

論文の内容の要旨

論文題目 地震による内外装壁の損傷の評価に関する実大実験を通じた研究

氏名 八木 尚太郎

本研究は、内外装壁の耐震性について設計者が把握できるようにすることと、地震後に行われる損傷の診断に関する課題の明確化と解決を通じ、地震後を含めた内外装壁の耐震性の確保を目指した。本研究では、実建物を模した試験体を用いた実大実験と実大実験で観察された損傷の評価により、地震による内外装壁の損傷と損傷がもたらす被害について、大地震まで想定した、壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を、地震後に行われる損傷の診断の観点を含めて明らかにした。

建物において間仕切り壁や外壁などの内外装壁は、断熱性など住環境の快適性を確保する上で重要である。その一方で、天井や構造部材と比較して、内外装壁は耐震性の検討が遅れており、大地震による内外装壁の損傷の中には、経済的被害だけでなく人的被害をもたらすものもある。

ただし、内外装壁に求められる耐震性は建物の用途などによって異なる。そのため、設計者は内外装壁の耐震性について建物ごとに検討を行う必要がある。また、内外装壁に求められる耐震性は、想定する地震の規模などによっても異なる。そのため、内外装壁の耐震性について適切に検討できるためには、地震時の建物の応答に対して発生が想定される内外装壁の損傷と損傷がもたらす被害が示されている必要がある。

また、地震後の建物の利用再開などの判断は、地震後に行われる目視調査による損傷の診断に基づき行われる。そのため、内外装壁において目視調査で容易に確認できない範囲に損傷が発生した場合、この損傷が見過ごされ、後に想定外の被害がもたらされる可能性が考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、地震後を含めた内外装壁の耐震性の確保を目指し、建物の応答に対する、地震による内外装壁の損傷や損傷がもたらす被害について、地震後に行われる損傷の診断の観点を含めて明らかにすることを目的とした。

なお、間仕切り壁は外壁と比較して構成が複雑である上、耐震性の検討が特に遅れているなど、内外装壁の中でも耐震性に関する状況が異なる。これを踏まえ、研究対象を間仕切り壁と外壁の両方とし、壁に付くドアと窓も含めた。具体的には、中低層の建物で一般的に採用されている LGS 間仕切り壁、縦壁ロック方式の ALC 外壁、鋼製片開きドア、サッシ方式の窓を取り上げた。

論文は序章とまとめを含めた 9 つの章により構成されている。2 章と 3 章では、内外装壁の耐震性の実態と研究状況を示す。4 章と 5 章では、実大実験の概要と実大実験で観察された損傷を示す。6 章では、実大実験で観察された損傷もたらす被害の程度の評価について示す。7 章では、実大実験で観察された損傷の診断の難易度の評価について示し、今後の課題について示す。最後に 8 章では、7 章で示した内外装壁の損傷の診断に関する課題の解決に向けた展望を示す。

2 章の地震被害調査などから見る内外装壁の耐震性では、地震被害調査で観察された内外装壁の損傷と、内外装壁に求められる耐震性に関する各種文献の記載との比較を通じて、内外装壁の耐震性を設計者が認識できていない可能性について論じた。更に、天井において目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が見過ごされた事例を紹介し、天井と同じく内外装壁の損傷も見過ごされる可能性があることを論じた。

3 章の内外装壁の耐震性に関する既往研究に基づく課題の検討では、内外装壁の耐震性に関する既往研究の調査を踏まえ、本研究で対象とする地震時の建物の応答の種類と程度や、実大実験で明らかにする具体的な課題について論じた。

4 章の内外装壁の実大実験の概要では、3 章の内容を踏まえて計画した 4 つの実大実験の概要を示した。実験①と実験②は、LGS 間仕切り壁、ALC 外壁、ドア、窓の損傷と鉄骨骨組の層間変位との対応関係を明らかにすることを目的とした。実験③は、LGS 間仕切り壁とドアの損傷と RC 架構の層間変位との対応関係を明らかにし、構造部材が異なることが損傷の発生に与える影響を明らかにすることを目的とした。実験④は 1 軸の振動台実験とし、窓の損傷と層間変位と慣性力との対応関係を明らかにし、壁の面内方向の慣性力が損傷の発生に与える影響を明らかにすることを目的とした。

5 章の内外装壁の損傷の評価では、4 つの実大実験の結果について示し、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした。実大実験を通じて計 158 の損傷が観察された。158 の損傷の内容、発生時の建物の応答、発生位置を示し、その原因について考察した。また、実験③の結果に基づき、地震による LGS 間仕切り壁やドアの損傷について考える上では、層間変位だけでなく、構造部材の種類や挙動も考慮する必要があることを論じた。更に、実験④の結果に基づき、地震による窓の損傷について考える上では、層間変位だけでなく、慣性力も考慮する必要があることを論じた。

6章の内外装壁の被害の評価では、実験で観察された損傷について、損傷がもたらす被害の程度を評価し、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした。明らかにした対応関係を通じて、大地震時に最大層間変形角が $1/67\text{rad}$ を超えるRC架構の建物ではドアの耐震対策が必要になることや、最大層間変形角が $1/50\text{rad}$ を超え、かつ、地震後に即座に利用を再開させたい建物ではLGS間仕切り壁や窓の耐震対策が必要になることなどを示した。

7章の内外装壁の診断の観点を含む評価では、実験で観察された損傷について、損傷の診断の難易度を評価し、内外装壁の損傷及び損傷がもたらす被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を、地震後に行われる診断の観点を含め明らかにした。明らかにした対応関係を通じて、中地震（最大層間変形角 $1/200\text{rad}$ 想定）に対しては、内外装壁は最低限の耐震性を有しているが、LGS間仕切り壁に関しては目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の診断方法の構築が課題であることを示した。また、大地震（最大層間変形角 $1/50$ 想定）に対しては、外壁は最低限の耐震性を有しているが、ドア、LGS間仕切り壁、窓は耐震対策が必要となる場合があることを示した。そして、全ての内外装壁に関して目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の診断方法の構築が課題であることを示した。特に、LGS間仕切り壁に関しては、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷がもたらす被害のほうが深刻である場合が考えられるため、新しい診断方法の構築が特に急がれることを示した。

8章の内外装壁の損傷の診断方法の展望では、前章で示した課題や周辺分野を含めた研究状況などを踏まえた上で、地震による内外装壁の損傷の診断方法の構築に向けた展望について論じた。中でも、地震による構造部材の損傷の診断や経年劣化による内外装壁の損傷の診断において着目されている、計測機器を事前に建物に設置しておき地震後に自動で判断が行われる診断方法が、地震による内外装壁の損傷の診断方法としても有用であることを論じた。ただし、この実現には、地震による内外装壁の損傷と計測結果の対応関係を明らかにし、閾値を設定することが課題であり、更に、この診断方法の普及のためには、地震による損傷の診断以外の用途や、メンテナンスの頻度を抑えることなどが課題であることを論じた。

9章のまとめでは、研究の総括、研究の結論と成果、そして今後の課題を示した。

本研究では、内外装壁の耐震性について設計者が把握できるようにすることと、地震後に行われる診断に関する課題の明確化と解決を通じ、地震後を含めた内外装壁の耐震性の確保を目指した。そして、実建物を模した試験体を用いた実大実験と、損傷がもたらす被害の程度の評価を通じて、地震による内外装壁の損傷と損傷がもたらす被害について、壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることで、耐震性について設計者が把握し確保できるための情報を提供し、ドア、間仕切り壁、窓の耐震性の向上が課題であることを示した。

更に、損傷の診断性の評価などを通じて、地震後において必要な耐震性を確保できるための情報を提供し、人的被害や経済的被害に関わる損傷が目視調査で見過ごされる可能性があるという課題を明らかにした。そして、特に間仕切り壁において課題となっていることを示し、その解決に向けた展望を示した。

博士論文

地震による内外装壁の損傷の評価に関する実大実験を通じた研究

八木 尚太朗

目次

1 章 序論 …p. 9

- 1.1. 研究の背景 …p.10
 - 1.1.1. 内外装壁の概要 …p.10
 - 1.1.2. 地震による内外装壁の損傷と被害 …p.12
 - 1.1.3. 内外装壁の耐震性の確保に向けた課題…p.13
- 1.2. 研究の目的 …p.18
- 1.3. 研究の立ち位置 …p.19
- 1.4. 研究の対象 …p.20
- 1.5. 研究の方法 …p.22
- 1.6. 論文の構成 …p.24
- 1.7. 既往の発表との関係 …p.26
- 1.8. 用語の説明 …p.28
- 1 章の参考文献 …p.36

2 章 地震被害調査などから見る内外装壁の耐震性 …p.39

- 2.1. 地震被害調査で観察された内外装壁の損傷 …p.40
 - 2.1.1. 地震被害調査の概要 …p.40
 - 2.1.2. 間仕切り壁の損傷 …p.42
 - 2.1.3. ALC 外壁の損傷 …p.44
 - 2.1.4. ドアの損傷 …p.46
 - 2.1.5. 窓の損傷 …p.47
- 2.2. 内外装壁の耐震性の実態 …p.50
 - 2.2.1. 内外装壁に求められる耐震性 …p.50
 - 2.2.2. 内外装壁の損傷と求められる耐震性との比較 …p.53
- 2.3. 診断の観点から見た内外装壁の耐震性の実態 …p.54
 - 2.3.1. 見過ごされた天井の損傷の例 …p.54
 - 2.3.2. 内外装壁の損傷が見過ごされる可能性 …p.56
- 2 章の小括 …p.57
- 2 章の参考文献 …p.58

3章 内外装壁の耐震性に関する既往研究に基づく課題の検討 …p. 61

- 3.1. 内外装壁の損傷を発生させる地震時の建物の応答 …p.62
 - 3.1.1. 建物の応答の種類 …p.62
 - 3.1.2. 建物の応答の程度 …p.65
- 3.2. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係を明らかにする方法 …p.66
 - 3.2.1. 地震被害調査による方法の検討 …p.66
 - 3.2.2. 実大実験による方法の検討 …p.68
- 3.3. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係に関する既往研究 …p.71
 - 3.3.1. LGS 間仕切り壁を対象とした既往研究 …p.71
 - 3.3.2. ALC 外壁を対象とした既往研究 …p.74
 - 3.3.3. ドアを対象とした既往研究 …p.77
 - 3.3.4. 窓を対象とした既往研究 …p.80
- 3.4. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係の明確化に向けた課題…p.82
- 3章の小括 …p.84
- 3章 参考文献 …p.85

4章 内外装壁の実大実験の概要 …p. 89

- 4.1. 実験の全体像 …p.90
 - 4.1.1. 実験の目的 …p.90
 - 4.1.2. 各実験に共通する特徴 …p.92
- 4.2. 各実験の概要 …p.94
 - 4.2.1. 層間変位に関する実験（実験①と②）の概要 …p.94
 - 4.2.2. 異種の構造部材の層間変位に関する実験（実験③）の概要…p.110
 - 4.2.3. 層間変位と慣性力に関する実験（実験④）の概要 …p.116
- 4章の小括 …p.122
- 4章 参考文献 …p.123

5章 内外装壁の損傷の評価 …p. 125

- 5.1. 層間変位に対する内外装壁の損傷の評価 …p.126
 - 5.1.1. LGS 間仕切り壁の損傷の評価 …p.127
 - 5.1.2. ALC 外壁の損傷の評価 …p.140
 - 5.1.3. ドアの損傷の評価 …p.146
 - 5.1.4. 窓の損傷の評価 …p.150
- 5.2. 異種の構造部材の層間変位に対する内外装壁の損傷の評価 …p.154
 - 5.2.1. LGS 間仕切り壁の損傷の評価 …p.155
 - 5.2.2. ドアの損傷の評価 …p.168

- 5.3. 層間変位と慣性力に対する窓の損傷の評価 …p.176
- 5.4. 内外装壁の損傷の評価のまとめ …p.198
 - 5.4.1. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係 …p.198
 - 5.4.2. 地震被害調査で観察された損傷との比較 …p.208
- 5章の小括 …p.210
- 5章 参考文献 …p.211

6章 内外装壁の被害の評価 …p. 213

- 6.1. 内外装壁の被害の評価の概要 …p.214
 - 6.1.1. 内外装壁の被害の評価の目的 …p.215
 - 6.1.2. 内外装壁の被害の評価に関連する先行事例 …p.216
 - 6.1.3. 内外装壁の被害の評価の方法 …p.218
- 6.2. 内外装壁が担う性能の整理 …p.219
- 6.3. 内外装壁の損傷が性能に与える影響の分析 …p.221
- 6.4. 内外装壁の被害の評価 …p.231
 - 6.4.1. 内外装壁の損傷の被害度の評価 …p.231
 - 6.4.2. 内外装壁の被害と建物の応答との対応関係 …p.236
- 6章の小括 …p.242
- 6章 参考文献 …p.243

7章 内外装壁の診断の観点を含む評価 …p. 245

- 7.1. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の概要 …p.246
 - 7.1.1. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の目的 …p.246
 - 7.1.2. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の方法 …p.247
- 7.2. 内外装壁の損傷の発生位置の分析 …p.248
- 7.3. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価 …p.256
 - 7.3.1. 内外装壁の損傷の診断性の評価 …p.256
 - 7.3.2. 内外装壁の損傷と建物の応答との診断の観点を含む対応関係 …p.258
- 7.4. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の概要 …p.263
 - 7.4.1. 内外装壁の診断の観点を含む被害の評価の目的 …p.263
 - 7.4.2. 内外装壁の診断の観点を含む被害の評価の方法 …p.264
- 7.5. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価 …p.266
- 7.6. 内外装壁の耐震性の向上に向けた課題 …p.272
- 7章の小括 …p.280
- 7章 参考文献 …p.281

8章 内外装壁の損傷の診断方法の展望 …p. 283

- 8.1. 内外装壁の損傷の診断方法に関する課題 …p.284
 - 8.2. 内外装壁の損傷の診断方法に関する研究状況 …p.285
 - 8.2.1. 内外装壁の損傷の診断方法に関する技術の検討状況 …p.286
 - 8.2.2. 構造部材の損傷の診断方法に関する技術の応用の可能性…p.288
 - 8.2.3. 内外装壁の経年劣化による損傷の診断方法に関する技術の応用の可能性 …p.290
 - 8.3. 内外装壁の損傷の診断方法の課題 …p.292
 - 8.3.1. 内外装壁の損傷の診断方法の候補 p.292
 - 8.3.2. 内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件 …p.294
 - 8.3.3. 内外装壁の損傷の診断方法の候補と求められる条件との比較 …p.298
- 8章の小括 …p.304
- 8章 参考文献 …p.305

9章 まとめ …p. 307

- 9.1. 研究の総括 …p.308
- 9.2. 研究の結論 …p.310
- 9.3. 研究のその他の成果 …p.318
- 9.4. 今後の課題 …p.322

参考文献一覧 …p. 327

付録 …p. 343

- 付録 1 内外装壁に関する研究の変遷 …p.344
 - 付録 2 内外装壁の耐震対策 …p.347
 - 付録 3 建物の地震による被害の全体像 …p.351
 - 付録 4 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係に関する既往研究 …p.355
 - 付録 5 内外装壁の被害の評価に関連する先行事例の内容 …p.377
 - 付録 6 損傷が性能に与える影響の分析の過程 …p.381
 - 付録 7 内外装壁の被害と建物の応答との対応関係の整理 …p.405
 - 付録 8 地震時に行われる内外装壁の損傷の診断の目的 …p.415
 - 付録 9 損傷の発生位置の分析の過程 …p.417
 - 付録 10 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係の診断の観点を含む整理 …p.433
 - 付録 11 内外装壁の被害と建物の応答との対応関係の診断の観点を含む整理 …p.441
 - 付録 12 加速度センサを用いた診断方法のケーススタディー …p.449
 - 付録 13 追加で実施した実大実験の概要 …p.475
 - 付録 14 実大実験の詳細図面 …p.483
- 謝辞 …p.493

1章 序論

1.1. 研究の背景	10
1.1.1. 内外装壁の概要	10
1.1.2. 地震による内外装壁の損傷と被害	12
1.1.3. 内外装壁の耐震性の確保に向けた課題	13
1.2. 研究の目的	18
1.3. 研究の立ち位置	19
1.4. 研究の対象	20
1.5. 研究の方法	22
1.6. 論文の構成	24
1.7. 既往の発表との関係	26
1.8. 用語の説明	28
1章の参考文献	36

本研究は、内外装壁の耐震性について設計者が把握できるようにすることと、地震後に行われる損傷の診断に関する課題の明確化と解決を通じ、地震後を含めた内外装壁の耐震性の確保を目指した。そして、本研究では、実建物を模した試験体を用いた実大実験と実大実験で観察された損傷の評価により、地震による内外装壁の損傷と損傷がもたらす被害について、大地震まで想定した、壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を、地震後に行われる損傷の診断の観点を含めて明らかにした。

1章では、研究の背景、研究の目的、研究の対象、研究の立ち位置、研究の方法、論文の構成、既往の発表との関係、そして用語の説明について述べる。

1.1. 研究の背景

1.1.1. 内外装壁の概要

1.1.1.節では、内外装壁の概要について説明する。

内外装壁の定義

建物は、建物を支える骨組の役割を果たす構造部材と、その構造部材に取り付く非構造部材とで構成される。本研究では、この非構造部材から設備や什器を除いた部材を内外装材と呼ぶ。図 1-1 に建物における内外装材のイメージを示す。内外装材の例として、室内の頭上に設置される天井、建物の内側に設置される間仕切り壁（内壁）、建物の外側に設置される外壁、外壁や間仕切り壁に設置される窓やドア、足元に設置される床がある。

更に本研究では、内外装材の中でも、壁の役割を果たす間仕切り壁や外壁、そして壁に設置されるドアや窓を総称して内外装壁¹と呼ぶ。

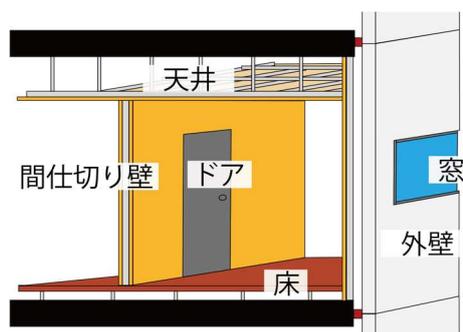


図 1-1 内外装材のイメージ

内外装壁の役割

建物において内外装壁は、建物を利用する上での快適性を確保するために必要不可欠な部材である。例えば、間仕切り壁は、建物の内部空間を分ける役割だけでなく、断熱性、空調性、音響性といった役割を担う。外壁は、建物の外部と内部を分ける役割だけでなく、断熱性、空調性、遮音性といった役割を担う。そしてドアや窓は、空間を分ける役割だけでなく、人や空気を行き来させる役割を担う。更に内外装壁は、デザインにより部屋や建物の意匠性を高める役割も担う。なお、付録 1 では、内外装壁に関するこれまでの研究の変遷を示し、上記の断熱性などの快適性に関する研究が多かったことについて説明している。

¹ 建物を支える骨組の役割を果たす耐力壁や、RC 造の非構造壁などは含まない。

耐震性に関する検討状況

ここでは、構造部材と内外装材に分けて、それぞれの耐震性に関する検討状況について説明する²。なお、前提として本研究では、地震などにより発生する部材の物理的な変化のことを損傷³と称す。そして、損傷によりもたらされる好ましくない影響のことを被害⁴と称す。必ずしもすべての損傷が被害をもたらすわけではない。

構造部材の耐震性に関する検討状況

地震による建物の損傷の中でも、構造部材の損傷による建物の倒壊は、内外装壁の損傷の有無にかかわらず、人的被害に直結するため最も防ぐべきものである。そのため、構造部材の耐震性を高めることが優先され、1981年の建築基準法の改正（いわゆる新耐震基準の施行）などが行われた。その結果として、2011年の東北地方太平洋沖地震では、地震の規模の割には、構造部材の損傷が過去の地震と比較して少なかったとされている [1]⁵。

内外装材の耐震性に関する検討状況

詳しくは 1.1.2.節並びに 2.1.節で説明するが、内外装材の損傷も落下物による人的被害や建物の機能を停止させることによる経済的被害をもたらす [1] [2]⁶ [3]⁷。そのため、構造部材の耐震性の研究と比較すると数が限られるが、高所からの脱落が発生しやすい外壁や窓、天井を中心に耐震性の研究が行われている（ [4]⁸など）。

内外装材の中でも天井は、2011年の東北地方太平洋沖地震などでの被害を受け、構造計算に関する具体的な数値が建築基準法⁹により規定された。これに対して、外壁や窓は、脱落の恐れがないようにするということが建築基準法で定められている。しかし、具体的な規制がある天井と比較すると、耐震性に関する検討は遅れていると言える。また、間仕切り壁やドアは耐震性に関する法規制はまだなく、検討は更に遅れていると言える。

以上を踏まえて本研究は、内外装壁を研究対象とし、地震後を含めた内外装壁の耐震性の確保を目指すものとする。

² 他にも内外装材として床があるが、床は高所から脱落する恐れがなく、耐震性について検討する優先度が低いため、本研究では対象としない

³ 損傷の例：部材のひび割れ、脱落

⁴ 被害の例：人的被害、経済的被害

⁵ 日本建築学会. (2019). 東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材. 東京都: 日本建築学会.

⁶ 脇山善夫, 清家剛. (2006). 非構造部材の地震被害が語るもの（非構造部材の耐震設計・施工の安全性を問う）. 建築技術, 680, 98-101.

⁷ 日本建築学会. (2000). 阪神・淡路大震災調査報告 建築編 5 非構造部材 材料施工. 東京都: 日本建築学会.

⁸ 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎. (1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究：その 1. 構法及び実験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 201-202.

⁹ 「特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件」（平成 25 年 8 月 5 日 国土交通省告示第 771 号）

1.1.2. 地震による内外装壁の損傷と被害

1.1.2.節では、地震による内外装壁の損傷と被害の概要について説明する。なお、具体的な損傷や被害の事例については、2.1.節で写真と共に説明する。

地震による内外装壁の損傷の例

間仕切り壁の地震による損傷の例としては、ボード材のひび割れ、壁の倒れ（構造躯体との接合部の破損）などが挙げられる。外壁の地震による損傷の例としては、パネルのひび割れ、パネルの脱落などが挙げられる。ドアの地震による損傷の例としては、開扉機能の低下（ドアが開けられなくなる）などが挙げられる。窓の地震による損傷の例としては、ガラスの破片の脱落などが挙げられる [1]¹⁰ [3]¹¹。

地震による内外装壁の被害の例

内外装壁の落下物が重量物や鋭利である場合や高所からの落下である場合は人的被害を発生させる。また、壁などの脱落や、ドアの開閉機能の低下といった損傷は避難の妨害となり、やはり人的被害を発生させる。このほかに、2018年の熊本地震では内外装壁の損傷により、避難所などの防災拠点として使用されるはずだった5つの自治体の庁舎と数多くの総合体育館が使用できなくなったことが報告されている [5]¹²。避難所が使えなくなると、そこに入る予定だった人々の屋外での待機時間が長くなる。そのため、その人のコンディションや気温などによっては人命に関わりうる。もしくは使用できなくなる施設が病院や発電所であれば人命に関わる。

また、例え落下物が人的被害を発生させなかったとしても、その撤去のため人員と時間が割かれるため、経済的被害が発生する。また、落下物により工場のラインが止まり、経済的被害が発生したという話もある¹³。更に、工場に限らず、商業建築物において、内外装壁の損傷が発生した場合、例え構造部材が健全であっても、営業ができなくなることは十分に考えられる。これは、建物の所有者にとっての経済的被害であり、食料や医薬の供給などに関わる場合、近隣住民にとっての人的被害にもなりうる。

以上より、地震による内外装壁についても耐震性の確保は必須であると言える。

¹⁰ 日本建築学会. (2019). 東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材. 東京都: 日本建築学会.

¹¹ 日本建築学会. (2000). 阪神・淡路大震災調査報告 建築編 5 非構造部材 材料施工. 東京都: 日本建築学会.

¹² 清家剛. (2020). 落ちない, 倒れない, 飛んでいかない, 非構造部材の設計 (非構造部材に求められる耐震・耐風設計). 建築技術, 842, 64-66.

¹³ 当時、被害調査を行った軽量鉄骨下地メーカーの方から聞いた話。

1.1.3. 内外装壁の耐震性の確保に向けた課題

1.1.3.節では、内外装壁の耐震性の確保に向けた本研究で取り組む課題について説明する。

建物のタイムライン

図 1-2 に建物のタイムラインの一部のイメージを示す。建物は、設計と施工を経て利用に至り、経年劣化に対する診断と修復などを経て、最終的に解体される。地震の場合は、地震による損傷の診断と修復を経て、平常時に戻っていく。

建物の生涯を通じて内外装壁の耐震性を確保する上では、建物の設計段階と施工段階での取り組みのみならず、経年劣化に対する診断と修復や、地震などの災害後に行われる損傷の診断と修復も重要となる。また、耐震性の低い古い仕様の内外装壁に対して改修を施すことも重要である [6]¹⁴。

本研究ではこの中でも、建物の設計段階と地震後に行われる損傷の診断に着目する。



図 1-2 建物のタイムラインの一部のイメージ

¹⁴ 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所. (2019). 既存建築物の非構造部材の耐震診断指針・同解説. 東京都: 日本建築防災協会, 耐震改修支援センター.

内外装壁の耐震性の確保に向けた建物の設計段階における課題

ここでは、設計段階において内外装壁の耐震性が確保される上では、地震の規模（地震時の建物の応答）に対して、発生が想定される内外装壁の損傷や損傷がもたらす被害が示されている必要があることについて説明する。

内外装壁の耐震対策

内外装壁の耐震性を確保するためには、設計段階において内外装壁の耐震対策¹⁵を講じることが必要不可欠である。例えば、設計段階において、接合部の剛性を高めることなどで耐震性を高めた製品や、逆に接合部の自由度を高めて地震時の建物の変形への追従性を上げることなどで耐震性を高めた製品を導入するという講じ方が考えられる。また、内外装壁にネットを掛けることで、脱落などの損傷を被害に繋げさせないという講じ方も考えられる。このほかに、設計段階において、構造部材の剛性と強度を高めることや、制震や免震構造を導入することにより、地震時の建物の変形や揺れを抑えるという講じ方も考えられる。なお、付録2では、これらの耐震対策の講じ方について具体的な文献を挙げて説明している。

内外装壁の耐震対策の注意点

上記で説明した通り、内外装壁の耐震性を確保するためには、設計段階において内外装壁の耐震対策を講じることが必要不可欠である。そして、耐震対策の講じ方についても研究開発が行われている。しかし、全ての建物の全ての居室の全ての内外装壁に対して、闇雲に耐震対策を講じれば良い訳ではない。

その理由として、まず、コストが挙げられる。方法によって差はあるが、耐震対策を講じる場合は、何もしない場合と比較して当然コストがかかる。当然のことながら、建築基準法で定められている外壁や天井の脱落などに対しては、コストをかけてでも対策をする必要がある。しかし、壁にひび割れ一つ発生しないレベルまで対策する必要があるかどうかは、建物の用途などによって異なる。例えば、危険物を保管する施設では、コストをかけて万全な耐震対策を講じる必要があると考えられるが、コストを抑えることが求められる商業建物では、最低限の対策のみ講じることが求められると考えられる。

別の理由として、耐震対策を講じることで、内外装壁が担う他の性能が低下することも挙げられる。例えば、内外装壁の耐震性を高める方法の一つに、部材間に隙間を設け地震時の建物の変形を吸収させる方法がある [7]¹⁶。しかし、隙間を設けることは気密性を失うことと同義であり、耐火性能、遮音性能、空調性能の低下を意味する。

¹⁵ 耐震性を高め、地震による被害を抑えるための方策のこと

¹⁶ 日本建築学会.(2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

建物に求められる耐震性

建物に求められる耐震性は建物ごとに異なるため、設計者は内外装壁の耐震性の検討を、建物ごとに行う必要がある。また、建物に求められる耐震性は地震の規模によっても異なる。例えば、震度 4 の地震に対しては損傷が一切発生しないことが求められるが、震度 6 強の地震などに対しては脱落しないことだけ求められるなどが考えられる。

内外装壁の耐震性に関する設計が適切に行われるために必要な要素

設計者が内外装壁の耐震性の検討を適切に行えるためには、“地震の規模に対する建物の応答（内外装壁の損傷の要因）”と、“建物の応答に対して発生が想定される内外装壁の損傷と被害”が明確になっていることが必要である。この 2 つが明確になっていれば、設計者は、地震時に内外装壁に発生する損傷並びに損傷もたらす被害を想定することができ、建物に求められる耐震性の許容範囲に収まっているか検討することができる。そして、許容範囲に収まっていないと検討された場合に内外装壁の耐震対策を講じることで、确实かつ効率的に内外装壁の耐震性を確保することができる。

“地震の規模に対する建物の応答”について

内外装壁の損傷の要因となる地震に対する建物の応答として、層間変位¹⁷がある。中地震に対しては、層間変形角¹⁸が 1/200rad 以内であることを検証することが建築基準法で義務付けられている。大地震に対しては、高さ 60m を超える超高層建築物でない限り、層間変位の検証は義務付けられていない。ただし、時刻歴応答解析などの計算手法により層間変位を算出することは可能である。つまり、地震波の設定と動的解析が必要となるが、地震に対する建物の応答は算出可能である。

“建物の応答に対して発生が想定される内外装壁の損傷と被害”について

図 1-3 に建物の応答に対して発生が想定される内外装壁の損傷のイメージを示す。しかし、内外装壁の耐震性に関する研究の数は限られる上、多くの研究が中地震に対して被害を発生させない手法の確立を目的とした研究である。そのため、建物の応答に対して発生が想定される内外装壁の損傷と被害は十分に明確にされていない。例えば、2003 年に改定された「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工指針」 [7]¹⁹には、地震による内外装壁の損傷と層間変位の対応関係がまとめられているが、1970 年代後半の実験に基づくものである。今現在施工される建物で一般的に採用されている仕様である ALC 外壁（縦壁ロック方式）や LGS 間仕切り壁（LGS 下地に石膏ボード張り）に関しては記載が無い。そのため、図 1-3 に示すイメージのような整理ができない状況にある。

¹⁷ 水平方向の建物の変位のこと

¹⁸ 層間変位の量を階高で割った値のこと

¹⁹ 日本建築学会.(2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

内外装壁の耐震性の確保に向けた地震後の診断における課題²⁰

ここでは、内外装壁の耐震性が確保される上では、地震後の診断について、現状行われている手法の不確かさの確認が必要であることについて説明する。

地震による内外装壁の損傷に対する応急的な対応の判断

地震による内外装壁の損傷の多くが、最終的には修復される。しかし、被災地では職人の人手不足により、元に戻るまでに数か月かかることもある [8]²¹。ここで、例えば、ガラスのひび割れといった損傷は、ガラスの面内剛性を低下させると推測される。そのため、損傷が発生した段階では脱落していないが、次の地震²²が発生した段階で、破片の脱落が発生し、人的被害をもたらす可能性がある。そのため、修復までの期間においては、内外装壁などの非構造部材に損傷が発生した場合は、構造部材が健全であったとしても、建物の利用者の安全のためには居室の利用を制限するなどの応急的な対応が必要となる場合も考えられる。

その一方で、建物の管理者は、なるべく多くの居室の利用を早期再開させたいという要望を有す。すなわち、建物の管理者は、(構造部材が健全であるが)内外装壁に損傷が発生している場合は、安全かつ効率的な応急対応の判断を迫られることになる。

応急的な対応の判断の注意点

地震後の応急的な対応の判断は、建物の管理者が行う地面や床からの目視調査による診断²³の結果に基づいて定性的に行われている現状がある。そのため、例えば壁の内側など、目視調査で容易に確認できない範囲に損傷が発生した場合、これが見過ごされることが疑われる。図 1-4 にこのイメージを示す。例えば、この損傷が内外装壁の剛性を低下させるものであった場合、建物の管理者は、安全に十分に配慮した判断を行えないことになる。

本研究の対象ではないが、天井においては、天井裏など目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が見過ごされ放置されていることが報告されており、損傷の診断の観点からの課題が提示されている [9]²⁴ [10]²⁵。一方で、天井と同じく目視調査で容易に確認できない範囲が存在しうるにも関わらず、内外装壁については、損傷の診断の観点からの検討が行われていない。この詳細については 2.3.節で説明する。

²⁰ ただし、診断後に修復などの適切な対応が講じられることを前提とする。

²¹ 熊本県. (2018). 平成 28 年熊本地震 熊本県はいかに動いたか (初動・応急対応編). 東京都: ぎょうせい.

²² 次の地震とは、最初の地震の余震、本震、ならびに全く別の地震の全てを含む

²³ 損傷を検出し、その程度を把握する行為のことを指す

²⁴ 塩入徹. (2018). 天井の劣化診断 (非構造部材の再確認). 建築技術, 824, 152-155.

²⁵ 塩入徹. (2022). 天井被害の実情 (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 92-93.

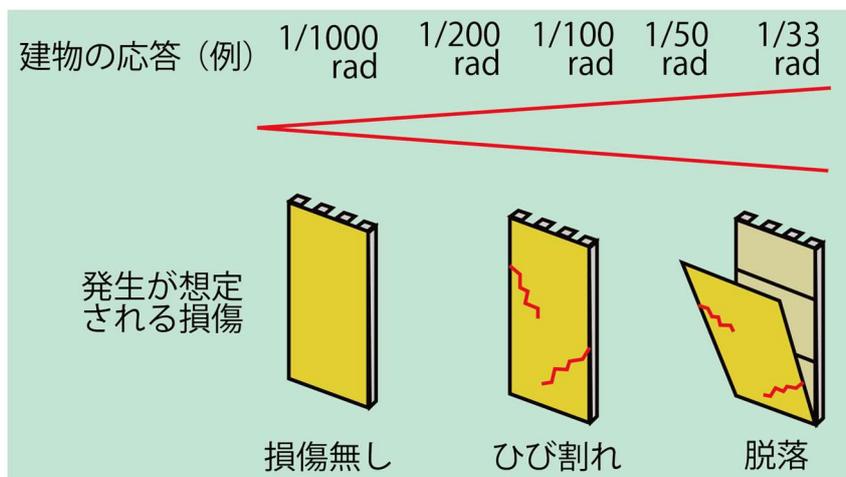


図 1-3 建物の応答に対して発生が想定される内外装壁の損傷に関するイメージ

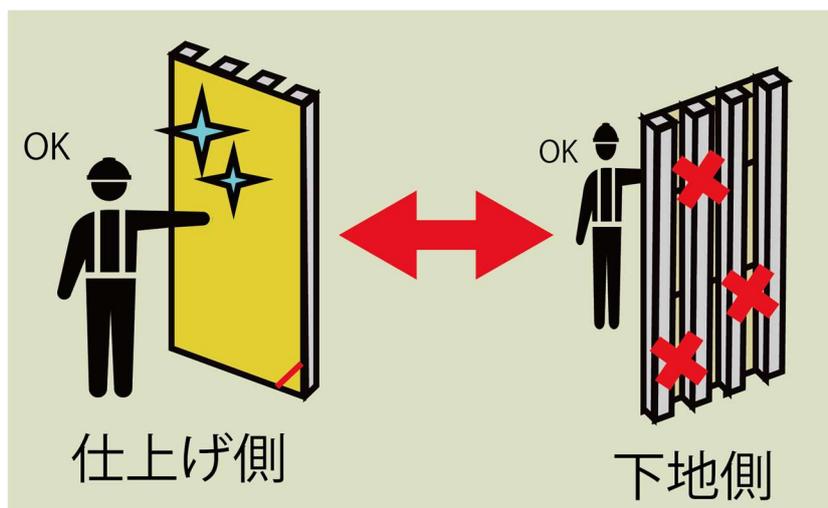


図 1-4 従来の目視調査で見過ごされる内外装壁の損傷のイメージ図

1.2. 研究の目的

1.1.節で説明した背景を踏まえ、本研究の目的を以下とする。

- ・内外装壁の耐震性について設計者が把握できるようにすることと、診断に関する課題の明確化と解決を通じ、地震後を含めた内外装壁の耐震性の確保を目指し、地震による内外装壁の損傷や損傷がもたらす被害について、地震後に行われる損傷の診断の観点を含めて明らかにする。

また、具体的な目的を以下とする。

- ・実建物を模した試験体を用いた実大実験を通じて、内外装壁の損傷と、壁の面内方向の層間変位（ $1/200\text{rad}$ - $1/33\text{rad}$ ）を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにする。²⁶
- ・実験で観察された損傷について、損傷がもたらす被害や診断の観点を含む評価を通じて、損傷や損傷がもたらす被害と建物の応答との対応関係を地震後に行われる損傷の診断の観点を含めて明らかにする。

なお、本研究は、地震による内外装壁の損傷と被害について、診断の観点を含めて、建物の応答との対応関係を明らかにすることを目的とした大きな研究のスタートラインにあたるものであり、後続研究の手がかりを模索するための研究でもある。

²⁶ 内外装壁（内外装材）の耐震性に関しては、建築基準法で示された層間変形角 $1/200\text{rad}$ の範囲で壊れないことを確かめる研究が多く行われてきた過去がある。その一方で、層間変形角 $1/50\text{rad}$ などの大きな変形に対して、内外装壁が壊れないのか、壊れるとしたらどのように壊れるのかということに関する報告は少ない。しかし、別の既往研究では、大地震に対して中低層の鉄骨造建物が経験する最大層間変形角が $1/50\text{rad}$ 以上になりうる事が算出されている。つまり、実際の地震では建物の最大層間変形角が $1/50\text{rad}$ まで達しうることを考慮する必要があることが示唆される。そのため、例えば、層間変形角 $1/50\text{rad}$ に対して建物が避難所として使えなくなるとしても、内外装壁が取りうる状態について把握することは重要であり、特に、内外装壁の損傷が原因で人的被害が発生しうるのかという点を明らかにすることは重要である。以上を踏まえ、本研究では、層間変形角 $1/50\text{rad}$ など大きな変形も取り上げ、これに対する内外装壁の損傷や損傷がもたらす被害を明らかにする。

1.3. 研究の立ち位置

内外装壁の耐震性に関する既往研究に対する本研究の立ち位置について説明する。

内外装壁の耐震に関する既往研究は大きく分けて、「内外装壁の損傷と被害の把握」が目的の研究（例えば松岡ら（2009）の研究 [11]²⁷）、「内外装壁の損傷と被害を発生させない手法の確立」が目的の研究（例えば吉敷ら（2018）の一連の研究 [12]²⁸）、「内外装壁の損傷を修復する手法の確立」が目的の研究（例えば加登ら（2007）の研究 [13]²⁹）に分けられる。以下で、それぞれに対する本研究の立ち位置について説明する。

「内外装壁の損傷と被害の把握」が目的の研究に対する立ち位置

「内外装壁の損傷と被害の把握」が目的の研究は、地震被害調査が手法の研究もあるが、実験が手法の研究が主である。そのため、構造力学的な観点から議論されることが多いが、実験での損傷の目視観察の結果を報告した研究も一部ある。本研究は、これらの既往研究で報告された内容を調査した上で課題を示し（3章の内容）、新たな実験と評価を通じて解決するものである。

「内外装壁の損傷と被害を発生させない手法の確立」が目的の研究に対する立ち位置

「内外装壁の損傷と被害を発生させない手法の確立」が目的の研究は、実験が手法の研究や、計算やシミュレーションを通じた研究が多い。これらの研究の成果として、1.1.3.節で説明した耐震対策が確立されつつある。本研究は、既往研究により構築された耐震対策の導入が不十分であることを示し（2章の内容）、既往研究により構築された耐震対策が確実かつ効率的に採用されるための仕組みづくりを行うものである。

「内外装壁の損傷を修復する手法の確立」が目的の研究に対する立ち位置

「内外装壁の損傷を修復する手法の確立」が目的の研究は、損傷に対してどの程度の補修が必要かということ議論する研究が多い。本研究は、修復などの対応の手前にある診断の部分に着目するものであり、修復などの対応が適切に行われるための情報を提供するものである（7章と8章の内容）。

²⁷ 松岡祐一, 吹田啓一郎, 山田哲, 島田侑子, 赤澤資貴, 松宮智央. (2009). 実大4層鉄骨造建物の震動台実験における外装材の耐震性能評価. 日本建築学会構造系論文集, 641, 1353-1361. doi:10.3130/aajs.74.1353

²⁸ 吉敷祥一, 清家剛, 元結正次郎, 奥石直幸. (2018). 軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その1 研究背景と目的. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1073-1074.

²⁹ 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛. (2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aajs.72.139

1.4. 研究の対象

本研究で対象とする内外装壁の種類について説明する。

1.1.1.節で説明した通り、内外装壁の中でも、屋外に面した高所に多く設置される外壁と窓は、耐震性（並びに耐風圧性）の検討が間仕切り壁と比較し進んでいる。特に、ALC パネルを用いた外壁では、2002 年に耐震性が低いとされる仕様を全面廃止するなどを経て、耐震性に配慮した仕様が一般的に普及している [6]³⁰。

更に、外壁はパネルと構造部材との接合部のみにより構成されているのに対して、間仕切り壁はボードと下地と構造部材との接合部により構成されている。更に、下地も単一の部材ではなく、複数の部材で構成される。また、ボードが複数枚張られている場合もある。すなわち、外壁と比較すると間仕切り壁は、部材の種類や数が多く、構成が複雑である。そのため、外壁と比較して間仕切り壁は、地震時の挙動や損傷の予想がしにくく、耐震性の検討の難易度が高いと言える。

更に、外壁はその殆どが平面的な形状であるのに対して、間仕切り壁はコーナー部も多く、梁から持ち出した壁など、特殊な形状のものが多い。このことも間仕切り壁の耐震性の検討の難易度を高くしていると言える。

このように間仕切り壁と外壁の耐震性に関する状況に違いがあることを踏まえ、本研究では間仕切り壁と外壁の両方を研究対象とし、更に壁に設置されるドアと窓も研究対象とする。

そして、間仕切り壁、外壁、ドア、窓の中でも、公共建築や商業建築などに多く、高度な構造計算を設計段階で求められていない 5 階以下の中低層の建物などで一般的に採用されているものを研究対象として取り上げる。

具体的には、間仕切り壁として軽量鉄骨（LGS）下地に石膏ボードを張る仕様の LGS 間仕切り壁を、外壁として縦壁ロック方式で ALC パネルを躯体に取り付ける仕様の ALC 外壁を、ドアとして鋼製の片開きドアを、窓としてサッシ方式の引き違い窓と FIX 窓を取り上げる。なお、それぞれの詳細は 1.8.節で説明する。

³⁰ 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所. (2019). 既存建築物の非構造部材の耐震診断指針・同解説. 東京都: 日本建築防災協会, 耐震改修支援センター.

写真 1-1 に、本研究で対象とする内外装壁の例を示す。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

写真 1-1 本研究で対象とする内外装壁の例；

(a) LGS 間仕切り壁 [14]³¹, (b) ALC 外壁 [15]³², (c) ドア [16]³³, (d) 引き違い窓 [17]³⁴,
(e) FIX 窓 [17]

³¹ 桐井製作所. 建築用鋼製壁下地材. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先:
<https://www.kirii.co.jp/products/wall/steel-wall.html>

³² ALC 協会. 施工事例. 参照日: 2022 年 7 月 26 日, 参照先: <http://www.alc-a.or.jp/gallery.html>

³³ 三協アルミ. 勝手口/汎用ドア・引戸. 参照日: 2022 年 7 月 26 日, 参照先: <https://alumi.st-grp.co.jp/products/entrance/hanyo/>

³⁴ 樹脂サッシ工業会. (2022). 再資源化を志向した樹脂サッシ窓の解体マニュアル (詳細版).

1.5. 研究の方法

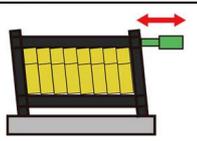
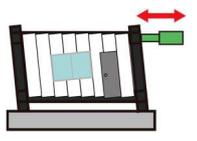
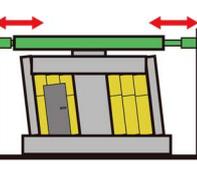
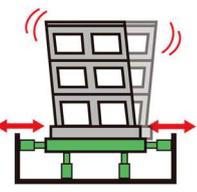
研究の主な方法は、実建物を模した試験体を用いた4つの実大実験と、実験で観察された損傷に対して行う損傷がもたらす被害や診断の観点を含む評価である。

以下でそれぞれについて説明する。

実建物を模した試験体を用いた実大実験

本研究では、地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることを目的とし、実建物を模した試験体を用いた4つの実大実験（以降、実験）を実施する。実験においては、目視観察を中心に損傷の調査を実施し、層間変位の程度（すなわち層間変形角）などに対する内外装壁の損傷を評価する。表 1-1 に4つの実験の概要を示す。実験①と実験②は、層間変位に対する内外装壁の損傷を評価することを目的とした、本研究においてベースとなる実験となっている。実験③は、実験①と実験②の結果を踏まえて、異種の構造部材の層間変位に対する LGS 間仕切り壁とドアの損傷を評価することを目的としている。そして、実験④は、実験②の結果を踏まえて、層間変位と慣性力に対する窓の損傷を評価することを目的としている。なお、実験の詳細については4章で説明し、内外装壁の損傷の評価結果については5章で説明する。

表 1-1 実施した実大実験の概要

	実験名	実験の目的	試験体の外観	実験のイメージ
実験①	LGS 間仕切り壁の層間変位に対する損傷確認実験	層間変位の程度に対する LGS 間仕切り壁の損傷の評価		
実験②	ALC 外壁とドアと窓の層間変位に対する損傷確認実験	層間変位の程度に対する ALC 外壁とドアと窓の損傷の評価		
実験③	LGS 間仕切り壁とドアの RC 架構の層間変位に対する損傷確認実験	異種の構造部材の層間変位の程度に対する LGS 間仕切り壁とドアの損傷の評価		
実験④	窓の層間変位と慣性力に対する損傷確認実験	層間変位と慣性力の程度に対する窓の損傷の評価		

実験で観察された損傷の評価

そして、地震による内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることを目的とし、実験で観察された損傷に対して、内外装壁の性能に与える影響の分析に基づき、もたらす被害の程度の評価（被害度の評価と称す）を行う。なお、この評価については6章で説明する。

次に、地震による内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係について、診断の観点を含めて明らかにすることを目的とし、実験で観察された損傷に対して、発生位置の分析に基づき、診断の難易度の評価（診断性の評価と称す）を行う。なお、この評価については7章の前半（7.1.節～7.3節）で説明する。

更に、地震による内外装壁の被害と建物の応答との対応関係について、診断の観点を含めて明らかにすることを目的とし、被害度の評価と診断性の評価を組み合わせた評価を行う。なお、この評価については7章の後半（7.4.節～7.5.節）で説明する。

このように、7章は前半が損傷の診断の議論、後半が被害の診断の議論となっている。

このほかに、本研究では、地震被害調査や文献調査も行った。図 1-5 に論文の章立てと共に、研究の方法と各評価の目的を図式化したものを示す。

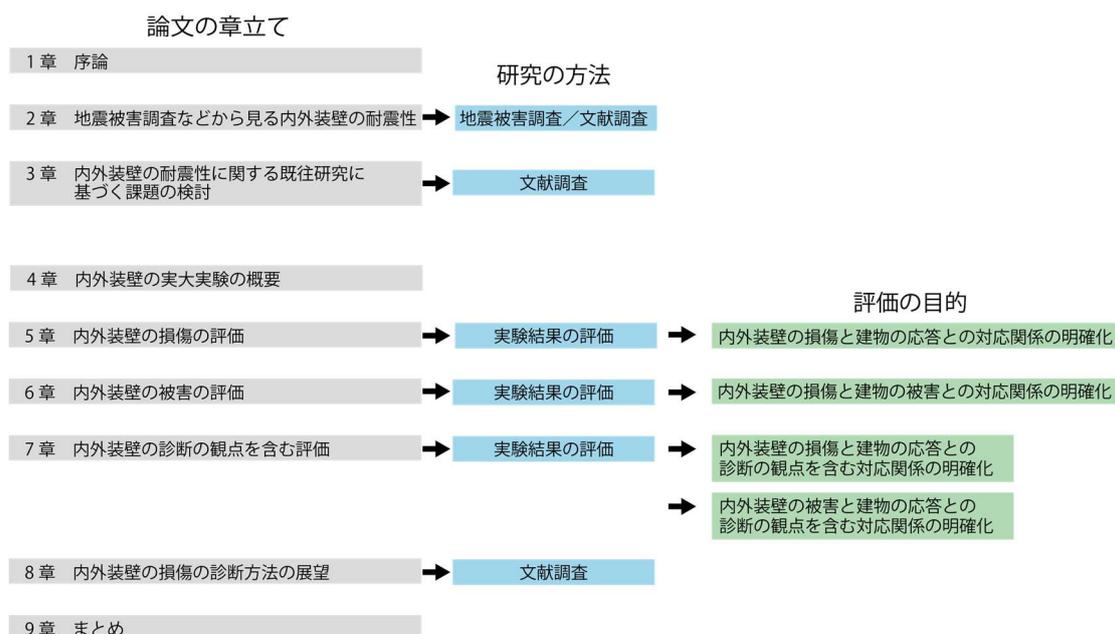


図 1-5 論文の構成

1.6. 論文の構成

1.5.節の図 1-5 で示した通り、本論文は序章とまとめを含めた 9 つの章により構成されている。2 章と 3 章では、内外装壁の耐震性の実態と研究状況を説明し、4 章と 5 章で実験の概要と観察された損傷について説明する。6 章では観察された損傷の被害の評価について、7 章では診断の評価について説明し、最後に 8 章で、7 章で示した地震による内外装壁の損傷の診断に関する課題の解決に向けた展望を示す。以下では各章の内容を説明する。

2 章 地震被害調査などから見る内外装壁の耐震性

2 章では、地震被害調査などの結果を踏まえ、内外装壁の耐震性について論じる。まず、2.1.節で、地震被害調査で観察された内外装壁の損傷について説明する。次に、2.2.節で、内外装壁に求められる耐震性について、各種文献に記載された内容を示し、地震被害調査で観察された損傷との比較を踏まえて、内外装壁の耐震性について論じる。最後に、2.3.節で、見過ごされ放置された天井の損傷の事例を踏まえて、診断の観点から見た内外装壁の耐震性の議論として、地震による内外装壁の損傷が見過ごされる可能性について論じる。

3 章 内外装壁の耐震性に関する既往研究に基づく損傷と外力の関係性の検討

3 章では、内外装壁の耐震性に関する既往研究の調査を踏まえ、本研究で対象とする地震時の建物の応答や取り組む具体的な課題について論じ、実施する実大実験に求められる条件について説明する。まず、3.1.節で、内外装壁の耐震性に関する既往研究を踏まえ、本研究で地震による内外装壁の損傷との対応関係を明らかにする地震時の建物の応答の種類とその範囲について論じる。次に、3.2.節で、地震による内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係を明らかにするための方法について論じる。次に、3.3.節で、地震による内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係について実大実験に基づく報告のある既往研究について調査した結果について説明する。最後に、3.4.節で、既往研究を踏まえ、本研究で取り組む具体的な課題について論じ、本研究で実施する実大実験に求められる条件について説明する。

4 章 内外装壁の実大実験の概要

4 章では、3 章の内容を踏まえて計画した、地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることを目的とする 4 つの実大実験の概要について説明する。まず、4.1.節で、実験の全体像として、実験の目的と各実験に共通する特徴について説明する。次に、4.2.節で、各実験の概要として、各実験の試験体や加力方法について説明する。

5 章 内外装壁の損傷の評価

5 章では、4 つの実大実験の結果について説明し、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物との対応関係を明らかにした結果について説明する。まず、5.1.節で、実験①と実験②の結果に基づき、層間変位に対する内外装壁の損傷を評価した結果について説明する。次に、5.2.節で、実験③の結果に基づき、異種の構造部材の層間変位に対す

る内外装壁の損傷を評価した結果について説明する。次に、5.3.節で、実験④の結果に基づき、層間変位と慣性力に対する窓の損傷を評価した結果について説明する。最後に、5.4.節で、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明し、その妥当性についても論じる。

6章 内外装壁の被害の評価

6章では、実験で観察された損傷について、損傷がもたらす被害を評価し、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。まず、6.1.節で、内外装壁の損傷がもたらす被害の評価の目的、関連する先行事例、そして方法について説明する。次に、6.2.節で、内外装壁が担う性能を整理した結果について説明する。次に、6.3.節で、内外装壁の損傷が性能に与える影響を分析した結果について説明する。最後に、6.4.節で、内外装壁の被害を評価した結果について説明し、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

7章 内外装壁の診断の観点を含む評価

7章では、実験で観察された損傷と、6章で評価した被害について、診断の観点を含む評価をし、内外装壁の損傷と被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明し、内外装壁の耐震性の向上に向けた課題を示す。まず、7.1.節で、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の目的と方法について説明する。次に、7.2.節で、内外装壁の損傷の発生位置を分析した結果について説明する。そして7.3.節で、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価をした結果について説明し、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明する。次に、7.4.節で、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の目的と方法について説明する。次に、7.5.節で、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価を行い、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明する。最後に、7.6.節で、評価結果を踏まえ、内外装壁の耐震性の向上に向けた課題を示す。

8章 内外装壁の損傷の診断方法の展望

8章では、内外装壁の損傷の診断方法について、課題や研究状況などを踏まえた上でその構築に向けた展望について論じる。まず、8.1.節で、7章の内容などを踏まえ内外装壁の損傷の診断に関する課題について論じる。次に、8.2.節で、診断方法に関する研究の状況と検討されている技術について説明する。最後に、8.3.節で、内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件などを踏まえ、内外装壁の損傷の診断方法の構築に向けた課題について論じる。

1.7. 既往の発表との関係

本研究の内容の一部は、以下に示す査読論文などで既に発表されている。以下に、それぞれの発表のタイトルを示す。

- 査読論文①：「鉄骨骨組に取り付けられた乾式間仕切り壁の大変形時における損傷と加速度計による傾斜計測を用いたその検出の可能性」(八木ら、2021) [18]³⁵
- 査読論文②：「鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験」(八木ら、2020) [19]³⁶
- 査読論文③：「実大載荷実験を通じた RC 骨組に取り付けた乾式間仕切り壁と鋼製ドアの損傷に関する考察」(八木ら、2022) [20]³⁷
- 査読論文④：「VALIDATING RESILIENT DETAILING OF JAPANESE CEILINGS, WINDOWS, AND WALL TILES USING AN E-DEFENSE SHAKE-TABLE TEST」(八木ら、2022) [21]³⁸
- 査読論文⑤：「振動台実験を通じた地震により窓に生じる損傷の発生メカニズムの考察」(八木ら、2022) [22]³⁹
- 雑誌記事①：「非構造部材の耐震性を計測する(世界はどこまで計測できるか)」(清家ら、2022) [23]⁴⁰
- 雑誌記事②：「非構造部材のヘルスマニタリング (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術)」(伊山ら、2022) [24]⁴¹

³⁵ 八木尚太郎, 伊山潤, 福島佳浩, 吉敷祥一, 石田孝徳, 清家剛, 山田哲. (2021). 鉄骨骨組に取り付けられた乾式間仕切り壁の大変形時における損傷と加速度計による傾斜計測を用いたその検出の可能性. 日本建築学会構造系論文集, 788, 1400-1411. doi:10.3130/aijs.86.1400

³⁶ 八木尚太郎, 清家剛, 山田哲, 石田孝徳, 吉敷祥一, 上瀧敬太, テンデランランディ. (2020). 鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験. 日本建築学会技術報告集, 64, 864-874. doi:10.3130/aijt.26.869

³⁷ 八木尚太郎, 巽信彦, 磯田充樹, 吉敷祥一, 本田信一, 清家剛, 前田匡樹, 西村康志郎. (2022). 実大載荷実験を通じた RC 骨組に取り付けた乾式間仕切り壁と鋼製ドアの損傷に関する考察. 日本建築学会技術報告集(70), 1125-1130. doi:10.3130/aijt.28.1125

³⁸ Yagi Shotaro, Teramoto Atsushi, Yeow Trevor, Seike Tsuyoshi, Kusunoki Koichi, Nakamura Izumi. (2022). VALIDATING RESILIENT DETAILING OF JAPANESE CEILINGS, WINDOWS, AND WALL TILES USING AN E-DEFENSE SHAKE-TABLE TEST. Journal of Earthquake Engineering. doi:10.1080/13632469.2021.1988764

³⁹ 八木尚太郎, 清家剛, 楠浩一, Yeow Trevor, 中村いずみ, 小林健二, 久田隆司. (2022). 振動台実験を通じた地震により窓に生じる損傷の発生メカニズムの考察. 日本建築学会技術報告集, 69, 585-590. doi:10.3130/aijt.28.585

⁴⁰ 清家剛, 八木尚太郎. (2022). 非構造部材の耐震性を計測する(世界はどこまで計測できるか). 建築雑誌, 137(1761), 16-17.

⁴¹ 伊山潤, 福島佳浩, 八木尚太郎. (2022). 非構造部材のヘルスマニタリング (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 74-77.

図 1-6 に本論文と既往の発表との関係を図式化したものを示す。

査読論文①は実験①に、査読論文②は実験②に、査読論文③は実験③に、査読論文④と⑤は実験④に対応しており、それぞれ、実験の概要（4章の内容）と損傷の評価結果（5章の内容）について報告している。すなわち、本論文の4章と5章は、これら査読論文で報告した内容を再編したものである。なお、査読論文①と査読論文②には既往研究のレビュー（3章の内容の一部）も含まれる。

なお、本論文の6章と7章で説明する内外装壁の被害の評価と、内外装壁の診断の観点を含む評価は、本論文が初出の内容である。

また、雑誌記事はいずれも内外装材の損傷の診断に関する内容である。8章の内容は、2本の雑誌記事の内容を再編し、考察を大幅に加えたものである。

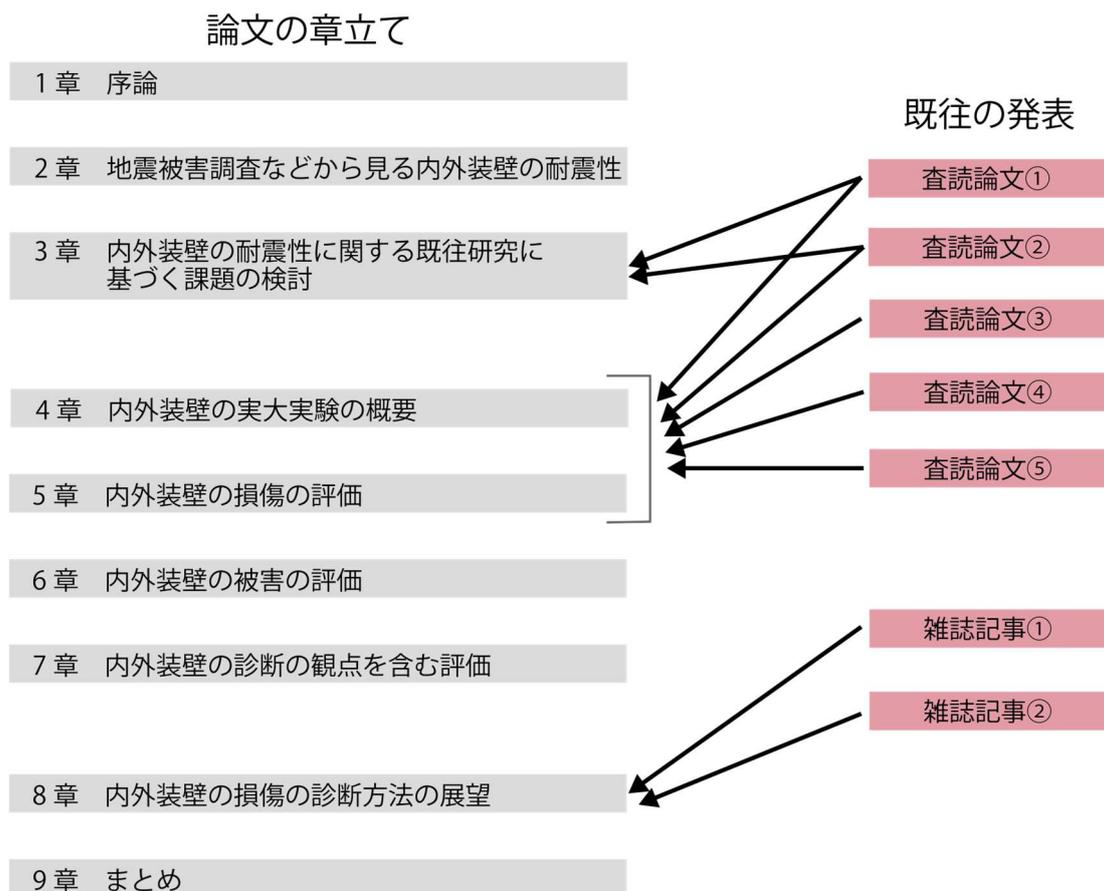


図 1-6 既往の発表との関係

1.8. 用語の説明

以下では、本論文で用いる用語の定義を示す。

損傷に関連する用語

損傷

外的要因により発生する部材の物理的な変化のこと。例：部材のひび割れ、脱落

被害

損傷が原因で発生する好ましくない影響のこと。例：人的被害、経済的被害

被害度

損傷をもたらす被害の程度のこと。例えば、人的被害を発生させる可能性がある、経済的被害を発生させる、など。

耐震対策

地震による損傷や被害を抑えるための方策のこと。

耐震性

地震に対して、脱落や転倒などによる危険を及ぼさないこと及び、避難行動における通路の妨害などによる危険を及ぼさないこと。また、この性能のこと。

診断

損傷を検出し、もたらす被害を把握すること。

診断性

損傷の診断されやすさの程度のこと。例えば、地面や床からの目視で診断可能、部材の解体を伴わないと目視では診断不可能、など。

地震に関連する用語

大地震

「極めてまれに（数百年に一度程度）発生する地震」とも呼ばれ、二次設計において、標準せん断力係数 1.0 以上を用いて計算される地震のこと。建築基準法では地震規模を明記していないが、震度 6 強～震度 7 の地震を指し、300~400 ガル (m/s^2) 程度の地震を想定していると言われている [25]⁴²。この地震による揺れは「大地震動」や「地震動のレベルⅡ」と呼ばれる。

中地震

「まれに（数十年に一度程度）発生する地震」とも呼ばれ、一次設計において、標準せん断力係数 0.2 以上を用いて計算される地震のこと。建築基準法では地震規模を明記していないが、震度 5 強程度の地震を指し、80~100 ガル (m/s^2) 程度の地震を想定していると言われている [25]。この地震による揺れは「中地震動」や「地震動のレベルⅠ」と呼ばれる。

建物の応答

地震力などの外的要因に対する建物の挙動のこと。

本研究においては建物の層間変位や揺れのことを指す。

層間変位

上下階の間に発生する水平方向の変位のこと。

層間変形角

床スラブに対して上階の床スラブの層間変位を階高の値で割った値のこと。

床応答加速度

ある床面の揺れの大きさを加速度で表した値のこと。

慣性力

地震による揺れにより発生する力のこと。ある床にある物体の質量が m で、その床の応答加速度が \ddot{y} であるとき、 $-m\ddot{y}$ で表される。

⁴² 日本建築構造技術者協会. 『地震-7』 - 基準法と地震の大きさ (その2) <建築基準法を守ると、どの程度の地震に耐えられるのか>. 参照日: 2022年7月27日, 参照先: https://www.jsca.or.jp/vol5/p4_4_tec_terms/200506/20050624.php

部材の名称に関連する用語

非構造部材

建物を構成する部材のうち、構造部材（基礎、柱、梁など）以外の部材のこと。

内外装材

非構造部材のうち、設備と什器以外の部材のこと。天井、床、間仕切り壁、外壁、ドア、窓など。

内外装壁

内外装材のうち、壁を構成する部材のこと。本研究では、内外装壁の中でも、LGS 間仕切り壁、ALC 外壁、ドア、窓を対象とする。

LGS 間仕切り壁

LGS（軽量鉄骨）を下地として構成される間仕切り壁のことを指す。更に本研究では、石膏ボードを張り付けたものを指す。なお、間仕切り壁と呼んでいるが、建物の中央に設置され内部空間を仕切る壁だけではなく、部屋の周囲に外装材を覆うように設置される壁のことも指す。

標準的な構法について説明する。下地は、床スラブと天井側の梁の両方に取り付けられるランナーと呼ばれるコの字型の軽量鉄骨と、ランナーの間に配置されるスタッドと呼ばれるコの字型の軽量鉄骨で構成される。なお、鉄骨造の場合は、梁には先付金物を介してランナーが取り付けられる。なお、上部のランナーは梁に接合されており、構造部材と一体となり水平方向に変位する。一方、スタッドは、ランナーにはめ込まれているだけで接合されていないため、ランナー内を滑ることにより、柱とは異なる傾斜となる可能性がある⁴³。

耐火仕様の間仕切り壁の場合はスタッドに石膏ボードが 2 枚張られる。下地側の石膏ボードは下張りボード、仕上げ側の石膏ボードは上張りボードと呼ばれる。下張りボードはスタッドにビスで固定され、上張りボードは下張りボードに接着剤とステーブルで固定される。なお、上張りボードと構造部材の間や、上張りボードと開口部の間にはクリアランス（実施した実験では 5mm）を設け、シーリング材を充填する。このため構造部材から上張りボードには、圧縮力は伝達されるが引張力はほとんど伝達されない。また、仕上げを施す際には、上張りボードの目地はパテとテープで埋められ、塗装などが施される。図 1-7 に LGS

⁴³ この他に、スタッドには、水平方向に振れ止めと呼ばれる材が貫通するように設けられる他、内部にスペーサーと呼ばれる水平断面方向のせん断変形を防止するための部材が設けられる。

間仕切り壁の部材の名称を示す [14]⁴⁴ [26]⁴⁵。図 1-8 に上張りボードの目地処理のイメージを示す⁴⁶。

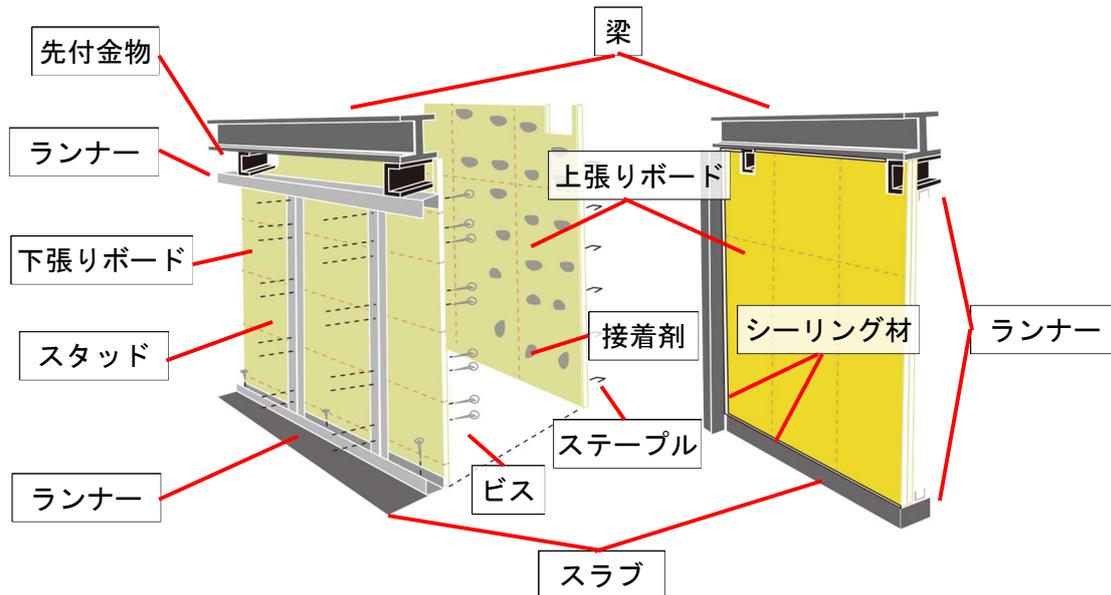


図 1-7 LGS 間仕切り壁の部材の名称

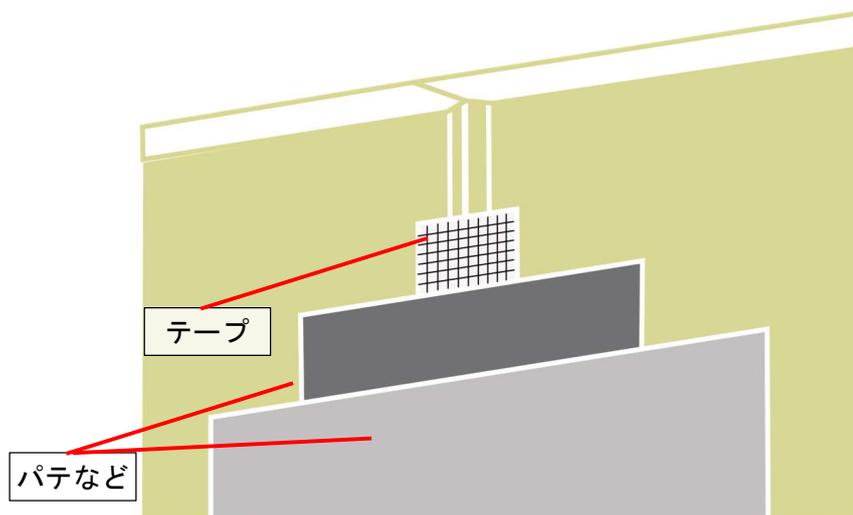


図 1-8 上張りボードの目地処理のイメージ

⁴⁴ 桐井製作所. 建築用鋼製壁下地材. 参照日: 2022年7月22日, 参照先:
<https://www.kirii.co.jp/products/wall/steel-wall.html>

⁴⁵ 国土交通省大臣官房官庁営繕部. (2022). 公共建築工事標準仕様書（建築工事編）令和4年版. 参照日:
2022年7月25日, 参照先: <https://www.mlit.go.jp/common/001473539.pdf>

⁴⁶ 参考: <https://yoshino-gypsum.com/method/目地処理工法>

ALC 外壁

ALC (Autoclaved Lightweight aerated Concrete の略) という、セメント、石灰質原料およびケイ酸質原料を主原料とし、高温高压、蒸気養生された軽量気泡コンクリートを適切な補強材で補強し、成形したパネルを用いた外壁のことを指す。本研究では特に縦壁ロックンク構法と呼ばれる構法で取り付けられたものを指す。

標準的な構法について説明する。ALC 外壁が鉄骨に取り付けられる場合は、鉄骨の下に定規アングルと呼ばれる L 字断面のアングル材が溶接により取り付けられ、更にその定規アングルに平プレートと呼ばれる金属部材が溶接により取り付けられる。下の階の梁にも同様に定規アングルが取り付けられており、こちらの定規アングルにはイナズマプレートと呼ばれる金属部材が取り付けられている。平プレートとイナズマプレートには穴が開けられており、この穴と ALC パネルに事前に開けられた上下 2 ヶ所の穴とをボルトで接合することで ALC パネルを鉄骨に取り付ける。なお、パネル間には 10~20mm 程度の伸縮目地が設けられておりシーリング材が充填されている。図 1-9 に ALC 外壁の部材の名称を示す [27]⁴⁷ [28]⁴⁸。縦壁ロックンク構法は、層間変位に対して、ALC パネルが壁の面内方向に回転 (ロックンク) することで追従できる仕組みになっている。図 1-10 にイメージを示す。

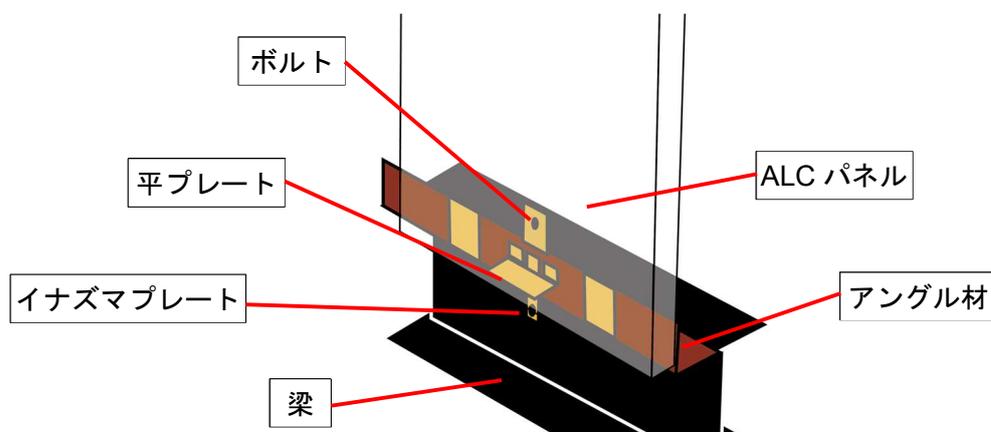


図 1-9 ALC 外壁の部材の名称

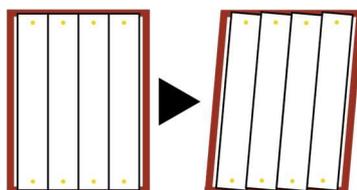


図 1-10 ALC パネルがロックンクする様子

⁴⁷ ALC 協会. (2013). ALC パネル取付け構法標準・同解説 平成 25 年版.

⁴⁸ ALC 協会. 取付け構法. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: <http://www.alc-a.or.jp/installation.html>

ドア

壁に設置される、人が通行するための建具のことを指す。本研究では、引戸ではなく、開きドア、特に鋼製のドアのことを指す。なお、枠を含まない可動部のことを扉と呼ぶ。また、鉛直材と上部の横架材のみで、下部の横架材が無い枠のことを、三方枠と呼ぶ。

標準的な接合方法について説明する。まず、床スラブと鉄骨梁との間（LGS 間仕切り壁の中に設置される場合は上下のランナーの間）に、開口補強鋼材と呼ばれる鋼材が、鉛直方向に2本設置される。開口補強鋼材は、溶接やビス止めで接合されるものであるため、層間変位に対しては、柱と同じ程度の傾斜となる。更に、この2本の鉛直方向の開口補強鋼材の間に、水平方向に開口補強鋼材が設置される。これもまた、溶接や補強金物を介したビス止めにより接合される。このように設置された開口補強鋼材に、三方枠が溶接やビス止めにより接合される。なお、溶接の場合は、開口補強鋼材と三方枠の隙間がモルタルで埋められる場合もある。そして三方枠に、扉がヒンジとドアクローザーを介して設置される。錠の代表的な部材について説明すると、まず、ノブやレバーハンドルで操作するのがラッチボルトで、サムターンなどで操作するのがデッドボルトである。扉が枠に収まった状態でラッチボルトやデッドボルトを飛び出させると、枠に設置したストライクと噛み合い、扉が開かなくなる。図 1-11 にドアの部材の名称を示す [29]⁴⁹。

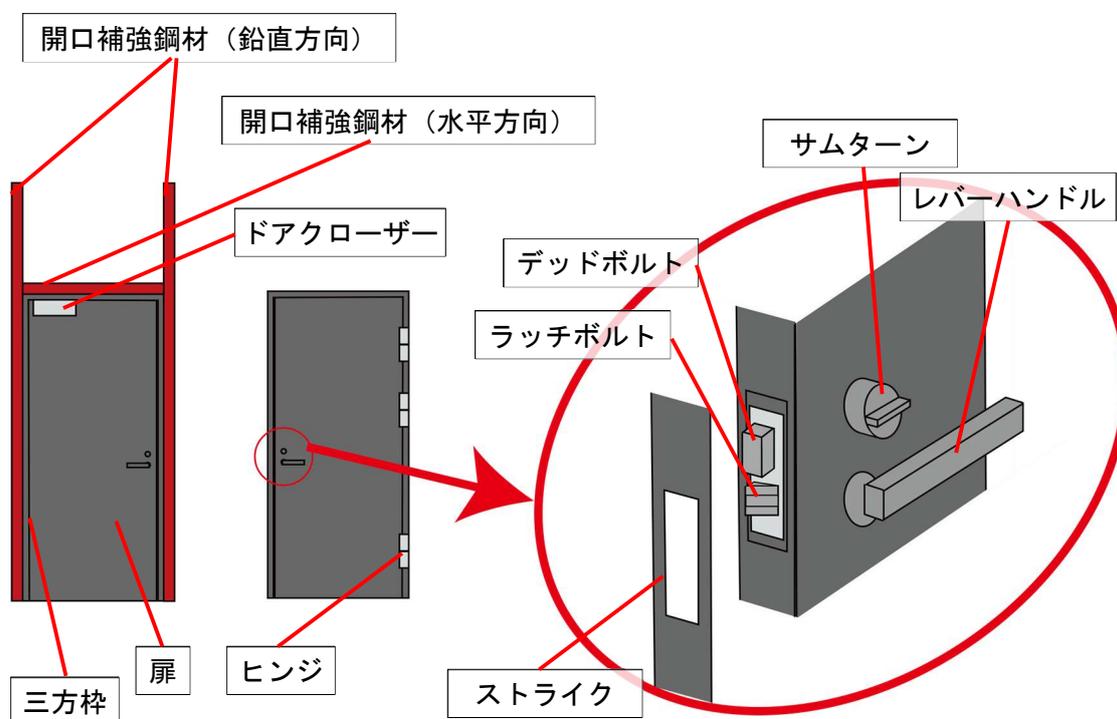


図 1-11 ドアの部材の名称

⁴⁹ 日本サッシ協会. (2018). サッシ・ドア関連用語集. 東京都: 日本サッシ協会.

窓

壁に設置される、光や風を通すための建具のことを指す。本研究では、引き違い窓ならびに FIX 窓のことを指す。引き違い窓とは、可動部が左右に動くことで開閉する窓のことである。なお、枠を含まない可動部のことを障子と呼ぶ。FIX 窓とは、枠に直接ガラスを固定し、開閉できない窓のことである。

引き違い窓の標準的な構法について説明する。鉄骨造の場合は、前項のドアと同じように、開口補強鋼材を介して、構造部材に枠が設置される。RC 造の場合は、垂れ壁や腰壁から伸ばしたアンカーと溶接する形で枠が設置される場合もある。隙間はモルタルで埋められる場合がある。枠は、鉛直方向の縦枠と、水平方向の上枠と下枠によって構成される。施工の手順としては、上枠と下枠が構造部材に接合され、それに縦枠がビス止めされる。最後に障子が枠の中にはめ込まれる。障子は、障子の枠とガラスによって構成される。

FIX 窓の標準的な構法について説明する。枠の設置方法は引き違い窓と一緒に、縦枠と上枠と下枠が設置された段階で、枠の中にガラスをはめ込む。更に、ガラスが面外に倒れるのを防ぐために、押縁と呼ばれる部材をガラスの上からはめ込む。図 1-12 に窓の部材の名称を示す [29]⁵⁰。なお、上枠、縦枠、下枠、押縁をまとめてサッシと呼ぶ。

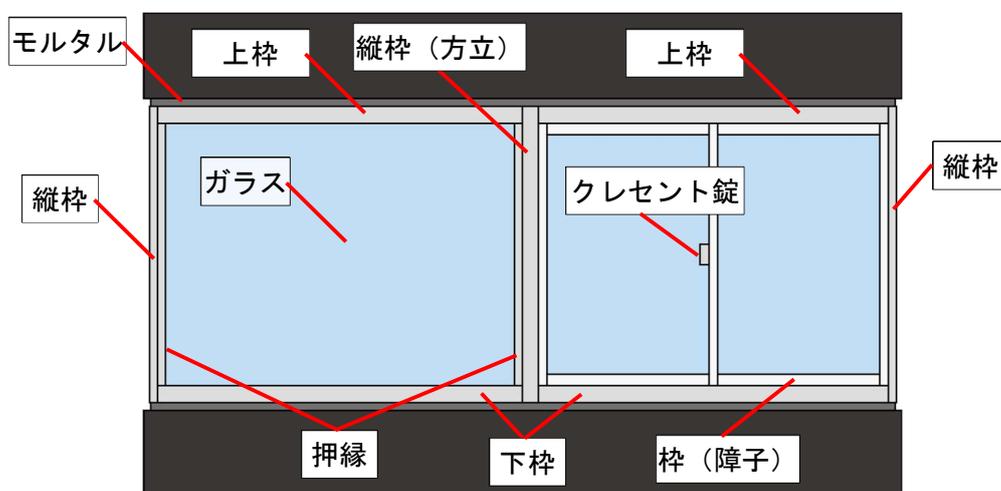


図 1-12 窓の部材の名称 (RC 造の場合)

⁵⁰ 日本サッシ協会. (2018). サッシ・ドア関連用語集. 東京都: 日本サッシ協会.

ガラスの標準的な設置方法について説明する。枠（引き違い窓の場合は障子の枠）の中に取り付けられたセッティングブロックと呼ばれる部材の上にガラスを置き、押縁をはめる。最後にガラスと枠の間を表面からシーリング材で埋める。このとき、ガラスは枠に対して完全には固定されていない。更に、枠の内部では、ガラスの周囲にクリアランスと呼ばれる隙間が設けられている。これは、地震の際には、枠の内部でガラスが水平移動したり、面内方向に回転したりすることで、枠の変形や慣性力に追従できるような仕組みにするためである。本研究では、このガラスの水平移動のことをスウェイ、面内方向の回転のことをロッキングと呼ぶ。図 1-13 にこれらの挙動のイメージを示す。



図 1-13 地震時のガラスの挙動のイメージ ; (a) スウェイ, (b) ロッキング

一般的には、ガラスの対角線の長さと、枠の対角線の長さが一致した時にガラスが割れるとされている [30]⁵¹。すなわち、枠の許容変形量 λ は以下の式で与えられる [31]⁵²。

$$\lambda = (C_1 + C_2) + (H/L) \cdot (C_3 + C_4)$$

ここで、図 1-14 に示すように、 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 はガラスと枠のクリアランスの量を、 L と H は枠内法の寸法を表す。なお、引き違い窓の場合は、枠と障子のクリアランスの分も加算される。

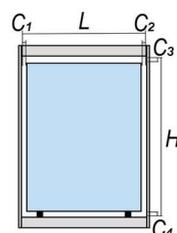


図 1-14 窓の各種寸法

⁵¹ 日本建築防災協会, 機能ガラス普及推進協議会. (2015年9月24日). 「安全・安心ガラス設計施工指針増補版」の手引き. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: http://www.itakyo.or.jp/upload/kinou01_20150924.pdf

⁵² Boukamp J. (1961). BEHAVIOR OF WINDOW PANELS UNDER IN-PLANE FORCES. Bulletin of the Seismological Society of America, 51(1), 85-109. doi:10.1785/BSSA0510010085

1章 参考文献

- [1] 日本建築学会. (2019). 東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材. 東京都: 日本建築学会.
- [2] 脇山善夫, 清家剛. (2006). 非構造部材の地震被害が語るもの(非構造部材の耐震設計・施工の安全性を問う). 建築技術, 680, 98-101.
- [3] 日本建築学会. (2000). 阪神・淡路大震災調査報告 建築編 5 非構造部材 材料施工. 東京都: 日本建築学会.
- [4] 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎. (1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究: その 1. 構法及び実験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 201-202.
- [5] 清家剛. (2020). 落ちない, 倒れない, 飛んでいかない, 非構造部材の設計(非構造部材に求められる耐震・耐風設計). 建築技術, 842, 64-66.
- [6] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所. (2019). 既存建築物の非構造部材の耐震診断指針・同解説. 東京都: 日本建築防災協会, 耐震改修支援センター.
- [7] 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.
- [8] 熊本県. (2018). 平成 28 年熊本地震 熊本県はいかに動いたか(初動・応急対応編). 東京都: ぎょうせい.
- [9] 塩入徹. (2018). 天井の劣化診断(非構造部材の再確認). 建築技術, 824, 152-155.
- [10] 塩入徹. (2022). 天井被害の実情(ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 92-93.
- [11] 松岡祐一, 吹田啓一郎, 山田哲, 島田侑子, 赤澤資貴, 松宮智央. (2009). 実大 4 層鉄骨造建物の震動台実験における外装材の耐震性能評価. 日本建築学会構造系論文集, 641, 1353-1361. doi:10.3130/aijs.74.1353
- [12] 吉敷祥一, 清家剛, 元結正次郎, 輿石直幸. (2018). 軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その 1 研究背景と目的. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1073-1074.
- [13] 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛. (2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139

- [14] 桐井製作所. 建築用鋼製壁下地材. 参照日: 2022年7月22日, 参照先: <https://www.kirii.co.jp/products/wall/steel-wall.html>
- [15] ALC協会. 施工事例. 参照日: 2022年7月26日, 参照先: <http://www.alc-a.or.jp/gallery.html>
- [16] 三協アルミ. 勝手口／汎用ドア・引戸. 参照日: 2022年7月26日, 参照先: <https://alumi.st-grp.co.jp/products/entrance/hanyo/>
- [17] 樹脂サッシ工業会. (2022). 再資源化を志向した樹脂サッシ窓の解体マニュアル (詳細版) .
- [18] 八木尚太朗, 伊山潤, 福島佳浩, 吉敷祥一, 石田孝徳, 清家剛, 山田哲. (2021). 鉄骨骨組に取り付けられた乾式間仕切り壁の大変形時における損傷と加速度計による傾斜計測を用いたその検出の可能性. 日本建築学会構造系論文集, 788, 1400-1411. doi:10.3130/aijs.86.1400
- [19] 八木尚太朗, 清家剛, 山田哲, 石田孝徳, 吉敷祥一, 上瀧敬太, テンデランランディ. (2020). 鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験. 日本建築学会技術報告集, 64, 864-874. doi:10.3130/aijt.26.869
- [20] 八木尚太朗, 巽信彦, 磯田充樹, 吉敷祥一, 本田信一, 清家剛, 前田匡樹, 西村康志郎. (2022). 実大載荷実験を通じた RC 骨組に取り付けた乾式間仕切り壁と鋼製ドアの損傷に関する考察. 日本建築学会技術報告集(70), 1125-1130. doi:10.3130/aijt.28.1125
- [21] Yagi Shotaro, Teramoto Atsushi, Yeow Trevor, Seike Tsuyoshi, Kusunoki Koichi, Nakamura Izumi. (2022). VALIDATING RESILIENT DETAILING OF JAPANESE CEILINGS, WINDOWS, AND WALL TILES USING AN E-DEFENSE SHAKE-TABLE TEST. Journal of Earthquake Engineering. doi:10.1080/13632469.2021.1988764
- [22] 八木尚太朗, 清家剛, 楠浩一, Yeow Trevor, 中村いずみ, 小林健二, 久田隆司. (2022). 振動台実験を通じた地震により窓に生じる損傷の発生メカニズムの考察. 日本建築学会技術報告集, 69, 585-590. doi:10.3130/aijt.28.585
- [23] 清家剛. (2022). 建築物に潜むリスク (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術) . 建築技術, 869, 60-61.
- [24] 伊山潤. 福島佳浩, 八木尚太朗. (2022). 非構造部材のヘルスマonitoring (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術) . 建築技術, 869, 74-77.
- [25] 日本建築構造技術者協会. 『地震-7』 - 基準法と地震の大きさ (その2) <建築基準法を守ると、どの程度の地震に耐えられるのか>. 参照日: 2022年7月27日, 参照先: https://www.jsca.or.jp/vol5/p4_4_tec_terms/200506/20050624.php
- [26] 国土交通省大臣官房官庁営繕部. (2022). 公共建築工事標準仕様書 (建築工事編) 令和4年版. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: <https://www.mlit.go.jp/common/001473539.pdf>

- [27] ALC 協会. (2013). ALC パネル取付け構法標準・同解説 平成 25 年版.
- [28] ALC 協会. 取り付け構法. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: <http://www.alc-a.or.jp/installation.html>
- [29] 日本サッシ協会. (2018). サッシ・ドア関連用語集. 東京都: 日本サッシ協会.
- [30] 日本建築防災協会, 機能ガラス普及推進協議会. (2015 年 9 月 24 日). 「安全・安心ガラス設計施工指針 増補版」の手引き. 参照日: 2022 年 7 月 25 日, 参照先: http://www.itakyo.or.jp/upload/kinou01_20150924.pdf
- [31] BoukampJ. (1961). BEHAVIOR OF WINDOW PANELS UNDER IN-PLANE FORCES. Bulletin of the Seismological Society of America, 51(1), 85-109. doi:10.1785/BSSA0510010085

2章 地震被害調査などから見る内外装壁の耐震性

2.1. 地震被害調査で観察された内外装壁の損傷.....	40
2.1.1. 地震被害調査の概要.....	40
2.1.2. 間仕切り壁の損傷.....	42
2.1.3. ALC 外壁の損傷.....	44
2.1.4. ドアの損傷.....	46
2.1.5. 窓の損傷.....	47
2.2. 内外装壁の耐震性の実態.....	50
2.2.1. 内外装壁に求められる耐震性.....	50
2.2.2. 内外装壁の損傷と求められる耐震性との比較.....	53
2.3. 診断の観点から見た内外装壁の耐震性の実態.....	54
2.3.1. 見過ごされた天井の損傷の例.....	54
2.3.2. 内外装壁の損傷が見過ごされる可能性.....	56
2章の小括.....	57
2章の参考文献.....	58

2章では、地震被害調査などの結果を踏まえ、内外装壁の耐震性について論じる。

2.1.節では、地震被害調査で観察された内外装壁の損傷について説明する。

2.2.節では、内外装壁に求められる耐震性について、各種文献に記載された内容を示し、地震被害調査で観察された損傷との比較を踏まえて、内外装壁の耐震性について論じる。

2.3.節では、見過ごされ放置された天井の損傷について説明し、これを踏まえて診断の観点から見た内外装壁の耐震性について論じる。

2.1. 地震被害調査で観察された内外装壁の損傷

2.1.節では、地震被害調査で観察された内外装壁の損傷について説明する。

2.1.1.節では、地震被害調査の概要について説明する。

2.1.2.節から 2.1.5.節のそれぞれでは、地震被害調査で観察された間仕切り壁、ALC 外壁、ドア、窓の損傷について写真と共に説明する。

2.1.1. 地震被害調査の概要

2.1.1.節では、地震被害調査の概要について説明する。

震度 6 強以上の大規模な地震や 2018 年の大阪北部地震など物的被害が比較的多く見られる地震の際は、日本建築学会や各大学などにより、学術的な目的のために地震被害調査が行われる場合がある¹。1995 年の兵庫県南部地震や、2011 年の東北地方太平洋沖地震では、内外装材の損傷と被害の調査結果をまとめた本も出された [1]² [2]³。また、学術論文としての発表や、学術雑誌での特集もたびたび組まれている。

本研究においては、2018 年の大阪北部地震、2018 年の北海道胆振東部地震、2021 年の福島県沖地震、2022 年の福島県沖を震源とする地震の際に地震被害調査を行い、商業施設や学校施設を中心に内外装材の損傷を見て回った⁴。表 2-1 に地震と地震被害調査の概要を示す。

次項より、間仕切り壁、ALC 外壁、ドア、窓の地震による損傷について、既往文献や、本研究で行った地震被害調査の結果を用いて説明する。

¹ なお、付録 3 では、建物の地震による被害の全体像について説明している。

² 日本建築学会. (2000). 阪神・淡路大震災調査報告 建築編 5 非構造部材 材料施工. 東京都: 日本建築学会.

³ 日本建築学会. (2019). 東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材. 東京都: 日本建築学会.

⁴ ただし、2018 年の大阪北部地震では写真撮影を行っていないため、本章では取り上げない。

表 2-1 地震被害調査を行った地震と被害調査の概要

地震の名称	発生日時	最大震度	震源地(震央)	調査日	調査地
大阪北部地震	2018年6月18日	6弱	大阪府北部	2018年6月23日	大阪府茨木市、高槻市、枚方市
北海道胆振東部地震	2018年9月6日	7	北海道胆振地方中東部	2018年9月17日	北海道札幌市、千歳市、
福島県沖地震	2022年2月13日	6強	福島県沖	2022年3月1-2日	宮城県仙台市、福島県相馬郡、福島市、郡山市
福島県沖地震	2022年3月16日	6強	福島県沖	2022年3月20-21日	宮城県名取市、仙台市、白石市、福島県伊達郡、福島市

2.1.2. 間仕切り壁の損傷

2.1.2.節では、地震被害調査で観察された間仕切り壁の損傷について写真と共に説明する。

損傷観察の観点から見たときの特徴

建物の内側に設置される間仕切り壁は、建物に入らないとその損傷を観察できないため、外壁と比較して情報を得にくい。そのため、損傷に関する文献での報告の数も少なく、不明な点が多い。特に、下地側の損傷については、ボードが脱落しない限り確認することができないため、情報が少ない。

既往文献による報告

2011年の東北地方太平洋沖地震では、工場や倉庫などで、高さ5mを超える間仕切り壁の損傷が大きく取り上げられた [3]⁵ [4]⁶ [5]⁷ [6]⁸。2016年の熊本地震では、間仕切り壁のボードにひび割れが発生し、一部剥落している様子が災害対応型移動ロボットにより撮影された [7]⁹。また、鉄骨造の校舎の間仕切り壁が脱落した事例についても報告されている。この脱落した壁には、廊下に倒れこむものもあった [8]¹⁰。

本研究で行った地震被害調査の結果

本研究で行った地震被害調査では、**写真 2-1** や**写真 2-2** に示す開口部角からのボードのひび割れや、**写真 2-3** や**写真 2-4** に示す階段室のボードのひび割れが観察された。

また、**写真 2-5** に示す、間仕切り壁が倒れかかる損傷も観察された。**写真 2-6** は、同じ壁を反対側から見た様子である。この教室は使用停止になっていた。

なお、下地の詳細まで確認できた事例は無いため、ここで紹介する間仕切り壁は、本研究で対象として取り上げるLGS下地の間仕切り壁とは限らない。

⁵ 吉敷祥一, 清家剛, 元結正次郎, 輿石直幸. (2018). 軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その1 研究背景と目的. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1073-1074.

⁶ 吉敷祥一. (2018). 乾式間仕切り壁の耐震性能を再確認 (非構造部材の再確認). 建築技術, 824, 118-121.

⁷ 清家剛. (2020). 間仕切り壁に求められる耐震設計技術 (非構造部材に求められる耐震・台風設計). 建築技術, 842, 90-93.

⁸ 清家剛. (2022). 間仕切り壁の耐震対策 (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 94-97.

⁹ 日本建築学会. (2018). 2016 熊本地震災害調査報告. 東京都: 日本建築学会.

¹⁰ 伊山潤, 松尾真太郎, 吉敷祥一, 石田孝徳, 東康二, 城戸将江, 岩下勉, 澤田樹一郎, 山田哲, 清家剛. (2018). 熊本地震で被災した鉄骨造文教施設の被害調査の概要. 日本建築学会技術報告集, 24(56), 183-188. doi:10.3130/aijt.24.183



写真 2-1 開口部角からのボードのひび割れの例 (2021年の福島県沖を震源とする地震、商業施設)



写真 2-2 開口部角からのボードのひび割れの例 (2021年の福島県沖を震源とする地震、商業施設)

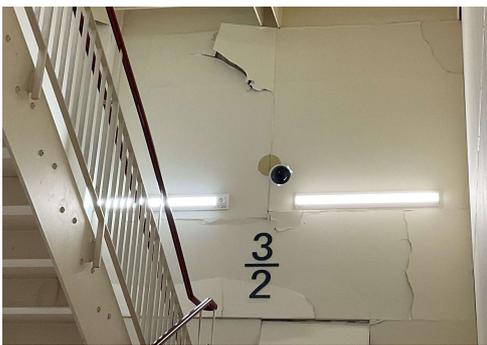


写真 2-3 階段室のボードのひび割れの例 (2022年の福島県沖を震源とする地震、商業施設)



写真 2-4 階段室のボードのひび割れの例 (2022年の福島県沖を震源とする地震、商業施設)



写真 2-5 倒れかかった間仕切り壁の例 (2021年の福島県沖を震源とする地震、学校施設)

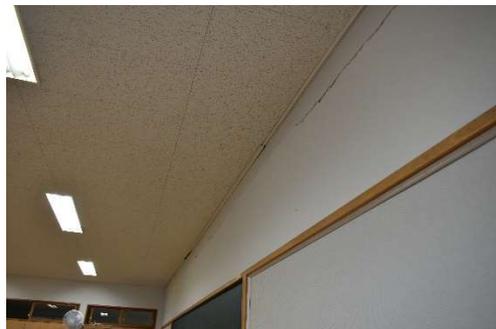


写真 2-6 倒れかかった間仕切り壁の例 (2021年の福島県沖を震源とする地震、学校施設)

2.1.3. ALC 外壁の損傷

2.1.3.節では、地震被害調査で観察された ALC 外壁の損傷について写真と共に説明する。

損傷観察の観点から見たときの特徴

建物の外側に設置される ALC 外壁は、外部から観察可能であるため、地震被害調査で情報を得やすい。そのため、文献での報告が間仕切り壁と比較すると多い。ただし、間仕切り壁と同じ様に、パネルが脱落しない限り下地を確認することはできない。そのため下地側の損傷に関する情報は少ない。

既往文献による報告

2011 年の東北地方太平洋沖地震では、ALC 外壁のひび割れや脱落といった損傷が報告されている。ALC パネルのひび割れに関しても、ALC パネルの角部のひび割れといった補修を行えば継続使用が可能な損傷や、ALC パネルの取り付け部の大破といった、部材の交換を要する損傷が報告がされている。ALC パネルの脱落が発生した ALC 外壁の構法は、接合部が可動しない古い構法である縦壁挿入金構法によるものが殆どであったが、一部は縦壁ロックング構法によるものも報告されている。また、室内で天井と衝突したことが原因である、ALC パネルに穴が開くという損傷も報告されている [2]¹¹ [9]¹²。

本研究で行った地震被害調査の結果

本研究で行った地震被害調査では、**写真 2-7**や**写真 2-8**に示す ALC パネルの角部のひび割れや、**写真 2-9**や**写真 2-10**に示す ALC パネルの脱落が観察された。ALC パネルが脱落した外壁では、直下にあたる地上部分は立入禁止になっていた。

なお、下地の詳細まで確認できた事例は無いため、ここで紹介する ALC 外壁は、本研究で対象として取り上げる縦壁ロックング方式の ALC 外壁とは限らない。

¹¹ 日本建築学会. (2019). 東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材. 東京都: 日本建築学会.

¹² 寺本隆幸, 清家剛, 大迫勝彦, 渡壁守正, 鈴木正裕. (2013). ALC 間仕切り壁の地震被害と今後の対策 : その 1 東日本大震災における ALC 帳壁の地震被害と課題. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013, 1421-1422.



写真 2-7 ALC パネルの角部のひび割れの例（2021年の福島県沖を震源とする地震、商業施設）



写真 2-8 ALC パネルの角部のひび割れの例（2022年の福島県沖を震源とする地震、商業施設）



写真 2-9 ALC パネルの脱落の例（2022年の福島県沖を震源とする地震、商業施設）



写真 2-10 ALC パネルの脱落の例（2022年の福島県沖を震源とする地震、商業施設）

2.1.4. ドアの損傷

2.1.4.節では、地震被害調査で観察されたドアの損傷について写真と共に説明する。

損傷観察の観点から見たときの特徴

建物の外側にも設置されるドアは、外部から観察可能であるため、地震被害調査で情報を得やすい。ただし、開閉機能の確認は、建物の関係者でない限り情報を得ることは難しい。そのため、ALC 外壁と比べると報告の数は少ない。

既往文献による報告

文献では、扉が閉められなくなるという損傷や、逆に開けられなくなるという損傷についての報告がされている [10]¹³。1978年の宮城県沖地震での被害を受けて、耐震性が確保されたドア¹⁴の生産が始まったが、古いドアもまだ多く残っており、2005年の福岡県西方沖地震ではせん断破壊による集合住宅のドアの被害が報告されている [11]¹⁵ [12]¹⁶。

本研究で行った地震被害調査の結果

本研究で行った地震被害調査では、ドアに関する損傷や被害の情報を得ることはできなかった。

¹³ 富松太基. (2006). 出入口扉（非構造部材の耐震設計・施工の要点）. 建築雑誌, 680, 136-137.

¹⁴ JIS では3段階の等級が設定されており、D-1は層間変形角 1/300 rad まで、D-2は層間変形角 1/150 rad まで、D-3は層間変形角 1/120 rad まで扉が開かなければならないと規定している [87]。また、優良住宅部品評価基準では、層間変位へのドアの追従性について、「面内変形 1/200 時 200N 以下で扉が開放し、かつ、手動により閉扉できること。また、面内変形 1/120 時 500N 以下で扉が開放すること。」と定めている [69]。

¹⁵ 日本建築学会. (2005). 2005年福岡県西方沖地震災害調査報告.

¹⁶ 脇山善夫. (2020). 扉に求められる耐震設計技術（非構造部材に求められる耐震・耐風設計）. 建築技術, 842, 98-99.

2.1.5. 窓の損傷

2.1.5.節では、地震被害調査で観察された窓の損傷について写真と共に説明する。

損傷観察の観点から見たときの特徴

建物の外側に設置される窓は、外部から観察可能であるため、地震被害調査で情報を得やすい。ただし、時間が経過するとブルーシートや板で覆われてしまうため、損傷があったことは確認できるが、細かい発生箇所といった詳細な情報は得にくい。また、窓枠の変形といった損傷は、近くで観察しないと確認しにくいいため、建物の関係者でない限り詳細な情報は得にくい。

既往文献による報告

窓ガラスの損傷は、FIX窓において多く観察されている。特に、硬性パテ止めによるFIX窓のガラスのひび割れが多く報告されている [13]¹⁷ [14]¹⁸。硬性パテは、1978年以降禁止されているが、古い建物ではまだ残っている。2011年の東北地方太平洋沖地震でも、FIX窓の硬性パテ止めのガラスの損傷が数多く報告されている [2]¹⁹。

本研究で行った地震被害調査の結果

行った現地調査では、**写真 2-11** や**写真 2-12** に示す窓の脱落やガラスのひび割れといった損傷が観察された。こうした損傷が観察された体育館や教室は使用停止となっていた。

また、一部の建物では、関係者に許可をもらい、至近距離や内部から観察することもできた。**写真 2-13** や**写真 2-14** に示す枠の変形が観察された。その他、**写真 2-15** に示す溶接が破断し面外に変位した窓や、**写真 2-16** に示すシーリング材の切れが観察された。

更に、商業施設においても、**写真 2-17** や**写真 2-18** に示すガラスのひび割れが観察された。いずれも、ガラスのひび割れが発生したフロアは休業していた。

¹⁷ 坪内信朗. (2006). ガラス窓（非構造部材の耐震設計・施工の要点）. 建築技術, 680, 134-135.

¹⁸ 清家剛. (2012). ガラスの被害から見る今後の検討課題（非構造部材の耐震性を設計・施工する）. 建築技術, 749, 152-155.

¹⁹ 日本建築学会. (2019). 東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材. 東京都: 日本建築学会.



写真 2-11 窓の脱落の例（2018年の北海道胆振東部地震、学校施設）



写真 2-12 ガラスのひび割れの例（2018年の北海道胆振東部地震、学校施設）



写真 2-13 窓の枠の変形の例（2021年の福島県沖を震源とする地震、学校施設）



写真 2-14 窓の枠の変形の例（2021年の福島県沖を震源とする地震、学校施設）



写真 2-15 窓の溶接の破断の例（2021年の福島県沖を震源とする地震、学校施設）



写真 2-16 シーリング材の切れの例（2021年の福島県沖を震源とする地震、施設）



写真 2-17 ガラスのひび割れの例（2022年の福島県沖を震源とする地震、商業施設）



写真 2-18 ガラスのひび割れの例（2022年の福島県沖を震源とする地震、商業施設）

2.2. 内外装壁の耐震性の実態

2.2.節では、内外装壁に求められる耐震性について、各種文献に記載された内容を示し、地震被害調査で観察された損傷との比較を踏まえて、内外装壁の耐震性について論じる。

2.2.1.節では、内外装壁に求められる耐震性について、各種文献に記載された内容を示す。

2.2.2.節では、各種文献に記載された内外装壁に求められる耐震性と、地震被害調査で観察された損傷との比較を踏まえて、内外装壁の耐震性について論じる。

2.2.1. 内外装壁に求められる耐震性

2.2.1.節では、内外装壁に求められる耐震性について、各種文献に記載された内容を示す。

1.1.3.節で説明した通り、内外装壁に求められる耐震性としては、最低ラインが建築基準法で定められている以外は、建物の用途などによって建物ごとに異なる。その一方で、日本建築学会が出している指針などでは、内外装壁に求められる耐震性の例が示されている。

建築基準法について

建築基準法施行令第39条では、「屋根ふき材、内装材、外装材、(中略)は、風圧並びに地震その他の震動及び衝撃によって脱落しないようにしなければならない。」ということが書かれている²⁰。つまり、内外装材が地震動によって脱落しないことが、すべての建物の内外装壁に求められる最低限の耐震性である。そして、大地震に対して求められる耐震性については記述がない現状がある。なお、構造部材に求められる耐震性として、建物の設計段階で、建物が大地震に対して倒壊・崩壊しないこと、中地震に対して殆ど損傷しないことを検証することが建築基準法で規定されている。

非構造部材の耐震設計施工指針・同解説について

2003年に日本建築学会が出した「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」は、非構造部材の耐震設計・施工に関する基本的な考え方を規定するものである [15]²¹。これは、1978年の伊津大島近海地震や宮城県沖地震などで観察された非構造部材の被害を受けて設置された委員会の成果をまとめたものであり、その後、1995年の兵庫県南部地震で観察された

²⁰ ただし、明記されていないが、これは中地震に対して定められた耐震性と考えられる

²¹ 日本建築学会.(2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

非構造部材の被害を受けて 2003 年に改定された。

「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」では、3つの性能目標に対し耐震性に関する目標性能を設定し、内外装壁を設計することを勧めている。3つの性能目標を下記に示す。

- (1) 人命の安全：当該建築物内外の人命に直接・間接に及ぼす危険を回避すること
- (2) 財産の保護：当該建築物内の財産を保護すること
- (3) 機能性・居住性の確保：当該建築物の機能性・居住性を確保すること

また、大地震と中地震に対する、一般事務所建築物の内外装壁（非構造部材）に求められる耐震性の例を示している。表 2-2 にこの内容を示す。

表 2-2 非構造部材の耐震設計・施工の目標の例（一般事務所建物） [15]

性能目標	地震動のレベルⅠ（中地震動）	地震動のレベルⅡ（大地震動）
人命の安全	直接にまったく危険を及ぼさない	脱落・倒壊・転倒による危険を及ぼさない 避難行動に危険を及ぼさない
財産の保護	補修の必要は殆どない	部分的交換、修理に留める
機能性・居住性の確保	地震直後に機能性・居住性が従前どおりに確保される	数日で復旧できる

官庁施設の総合耐震・対津波計画基準及び同解説について

国土交通省大臣官房官庁営繕部監修のもと、一般社団法人公共建築協会が 2013 年に制定した「官庁施設の総合耐震・対津波計画基準及び同解説」は、地震災害、津波災害及びそれらの二次災害に対する安全性に関する基本的事項を定めるとともに、保全に係る事項について定め、地震及び津波による災害時に官庁施設として必要な機能の確保を図ることを目的とするものである [16]²²。

この基準の中では、官庁施設の種別ごとに、構造部材、非構造部材、設備のそれぞれに対して耐震安全性の目標が定められている。内外装壁（非構造部材）の目標（求められる耐震性）は A 類と B 類の 2つのレベルで定められている。

²² 国土交通省大臣官房官庁営繕部. (2021). (平成 25 年制定) 官庁施設の総合耐震・対津波計画基準及び同解説 令和 3 年版. 東京都: 公共建築協会.

A 類：大地震動後、災害応急対策活動や被災者の受け入れの円滑な実施、または危険物の管理の上で、支障となる建築非構造部材の損傷、移動等が発生しないことを目標とし、人命の安全確保に加えて十分な機能確保が測られている。

B 類：大地震動により建築非構造部材の損傷、移動等が発生する場合でも、人命の安全確保と二次災害の防止が図られている。

災害応急対策活動に必要な施設、避難所として位置づけられた施設、危険物を貯蔵するまたは使用する施設に対しては、非構造部材の目標は A 類と定められている。その一方で、上記以外の施設に対しては B 類と定められている。

防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドラインについて

国土交通省住宅局が 2018 年に出した「防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン」は、建築主、設計者、管理者が防災拠点建築物の機能継続を図る際の参考となるよう、企画、設計、運用の各段階における基本的な考え方を示すものである [17]²³。

このガイドラインの中では内外装壁（非構造部材）に求められる耐震性に関する考え方が下記の通り示されている。

- (1) 対象建築物の非構造部材については、大地震時における人命の安全確保及び二次災害の防止に加えて、大きな補修をすることなく、施設の機能継続ができるように設計するとともに、確実な施工を行う
- (2) 大地震時に対象建築物に求められる役割に応じて、機能継続を図ることが必要な部位（室及び当該室に至る経路）を特定する
- (3) これらの非構造部材については、大地震時の構造体の変形に対して追従するとともに、大地震時の水平・鉛直方向の地震力に対し、必要な安全性及び機能継続性を確保する。また、局所的な力の集中や共振による応答増幅を考慮して、余裕を確保した設計とする。

各種文献に記載された内外装壁に求められる耐震性のまとめ

脱落しないことが最低ラインとして建築基準法で定められているほか、その他の文献では、中地震に対しては損傷を殆ど発生させず、大地震に対しては人的被害を発生させないという目標が概ね書かれている。更に、公共建築の中でも地震直後から利用を再開したい建物についてはより厳しい目標が書かれている。

²³ 国土交通省住宅局. (2018 年 5 月). 防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン（新装版）. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: <https://www.mlit.go.jp/common/001292547.pdf>

2.2.2. 内外装壁の損傷と求められる耐震性との比較

2.2.2.節では、各種文献に記載された内外装壁に求められる耐震性と、地震被害調査で観察された損傷との比較を通じて、内外装壁の耐震性について論じる。

文献に記載された内外装壁に求められる耐震性と地震被害調査で観察された損傷の比較

2.1.節では、地震の際に ALC パネルやガラスの脱落といった損傷が発生していることを示した。その一方で、内外装壁に求められる耐震性としては、脱落しないことが最低ラインとして建築基準法で定められている。すなわち、内外装壁の耐震性が建築基準法やその他の文献で示されたラインに達していないことを示唆している。

内外装壁の耐震性の実態に関する考察

文献に記載された内外装壁に求められる耐震性と地震被害調査で観察された損傷の比較を通じて、少なくとも大地震に対しては、内外装壁の耐震性が求められる性能に達していないことが示唆された。

また、2.1.節では、間仕切り壁の損傷により学校の教室が利用不可になっていたことや、窓のガラスの損傷により商業施設が利用不可になっていたことを紹介した。

これらが意図的でない限り、以上のことから、設計者が内外装壁の耐震性について正しく認識できていないことが示唆される。そのため、少なくとも大地震に対しては、内外装壁の脱落などの損傷が今後発生することが想定され、これによる被害が発生することも想定される。

そして、この背景には、1.1.3.節で説明した通り、建物の応答に対して発生が想定される内外装壁の損傷と被害が明確にされていないことがあると考えられる。

2.3. 診断の観点から見た内外装壁の耐震性の実態

2.3.節では、見過ごされ放置された天井の損傷について説明し、これを踏まえて診断の観点から見た内外装壁の耐震性について論じる。

2.3.1.節では、見過ごされ放置された天井の損傷について説明する。

2.3.2.節では、天井の事例を踏まえ診断の観点から見た内外装壁の耐震性について論じる。

2.3.1. 見過ごされた天井の損傷の例

2.3.1.節では、見過ごされ放置された天井の損傷について説明する。

日本耐震天井施工協同組合による天井の耐震性の調査について

1.1.4.節でも紹介した通り、天井においては、天井裏など目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が見過ごされ放置された事例が報告されている [18]²⁴ [19]²⁵。この報告は、日本耐震天井施工協同組合による天井の耐震性の調査の結果に基づいて行われている。

日本耐震天井施工協同組合は、耐震性に特化した天井の導入と普及をその活動目的として2008年に改組・設立された団体である。そして、活動の一環として、建物の所有者からの依頼を受け、天井の耐震性の調査を実施している。

この調査は、その多くが日常的に利用されている建物の天井に対して、その耐震性に不安を覚えた建物の管理者からの依頼を受けて行われる。そのため、この調査により確認された損傷の多くが、見過ごされ放置されてきた損傷ということになる。

また、この調査は、地面や床からの目視調査だけでなく、天井裏の目視調査も行われる。含まれる。そのため、必要に応じて足場などが組まれる。また、この調査は専門的な訓練を受けた診断士により実施される。

このように、調査の時期、目視調査の範囲、精度の点において、地震後の応急的な対応の判断のために行われる建物の管理者による床や地面からの目視調査と異なる。

²⁴ 塩入徹. (2018). 天井の劣化診断（非構造部材の再確認）. 建築技術, 824, 152-155.

²⁵ 塩入徹. (2022). 天井被害の実情（ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術）. 建築技術, 869, 92-93.

見過ごされ放置された天井の損傷について

日本耐震天井施工協同組合により、2017年から2021年にかけて行われた185事例（303部屋分、684点検箇所）の調査結果を分析した、「天井耐震診断調査研究報告書 一天井の耐震診断から見えてくること」²⁶の内容を紹介する。この報告書では、各事例で確認された損傷の内容や箇所、天井の形状、建物の構造種別といった点に着目した様々な分析結果について報告されている。

その中に、「天井下から視認可能な損傷がある場合とない場合の損傷の比較」がある。これによると、全859箇所で行った調査に対して、684箇所において、天井下から視認可能な損傷が無いとされている。更に、その684箇所中、485箇所において、**図 2-1**に示すような、天井下から視認不可能な損傷（天井裏の損傷）があったとされている。すなわち、調査箇所の56.5%において、天井下から視認不可能な損傷のみ存在し、これらが見過ごされ放置されていたことになる。

更に、これに該当する天井下から視認不可能な損傷の内、25%がクリップ（天井の下地の中でも野縁と野縁受けを接合する部材）の緩みや外れであるとされる。クリップの緩みや外れの原因は、経年劣化とは考えにくく、施工不良を除けば、地震動や風による天井の揺れだと考えられる。そして、クリップの緩みや外れは接合部の損傷であるため、天井全体の剛性を低下させる損傷であると考えられる。

以上より、天井においては、剛性を低下させる損傷が見過ごされ放置されているということを紹介した。なお、この結果を踏まえて、日本耐震施工天井組合では、天井裏の損傷を診断できる簡易的な方法の検討などの対策が講じられている。

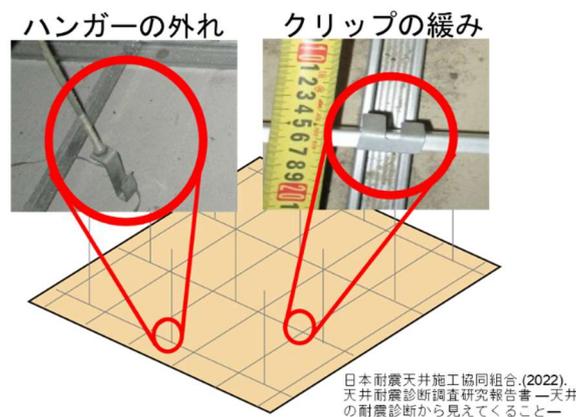


図 2-1 天井下地の損傷の例

²⁶ 日本耐震天井施工協同組合.(2022). 天井耐震診断調査研究報告書 一天井の耐震診断から見えてくること一. 東京都: 日本耐震天井施工協同組合.

2.3.2. 内外装壁の損傷が見過ごされる可能性

2.3.2.節では、天井の事例を踏まえ診断の観点から見た内外装壁の耐震性について論じる。

天井と内外装壁の仕様の比較

図 2-2 に示すように、本研究で対象とする LGS 間仕切り壁・ALC 外壁・ドア・窓は、天井と同じ様に、目視調査で容易に確認できる範囲と、確認できない範囲が存在する。具体的には、LGS 間仕切り壁に関しては、構造部材との接合部でもある下地の部分や、仕上げ用のボードと下地の間に張られる下張りボードが該当する。ALC 外壁に関しては、ALC パネルの室内側や構造部材との接合部が該当する。ドアと窓に関しては、構造部材との接合部が目視調査で容易に確認できない範囲に該当する。なお、目視調査で容易に確認できる範囲としては、LGS 間仕切り壁に関しては上張りボード、ALC 外壁に関しては ALC パネルの室外側、ドアと窓に関しては構造部材との接合部以外のドア枠、扉、サッシ、ガラスが該当する。

診断の観点から見た内外装壁の耐震性の実態に関する考察

目視調査で容易に確認できない範囲の損傷について、天井については検討が行われ対策が検討されているのに対して、内外装壁については検討が行われていない。

そのため、内外装壁においても目視調査で容易に確認できない範囲に地震による損傷が発生している可能性があり、これが見過ごされ放置されている可能性が考えられる。そして、地震後の建物の利用再開の判断が安全に十分に配慮できていない可能性が考えられるだけでなく、設計の段階で確保した内外装壁の耐震性が低下しており、次の地震の際に想定外の損傷並びに被害が発生する可能性が考えられる。



図 2-2 内外装壁の仕上げ側と下地側

2 章の小括

2 章では、地震被害調査などの結果を踏まえ、内外装壁の耐震性について論じた。

まず、2.1.節で、地震被害調査で観察された内外装壁の損傷について説明した。大地震に対して、間仕切り壁が倒れこみや、ALC パネルやガラスの脱落などの損傷が発生したことについて写真と共に示した。

次に、2.2.節で、内外装壁に求められる耐震性について、各種文献に記載された内容を示し、地震被害調査で観察された損傷との比較を踏まえて、内外装壁の耐震性について論じた。内外装壁の耐震性について、設計者が正しく認識できていない可能性があり、少なくとも大地震に対しては、内外装壁の脱落などの損傷が今後発生することが想定され、これによる被害が発生することも想定される。

最後に、2.3.節で、見過ごされ放置された天井の損傷について説明し、これを踏まえて診断の観点から見た内外装壁の耐震性について論じた。内外装壁においても目視調査で容易に確認できない範囲に地震による損傷が発生している可能性があり、これが見過ごされ放置されている可能性が考えられる。そして、地震後の建物の利用再開の判断が安全に十分に配慮できていない可能性が考えられる。また、設計の段階で確保した内外装壁の耐震性が低下しており、次の地震の際に想定外の損傷並びに被害が発生する可能性も考えられる。

以上、2 章では、地震被害調査などの結果を踏まえ、内外装壁の診断の観点を含めた耐震性について論じ、問題を提起した。

これに対して 3 章では、内外装壁の耐震性に関する既往研究の調査を踏まえ、本研究で取り組む具体的な内容について論じる。

2章 参考文献

- [1] 日本建築学会. (2000). 阪神・淡路大震災調査報告 建築編 5 非構造部材 材料施工. 東京都: 日本建築学会.
- [2] 日本建築学会. (2019). 東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材. 東京都: 日本建築学会.
- [3] 吉敷祥一, 清家剛, 元結正次郎, 興石直幸. (2018). 軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その1 研究背景と目的. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1073-1074.
- [4] 吉敷祥一. (2018). 乾式間仕切壁の耐震性能を再確認 (非構造部材の再確認). 建築技術, 824, 118-121.
- [5] 清家剛. (2020). 間仕切壁に求められる耐震設計技術 (非構造部材に求められる耐震・台風設計). 建築技術, 842, 90-93.
- [6] 清家剛. (2022). 間仕切壁の耐震対策 (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 94-97.
- [7] 日本建築学会. (2018). 2016 熊本地震災害調査報告. 東京都: 日本建築学会.
- [8] 伊山潤, 松尾真太郎, 吉敷祥一, 石田孝徳, 東康二, 城戸將江, 岩下勉, 澤田樹一郎, 山田哲, 清家剛. (2018). 熊本地震で被災した鉄骨造文教施設の被害調査の概要. 日本建築学会技術報告集, 24(56), 183-188. doi:10.3130/ajjt.24.183
- [9] 寺本隆幸, 清家剛, 大迫勝彦, 渡壁守正, 鈴木正裕. (2013). ALC 間仕切壁の地震被害と今後の対策 : その1 東日本大震災における ALC 帳壁の地震被害と課題. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013, 1421-1422.
- [10] 富松太基. (2006). 出入口扉 (非構造部材の耐震設計・施工の要点). 建築雑誌, 680, 136-137.
- [11] 日本建築学会. (2005). 2005 年福岡県西方沖地震災害調査報告.
- [12] 脇山善夫. (2020). 扉に求められる耐震設計技術 (非構造部材に求められる耐震・耐風設計). 建築技術, 842, 98-99.
- [13] 坪内信朗. (2006). ガラス窓 (非構造部材の耐震設計・施工の要点). 建築技術, 680, 134-135.
- [14] 清家剛. (2012). ガラスの被害から見る今後の検討課題 (非構造部材の耐震性を設計・施工する). 建築技術, 749, 152-155.
- [15] 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要

領. 東京都: 日本建築学会.

- [16] 国土交通省大臣官房長官官舎部. (2021). (平成 25 年制定) 官庁施設の総合耐震・対津波計画基準及び同解説 令和 3 年版. 東京都: 公共建築協会.
- [17] 国土交通省住宅局. (2018 年 5 月). 防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン (新装版) . 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: <https://www.mlit.go.jp/common/001292547.pdf>
- [18] 塩入徹. (2018). 天井の劣化診断 (非構造部材の再確認) . 建築技術, 824, 152-155.
- [19] 塩入徹. (2022). 天井被害の実情 (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術) . 建築技術, 869, 92-93.
- [20] 日本耐震天井施工協同組合. (2022), 天井耐震診断調査研究報告書 一天井の耐震診断から見えてくること一, 日本耐震天井施工協同組合.

3章 内外装壁の耐震性に関する既往研究に基づく課題の検討

3.1. 内外装壁の損傷を発生させる地震時の建物の応答.....	62
3.1.1. 建物の応答の種類.....	62
3.1.2. 建物の応答の程度.....	65
3.2. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係を明らかにする方法.....	66
3.2.1. 地震被害調査による方法の検討.....	66
3.2.2. 実大実験による方法の検討.....	68
3.3. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係に関する既往研究.....	71
3.3.1. LGS 間仕切り壁を対象とした既往研究.....	71
3.3.2. ALC 外壁を対象とした既往研究.....	74
3.3.3. ドアを対象とした既往研究.....	77
3.3.4. 窓を対象とした既往研究.....	80
3.4. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係の明確化に向けた課題.....	82
3章の小括.....	84
3章の参考文献.....	85

3章では、内外装壁の耐震性に関する既往研究の調査を踏まえ、本研究で対象とする地震時の建物の応答や取り組む具体的な課題について論じ、実施する実大実験に求められる条件について説明する。

3.1.節では、内外装壁の耐震性に関する既往研究を踏まえ、本研究で地震による内外装壁の損傷との対応関係を明らかにする地震時の建物の応答の種類とその範囲について論じる。

3.2.節では、地震による内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係を明らかにするための方法について論じる。

3.3.節では、地震による内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係について実大実験に基づく報告のある既往研究について調査した結果について説明する。

3.4.節では、既往研究を踏まえ、本研究で取り組む具体的な課題について論じ、本研究で実施する実大実験に求められる条件について説明する。

3.1. 内外装壁の損傷を発生させる地震時の建物の応答

3.1.節では、内外装壁の耐震性に関する既往研究を踏まえ、本研究で地震による内外装壁の損傷との対応関係を明らかにする地震時の建物の応答の種類とその範囲について論じる。

3.1.1.節では、対応関係を明らかにする地震時の建物の応答の種類について論じる。

3.1.2.節では、対応関係を明らかにする地震時の建物の応答の範囲について論じる。

3.1.1. 建物の応答の種類

3.1.1.節では、対応関係を明らかにする地震時の建物の応答の種類について論じる。

地震時に内外装壁の損傷の要因となる建物の応答

「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」[1]¹によると、“非構造部材は地震時に構造骨組から床応答加速度による慣性力と構造骨組の層間変位による強制力を受ける。このほかにも考慮すべき荷重・外力はあるが、「指針」では主として慣性力と強制変形角とを考えた”とある。

つまり、地震時に内外装壁の損傷の要因となる建物の応答は、建物の層間変位と建物の揺れである。建物の層間変位は、内外装壁を強制的に変形させ、応力を発生させる。そして、建物の揺れは、内外装壁に慣性力を発生させる。

更に、層間変位は、壁の面内方向と面外方向の2つのベクトルに分けられる。そして、慣性力は、壁の面内方向と面外方向と鉛直方向の3つのベクトルに分けられる。

なお、「安心・安全ガラス設計施工指針」[2]²では、地震時のガラスの破損の原因として、層間変位と衝突物が挙げられている。衝突物とは、建物の中で、キャスター付きの什器がガラスに衝突し、その衝撃でガラスが割れることを指す。ただし、衝突物に関しては、建物の設計との関係性は薄いため、本研究では対象外とする。

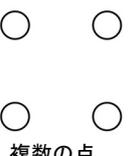
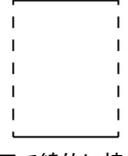
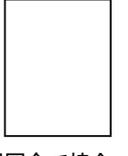
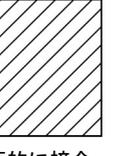
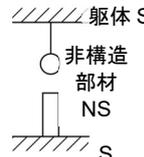
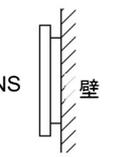
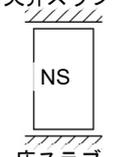
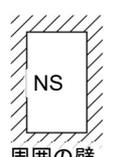
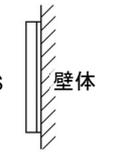
¹ 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

² 日本建築防災協会, 機能ガラス普及推進協議会. (2014). 安全・安心ガラス設計施工指針 増補版. 東京都: 日本建築防災協会

内外装壁と建物の応答の種類の関係性

「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」 [1]では、非構造部材（含む内外装壁）と構造部材の接合形態によって、建物の応答のそれぞれが与える影響力が異なることを説明している。表 3-1 に、非構造部材と構造部材の接合形態と建物の応答の関係を示す。

表 3-1 非構造部材（含む内外装壁）と構造部材の接合形態と建物の応答の関係³

タイプ	I	II	III	IV	V
非構造部材と構造部材の接合形態	 1点 線	 複数の点	 上下で線的に接合	 周囲全て接合	 面的に接合
実際の接合状態	 躯体 S 非構造部材 NS S	 NS 壁	 天井スラブ NS 床スラブ	 NS 周囲の壁	 NS 壁体
非構造部材の例	・天井から吊られた照明器具 ・自立した非構造部材	・カーテンウォール ・配管	・間仕切り壁	・窓 ・ドア ・分電盤	・タイル ・モルタル仕上げ ・吹付材
建物の応答	特に慣性力 (2方向)	面内方向の層間変位 面外方向の慣性力	面内方向の層間変位 面外方向の慣性力	周囲の枠の変形	下地構造材のひずみ

この考えに基づくと、本研究で対象とする LGS 間仕切り壁はタイプ III にあたり、面内方向の層間変位と、面外方向の慣性力が支配的ということになる。また、LGS 間仕切り壁の上張りボードだけに着目しても、そのカテゴリーはタイプ IV に当たり、下地すなわち下張りボードやスタッドのひずみが支配的ということになり、やはり面内方向の層間変位が支配的といえる。ALC 外壁はタイプ II にあたり、面内方向の層間変位と、面外方向の慣性力が支配的ということになる。窓と扉はタイプ IV にあたり、周囲の枠の変形が支配的ということになる。枠の変形は、主に面内方向の層間変位によりもたらされるため、面内方向の層間変位が支配的とも捉えられる。なお、米国の指針 [3]⁴でも、間仕切り壁や外壁は、慣性力の影響も受けるが、層間変位の影響が高いとされている。

³ 「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」を元に作成

⁴ Department of Homeland Security / Emergency Preparedness and Response Directorate / Federal Emergency Management Agency / Mitigation Division / Washington, D.C. (2003 年 1 月). HAZUS-MH MR1 ADVANCEED ENGINEERING BUILDING MODULE TECHNICAL and USER'S MANUAL. 参照日: 2022 年 7 月 25 日, 参照先: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-09/fema_hazus_advanced-engineering-building-module_user-manual.pdf

本研究で対応関係を明らかにする地震時の建物の応答の種類

「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」 [1]⁵に基づく、本研究で対象とする内外装壁はいずれも、面内方向の層間変位が損傷の発生に与える影響が大きいことになる。

また、「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」 [1]では、“慣性力に対しては、一部の内外装材を除けば、構造的な解析によって設計目標を達成することは比較的容易であると考えられる”とある。言い換えると、層間変位に対する内外装壁の耐震性の達成は、構造的な解析によって検討しにくいということである。そのため、層間変位に対しては、本研究で提案する、損傷や被害と建物の応答の対応関係を明らかにすることによる耐震性の達成が有用になると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、地震による内外装壁の損傷や被害との対応関係を明らかにする建物の応答の種類として、主に面内方向の層間変位を取り上げる。ただし、4章で後述するように、窓に関しては面内方向の慣性力に対する検討の重要性が考えられたため、これについても取り上げる。

⁵ 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

3.1.2. 建物の応答の程度

3.1.2.節では、対応関係を明らかにする地震時の建物の応答の範囲について論じる。

2.2.1.節で示した通り、構造部材については、建築基準法により中地震と大地震に対する耐震性の目標が示されている。そして、「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」 [1]⁶でも、この区分に対応した考え方を示している。そこで、以下では中地震と大地震の際に考えられる、建物の層間変位の程度について検討する。実際は、地震の規模と建物の応答には絶対的な関係は無く、建物の剛性に依存する面が大きいですが、ここではあくまで目安について論じる。

中地震の際に考えられる建物の層間変位の程度

建築基準法施行令第82条の2により、中地震に対する構造部材の設計目標として、各階に生じる層間変位が $1/200$ rad (構造耐力上主要な部分の変形によって建築物の部分に著しい損傷が生じる恐れのない場合にあっては $1/120$ rad) に収まることが定められている。そこで本研究では、中地震の際に考えられる建物の層間変位として、層間変形角 $1/200$ rad を想定する。

大規模の地震における層間変位の程度

大地震に対しては、超高層の建物を除き、層間変位の検討を行う義務は定められていない。ただし、既往研究により、中低層の鉄骨造建築物の設計時に時刻歴応答解析を行うと、大地震に対しては、鉄骨骨組の層間変形角が最大 $1/50$ rad を超える場合もあることが示されている [4]⁷。そこで本研究では、大地震の際に考えられる建物の層間変位として、層間変形角 $1/50$ rad を想定する。

本研究で検討する外力の程度

以上より、本研究では、層間変形角 $1/200$ rad から $1/50$ rad の範囲を含む、面内方向の層間変位中心に取り上げ、地震による内外装壁の損傷や被害との対応関係を明らかにする。

⁶ 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

⁷ 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所. (2019). 既存建築物の非構造部材の耐震診断指針・同解説. 東京都: 日本建築防災協会, 耐震改修支援センター.

3.2. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係を明らかにする方法

3.2.節では、地震による内外装壁の損傷と層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにするための方法について論じる。

3.2.1.節では、地震による内外装壁の損傷と層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにする上での、地震被害調査のメリットとデメリットについて論じる。

3.2.2.節では、地震による内外装壁の損傷と層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにする上での、実大実験による調査のメリットとデメリットについて論じる。

3.2.1. 地震被害調査による方法の検討

3.2.1.節では、地震による内外装壁の損傷と層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにする上での、地震被害調査のメリットとデメリットについて論じる。

地震被害調査の概要

損傷に関する情報を得る方法の一つに地震被害調査がある。2.1.1.節で説明した通り、大地震や、物的被害が特に顕著であった地震の際には、日本建築学会などにより地震被害調査が行われる。

地震被害調査のメリット

リアルな情報を得られる点

地震被害調査のメリットとして、内外装壁に発生した損傷について、リアルな情報を収集できる点がある。

多種多様な建物や内外装材の損傷の情報を得られる点

建物は基本的には一品生産で、まったく同じ建物はほぼ無い。そのため、地震被害調査では、多種多様な内外装壁について、発生した損傷の情報を得ることができる。

地震被害調査のデメリット

要因の分析が難しい点

地震被害調査のデメリットとして、損傷が発生した要因の分析が困難な点がある。地震の際に発生する損傷の原因には、建物の応答以外にも、施工の精度や経年劣化など、様々な要

因が重なることが想定される。また、他の内外装材や設備、什器などとの干渉によっても損傷が発生しうる。そのため、内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係だけ抽出して考えることは困難である。

外力の値の把握が困難である点

地震被害調査では、地震時の建物の応答の程度の把握が困難である。これは、地震時の建物の層間変位や揺れの正確な値を知るためには、事前に建物に計測器が設置されている必要があるためである。近年では、構造部材を対象としたヘルスマonitoring技術に関する技術開発が行われており、地震の際の建物の層間変位や揺れの計測を行っている建物も存在する [5]⁸。ただし、その数は少ないため、内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係を明らかにするためには不十分である⁹。

調査できる建物や内外装材の範囲が限られる点

2.1.2.節でも述べたが、LGS 間仕切り壁やドアについては室内に立ち入らないと損傷の観察ができない。そのため、建物の関係者でない限り実施不可能である。ALC 外壁や窓についても、至近距離での観察は実施不可能である。

また、実際の建物において、内外装材の下地は、仕上げ材もしくはその他の内外装材で覆われている場合が殆どである。そのため、下地側に損傷が発生したとしても、仕上げ材が脱落していない限り、目視での観察は不可能である。人力により仕上げ材を剥がして下地側の観察を行うことも考えられるが、剥がし方を工夫しない限り、剥がす工程で発生した損傷なのか、地震により発生した損傷なのか判別が難しくなる。

本研究の研究方法としての地震被害調査の是非

地震被害調査により収集された情報は、他の方法により収集された情報に対する「答え」になる。そのため、地震被害調査を行うことは必須となる。ただし、建物の応答の程度や下地側の損傷といった情報が収集しにくいデメリットもある。そのため、下地側も含めた損傷と建物の応答との対応関係を明らかにするという本研究の目的とは合致しない。このことから、本研究では地震被害調査を研究の主な方法とはしない。

⁸ 藤野陽三, 日本鋼構造協会. (2020). 構造物のモニタリング技術. 東京都: コロナ社.

⁹ ただし、今後計測器の導入数が増え、今後の地震において計測器が設置された建物で内外装壁の損傷が発生した場合、損傷と計測値を比較することで重要な知見が得られると考えられる。

3.2.2. 実大実験による方法の検討

3.2.2.節では、地震による内外装壁の損傷と層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにする上での、実大実験による調査のメリットとデメリットについて論じる。

実大実験の概要

地震による内外装壁の損傷に関する情報を得る方法として、地震時の状況を実験で再現するという事も考えられる。ここで、例えばボード材の試験片を対象とし、剛性などの物理特性を把握することを目的とした実験が要素実験や部材実験と呼ばれるのに対して、本研究では、実際の建物を模して壁として施工された内外装壁を対象とし、地震時の状況を再現する実験のことを実大実験と呼ぶ。

なお、内外装壁だけでなく、内外装壁が取り付く構造部材の部分まで実際の建物を模して施工された試験体であれば、地震時の状況をより再現できると言える。ただし、本研究では、構造部材が再現されていないものも実大実験に含めるとする。

実大実験のメリット

要因の分析が容易な点

実大実験では与える外力をコントロールできる。また、試験体の制作日と実験の実施日をコントロールできるため、経年劣化の影響は排除できる。更に、施工の精度についても施工段階から工事を確認し、必要に応じて検査を実施することで、ある程度の品質を持った試験体を作成できる。そして、実験前と実験後の状況の両方を比較できるため、純粹に与えた外力の影響だけ取り出して考えることができる。つまり、構造部材の部分まで実際の建物を模して施工された試験体であれば、建物の応答の影響だけを取り出して考えることができる。

建物の応答の計測が容易である点

実大実験では、与える外力をコントロールできるほか、計測器を試験体に事前に設置しておける。また、試験装置の制御可能な範囲においては、自由に層間変位や揺れを与えることができる。以上より、建物の応答の程度を把握することが容易である。

下地側を含めた至近距離での調査が可能な点

実大実験では、試験体の観察を至近距離から自由に行える。また、下地が露わになるように試験体を設計すれば、下地側の損傷を観察することも可能である。

実大実験のデメリット

リアルな情報を得られない点

地盤や基礎部分まで再現した試験体の作成はコスト的にも試験装置的にも非現実的である。そのため、実際の地震時の状況を完全に再現することはできず、実大実験の結果は、あくまで実験結果であり、実際の現象とは異なる可能性もある。そのため、地震被害調査の結果と実大実験の結果を比較し、実大実験の結果の妥当性を議論することが重要となる。

調査できる数が限られる点

建物を模した実物大の試験体を作成するには、新築の建物を建てるのと同等のコストが掛かる。また、加力にもコストが掛かるため、実大実験は部材実験のように大量に数をこなすことは難しい。そのため、汎用性の高い結果を得られるように試験体の仕様を一般的なものに統一するといった工夫が重要となる。

本研究の研究方法としての実大実験の是非

実大実験は、建物の応答の程度や下地側の損傷といった情報を収集できるため、本研究の目的と合致する。このことから、本研究では、実大実験を研究の主な方法とする。ただし、実験で得られた結果の妥当性を議論するため、2.1.節で説明した地震被害調査の結果と比較する（5.4.2.節の内容）。

なお、3.3.節（次節）では、本研究で実施する実大実験の計画に先立ち、地震による内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係について実大実験に基づく報告のある既往研究について調査した結果について説明する。

3.3. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係に関する既往研究

3.3.節では、地震による内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係について実大実験に基づく報告のある既往研究について調査した結果について説明する。

3.3.1.節では LGS 間仕切り壁を対象とした既往研究について説明する。

3.3.2.節では ALC 外壁を対象とした既往研究について説明する。

3.3.3.節ではドアを対象とした既往研究について説明する。

3.3.4.節では窓を対象とした既往研究について説明する。

3.3.1. LGS 間仕切り壁を対象とした既往研究

3.3.1.節では LGS 間仕切り壁を対象とした既往研究について説明する。

既往研究の一覧

以下の既往研究は、LGS 間仕切り壁の損傷と壁の面内方向の層間変位との対応関係に関する実大実験に基づく内容を含む。なお、それぞれの研究の説明は付録 4 にまとめた。

「軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能確認実験」(金子美香ら、2005) [6]¹⁰

「軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証」(加登美喜子ら、2007) [7]¹¹

「地震により損傷を受けた乾式間仕切り壁の耐火性能」(小野寺賢ら、2008) [8]¹²

「地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 その9 間仕切り壁および扉の挙動」(隈澤文俊ら、2010) [9]¹³

¹⁰ 金子美香, 神原浩, 塩原等, 寺田岳彦, 田村和夫. (2006). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能確認実験. 2005 年度日本建築学会 関東支部研究報告集, 76, 77-80.

¹¹ 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛. (2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139

¹² 小寺賢, 鈴木弘之, 大宮喜文, 鈴木淳一, 市原嵩紘, 村井亮介, 伊藤卓, 大熊晃一路. (2009). 地震により損傷を受けた乾式間仕切り壁の耐火性能: その1: 実験概要、観察結果. 2008 年度日本建築学会関東支部研究報告集, 79, 549-552.

¹³ 隈澤文俊, 脇山善夫, 加藤博人, 向井智久, 田尻清太郎, 安達和男. (2010). 地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験: その9 間仕切り壁および扉の挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 87-88.

「集合住宅における内装間仕切壁の面内加力実験」(三谷一房ら、2011) [10]¹⁴ [11]¹⁵

既往研究の分析

損傷に関する情報について

金子らや加登らの研究では、層間変位に対して発生する損傷を確認することが主な目的の一つであったため、損傷が発生した時の外力や損傷の発生箇所が明確に報告されており、損傷の写真も明瞭である。しかし、これらの研究では、下地の両側に石膏ボードを張っているため、下地の損傷の報告がない。

その一方で、小野寺らや三谷らの研究では、下地の損傷もされているが、損傷については簡潔な表現でまとめられており、位置の詳細までは報告されていない。限澤らの研究でも、損傷が発生した時の層間変位の値や位置の詳細までは報告されていない。

損傷と層間変位の対応関係に着目すると、それぞれの研究で正確に一致するわけではないことが分かる。この原因は、実験によって、壁の寸法や石膏ボードの厚みや枚数、石膏ボードの種類、石膏ボードの目地の仕上げ方が異なることだと考えられる。これらの整理のためには、パラメーターを絞った複数の実大実験の実施や、要素実験による検討が必要である。

試験体の形状について

試験体の形状に着目すると、全ての研究(実験)で、無開口の平坦な壁を対象としている。実際の建物では無開口の平坦な壁が、壁の耐部分を占めているため、その耐震性について把握することは非常に重要である。

また、開口部を有する壁の実験も多く行われている。2.1.2 節で紹介したように、開口部周辺には損傷が集中することが実際の地震の際に観察されている。そのため、開口部を有する壁の耐震性について把握することも重要である。

更に、コーナー部を有する壁の実験も多く行われている。実際の建物では、部屋の角部や柱との取り合いにおいて、途中でコーナー部を有する壁が多く使われる。そのため、コーナー部を有する壁の耐震性について把握することも重要である。

¹⁴ 三谷一房, 林徹, 河内武, 大内渉, 林幸輝. (2011). 集合住宅における内装間仕切壁の面内加力実験 : その1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 751-752.

¹⁵ 林徹, 三谷一房, 河内武, 大内渉, 林幸輝. (2011). 集合住宅における内装間仕切壁の面内加力実験 : その2 変形モードと損傷状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 753-754.

その一方で、梁から持ち出した壁の実験は行われていなかった。梁から持ち出した壁¹⁶は、商業建築など間仕切りの変更が多い建物で一般的に用いられるため、その耐震性について把握することは重要である。

構造部材の有無について

試験体の内外装壁の設置状況に着目すると、隈澤らの研究で行われた実験では、実際の建物を模した RC 骨組に内外装壁が設置されていた。その一方で、金子ら、加登ら、小野寺ら、三谷らの研究で行われた実験では、フレーム¹⁷に内外装壁が設置されていた。

実際の建物において、内外装壁は構造部材に設置される。そのため、内外装壁への加力は構造部材を介して行われる。そのため、フレームではなく、構造部材に内外装壁を設置した試験体の方が実態に即している。

また、地震時には内外装壁と構造部材の両方に損傷が発生しうる。そして、構造部材に損傷が発生した場合、内外装壁の損傷の有無に関わらず、建物の継続利用ができなくなる。つまり、同程度の外力に対して、内外装壁と構造部材の両方の損傷を確認できることが望ましい。実大実験においては、実験用のフレームではなく、実際の建物を模した構造部材に内外装壁を設置した試験体を用いるほうが得られる情報は多くなる。

¹⁶ 通常は、梁の直下に壁が設置される。

¹⁷ ピン接合された鉄骨の横架材と鉛直材により構成される、内外装材に層間変位を与える架構のこと。

3.3.2. ALC 外壁を対象とした既往研究

3.3.2.節では ALC 外壁を対象とした既往研究について説明する。

既往研究の一覧

以下の既往研究は、ALC 外壁の損傷と壁の面内方向の層間変位との対応関係に関する実大実験に基づく内容を含む。なお、それぞれの研究の説明は付録 4 にまとめた。

「ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究」(坂本功ら、1987) [12]¹⁸ [13]¹⁹ [14]²⁰

「ALC ロッキング構法実大変形成従性試験」(伊藤弘ら、1998) [15]²¹ [16]²² [17]²³ [18]²⁴ [19]²⁵

「現場タイル張り ALC パネル縦壁ロッキング構法の層間変形成従性能に関する実験的研究 その 1 層間変形成従性能試験結果」(永井昌志ら、1998) [20]²⁶

「現場タイル張り ALC パネルの層間変形成従性能に関する実験的研究 その 2 ロッキング構法へのタイル張り」(荻原達也ら、2002) [21]²⁷

¹⁸ 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎.(1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究 : その 1. 構法及び実験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 201-202.

¹⁹ 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎.(1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究 : その 2 平面試験体の試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 203-204.

²⁰ 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎.(1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究 : その 3. 立体試験体の試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 205-206.

²¹ 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 107-108.

²² 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 高橋光雄, 富田和男廣波純二, 伊藤弘, 西田和生、.(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 2 単層加力試験の結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 109-110.

²³ 西田和生, 伊藤弘, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 3 ALC パネルの動き. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 111-112.

²⁴ 水谷吉克, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 4 パネルのひびわれ状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 113-114.

²⁵ 相子恒夫, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 5 建具・シーリング材の状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 115-116.

²⁶ 永井昌志, 山崎健一, 河辺伸二.(1998). 現場タイル張り ALC 縦壁ロッキング構法の層間変形成従性能に関する実験的研究 : その 1. 層間変形成従性能試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 121-122.

²⁷ 荻原達也, 細内正紀, 横家尚, 横木光一郎.(2002). 現場タイル張り ALC パネルの層間変形成従性能に関する実験的研究 : その 2 ロッキング構法へのタイル張り. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 355-356.

「内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形追従性」(高橋大祐ら、2002) [22]²⁸ [23]²⁹

「ALC 帳壁部材の耐震安全性に関する基礎的研究(その 1. 実験概要および構法の違いによる影響)」(菊池雅史ら、2003) [24]³⁰

「高層建物の地震応答再現実験に組み込まれた ALC 外壁システムに関する概要高層建物の非構造部材・家具什器に関する E-ディフェンス振動実験 その 8」(鳥谷修平ら、2007) [25]³¹

「実大 4 層鉄骨造建物の振動台実験における外装材の耐震性能評価」(松岡祐一ら、2009) [26]³²

「超高層建物の地震応答を受ける ALC 版外壁の耐震性能 E-ディフェンス振動台実験」(長江拓也ら、2009) [27]³³

「集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討」(法身裕治ら、2016) [28]³⁴ [29]³⁵ [30]³⁶

²⁸ 高橋大祐, 橋本敏男, 池田賢, 清家剛. (2002). 内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形能試験 : その 1 研究概要及び試験方法. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 359-360.

²⁹ 清家剛, 池田賢, 高橋大祐, 橋本敏男. (2002). 内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形能試験 : その 2 試験結果及び考察. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 361-362.

³⁰ 菊池雅史, 小山明男, 小宮岳枝, 小林正人, 中山政則, 横家尚. (2003). ALC 帳壁部材の耐震安全性に関する基礎的研究 : その 1. 実験概要および構法の違いによる影響. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003, 195-196.

³¹ 鳥谷修平, 長江拓也, 福山國夫, 藤谷秀雄, 城戸史郎, 中谷成男, 梶原浩一, 中島正愛. (2007). 高層建物の地震応答再現実験に組み込まれた ALC 外壁システムに関する概要 : 高層建物の非構造部材・家具什器に関する E-ディフェンス振動実験-その 8. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2007, 565-566.

³² 松岡祐一, 吹田啓一郎, 山田哲, 島田侑子, 赤澤資貴, 松宮智央. (2009). 実大 4 層鉄骨造建物の震動台実験における外装材の耐震性能評価 . 日本建築学会構造系論文集, 641, 1353-1361. doi:10.3130/aijs.74.1353

³³ 長江拓也, 藤谷秀雄, 福山國夫, 梶原浩一, 城戸史郎. (2009). 超高層建物の地震応答を受ける ALC 版外壁の耐震性能 -E-ディフェンス振動台実験-. 日本建築学会技術報告集, 15(31), 667-672. doi:10.3130/aijt.15.667

³⁴ 法身裕治, 林徹, 太田匡信, 佐藤高行. (2016). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 1 試験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016, 889-890.

³⁵ 林徹, 法身裕治, 太田匡信, 佐藤高行. (2016). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 2 試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016, 891-892.

³⁶ 林徹, 法身裕治, 太田匡信, 佐藤高行. (2017). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 3 開口部まわりの挙動について. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017, 1139-1140.

既往研究の分析

損傷に関する情報について

LGS 間仕切り壁と比較し、研究の数は多いが、いずれも ALC 外壁の挙動を量的に評価することに重きを置いている。そのため、生じた損傷については、表に簡単にまとめる程度に留まっているものが多く、生じた位置やその原因について考察したものは少ない。特に、室外側と室内側（目視調査で容易に確認できない範囲）で損傷が分けて報告されていない

損傷と層間変位の対応関係に着目すると、大まかには、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ から $1/50 \text{ rad}$ にかけて ALC パネルのひび割れが発生し、それ以上の層間変形角では ALC パネルの脱落も発生しうることが示唆される。ただし、損傷と層間変位の対応関係が正確に一致するわけではないことが分かる。この原因は、LGS 間仕切り壁と同じく、実験ごとに、試験体の仕様が異なることだと考えられる。これらの整理のためには、パラメーターを絞った複数の実大実験の実施や、要素実験による検討が必要である。

試験体の形状について

試験体の形状に着目すると、全ての研究（実験）で、無開口の平坦な壁を対象としている。実際の建物では無開口の平坦な壁が、壁の耐部分を占めているため、その耐震性について把握することは非常に重要である。

また、開口部を有する壁の実験も多く行われている。開口部周辺には損傷が集中することが実際の地震の際に観察されているため、開口部を有する壁の耐震性について把握することは重要である。

構造部材の有無について

試験体の内外装壁の設置状況に着目すると、伊藤ら、鳥谷ら、松岡ら³⁷、長江らの研究で行われた実験では、実際の建物を模した鉄骨骨組に内外装壁が設置されていた。その一方で、坂本ら、永井ら、荻原ら、高橋ら、菊池ら、法身らの研究で行われた実大実験では、フレームに内外装壁が設置されていた。ただし、LGS 間仕切り壁に比べ、実建物を模した試験体を用いた実大実験が多く行われている。

³⁷ 松岡らの研究では、フレームに ALC 外壁を設置した試験体の加力実験も行っている。

3.3.3. ドアを対象とした既往研究

3.3.3.節ではドアを対象とした既往研究について説明する。

既往研究の一覧

以下の既往研究は、ドアの損傷と壁の面内方向の層間変位との対応関係に関する実大実験に基づく内容を含む。なお、それぞれの研究の説明は付録4にまとめた。

「8階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験」（後藤哲郎ら、1981） [31]³⁸ [32]³⁹

「日米共同大型耐震実験研究 56 鉄骨造実大6層建物による非構造部材の耐震実験 その7 ドアの実験結果」（西田和生ら、1986） [33]⁴⁰

「地震後に開放可能なRC・SRC造建物用鋼製ドア その2 RC壁の損傷を想定した耐震性試験」（渡辺博司ら、1997） [34]⁴¹

「ALC ロッキング構法実大変形追従性試験」（伊藤弘ら、1998） [15]⁴² [16]⁴³ [17]⁴⁴ [18]⁴⁵ [19]⁴⁶

³⁸ 後藤哲郎, 広沢雅也, 山下一也, 石塚忠行. (1981). 8階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験 : その9. ドア耐震性に関する実験概要及結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 56, 1695-1696.

³⁹ 後藤哲郎, 広沢雅也, 山下一也. (1981). 8階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験 : その10. ドア耐震性に関する実験結果の検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 56, 1697-1698.

⁴⁰ 西田和生, 伊藤弘, 坂本功, 山内泰之. (1986). 日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)56: 鉄骨造実大6層建物による非構造部材の耐震実験(その7. ドアの実験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 61, 311-312.

⁴¹ 渡辺博司, 佐藤謙和, 坪内信朗. (1997). 震後に開放可能なRC・SRC造建物用鋼製ドア : その2 RC壁の損傷を想定した耐震性試験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997, 941-942.

⁴² 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男. (1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 107-108.

⁴³ 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 高橋光雄, 富田和男, 廣波純二, 伊藤弘, 西田和生. (1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その2 単層加力試験の結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 109-110.

⁴⁴ 西田和生, 伊藤弘, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男. (1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その3 ALC パネルの動き. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 111-112.

⁴⁵ 水谷吉克, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男. (1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その4 パネルのひびわれ状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 113-114.

⁴⁶ 相子恒夫, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男. (1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その5 建具・シーリング材の状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 115-116.

「軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験」(金子美香ら、2006) [6]⁴⁷

「軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証」(加登美喜子ら、2007) [7]⁴⁸

「地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 その9 間仕切り壁および扉の挙動」(隈澤文俊ら、2010) [9]⁴⁹

「地震による建築物の損傷状況、機能維持に着目した実大試験体実験 その8 非構造 RC 外壁の計測概要と損傷状態」(北代尚稔ら、2010) [35]⁵⁰

既往研究の分析

開閉機能の低下について

1981年の後藤ら、1986年の西田らの研究(実験)では1/500 radなどの層間変位の時より開閉機能の低下が報告されているが、1997年の渡辺らの研究(実験)以降は、1/200 radの時より開閉機能が低下することが報告されている。なお、開閉機能の低下の原因としては、扉と扉枠の接触と、ラッチボルトとプレートとの接触であることが多くの研究で報告されている。そのため、開閉機能に関しては、開扉、解錠、ノブの回転の3つの機能に分けて検証する研究(実験)が多い。

除荷時の開閉機能について

また、西田らや金子らの研究(実験)では、ドアが設置された構造躯体や構造フレームの変形を0にした状態での開閉機能が検証されている。その一方で、実際の地震時では、揺れが収まった後にドアの開閉機能が正常であることが重要である。つまり、実験においては、加力後の除荷時の開閉機能が正常であるか検証することが重要となる。除荷時の開閉機能については、加登らや北代らの研究で検討されており、加登らの研究では層間変形角 1/50 radを経験した後の除荷時では正常に機能しないことが報告されている。

⁴⁷ 金子美香, 神原浩, 塩原等, 寺田岳彦, 田村和夫. (2006). 軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験. 2005年度日本建築学会 関東支部研究報告集, 76, 77-80.

⁴⁸ 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛. (2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139

⁴⁹ 隈澤文俊, 脇山善夫, 加藤博人, 向井智久, 田尻清太郎, 安達和男. (2010). 地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 : その9 間仕切り壁および扉の挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 87-88.

⁵⁰ 北代尚稔, 衣笠秀行, 向井智久, 加藤博人, 田尻清太郎, 脇山善夫, 隈澤文俊, 瀧川公策. (2010). 地震による建築物の損傷状況, 機能維持に着目した実大試験体実験 : その8 非構造 RC 外壁の計測概要と損傷状態. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 85-86.

開閉に要する力の計測について

渡辺ら、北代らの研究では、開扉に必要な力や、鍵やノブを回すのに必要な力の計測も行っている。実際にドアを使用する者は、それぞれ力が異なるため、開閉機能の検証を行う上では、このように定量的な評価による検証がより好ましい。他の研究では、主体的な評価に基づき開閉機能の検証を行っていると思われる。

3.3.4. 窓を対象とした既往研究

3.3.4.節では窓を対象とした既往研究について説明する。

既往研究の一覧

以下の既往研究は、窓の損傷と壁の面内方向の層間変位との対応関係に関する実大実験に基づく内容を含む。なお、それぞれの研究の説明は付録4にまとめた。

「はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 その1 単層静加力実験」(大枝千秋ら、1972) [36]⁵¹

「はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 その2 実建物にはめ込んで静的繰り返し変形を与えた場合」(大枝千秋ら、1972) [37]⁵²

「RC造実大7層試験体による窓ガラスの耐震安全性に関する実験」(西田和生ら、1982) [38]⁵³

「ALCロックンク構法実大変形追従性試験」(伊藤弘ら、1998) [15]⁵⁴

「木造軸組構法住宅の窓ガラス入りサッシュ付き壁と階段の静加力実験」(篠澤朋宏ら、2009) [39]⁵⁵

「実大4層鉄骨造建物の振動台実験における外装材の耐震性能評価」(松岡祐一ら、2009) [26]⁵⁶

⁵¹ 大枝千秋, 芹沢達, 大和久孝. (1972). はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 : その1. 単層静加力実験 : 構造. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 47, 513-514.

⁵² 大枝千秋, 芹沢達, 和泉正哲, 室田達郎. (1972). はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 : その2 実物建物にはめ込んで静的繰り返し変形を与えた場合 : 構造. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 47, 515-516.

⁵³ 西田和生, 伊藤弘, 坂本功. (1982). RC造実大7層試験体による窓ガラスの耐震安全性に関する実験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 57, 501-502.

⁵⁴ 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男. (1998). ALCロックンク構法実大変形追従性試験 : その1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 107-108.

⁵⁵ 篠澤朋宏, 五十田博, 村瀬伸吾, 森拓郎, 清水秀丸, 小松幸平. (2009). 木造軸組構法住宅の窓ガラス入りサッシュ付き壁と階段の静加力実験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009, 337-338.

⁵⁶ 松岡祐一, 吹田啓一郎, 山田哲, 島田侑子, 赤澤資貴, 松宮智央. (2009). 実大4層鉄骨造建物の振動台実験における外装材の耐震性能評価. 日本建築学会構造系論文集, 641, 1353-1361.

doi:10.3130/aijs.74.1353

「地震による建築物の損傷状況、機能維持に着目した実大試験体実験 その8 非構造 RC 外壁の計測概要と損傷状態」(北代尚稔ら、2010) [35]⁵⁷

既往研究の分析

損傷に関する情報について

窓の耐震性に着目した研究や、ガラスの耐震性に着目した研究は多く行われているが、損傷について発生位置や層間変位などの詳細まで報告したものの数は限られる。特に、サッシの損傷について図示により発生位置まで報告したものは見つからなかった。ガラスの損傷と違い、サッシの損傷は人的被害にはつながりにくいとも言えるが、建物の機能継続の上では無視できない損傷である可能性がある。

また、ガラスの損傷は、サッシとガラスの間のクリアランスの量に大きく依存するが、その数値を与えていないものも多くあった。特に、外壁の実験のついでに窓についても報告するものなどはこの傾向がみられる。研究によって損傷が発生する層間変形角が異なることの背景には、クリアランスの量が関係していると思われる。

開閉機能の低下に関する情報について

1998年の伊藤ら、2009年の松岡ら、2010年の北代らなどの実験では、開閉機能や施錠機能の報告も行われている。地震時には窓から避難することも考えられ、また、施錠機能が正常であることも防犯的に重要である。

加力方法について

また、「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」 [1]⁵⁸では、窓の損傷は、窓枠の変形によるものが支配的とされている。そして、損傷の報告がある実験を見ると、静的載荷で窓枠を変形させる実験が殆どである。その一方で、ガラスは窓の中で完全に固定されているわけではなく、弾性のシーリング材で固定されているだけあるため、窓枠の中を滑ることが知られている [2]⁵⁹。2009年の松岡らの研究では、動的加力を行った実験での報告がなされているが、層間変位による損傷と慣性力による損傷は区別されていない。

⁵⁷ 北代尚稔, 衣笠秀行, 向井智久, 加藤博人, 田尻清太郎, 脇山善夫, 隈澤文俊, 瀧川公策. (2010). 地震による建築物の損傷状況,機能維持に着目した実大試験体実験 : その8 非構造 RC 外壁の計測概要と損傷状態. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 85-86.

⁵⁸ 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

⁵⁹ 日本建築防災協会, 機能ガラス普及推進協議会. (2014). 安全・安心ガラス設計施工指針 増補版. 東京都: 日本建築防災協会

3.4. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係の明確化に向けた課題

3.4.節では、既往研究を踏まえ、本研究で取り組む具体的な課題について論じ、本研究で実施する実大実験に求められる条件について説明する。

LGS 間仕切り壁に関する課題と実大実験に求められる条件

まず、下地の損傷の検討が課題として挙げられる。そのため、本研究で実施する実大実験の試験体では、下地の両面に石膏ボードを張るのではなく、片面にのみ張った壁設計にすることが求められる。なお、実際の建物においても、外壁材の室内側に設置する LGS 間仕切り壁など、片面にしか石膏ボードを張らない場合が存在する。次に、梁から持ち出した壁の検討が課題として挙げられる。そのため、本研究で実施する実大実験では、これまでの研究でも検討されてきた無開口の平坦な壁や、開口部を有する壁に加えて、梁から持ち出した壁も試験体に含めることが求められる。

ALC 外壁に関する課題と実大実験に求められる条件

ALC 外壁を対象とした研究の数は、LGS 間仕切り壁を対象とした研究の数より多く、耐震性についての情報は比較的多く集まっている。ただし、層間変位との対応関係や、損傷の位置に関する更なる情報収集が課題である。特に、室外側と室内側の損傷を分けて考えることが課題として挙げられる。そのため、本研究で実施する実大実験の試験体では、ALC 外壁の室内側も観察できるよう設計にすることが求められる。また、これまでの研究でも検討されてきた無開口の平坦な壁と開口部を有する壁を試験体とすることが求められる。

ドアに関する課題と実大実験に求められる条件

開閉機能について、開扉、解錠、ノブの回転の3つの機能に分けて、主観による評価と定量的な評価の両方により検証し、損傷と層間変位との対応関係に関する更なる情報を収集することが課題である。また、実大実験では、除荷後の開閉機能も検証できることが求められる。また、開閉機能以外の損傷については、診断の観点を含めた検討ができることが求められる。

窓に関する課題と実大実験に求められる条件

サッシ部分を含め、損傷の位置の詳細や、層間変位や慣性力との対応関係に関する検討が課題である。また、ガラスの損傷については、ガラスと窓枠のクリアランスの量などの各種

寸法を明確に示し、その数値との関係性を議論することが課題である。また、実大実験については、ドアと同様に、開閉機能や施錠機能について検討できることが求められる。また、開閉機能以外の損傷については、診断の観点を含めた検討ができることが求められる。

その他の課題と実大実験に求められる条件

損傷の表現の統一

研究によって、同じ損傷を指すと考えられるが、その呼び方が異なる場合があった⁶⁰。また、同じ発生位置を指すと考えられるが、その呼び方が異なる場合もあった⁶¹。このように、用語が統一されていないと、各研究の成果を統合した検討を行えなくなる。そのため、実験を通じて、同じ損傷を指す用語を統一することが課題であり、実大実験の実施において求められる。

加力方法の範囲

本研究で実施する実大実験では、面内方向の層間変位（層間変形角 1/200~1/50 rad を含む範囲）を中心に加力を行うことが求められる。

構造部材への内外装壁の設置

内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係を把握するため、構造部材に内外装壁を設置した試験体を用いることが求められる。また、層間変位の影響だけ取り出して考えられるようにするためには、まずは、比較的降伏しにくい鉄骨造の骨組に内外装壁を設置した試験体が好ましい。ただし、RC 造の建物も多く存在することを考えると、RC 造の骨組に内外装壁を設置した試験体の実施も次点で求められる。

診断についての考慮を含むこと

いずれの既往研究においても、診断の観点を含めた検討は行われていなかった。そのため、本研究時で実施する実大実験では、診断の観点も含めた検討を行えるようにすることが求められる。具体的には、内外装壁の下地側（通常は他の部材で隠される部位）も極力、目視観察できるようにすることが求められる。

⁶⁰ 例えば、「ひび割れ」と「クラック」など。

⁶¹ 例えば、「上部」、「角部」、「隅部」など。

3章の小括

3章では、内外装壁の耐震性に関する既往研究の調査を踏まえ、本研究で対象とする地震時の建物の応答や取り組む具体的な課題について論じ、実施する実大実験に求められる条件について説明した。

まず、3.1節では、内外装壁の耐震性に関する既往研究を踏まえ、本研究で地震による内外装壁の損傷との対応関係を明らかにする地震時の建物の応答の種類とその範囲について論じた。本研究では、層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ から $1/50 \text{ rad}$ の範囲を含む、面内方向の層間変位中心に取り上げ、地震による内外装壁の損傷や被害との対応関係を明らかにする。

次に、3.2節では、地震による内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係を明らかにするための方法について論じた。本研究では、建物の応答の程度や下地側の損傷といった情報を収集できる実大実験を研究の主な方法とする。

次に、3.3節では、地震による内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係について実大実験に基づく報告のある既往研究について調査した結果について説明した。

最後に、3.4節では、既往研究を踏まえ、本研究で取り組む具体的な課題について論じ、本研究で実施する実大実験に求められる条件について説明した。本研究で実施する実大実験は、下記の要件を満たすものとする。

- ・ 内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係について下地まで含めた検討ができること
- ・ 壁の面内方向の層間変位 ($1/200\sim 1/50\text{rad}$) を中心とした建物の応答の検討ができること
- ・ 構造部材 (鉄骨造と RC 造) に内外装壁を設置したものを試験体とすること
- ・ LGS 間仕切り壁は、無開口の平坦な壁、開口部を有する壁、梁から持ち出した壁を試験体とすること
- ・ ALC 外壁は、無開口の壁と開口部を有する壁を試験体とすること
- ・ ドアと窓は、開閉機能の低下について、除荷時も含め、定性的、定量的な検討ができるようにすること

以上、3章では、内外装壁の耐震性に関する既往研究の調査を踏まえ、本研究で取り組む具体的な内容について論じ、実施する実大実験に求められる条件について説明した。

これに対して4章では、求められる条件を踏まえて計画した、4つの実大実験の概要について説明する。

3章 参考文献

- [1] 日本建築学会.(2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.
- [2] 日本建築防災協会, 機能ガラス普及推進協議会.(2014). 安全・安心ガラス設計施工指針 増補版. 東京都: 日本建築防災協会
- [3] Department of Homeland Security / Emergency Preparedness and Response Directorate / Federal Emergency Management Agency / Mitigation Division / Washington, D.C. (2003年1月). HAZUS-MH MR1 ADVANCED ENGINEERING BUILDING MODULE TECHNICAL and USER'S MANUAL. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-09/fema_hazus_advanced-engineering-building-module_user-manual.pdf
- [4] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所.(2019). 既存建築物の非構造部材の耐震診断指針・同解説. 東京都: 日本建築防災協会, 耐震改修支援センター.
- [5] 藤野陽三, 日本鋼構造協会.(2020). 構造物のモニタリング技術. 東京都: コロナ社.
- [6] 金子美香, 神原浩, 塩原等, 寺田岳彦, 田村和夫.(2006). 軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験. 2005年度日本建築学会 関東支部研究報告集, 76, 77-80.
- [7] 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛.(2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139
- [8] 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛.(2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139
- [9] 小寺賢, 鈴木弘之, 大宮喜文, 鈴木淳一, 市原嵩紘, 村井亮介, 伊藤卓, 大熊晃一路.(2009). 地震により損傷を受けた乾式間仕切壁の耐火性能: その1: 実験概要、観察結果. 2008年度日本建築学会関東支部研究報告集, 79, 549-552.
- [10] 隈澤文俊, 脇山善夫, 加藤博人, 向井智久, 田尻清太郎, 安達和男.(2010). 地震によるRC造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験: その9 間仕切り壁および扉の挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 87-88.
- [11] 三谷一房, 林徹, 河内武, 大内渉, 林幸輝.(2011). 集合住宅における内装間仕切壁の面内加力実験: その1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 751-752.
- [12] 林徹, 三谷一房, 河内武, 大内渉, 林幸輝.(2011). 集合住宅における内装間仕切壁の

面内加力実験：その2 変形モードと損傷状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 753-754.

- [13] 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎.(1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究：その2 平面試験体の試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 203-204.
- [14] 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎.(1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究：その3. 立体試験体の試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 205-206.
- [15] 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験：その1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 107-108.
- [16] 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 高橋光雄, 富田和男廣波純二, 伊藤弘, 西田和生、.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験：その2 単層加力試験の結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 109-110.
- [17] 西田和生, 伊藤弘, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験：その3 ALC パネルの動き. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 111-112.
- [18] 水谷吉克, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験：その4 パネルのひびわれ状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 113-114.
- [19] 相子恒夫, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験：その5 建具・シーリング材の状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 115-116.
- [20] 永井昌志, 山崎健一, 河辺伸二.(1998). 現場タイル張り ALC 縦壁ロッキング構法の層間変形追従性能に関する実験的研究：その1. 層間変形追従性能試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 121-122.
- [21] 荻原達也, 細内正紀, 横家尚, 横木光一郎.(2002). 現場タイル張り ALC パネルの層間変形追従性能に関する実験的研究：その2 ロッキング構法へのタイル張り. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 355-356.
- [22] 高橋大祐, 橋本敏男, 池田賢, 清家剛.(2002). 内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形能試験：その1 研究概要及び試験方法. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 359-360.
- [23] 清家剛, 池田賢, 高橋大祐, 橋本敏男.(2002). 内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形能試験：その2 試験結果及び考察. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1,

361-362.

- [24] 菊地雅史, 小山明男, 小宮岳枝, 小林正人, 中山政則, 横家尚. (2003). ALC 帳壁部材の耐震安全性に関する基礎的研究 : その 1. 実験概要および構法の違いによる影響. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003, 195-196.
- [25] 鳥谷修平, 長江拓也, 福山國夫, 藤谷秀雄, 城戸史郎, 中谷成男, 梶原浩一, 中島正愛. (2007). 高層建物の地震応答再現実験に組み込まれた ALC 外壁システムに関する概要 : 高層建物の非構造部材・家具什器に関する E-ディフェンス振動実験-その 8. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2007, 565-566.
- [26] 松岡祐一, 吹田啓一郎, 山田哲, 島田侑子, 赤澤資貴, 松宮智央. (2009). 実大 4 層鉄骨造建物の震動台実験における外装材の耐震性能評価 . 日本建築学会構造系論文集, 641, 1353-1361. doi:10.3130/aijs.74.1353
- [27] 長江拓也, 藤谷秀雄, 福山國夫, 梶原浩一, 城戸史郎, “超高層建物の地震応答を受ける ALC 版外壁の耐震性能 -E-ディフェンス振動台実験-,” 日本建築学会技術報告集, 第 15 巻, 第 31, pp. 667-672, 2009.
- [28] 法身祐治, 林徹, 太田匡信, 佐藤高行, “集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 1 試験の概要,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第 16 巻, pp. 889-890, 2016.
- [29] 林徹, 法身祐治, 太田匡信, 佐藤高行, “集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 2 試験結果,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第 16 巻, pp. 891-892, 2016.
- [30] 林徹, 法身祐治, 太田匡信, 佐藤高行, “集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 3 開口部まわりの挙動について,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第 17 巻, pp. 1139-1140, 2017.
- [31] 後藤哲郎, 広沢雅也, 山下一也, 石塚忠行. (1981). 8 階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験 : その 9. ドア耐震性に関する実験概要及結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 56, 1695-1696.
- [32] 後藤哲郎, 広沢雅也, 山下一也. (1981). 8 階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験 : その 10. ドア耐震性に関する実験結果の検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 56, 1697-1698.
- [33] 西田和生, 伊藤弘, 坂本功, 山内泰之. (1986). 日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)56 : 鉄骨造実大 6 層建物による非構造部材の耐震実験(その 7. ドアの実験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 61, 311-312.
- [34] 渡辺博司, 佐藤謙和, 坪内信朗. (1997). 震後に開放可能な RC・SRC 造建物用鋼製ドア : その 2 RC 壁の損傷を想定した耐震性試験. 日本建築学会大会学術講演梗概集,

1997, 941-942.

- [35] 北代尚稔, 衣笠秀行, 向井智久, 加藤博人, 田尻清太郎, 脇山善夫, 隈澤文俊, 瀧川公策. (2010). 地震による建築物の損傷状況,機能維持に着目した実大試験体実験 : その8 非構造 RC 外壁の計測概要と損傷状態. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 85-86.

4章 内外装壁の実大実験の概要

4.1. 実験の全体像.....	90
4.1.1. 実験の目的.....	90
4.1.2. 各実験に共通する特徴.....	92
4.2. 各実験の概要.....	94
4.2.1. 層間変位に関する実験（実験①と②）の概要.....	94
4.2.2. 異種の構造部材の層間変位に関する実験（実験③）の概要.....	110
4.2.3. 層間変位と慣性力に関する実験（実験④）の概要.....	116
4章の小括.....	122
4章の参考文献.....	123

4章では、3章の内容を踏まえて計画した、地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることを目的とする4つの実大実験の概要について説明する。

4.1.節では、実験の目的と各実験に共通する特徴について説明する。

4.2.節では、各実験の試験体や加力方法について説明する。

4.1. 実験の全体像

4.1.節では、実験の目的と各実験に共通する特徴について説明する。

4.1.1.節では、実験の目的について説明する。

4.1.2.節では、各実験に共通する特徴について説明する。

4.1.1. 実験の目的

4.1.1.節では、実験の目的について説明する。

実験の名称

本研究では、地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位（以降、層間変位）を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることを目的とする 4 つの実大実験（以降、実験）を実施した。4 つの実験の名称を下記に示す。

実験① LGS 間仕切り壁の層間変位に対する損傷確認実験

実験② ALC 外壁とドアと窓の層間変位に対する損傷確認実験

実験③ LGS 間仕切り壁とドアの RC 架構の層間変位に対する損傷確認実験

実験④ 窓の層間変位と慣性力に対する損傷確認実験

なお、実験①と実験②については、八木の修士論文 [1]¹でも取り扱っている。

¹ 八木尚太郎. (2018). 地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究 ―乾式間仕切り壁と ALC 外壁を対象とした実大載荷実験を通して―. 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻.

実験の目的

実験①と実験②は、鉄骨骨組に LGS 間仕切り壁、ALC 外壁、ドア、窓を設置した試験体に対して静的に加力することで、内外装壁の損傷と層間変位との対応関係を明らかにすることを目的とする。

実験③は、実験①と②の結果を踏まえて計画したもので、RC 造の架構（含む RC 壁）に LGS 間仕切り壁とドアを設置した試験体に対して静的に加力することで、損傷と異種の構造部材の層間変位との対応関係を明らかにすることを目的とする。

実験④は、実験②の結果を踏まえて計画したもので、RC 骨組に窓を設置した試験体に対して振動台により動的に加力することで、損傷と層間変位と慣性力との対応関係を明らかにすることを目的とする。なお、一軸の振動台実験とし慣性力も壁の面内方向のみに与える。

このように、4つの実験は、層間変位に関する実験、異種の構造部材の層間変位に関する実験、層間変位と慣性力に関する実験の3種類に分けることができる。図 4-1 に、4つの実験の概要を示す。

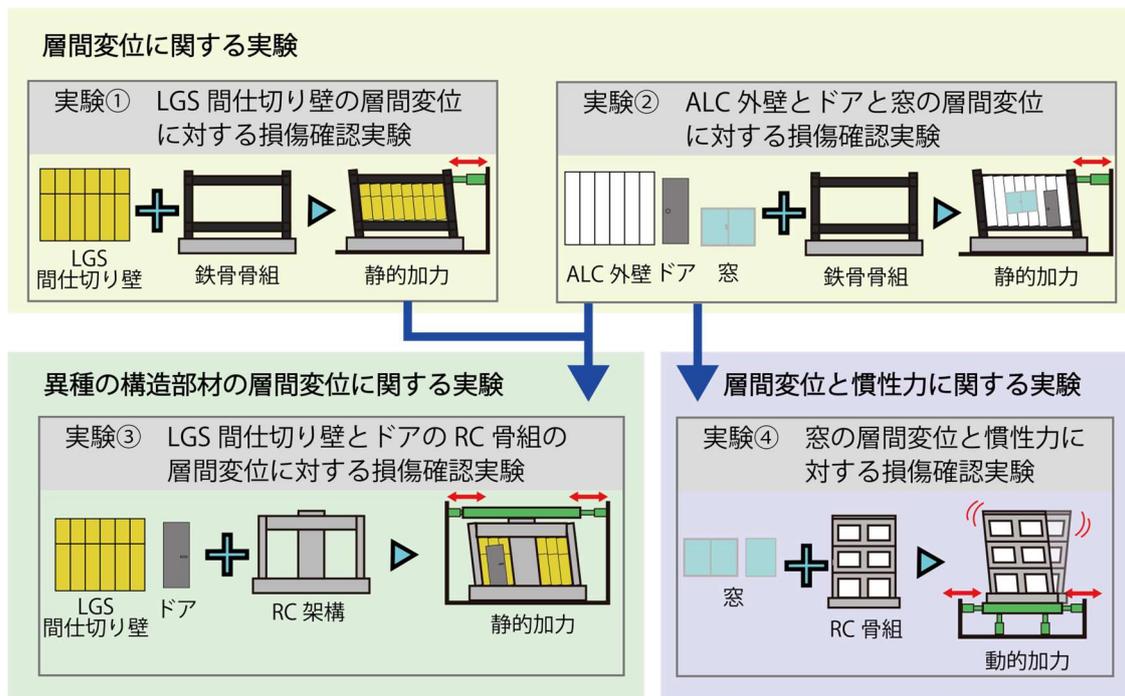


図 4-1 実験の概要

4.1.2. 各実験に共通する特徴

4.1.2.節では、各実験に共通する特徴について説明する。

試験体に関する特徴

試験体の材料・施工方法に関する特徴

試験体に設置する内外装壁は、材料、道具、手法ともに、実際の建物で一般的に採用されるものを用いて制作されたものである。施工は公共建築工事標準仕様書に準拠して行われた [2]²。使用する建材は、実験の再現性や得られる成果の汎用性を考慮し JIS 規格品を中心とした。

試験体の形状に関する特徴

内外装壁の形状は、得られる成果の汎用性を考慮し、特殊な形状（例えば湾曲した壁や、異形ガラスを有する窓など）ではなく、建物において一般的に見られる形状（無開口の平坦な壁、開口部を有する壁、梁から持ち出した壁など）とした。

加力方法に関する特徴

地震時の状況に限りなく近い状況を再現することが求められる実験（例えば [3]³）であれば、振動台を用いて地震動を模した3方向からの加力を行うべきである。ただし、地震動は3方向の複雑な波形で表されるため、振動台を用いて地震動を模した加力を行うと、どの程度の、どの建物の応答に対して、どの損傷が発生したのかの評価が困難になる。

そのため、本研究で実施する実験では加力を単純化させる。具体的には、加力は一方向からのみ（内外装壁の面内方向のみ）とする。特に、実験①、②、③（静的な加力を行う実験）では、加力の履歴は地震動を模したものとせず、パターン化させたものとする。それぞれの実験の加力方法の詳細については 4.2.節で説明する。

² 国土交通省大臣官房官庁営繕部. (2022年5月10日). 公共建築工事標準仕様書（建築工事編）令和4年版. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: <https://www.mlit.go.jp/common/001473539.pdf>

³ 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 荒井智一, 金井貴浩, 高岡昌史, 岩下裕樹, 吉澤睦博, 壁谷澤寿海, 清家剛, 山田哲, 福山洋, 太田勤, 江口亨, 伊山潤, 石原直, 磯部大吾郎. (2015). 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のための E-ディフェンス加振実験 報告書. 防災科学技術研究所研究資料(391).

観察方法に関する特徴

損傷の発生や進行状況について、建物の応答との対応関係を把握するため、加力の程度ごとに損傷の目視観察を行う。また、除荷した際にも観察を行う。それぞれの実験の観察方法のタイミングなどについては4.2節で説明する。

観察の際には、仕上げ側と下地側の両面に対して、目視観察を行いスケッチと写真撮影により記録する。図4-2に、実験③におけるスケッチの例を示す。

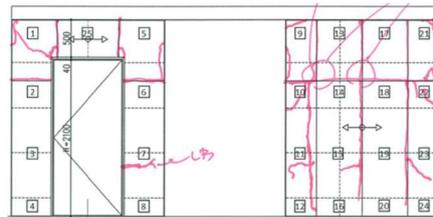


図4-2 スケッチの例

写真撮影においては、損傷のクローズアップ写真だけでなく、試験体の機械的な撮影も行う。ここで、機械的な撮影とは、試験体を事前に区分し、区分した各箇所を複数人で、損傷の有無に関わらず撮影することを指す。例えば実験③では、仕上げ側を25箇所、下地側を41箇所区分した⁴。図4-3に区分を示す。これにより、新しい損傷が見つかった際に、その前の加力状態で撮影した写真を確認することができ、損傷の発生したタイミングを正確に把握することができる。

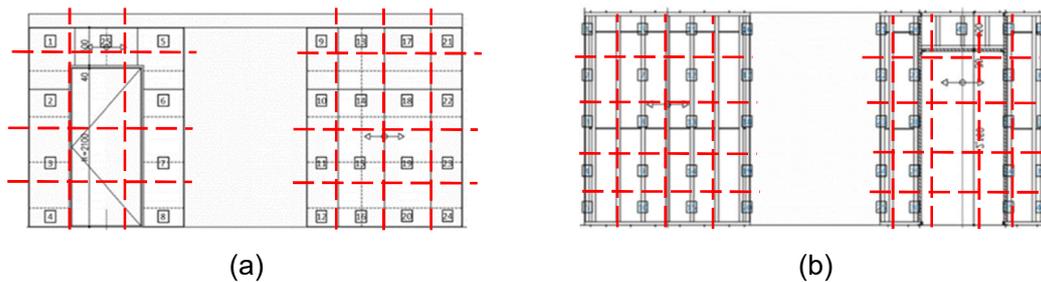


図4-3 試験体を区分した例
(a) 仕上げ側, (b) 下地側

⁴ LGS 間仕切り壁など、仕上げ側と比較して下地側が立体的な構成となる場合は、若干斜め方向から撮影する必要があるため、全面を撮影するためには下地側の枚数の方が多くなる。

4.2. 各実験の概要

4.2.節では、各実験の試験体や加力方法について説明する。

なお、付録 14 に各試験体の詳細な図面を掲載した。

4.2.1.節では、層間変位に関する実験（実験①と②）について説明する。

4.2.2.節では、異種の構造部材の層間変位に関する実験（実験③）について説明する。

4.2.3.節では、層間変位と慣性力に関する実験（実験④）について説明する。

4.2.1. 層間変位に関する実験（実験①と②）の概要

4.2.1.節では、層間変位に関する実験（実験①と②）について説明する。

実験①（LGS 間仕切り壁の層間変位に対する損傷確認実験）の概要

実験①の目的

鉄骨骨組に LGS 間仕切り壁を設置した試験体に対して静的に加力することで、損傷と層間変位との対応関係を明らかにすることを目的とする。

実験①の試験体

実際の建物では無開口の平坦な壁が壁の耐部分を占めているため、その耐震性について把握することは非常に重要である。また、開口部周辺には損傷が集中することが実際の地震の際に観察されているため、開口部を有する壁の耐震性について把握することも重要である。更に、商業建築など間仕切りの変更が多い建物で一般的に用いられる梁から持ち出した壁について把握することも重要である。以上を踏まえ、LGS 間仕切り壁の形状は、無開口の平坦な壁、開口部を有する壁、加力方向に直交する壁⁵、そして梁から持ち出した壁とする。これらの形状を取る LGS 間仕切り壁を鉄骨骨組に設置し、試験体とした。開口部を有する壁には扉枠まで設置した（扉は設置していない）。

鉄骨骨組は中低層鉄骨造建物の一部分をイメージして設計されている。階高 3500mm 長辺 6000mm 短辺 2500mm の 1 層 1×1 スパンのラーメン骨組であり、上下の梁にはいずれもコンクリートスラブが設置されている。鉄骨柱頭の南側には 2 台のオイルジャッキが接続されており南北方向に加力する。なお、鉄骨骨組の詳細については既報 [4]⁶で報告している。

⁵ この壁は梁の直下にはないが天井スラブに直接接合されているため、梁から持ち出した壁とも性質がことなる。また、この壁は壁の面外方向の層間変位との対応関係について検証しているとも捉えられる。

⁶ Ishida Takanori, Tenderan Randy, Kohtaki Keita, Kishiki Shoichi, Iyama Jun, Hasegawa Takashi, Seike Tsuyoshi,

この鉄骨骨組に計6面（それぞれ壁A～壁Fと称す）のLGS間仕切り壁を設けた。鉄骨骨組の東側構面には全面無開口の平坦な壁（壁A）を、西側構面には直交壁（壁B）、開口部を有する壁（壁C）、梁から持ち出した壁（壁D、壁E、壁F）を配置した。なお、直交壁（壁B）は加力方向に直交して設けられた壁であり、上部のランナーはスラブに接合されている。また梁から持ち出した壁（壁D、壁E）は梁直下にはなく、加力方向に直交する梁の直下にある壁Fとともに、梁から持ち出だされている壁を構成しており、平面的にはクランクした形状となっている。いずれの壁も試験体外側がLGS間仕切り壁の仕上げ側、試験体内側が下地側となるように配置した。図4-4に、試験体の平面図を示す。平面図において左向きが北方向を示す。

なお、梁からの持ち出しスパンはメーカー及び施工者との意見交換を通じ、実際の設計で採用されている値を踏まえて550mmと設定した。

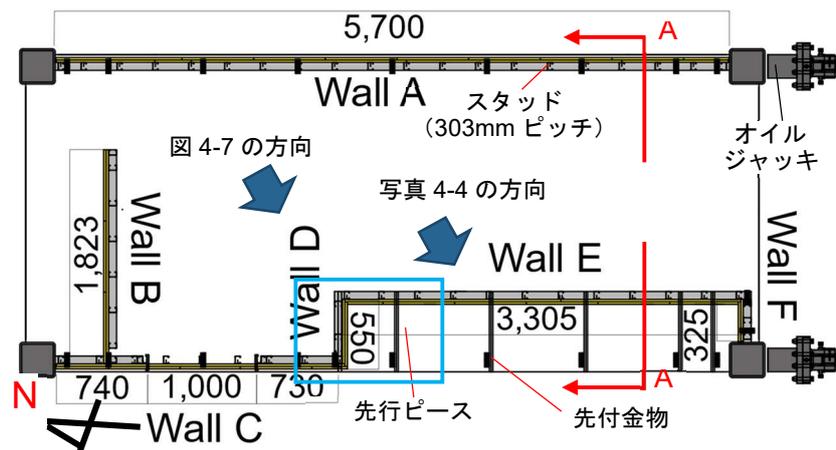


図4-4 平面図（単位：mm）

図 4-5 に東側の立面図を、図 4-6 に西側の立面図を、図 4-7 に断面図を示す。

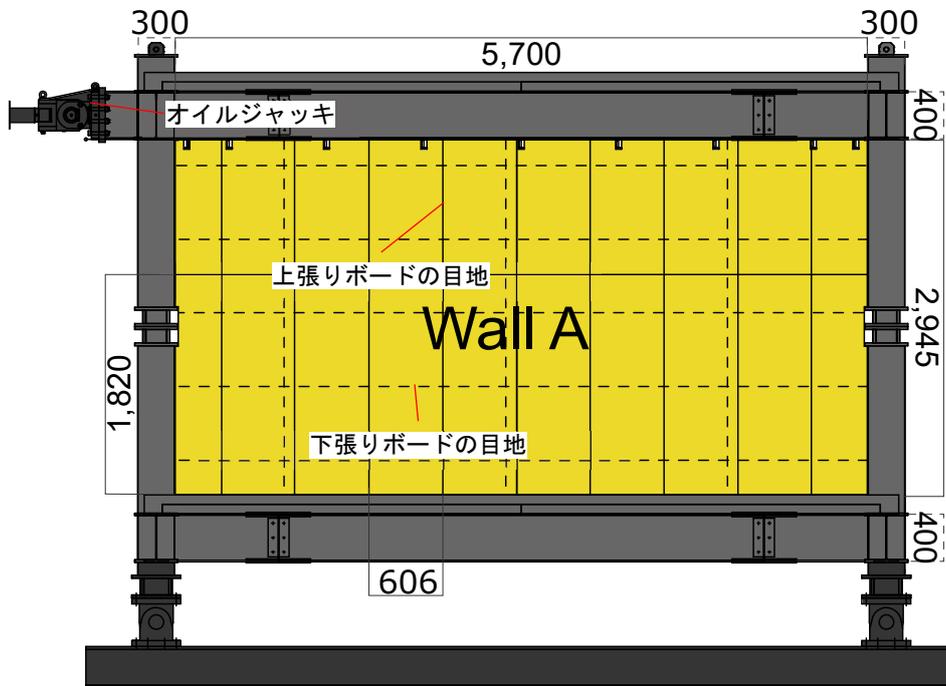


図 4-5 東側の立面図

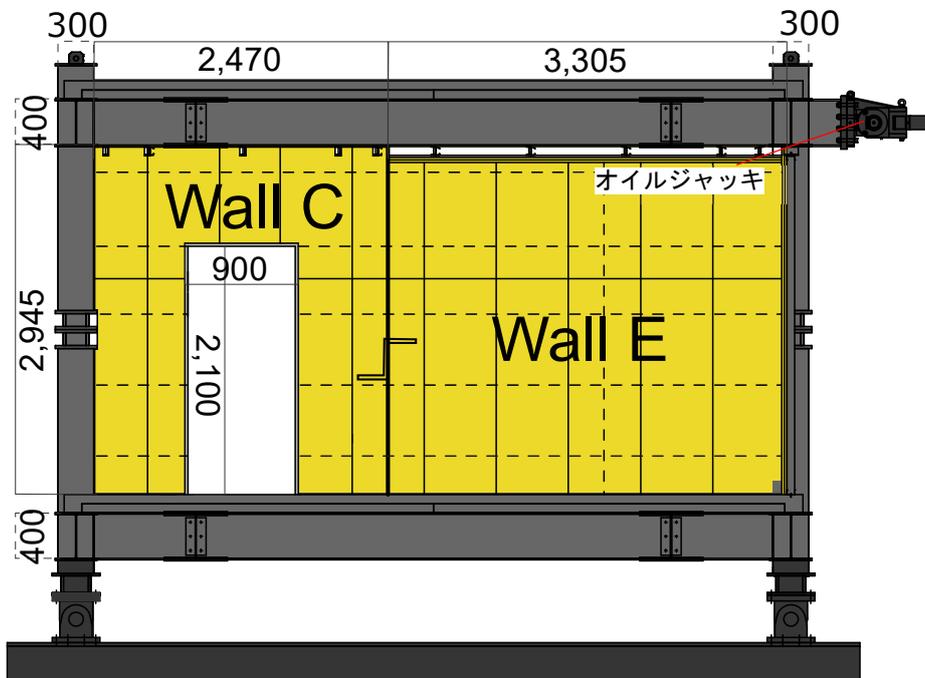


図 4-6 西側の立面図

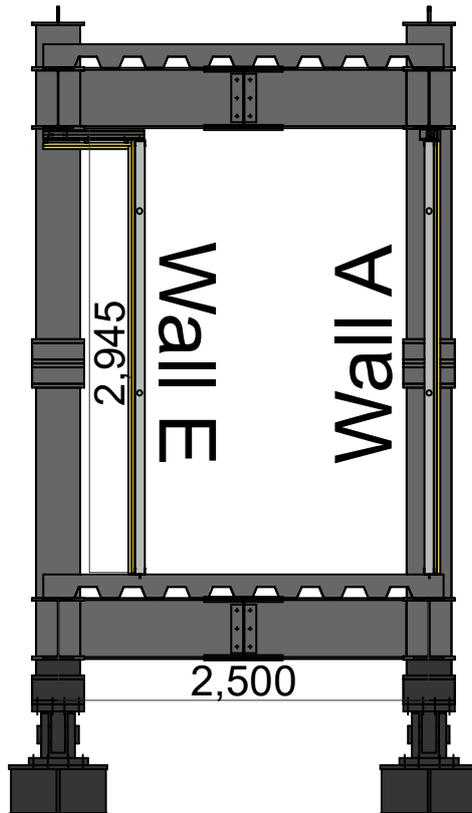


図 4-7 A-A 断面図

そして、写真 4-1 に、北西方向からの試験体外観を示す。開口部を有する壁（壁 C）と、奥に梁から持ち出された壁（壁 E）が見える。写真 4-2 に、梁から持ち出された壁（壁 E）を内側から見た様子を示す。

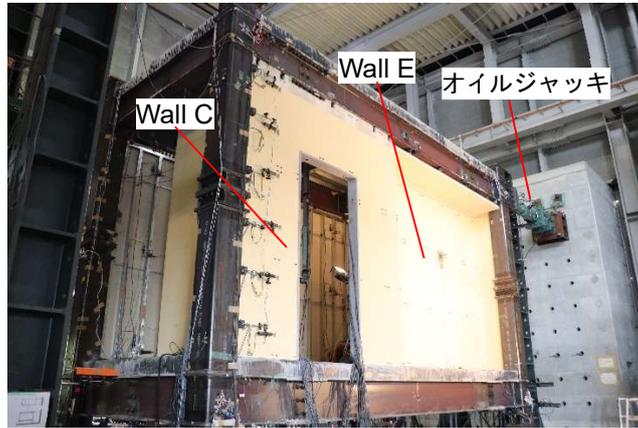


写真 4-2 北西方向からの試験体外観

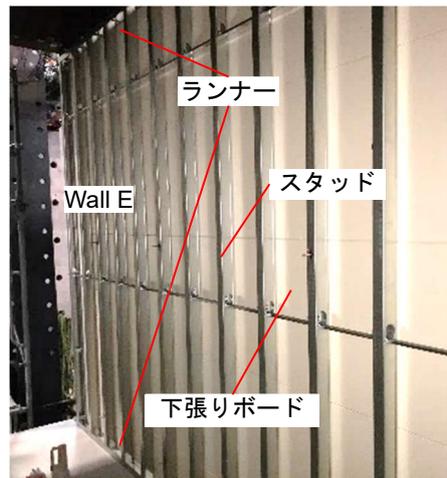


写真 4-3 下地側の様子

実験①の LGS 間仕切り壁の仕様

LGS 間仕切り壁は公共工事標準仕様書に準拠した仕様となっている。上下のランナーの間にはスタッドを 303mm 間隔で配置し、この下地の外部の面に厚さ 21mm の強化石膏ボードを片面 2 枚張り（下張りは横張、上張りは縦張とした）⁷、耐火仕様としている。梁や下側のスラブなど上張りボードの周囲の取り合い部分にシーリング材を充填し、特に鉄骨骨組との間には 5mm の隙間を設け充填した。壁 B～F は上張りボードの目地を埋め、塗装を施している。LGS 間仕切り壁の製作完了から実験開始までの日数は 11 日であった。

⁷ 3 章の議論を踏まえ、下地側の損傷を観察できるように石膏ボードは片面張りとした。

実験①の梁から持ち出した壁の詳細

図 4-8 に、試験体の梁から持ち出した壁（壁 D、壁 E）の下地側からの様子を立体的に示す。図 4-9 に、梁から持ち出した壁のクランクした形状の部分（図 4-3 で水色の線で囲った部分）を拡大した様子を示す。写真 4-3 に、クランク下形状の部分を見上げた様子を示す。

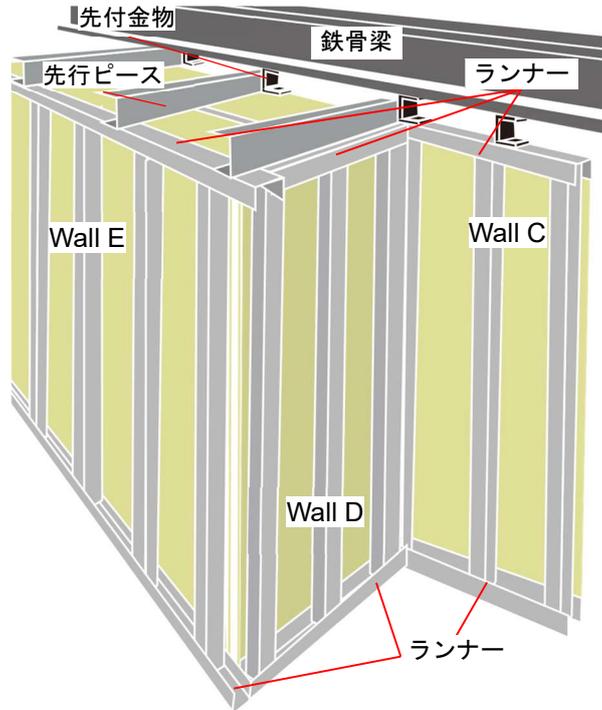


図 4-8 壁 D を下地側から見た様子

図 4-8 と写真 4-4 の方向

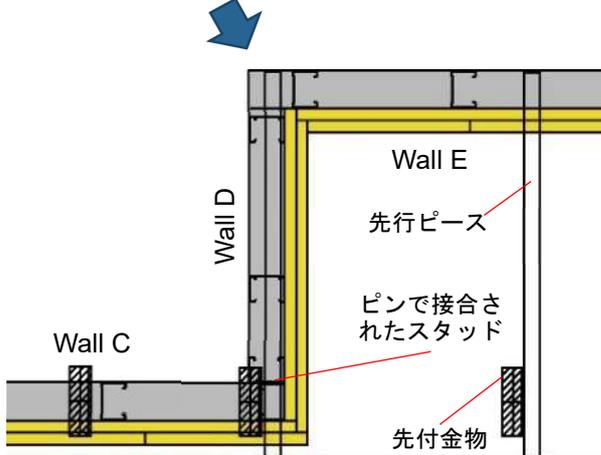


図 4-9 梁から持ち出した壁のクランクした形状の部分の詳細

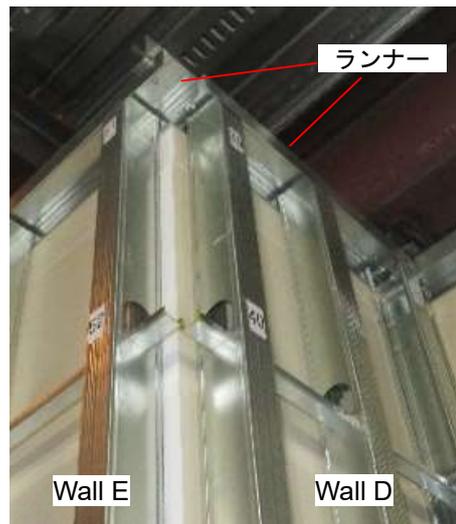


写真 4-4 壁 D を下地側から見た様子

ここで、梁直下にある壁 A、壁 C、壁 F は、梁に溶接された先付金物に上部のランナーが打込みピンで接合されている。これに対して、梁直下でない壁 D と壁 E は、先付金物に先行ピースが打込みピンで接合され、その先行ピースにランナーがビスで接合されている。図 4-10 に、壁 A などの接合方法を示す断面図を示し、図 4-11 に、壁 D の接合方法を示す断面図を示す。なお、下部のランナーはいずれの壁もスラブに打込みピンで固定されている。

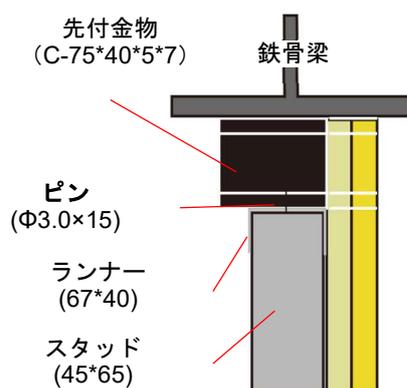


図 4-10 壁 A などの接合方法を示す断面図

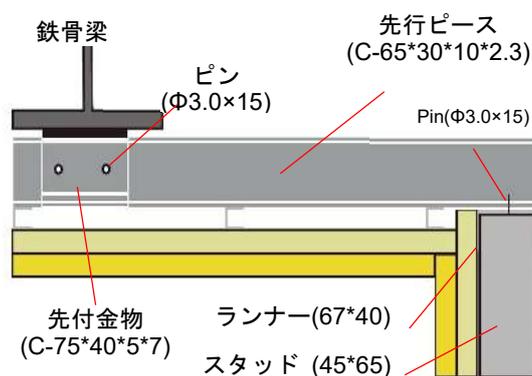
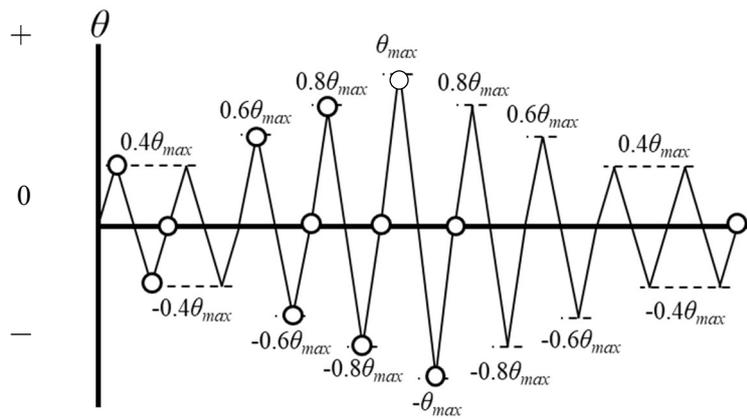


図 4-11 壁 D の接合方法を示す断面図

実験①の加力方法

図 4-3 に示す 2 つのオイルジャッキにより、静的に加力した。一回の地震を想定した繰り返し加力手順 [5]⁸ を 1 加力セットと定義し、その最大層間変形角を増減させながら、セット 1~9 の加力を行った。図 4-12 に、1 つの加力セットの加力履歴を示す。表 4-1 に、9 つの加力セットにおける最大層間変形角（以後、 θ_{max} ）を示す。なお、オイルジャッキが押す方向を正、引く方向を負とした⁹。層間変位の定義、変位計の位置の詳細については既報 [4]¹⁰ で報告している。



○: 観察を行ったタイミング

図 4-12 加力セットの加力履歴

表 4-1 各セットの θ_{max}

Set No.	θ_{max}
set1	1/400
set2	1/200
set3	1/100
set4	1/200
set5	1/75
set6	1/100
set7	1/50
set8	1/75
set9	1/33

⁸ Tenderan Randy, 上瀧敬太, 石田孝徳, 山田哲, 清家剛, 吉敷祥一, 長谷川隆, 伊山潤, 八木尚太郎, 櫻田頌吾. (2019). Experimental Study on Full Scale Steel Frame Considering Multiple Strong Earthquakes Part 2: Loading history and measurement plan. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 1189-1190.

⁹ 層間変形角は平面内で 2 か所以上計測しており、载荷は各構面の層間変形角の平均値を用い制御した。また、各構面に取り付けたジャッキストロークが同じとなるように制御したこと、柱は閉断面部材（角形鋼管）であること、R 階にコンクリートスラブが設置されていることから、ねじれがほとんど生じない条件下であると言える。実際、各構面の層間変形角の差は $\pm 1/1000$ 程度の範囲内で推移していた。

¹⁰ Ishida Takanori, Tenderan Randy, Kohtaki Keita, Kishiki Shoichi, Iyama Jun, Hasegawa Takashi, Seike Tsuyoshi, and Yamada Satoshi. (2021). Experimental study on full-scale steel moment-resisting frames with nonstructural walls subjected to multiple earthquakes. Engineering Structures, 242. doi:10.1016/j.engstruct.2021.112549.

実験①の観察計画

各加力セット当たり最大13回、合計96回、目視観察を行い、損傷のスケッチと写真撮影を行った。各加力セット内における観察のタイミングは、**図 4-12** 中に白丸で示した、ピーク変形時と、負側のピーク変形時から除荷して水平荷重がゼロとなった時点（以後、除荷時）とした。なお、安全面の配慮からピーク変形時の目視観察では10%程度除荷した状態で行った。

実験①の実施状況

実験①は国立研究開発法人建築研究所（茨城県つくば市立原1番地）の強度試験棟にて、2019年の3月4日から3月18日にかけて行われた（試験体の施工は2019年の1月21日から3月1日にかけて行われた）。実験①は、東京工業大学（当時）の山田哲研究室（鉄骨骨組の挙動計測、損傷観察が主な目的）、東京工業大学の吉敷祥一研究室（LGS間仕切り壁の挙動計測が主な目的）、東京大学の伊山潤研究室（鉄骨骨組の挙動計測が主な目的）との合同で行われた実験である。

実験②（ALC 外壁とドアと窓の層間変位に対する損傷確認実験）の概要

実験②の目的

鉄骨骨組に ALC 外壁、ドア、窓を設置した試験体に対して静的に加力することで、損傷と層間変位との対応関係を明らかにすることを目的とする。

実験②の試験体

ALC 外壁の形状は、無開口の平坦な壁と開口部を有する壁とする。これらの形状を取る ALC 外壁を鉄骨骨組に設置し、試験体とした。開口部を有する壁にはドアと引き違い窓を設置した。

鉄骨骨組の設計は実験①と同じであるため、ここでの説明は省略する。

この鉄骨骨組に計 2 面（それぞれ壁 A、壁 B と称す）の ALC 外壁を設けた。鉄骨骨組の東側構面には全面無開口の平坦な壁（壁 A）を、西側構面には開口部（ドアと引き違い窓）を有する壁（壁 B）を配置した。図 4-13 に試験体の平面図を示す。平面図において左向きが北方向を示す。

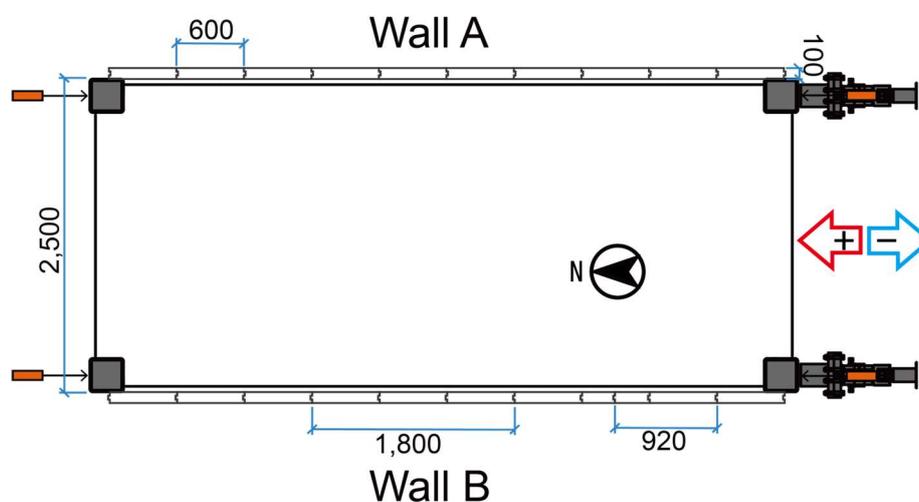


図 4-13 平面図（単位：mm）

図 4-14 に東側（無開口の平坦な壁（壁 A））の立面図を、図 4-15 に西側（開口部を有する壁（壁 B））の立面図を示す。

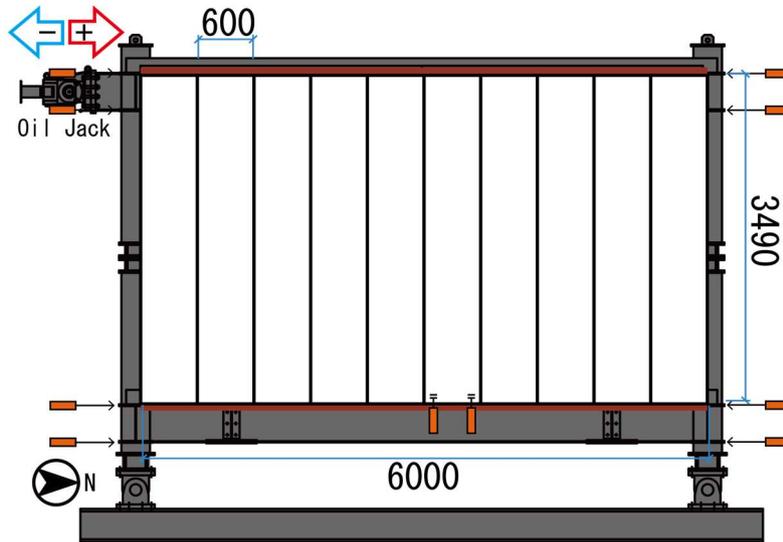


図 4-14 東側（無開口の平坦な壁（壁 A））の立面図

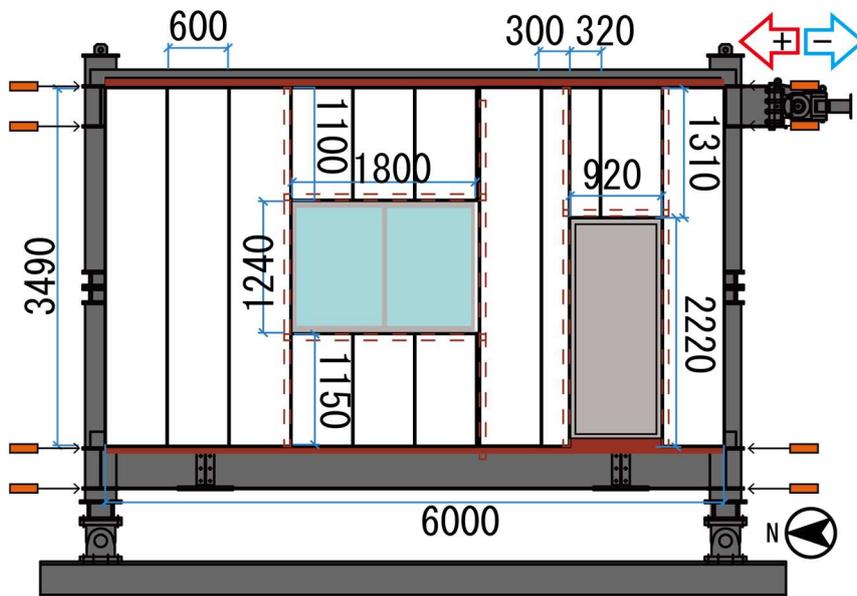


図 4-15 西側（開口部を有する壁（壁 B））の立面図

そして、写真 4-4 に、東側（無開口の平坦な壁（壁 A））からの試験体外観を示し、写真 4-5 に、西側（開口部付きの壁（壁 B））からの試験体外観を示す。



写真 4-5 東側（無開口の平坦な壁（壁 A））からの試験体外観



写真 4-6 西側（開口部付きの壁（壁 B））からの試験体外観

また、写真 4-6 に、ドアを下地側から見た様子を示し、写真 4-7 に、引き違い窓を下地側から見た様子を示す。



写真 4-7 ドアを下地側から見た様子



写真 4-8 引き違い窓を下地側から見た様子

実験②の ALC 外壁の仕様

ALC 外壁、ドア、引き違い窓の仕様は公共工事標準仕様書に準拠した仕様となっている。無開口の平坦な壁（壁 A）には、高さ 3490mm×幅 600mm×厚み 100mm の ALC パネルを無開口面には 10 枚配置した。開口部を有する壁（壁 B）には、基本的には無開口の平坦な壁（壁 A）と同じ割付で開口部の廻りのみ寸法が異なるパネルを配置した。ALC パネル間および ALC パネルと開口部間には、ウレタン系のシーリング材を充填した。ただし、試験体内部には内装材は張らず、パネルの裏面や、開口補強材の挙動を観察できるようにした。

実験②のドアの仕様

ドア（鋼製、高さ 2065mm×幅 920mm）は標準仕様書に準拠した仕様となっている。上部の鉄骨梁と床スラブに固定された開口補強鋼材に三方枠を取り付け、三方枠にヒンジとドアクローザーを介して取り付ける。また、ドアにはサムターンによる鍵とノブを設置する。

実験②の窓の仕様

窓（アルミサッシ、高さ 1240mm×幅 1800mm、合わせガラス）は標準仕様書に準拠した仕様となっている。上部の鉄骨梁と床スラブに固定された開口補強鋼材に枠を取り付け、障子をはめ込む。障子にはクレセント錠を設置する。

実験②の加力方法

加力の計画は、基本的に実験①と同じである。そのため、ここでの説明は省略する。ただし、実験①では、 $\theta_{\max}=1/400$ の加力セットから始めているが、実験②では $\theta_{\max}=1/200$ の加力セットから始める。そのため、セット数が 8 つになっている。表 4-2 に、8 つの加力セットにおける最大層間変形角（以後、 θ_{\max} ）を示す。

表 4-2 各セットの θ_{\max}

Set No.	θ_{\max}
set1	1/200
set2	1/100
set3	1/200
set4	1/75
set5	1/100
set6	1/50
set7	1/75
set8	1/33

実験②の観察計画

各加力セット当たり最大 13 回、合計 83 回、目視観察を行い、損傷のスケッチと写真撮影を行った。各加力セット内における観察のタイミングは、ピーク変形時と、負側のピーク変形時から除荷して水平荷重がゼロとなった時点（以後、除荷時）とした。なお、安全面の配慮からピーク変形時の目視観察では 10%程度除荷した状態で行った。

また、実験②では、目視観察に加え、窓とドアの開閉機能を把握するための確認も行った。各加力セット当たり、最大 17 回、合計で 99 回、人力による開閉確認を行った。開閉確認は、原則として損傷の観察と同時に行うと共に、一部の正側のピーク変形時からの除荷時にも行った。各開閉確認時に、開閉機能¹¹について、「正常に機能する」、「力を入れれば機能する」、「機能しない」の指標で主観的に評価した¹²。写真 4-8 に、開閉機能を確認している様子を示す。



写真 4-9 開閉機能を確認している様子

実験②の実施状況

なお、実験②は国立研究開発法人建築研究所（茨城県つくば市立原 1 番地）の強度試験棟にて、2019 年の 5 月 27 日から 6 月 10 日にかけて行われた（試験体の施工は 2019 年の 4 月 15 日から 5 月 24 日にかけて行われた）。実験②は、東京工業大学（当時）の山田哲研究室（鉄骨骨組の挙動計測、損傷観察が主な目的）、東京工業大学の吉敷祥一研究室（ALC 外壁の挙動計測が主な目的）、東京大学の伊山潤研究室（鉄骨骨組の挙動計測が主な目的）との合同で行われた実験である。

¹¹ 避難において特に重要になる、扉を開けること（開扉）ができるかに特に着目した。

¹² 実験②で行った開閉機能の確認の反省点として、確認し評価する人物を各セットで統一しなかったこと、鍵／ノブ／開扉の機能の性能を明確に分けて記録しなかったこと、要した力の計測などの定量的な評価を行わなかったことがある。

4.2.2. 異種の構造部材の層間変位に関する実験（実験③）の概要

4.2.2.節では、異種の構造部材の層間変位に関する実験（実験③）について説明する。

実験③（LGS 間仕切り壁とドアの RC 骨組の層間変位に対する損傷確認実験）の概要

実験③の目的

構造部材の変形は内外装壁の損傷の原因の一つである。そのため、鉄骨造の柱と異なる性質を持つ RC 造の柱や壁に内外装壁を設置した場合、内外装壁の損傷の発生に変化がでる可能性が考えられる。

そこで、実験③では、RC 造の架構（含む RC 壁）に LGS 間仕切り壁とドアを設置した試験体に対して静的に加力することで、損傷と異種の構造部材の層間変位との対応関係を明らかにすることを目的とする。そして、異種の構造部材であることが損傷の発生に与える影響にも着目して実験を行う。

実験③の試験体

LGS 間仕切り壁の形状は、無開口の平坦な壁と開口部を有する壁とする。これらの形状を取る LGS 間仕切り壁を RC 造の架構（以降、RC 架構）に設置し、試験体とした。開口部を有する壁にはドアを設置した。

RC 架構は、超高層 RC 造集合住宅の一部分をイメージして設計されている。階高 3000mm、長辺 6130mm、短辺 1500mm のラーメン架構と中央の耐震壁から構成される架構となっている。梁上部の壁に固定した鉄骨梁の東西の両側にオイルジャッキが接続されており、東西方向に加力する。なお、RC 架構の詳細については、既報 [6]¹³ [7]¹⁴で報告している。

この RC 架構に計 2 面（それぞれ壁 A、壁 B と称す）の LGS 間仕切り壁を設けた。RC 架構の西側構面には全面無開口の平坦な壁（壁 A）を、東側構面には開口部を有する壁（壁 B）を配置した。いずれの壁も北側が LGS 間仕切り壁の仕上げ側、南側が下地側となるように配置した。図 4-16 に北側の立面図を、図 4-17 に南側の立面図を、図 4-18 に断面図を示す。

¹³ 西村康志郎, 藤田起章, ShegayAlex, 参川朗, 田附遼太, 前田匡樹, 吉敷祥一. (2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その 1 研究の位置づけと実験計画の概要. 日本建築学会学術講演梗概集, 2021, 607-608.

¹⁴ 藤田起章. (2020). RC 造建物の残存耐震性能評価法の提案と縮小架構振動台実験及び実大架構静的載荷実験による検証. 東北大学.

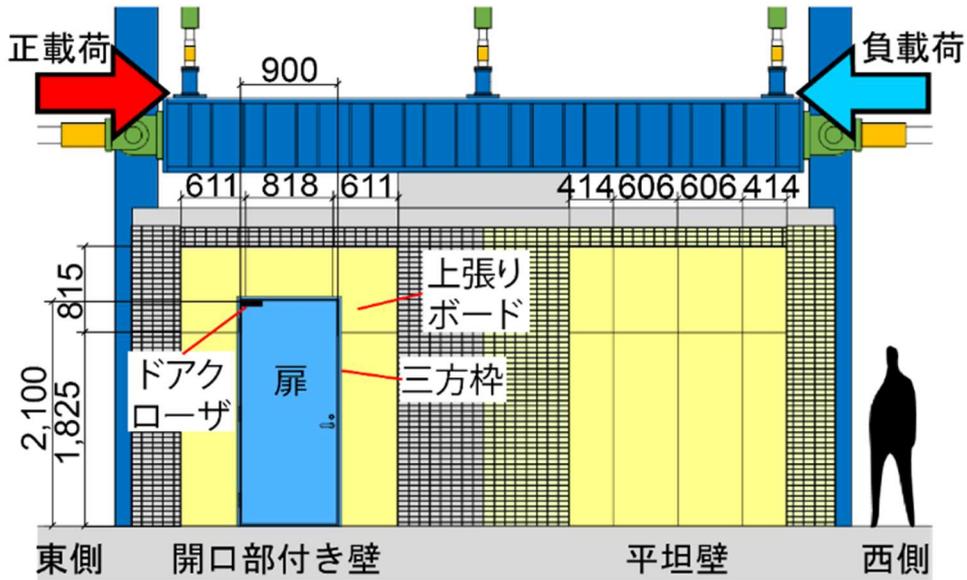


図 4-16 北側（仕上げ側）の立面図
 (数値は上張りボードと鋼製ドアの配置を示す)

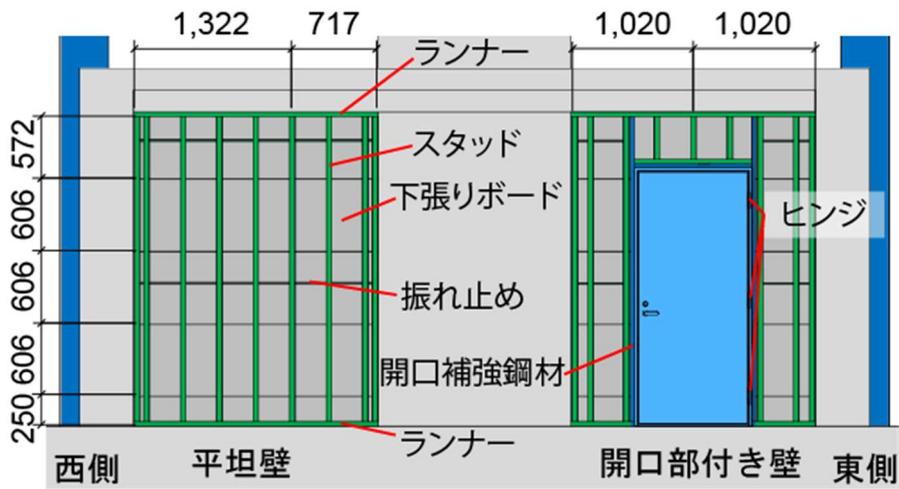


図 4-17 南側（下地側）の立面図
 (数値は下張りボードの配置を示す)

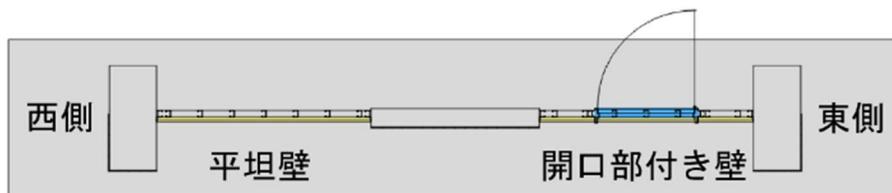


図 4-15 断面図

写真 4-9 に北側からの試験体外観を、写真 4-10 に南側からの試験体外観を示す。



写真 4-10 北側（仕上げ側）からの試験体外観



写真 4-11 南側（下地側）からの試験体外観

実験③の LGS 間仕切り壁の仕様

LGS 間仕切り壁は公共工事標準仕様書に準拠した仕様となっている。ランナーは上部の梁と床スラブに直接、打ち込みピンにより固定した。上下のランナーの間にはスタッドを 303mm 間隔で配置し、この下地の外部の面に厚さ 21mm の強化石膏ボードを片面 2 枚張り（下張りは横張、上張りは縦張とした）した、耐火仕様としている。梁や下側のスラブなど上張りボードの周囲の取り合い部分にシーリング材を充填し、特に RC 架構との間には 5mm

の隙間を設け充填した。上張りボードは全て、ファイバーテープとパテによる目地処理を行い、全体を塗装している。

実験③のドアの仕様

ドア（鋼製、高さ 2100mm×幅 900mm）は標準仕様書に準拠した仕様となっている。LGS 間仕切り壁の下地であるランナーに固定された開口補強鋼材に三方枠を取り付け、三方枠にヒンジとドアクローザーを介して取り付ける。また、ドアにはサムターンによる鍵とハンドルを設置する。

実験③の加力方法

図 4-15 に示す、青色の鉄骨架構を介しオイルジャッキ¹⁵により、静的に加力した。実験③では、実験①や実験②と比較し、より単純化させた加力の計画とした。図 4-19 に、加力の計画を示す。設定した θ_{max} に対して正負方向への加力と除荷を 2 階繰り返すまでを 1 セットと定義する。表 4-3 に、各セットの最大層間変形角（以後、 θ_{max} ）を示す。なお、オイルジャッキが西側に押す方向を正、東側に押す方向を負とした。変位計の位置の詳細については既報 [7]¹⁶で報告している。

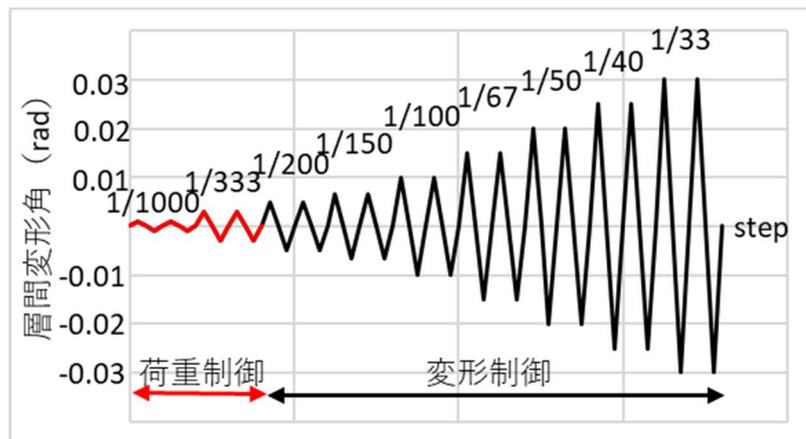


図 4-19 加力計画

¹⁵ 水平方向に設置したオイルジャッキで層せん断力を与えたほかに、鉄骨梁上部の鉛直ジャッキ 3 本で軸力及び、曲げモーメントを作用させた。圧縮軸力は 220kN（圧縮軸力比 0.025）とした。耐震壁上部に付与する曲げモーメントは耐震壁のせん断スパン比が一定（反曲点高さ=2750mm）になるように、層せん断力に比例するように制御し、試験体の予備解析に基づいてその比例定数を 0.25 にした。

¹⁶ 藤田起章. (2020). RC 造建物の残存耐震性能評価法の提案と縮小架構振動台実験及び実大架構静的載荷実験による検証. 東北大学.

表 4-3 各セットの θ_{max}

Set No.	θ_{max}
set1	1/1000
set2	1/333
set3	1/200
set4	1/150
set5	1/100
set6	1/67
set7	1/50
set8	1/40
Set9	1/33

実験③の観察計画

目視観察を各加力セット当たり 4 回行い、損傷のスケッチと写真撮影を行った。各加力セット内における観察のタイミングはピーク変形時と、負側のピーク変形時から除荷して水平荷重がゼロとなった時点（以後、除荷時）とした。

また、実験③では、目視観察のタイミングでドアの開閉機能を把握するための確認も行った。確認は解錠、施錠、レバーハンドルの回転、開扉、閉扉の機能に分けて行った。確認の手順としては、まず、鍵が正常に解錠・施錠できるかを確認した。次に、レバーハンドルが正常に回せるかを確認した。鍵とレバーハンドルが機能した場合には、最後に鋼製ドアが正常に開閉できるかを確認した。そして、各手順において、「正常に機能する」、「力を入れれば機能する」、「機能しない」の指標で主観的に評価した。実施は 1 名（20 代男性）で統一した。なお、層間変形角 1/40rad の時に内部の金具が壊れ、施錠されたまま鍵が空回りするようになったため、層間変形角 1/33rad のセットでは確認していない。

更に、実験③では、開閉機能を把握するために定量的な計測も行った。具体的には、レバーハンドルの回転と開扉に関して、人力による確認時に要した力をロードセルで計測した。**写真 4-11** に、使用したロードセル（株式会社イマダ、ZTS-2500N）を示す。レバーハンドルの回転の確認時には、レバーハンドルの端部に鉛直方向にロードセルを当てて押すことで計測した。開扉の確認時には、レバーハンドルを下げた状態でレバーハンドルのヒンジに正面からロードセルを当てて押すことで計測した。**写真 4-12** に、開扉の確認時の様子を示す。計測は衝撃が加わらないように静的に実施したが、開扉できなかった一部の場合では衝撃力が加わったものと考えられる。



写真 4-12 使用したロードセル



写真 4-13 計測時の様子

実験③の実施状況

実験③は東北大学（宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11）の総合研究棟にて、2020年の10月5日から10月16日にかけて行われた（試験体の施工は2019年の6月22日から10月2日にかけて行われた）。実験③は、東北大学の前田匡樹研究室（RC架構の挙動計測、損傷観察が主な目的）、芝浦工業大学の石川裕次研究室（RC架構の挙動計測、損傷観察が主な目的）、東京工業大学の吉敷祥一研究室（LGS間仕切り壁とドアの挙動計測が主な目的）、長谷工コーポレーション（外壁タイルの損傷観察が主な目的）、東京工業大学の西村康志郎研究室と東京大学の伊山潤研究室（RC架構の挙動計測が主な目的）らとの合同で行われた実験である。

4.2.3. 層間変位と慣性力に関する実験（実験④）の概要

層間変位と慣性力に関する実験（実験④）について説明する。

実験④（窓の層間変位と慣性力に対する損傷確認実験）の概要

実験④の目的

内外装壁の構造部材との接合形態と建物の応答の関係に関する考え方を3.1.1節で紹介した。この考え方によると、窓の損傷は、枠の変形すなわち層間変位に大きく影響される。その一方で、1.7節で示したように、ガラスは枠に対して完全に固定されていない。そのため、動的な加力を行うと、慣性力によりガラスが枠と衝突することが考えられる。しかし、実験②では、損傷と層間変位との対応関係を明らかにすることが目的であったため、慣性力の検討は行わなかった。

そこで、実験④では、RC骨組に窓を設置した試験体に対して振動台により動的に加力することで、損傷と層間変位と慣性力との対応関係を明らかにすることを目的とする。そして、慣性力が損傷の発生に与える影響にも着目して実験を行う。なお、一軸の振動台実験とし慣性力も壁の面内方向のみに与える。

実験④の試験体

引き違い窓とFIX窓をRC造の垂壁と腰壁を有するRC骨組に設置し、試験体とした。

RC骨組は、3層からなり、災害拠点となる建物をイメージして設計されている。階高が下から4000mm、3200mm、3200mm、長辺が9600mm、短辺が4800mmのラーメン架構となっている。また、許容耐力の向上を目的とし、垂壁と腰壁に構造スリットと新しい配筋方法が採用された。RC骨組は、屋外で施工されたのちに、振動台の振動テーブル上に固定され、振動テーブルを揺らすことで加力する。なお、RC骨組の詳細については、既報 [8]¹⁷で報告している。

このRC骨組の2階と3階に窓を配置した。図4-20に立面図を示す。そして、写真4-13に試験体外観を示す。

¹⁷ Trevor Zhiwing Yeow, Kusunoki, Izumi Nakamura, Yo Hibino, Satoru Fukai, Walid Ahmad Safi, Koichi. (2020). E-Defense Shake-table Test of a Building Designed for Post-disaster Functionality. Journal of Earthquake Engineering. doi:10.1080/13632469.2020.1865219

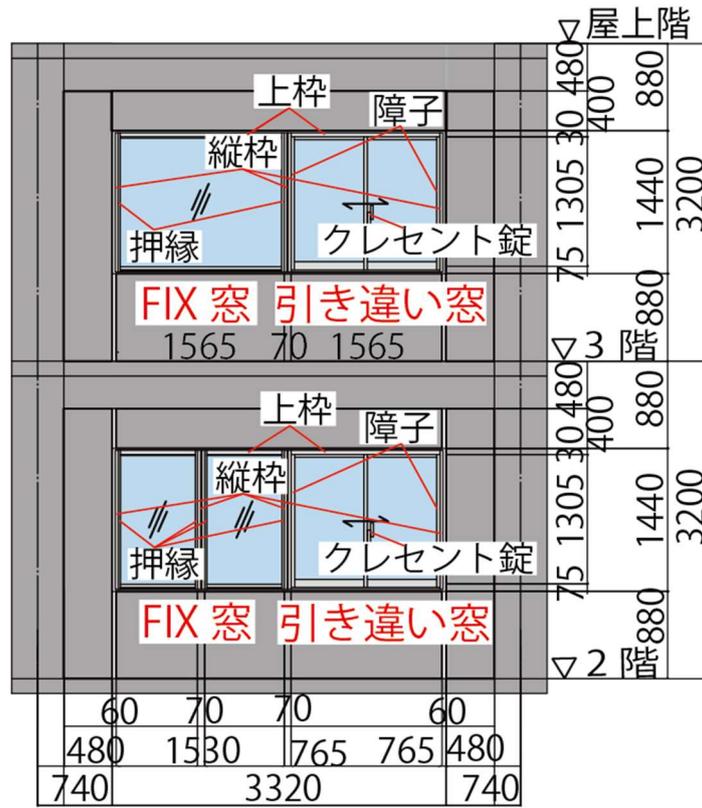


図 4-20 立面図 (単位 : mm)

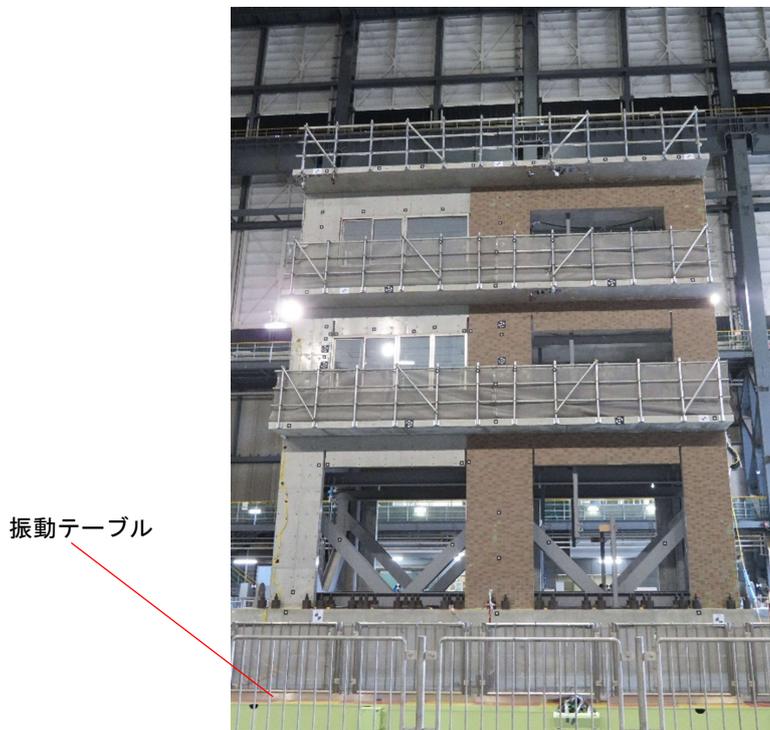


写真 4-14 外観

写真 4-14 に、窓の内観を示す。



写真 4-15 内観
(a) 2 階, (b) 3 階

実験④の窓の配置

試験体は、揺れ（慣性力）は 3 階の方が比較的大きく、層間変位は 2 階の方が比較的大きくなることが想定される。そこで、2 階と 3 階の両方に窓を配置し、発生した損傷を比較することで、慣性力と層間変位が損傷に与える影響を明確することを考える。

本実験では、引き違い窓、FIX 窓を 2 階と 3 階に配置した。引き違い窓は 2 階と 3 階で殆ど同じ仕様にしたのに対して、後述のように FIX 窓は 2 階と 3 階で異なる仕様とした。

実験④の窓の仕様

窓はいずれも公共工事標準仕様書に準拠した仕様となっている。垂壁と腰壁に枠を溶接し、障子もしくはガラスをはめ込むことで、構造部材と接合した。壁と枠の間にはモルタルを充填した。

2 階の引き違い窓の枠は高さ 1305mm×幅 1530mm、3 階の引き違い窓の枠は高さ 1305mm×幅 1565mm と殆ど同じである。いずれの引き違い窓にもクレセント錠を設置する。また、ガラスは、2 階と 3 階の引き違い窓ともに、単板ガラス 4^{mm}厚+空気層 16^{mm}+単板ガラス 4^{mm}厚の総厚 24^{mm}とし、室内側および室外側から飛散防止フィルムを貼る。そして、障子とガラスのクリアランスの量は、ガラスの横が 0mm と 3mm、ガラスの上が 17.1mm、ガラスの下が 7.46mm である。そして、障子と枠のクリアランスの量は、障子の横が 3mm ずつ、障子の上が 5mm、障子の下が 7mm である。ここで、1.7 節で紹介した式を用いて、枠の許容変形量 δ を求めると、2 階の引き違い窓は 70.8mm、3 階の引き違い窓は 69.4mm となる。

2階のFIX窓の枠は高さ1305mm×幅756mm、3階のFIX窓の枠は高さ1305mm×幅1565mmと、サイズに倍ほどの差がある。この分、2階にはFIX窓を横並びに二つ設置する。ガラスは、2階と3階のFIX窓ともに、合わせガラス8^{mm}+空気層12^{mm}+単板ガラス6^{mm}厚の総厚26^{mm}とし、室内側および室外側から飛散防止フィルムを貼る。そして、枠とガラスのクリアランスの量は、ガラスの横が4mmずつ、ガラスの上が25mm、ガラスの下が7mmである。ここで、1.7節で紹介した式を用いて、枠の許容変形量 λ を求めると、2階のFIX窓は65mm、3階のFIX窓は35.8mmとなる。このように、枠の許容変形量は3階が2階の半分程度と小さくなる。つまり、2階の引き違い窓のほうが、層間変位に対する追従性が高いということになる。

実験④の加力方法

実験④では、振動台を用いて、写真4-14に示す振動テーブルを揺らすことで、動的に加力した。設計用の地震波を20%、100%、150%（1回目）、150%（2回目）、160%とスケールリングさせたものを振動台に入力し、計5回加振した。図4-21に、100%加振時に振動テーブル上で計測された加速度の結果を示す。加振は水平1方向で、入力地震波には、人工地震波を用いた。ターゲットスペクトルは、工学的基盤の告示のスペクトルを地盤種別を第2種地盤とした略算の G_s で増幅したものをを用いた。位相には、JMA神戸波のNS成分を使用した。層間変位の定義、変位計の位置の詳細については既報[8]¹⁸で報告している。

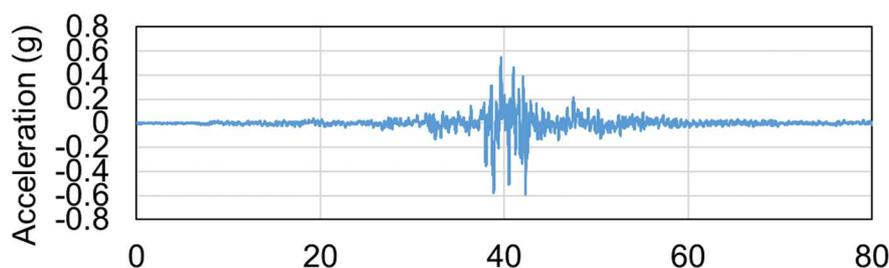


図4-21 100%加振時に振動テーブル上で計測された加速度

表4-4に、各加振時に計測された、試験体（2階と3階のみ）の層間変形角の最大値を示す。想定通り、2階の方が3階よりも大きい値となった。また、地震波のスケールを大きくするにつれて、層間変形角も大きくなっていったことが読み取れる。ここで、構造部材と比較して窓の剛性はかなり低い。そのため、層間変位は、垂壁や腰壁ではなく、窓の部分に発

¹⁸ Trevor Zhiwing Yeow, Kusunoki, Izumi Nakamura, Yo Hibino, Satoru Fukai, Walid Ahmad Safi, Koichi. (2020). E-Defense Shake-table Test of a Building Designed for Post-disaster Functionality. Journal of Earthquake Engineering. doi:10.1080/13632469.2020.1865219

生すると考えられる。そこで、表 4-4 には、垂壁や腰壁が変形しないと想定した場合の、窓の層間変形角の最大値も併せて記載している。

表 4-4 各加振時に計測された試験体の層間変形角の最大値(rad)

	20%	100%	150% (1 回目)	150% (2 回目)	160%
3 階	+1/8650	+1/948	+1/127	+1/103	+1/85
	(+1/3528)	(+1/387)	(+1/52)	(+1/42)	(-1/35)
	-1/5834	-1/867	-1/139	-1/89	-1/58
	(-1/2379)	(-1/354)	(-1/57)	(-1/36)	(-1/24)
2 階	+1/4457	+1/443	+1/74	+1/71	+1/71
	(+1/1818)	(+1/181)	(+1/30)	(+1/29)	(+1/29)
	-1/3737	-1/329	-1/69	-1/43	-1/29
	(-1/1523)	(-1/134)	(-1/28)	(-1/18)	(-1/12)
() 内は窓のみ変形した場合の窓の面内変形角の最大値					

表 4-5 に、各加振時に計測された、試験体 (2 階と 3 階のみ) の床応答加速度の最大値を示す。想定通り、3 階の方が 2 階よりも大きい値となった。また、150% (2 回目) 加振時までは、地震波のスケールを大きくするにつれて、床応答加速度も大きくなっていったことが読み取れる。その一方で、160%加振時には、床応答加速度が小さくなっていることも読み取れる。

表 4-5 各加振時に計測された試験体の床応答加速度の最大値(g)

	20%	100%	150% (1 回目)	150% (2 回目)	160%
3 階	0.19	0.93	1.38	1.43	1.40
2 階	0.14	0.69	1.07	1.22	1.08

以上、加振時に計測された試験体の層間変形角と床応答加速度の値から、窓に掛かった外力について、次の 4 つの点が言える。これを参考に損傷と建物の応答の対応関係を考える。

- 1) 層間変位の程度は 2 階の方が 3 階よりも大きい
- 2) 層間変位の値は、加振波の増大につれ、増大する
- 3) 慣性力の程度は 3 階の方が 2 階よりも大きい
- 4) 慣性力は、160%加振時に小さくなった

実験④の観察計画

100%加振後、150%（1回目）加振後、160%加振後に目視観察を行い、損傷のスケッチと写真撮影を行った。同じタイミングで、窓の開閉機能の確認も行った¹⁹。また、試験体内外に設置したビデオカメラより、加振中の観察も行った。なお、室外にはバルコニーが設置されているため、仕上げ側（室外側）の目視観察も可能となっている。

実験④の実施状況

実験④は国立研究開発法人防災科学技術研究所の兵庫耐震工学研究センター（兵庫県三木市志染町三津田西亀屋 1501-21）のE-ディフェンスにて、2019年の12月3日から12月6日にかけて行われた（試験体の施工は2019年の7月2日から11月29日にかけて行われた）。実験④は、東京大学の楠浩一研究室（RC骨組の挙動計測、損傷観察が主な目的）、広島大学の日比野陽研究室（RC骨組の挙動計測、損傷観察が主な目的）、広島大学の大久保孝昭研究室（外壁タイルの挙動計測、損傷観察が主な目的）、豊橋技術科学大学（当時）の林和宏研究室（損傷のモニタリング技術の検証が主な目的）、建築研究所（屋上配管の挙動計測が主な目的）らなどとの合同で行われた実験である。

¹⁹クレセント錠が破損したことにより施錠ができなくなった以外に、開閉に関する問題は無かったため、開閉機能の確認方法の説明は省略する。

4章の小括

4章では、3章の内容を踏まえて計画した、地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることを目的とする4つの実大実験の概要について説明した。

まず、4.1.節では、実験の目的と各実験に共通する特徴について説明した。実験は、地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることを目的とする。試験体の施工は、公共建築工事標準仕様書に準拠し、内外装壁の形状は一般的に建物で観られる無開口の平坦穴壁や、開口部付きの壁を中心に考えた。また、加力の程度ごとに損傷の目視観察を行った。

次に、4.2.節では、各実験の試験体や加力方法について説明した。実験①と実験②で、LGS間仕切り壁、ALC外壁、ドア、窓の損傷と層間変位の対応関係を明らかにすることを目的とする。実験③で、LGS間仕切り壁とドアの損傷と異種の構造部材の層間変位の対応関係を明らかにすることを目的とし、そして、異種の構造部材であることが損傷の発生に与える影響にも着目する。実験④で、窓の損傷と層間変位と慣性力の対応関係を明らかにすることを目的とし、慣性力が損傷の発生に与える影響にも着目する。

以上、4章では、4つの実大実験の概要について説明した。

これに対して5章では、実験の結果について説明し、内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

4章 参考文献

- [1] 八木尚太朗. (2018). 地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究 ―乾式間仕切り壁と ALC 外壁を対象とした実大載荷実験を通して―. 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻.
- [2] 国土交通省大臣官房官庁営繕部. (2022 年 5 月 10 日). 公共建築工事標準仕様書 (建築工事編) 令和 4 年版. 参照日: 2022 年 7 月 25 日, 参照先: <https://www.mlit.go.jp/common/001473539.pdf>
- [3] 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 荒井智一, 金井貴浩, 高岡昌史, 岩下裕樹, 吉澤睦博, 壁谷澤寿海, 清家剛, 山田哲, 福山洋, 太田勤, 江口亨, 伊山潤, 石原直, 磯部大吾郎. (2015). 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のための E-ディフェンス加振実験 報告書. 防災科学技術研究所研究資料(391).
- [4] Ishida Takanori, Tenderan Randy, Kohtaki Keita, Kishiki Shoichi, Iyama Jun, Hasegawa Takashi, Seike Tsuyoshi, and Yamada Satoshi. (2021). Experimental study on full-scale steel moment-resisting frames with nonstructural walls subjected to multiple earthquakes. *Engineering Structures*, 242. doi:10.1016/j.engstruct.2021.112549.
- [5] Tenderan Randy, 上瀧敬太, 石田孝徳, 山田哲, 清家剛, 吉敷祥一, 長谷川隆, 伊山潤, 八木尚太朗, 櫻田頌吾. (2019). Experimental Study on Full Scale Steel Frame Considering Multiple Strong Earthquakes Part 2: Loading history and measurement plan. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 1189-1190.
- [6] 西村康志郎, 藤田起章, ShegayAlex, 参川朗, 田附遼太, 前田匡樹, 吉敷祥一. (2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その 1 研究の位置づけと実験計画の概要. 日本建築学会学術講演梗概集, 2021, 607-608.
- [7] 藤田起章. (2020). RC 造建物の残存耐震性能評価法の提案と縮小架構振動台実験及び実大架構静的載荷実験による検証. 東北大学.
- [8] Trevor Zhiwing Yeow, Kusunoki, Izumi Nakamura, Yo Hibino, Satoru Fukai, Walid Ahmad SafiKoichi. (2020). E-Defense Shake-table Test of a Building Designed for Post-disaster Functionality. *Journal of Earthquake Engineering*. doi:10.1080/13632469.2020.1865219

5章 内外装壁の損傷の評価

5.1. 層間変位に対する内外装壁の損傷の評価.....	126
5.1.1. LGS 間仕切り壁の損傷の評価.....	127
5.1.2. ALC 外壁の損傷の評価.....	140
5.1.3. ドアの損傷の評価.....	146
5.1.4. 窓の損傷の評価.....	150
5.2. 異種の構造部材の層間変位に対する内外装壁の損傷の評価.....	154
5.2.1. LGS 間仕切り壁の損傷の評価.....	155
5.2.2. ドアの損傷の評価.....	168
5.3. 層間変位と慣性力に対する窓の損傷の評価.....	176
5.4. 内外装壁の損傷の評価のまとめ.....	198
5.4.1. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係.....	198
5.4.2. 地震被害調査で観察された損傷との比較.....	208
5章の小括.....	210
5章の参考文献.....	211

5章では、4つの実大実験の結果について説明し、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

5.1節では、実験①と実験②の結果に基づき、層間変位に対する内外装壁の損傷を評価した結果について説明する。

5.2節では、実験③の結果に基づき、異種の構造部材の層間変位に対する内外装壁の損傷を評価した結果について説明する。

5.3節では、実験④の結果に基づき、層間変位と慣性力に対する窓の損傷を評価した結果について説明する。

5.4節では、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明し、その妥当性についても論じる。

5.1. 層間変位に対する内外装壁の損傷の評価

5.1.節では、実験①と実験②の結果に基づき、層間変位に対する内外装壁の損傷を評価した結果について説明する。

5.1.1.節では、実験①の結果に基づき、層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷を評価した結果について説明する。

5.1.2.節では、実験②の結果に基づき、層間変位に対する ALC 外壁の損傷を評価した結果について説明する。

5.1.3.節では、実験②の結果に基づき、層間変位に対するドアの損傷を評価した結果について説明する。

5.1.4.節では、実験②の結果に基づき、層間変位に対する窓の損傷を評価した結果について説明する。

5.1.1. LGS 間仕切り壁の損傷の評価

5.1.1.節では、実験①の結果に基づき、層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷を評価した結果について説明する。

無開口の平坦な壁（壁 A）、直交壁（壁 B）、開口部付きの壁（壁 C）、梁から持ち出した壁（壁 D～F）に分けて、それぞれについて、層間変位に対する損傷を評価した結果を図と文章で説明する。損傷に関してはその原因を分析した結果についても説明する。

また、セット 4、セット 6、セット 8 は、 θ_{\max} の値が直前のセットの θ_{\max} の値より小さくなるセットである。そして、これらのセットでは、新しい損傷の発生は殆ど評価されなかった。そのため、以下ではこれらのセットでの結果は省略する。

また、5.1.1.節で示す内容は、既報 [1]¹ [2]²でも報告されている。特に八木の修士論文 [2] の付録に、実験①の観察結果の詳細が写真共に載せられている。そのため、ここでは最小限の説明に留める。

LGS 間仕切り壁の挙動に関する前提条件

評価結果の説明に先立ち、LGS 間仕切り壁について考える上での前提について説明する。

1.1.8.節で説明したように、LGS 間仕切り壁は上張りボード、下張りボード、スタッド、ランナーから構成される。梁から持ち出した部分を除き、上部のランナーは鉄骨梁かスラブに接合されており、鉄骨骨組と一体となり水平方向に変位する。一方、スタッドは、ランナーにはめ込まれているだけで接合されていないため、ランナー内を滑ることにより、鉄骨柱とは異なる傾斜となる可能性がある。この滑る挙動は既報 [3]³でも報告されている。また、下張りボードはスタッドに取り付けられており、上張りボードは下張りボードにステープルと接着剤で取り付けられている。上張りボードは鉄骨骨組とは直接接触していないが、鉄骨骨組との間にシーリング材が充填されている。このため鉄骨骨組から上張りボードには、圧縮力は伝達されるが引張力はほとんど伝達されない。損傷と層間変位の対応関係の評価および損傷の要因の考察については、LGS 間仕切り壁がこのように挙動する前提で行う。

¹ 八木尚太郎, 伊山潤, 福島佳浩, 吉敷祥一, 石田孝徳, 清家剛, 山田哲. (2021). 鉄骨骨組に取り付けられた乾式間仕切り壁の大変形時における損傷と加速度計による傾斜計測を用いたその検出の可能性. 日本建築学会構造系論文集, 788, 1400-1411. doi:10.3130/aijs.86.1400

² 八木尚太郎. (2018). 地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究 — 乾式間仕切り壁と ALC 外壁を対象とした実大載荷実験を通して—. 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会分環境学専攻.

³ 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛. (2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139

層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の評価結果

表 5-1 に層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷を評価した結果を示す。表 5-1 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている⁴。

表 5-1 層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の評価結果（実験①）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況	損傷の様子
Set 1 $\theta_{max}=1/400$		仕上げ側 ・ 上部の角部でシーリング材の切れ(1)	
		下地側 ・ 上部の右端部でランナーの変形(2) ・ 下部の左側で下張りボードのひび割れ(3)	
Set 2 $\theta_{max}=1/200$		・ 四隅でシーリング材の切れの拡大 ・ 先付金物用に切り欠きした部分で、上張りボードのひび割れ(4) ・ スタッドの水平移動およびこれに起因するランナーの傷 (5)	
Set 3 $\theta_{max}=1/100$		・ 中央で個々の上張りボードの面内方向の回転(6) ・ 下部の角部で上張りボードに斜め方向のしわ(7) ・ 上部と下部の左端部でランナーの変形(8) ・ 中央でスペーサーの爪の外れ(9)	
Set 5 $\theta_{max}=1/75$		・ 中央で上張りボード間に隙間(10) ・ 上部の右端部でランナーの変形の拡大 ・ 先付金物用に切り欠きした部分で、下張りボードのひび割れ(11) ・ 中央でスペーサーの爪の外れ(12)	
Set 7 $\theta_{max}=1/50$		・ 中央で上張りボードの面外方向への傾斜(13) ・ 下張りボードの目地周辺でビス穴の拡大(14)	
Set 9 $\theta_{max}=1/33$		・ 中央で上張りボードの面外方向への傾斜の増大および脱落(15) ・ 中央で下張りボードのひび割れ(16)	

赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／橙線：その他の損傷
※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

⁴ 同じ種類の損傷（発生時の外力、原因などが共通するもの）は、同じナンバリングとしている。

セット1 ($\theta_{max}=1/400rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、上張りボードと鉄骨柱の間に充填されたシーリング材の切れが観察された。東面からみると、正方向の加力時に上部の右角部と下部の左角部、負方向の加力時には上部の左角部と下部右角部を起点としていた(表 5-1 中(1))。また、シーリング材が切れていない方の角部では、シーリング材が潰れ、面外にはみ出ることが観察された。下地側では、上部のランナーの変形(表 5-1 中(2))などが観察された。

セット2 ($\theta_{max}=1/200rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、シーリング材の切れの拡大のほか、上張りボードの切り欠きした部分(先付金物の部分)でのひび割れ(表 5-1 中(4))が観察された。下地側では、ランナー内を滑るようなスタッドの水平移動が加力時に観察され、これに起因する下部のランナー内の傷が観察(表 5-1 中(5))された。

セット3 ($\theta_{max}=1/100rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、シーリング材の切れが除荷時も残留することが観察された。この他に、上張りボードのしわが観察された(表 5-1 中(7))。この時点で、上張りボードは、鉄骨骨組内で面内方向に一体として回転するのではなく、個々に回転することが確認された。この挙動は層間変形角が大きくなるにつれて顕著になることが観察された。下地側では、下部のランナーの変形(表 5-1 中(8))などが観察された。

セット5 ($\theta_{max}=1/75rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、個々の上張りボードの面内方向の回転により、上張りボード同士の間隙(表 5-1 中(10))が観察された。下地側では、ランナーの変形が拡大し、発生時と逆方向に加力した時にも残留することなどが観察された。

セット7 ($\theta_{max}=1/50rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、中央部の上張りボードの面外方向へ倒れこむような変位(表 5-1 中(13))が観察された。下地側では、下張りボードの目地周辺で、ビスに挟られることによるビス穴の拡大(表 5-1 中(14))が観察された。

セット9 ($\theta_{max}=1/33rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、上張りボードの面外方向の変位が増大した。定規で測ったところ、最大70mm程度であった。写真 5-1 には、この時の壁 A の外観を示す。その後、除荷時に、面外方向へ変位していた上張りボードが脱落した(表 5-1 中(15))。下地側では、下張りボードのひび割れ(表 5-1 中(16))が観察された。



写真 5-1 セット 9 の層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時の
無開口の平坦な壁（壁 A）の仕上げ側の様子

無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の原因の考察

シーリング材の切れ（表 5-1 中(1)）の原因は、鉄骨骨組はせん断変形する一方、上張りボードはせん断変形しないことだと推測される。

上張りボードのしわ（表 5-1 中(7)）や、上張りボードの面内方向の個々の回転（表 5-1 中(6)）の原因は、鉄骨骨組のせん断変形の影響が、鉄骨骨組と上張りボードの間に設けられた隙間で吸収できる範囲を超えたため、上張りボードがせん断変形したことだと推測される。

そして、上張りボードの面外方向の変位（表 5-1 中(13)）や脱落（表 5-1 中(15)）の原因としては、接着力の低下と鉄骨骨組から受ける圧縮力だと推測される。上張りボードは縦張で、下張りボードは横張と、割り付け方が異なっているため、ある 1 枚の下張りボードには複数の上張りボードが接着されていることになる。そのため、上張りボードが個々に面内方向に回転すると、上張りボードと下張りボードの間の接着剤には、せん断変形が生じることになり、接着力が低下することが考えられる⁶。この接着力の低下と、壁の対角線方向に加わる圧縮力により、上張りボードの中央部が押し出され、上張りボードの面外方向への傾斜ならびに脱落に至ったと推測される。

ランナーの変形（表 5-1 中(2)や(8)）の原因は、端のスタッドが鉄骨柱のジョイント部分に接触したことで移動を拘束された結果として発生した、スタッドと上部のランナーとの摩擦力だと推測される。

下張りボードのビス穴の拡大（表 5-1 中(14)）や、下張りボードのひび割れ（表 5-1 中(16)）の原因は、下張りボードとスタッドの挙動が異なった結果、接続するビス部分に応力が集中したことだと推測される。

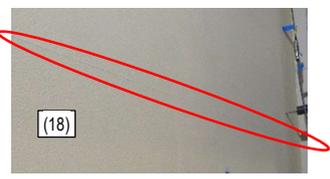
⁵ ただし、鉄骨骨組と上張りボードの間に設けられた隙間の分のみ。

⁶ ただし、接着力が低下したため、個々の回転をしやすくなったという考え方もできる。

層間変位に対する直交壁（壁 B）の損傷の評価結果

表 5-2 に層間変位に対する直交壁（壁 B）の損傷を評価した結果を示す。表 5-2 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている。

表 5-2 層間変位に対する直交壁（壁 B）の損傷の評価結果（実験①）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況	損傷の様子
Set 1 $\theta_{\max}=1/400$		仕上げ側 ・ 特になし	
		下地側 ・ スタッドの変形(17)	
Set 2 $\theta_{\max}=1/200$		・ 上張りボードの目地の開き(18)	
		・ 特になし	

赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／橙線：その他の損傷
※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

セット 1 ($\theta_{\max}=1/400\text{rad}$) において評価された損傷

下地側で、スタッドの変形（表 5-2 中(17)）が観察された。その後、進展する様子は観察されなかった。

セット 2 ($\theta_{\max}=1/200\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側で、上張りボードの水平方向の目地が開き、目視で位置が確認できるようになることが観察された（表 5-2 中(18)）。その後、進展する様子は観察されなかった。

直交壁（壁 B）の損傷の原因の考察

直交壁（壁 B）は、層間変位に対して面外方向に傾斜したと考えられる。この時、直交壁（壁 B）に鉛直方向に圧縮力が掛かったことが損傷の原因と推測される。ただし、加力の増加に応じた損傷の進行は見られなかったため、正確な原因の考察のためには、より詳細な検討が必要である。

層間変位に対する開口部を有する壁（壁C）の損傷の評価結果

表 5-3 に層間変位に対する開口部を有する壁（壁C）の損傷を評価した結果を示す。表 5-3 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている⁷。

表 5-3 層間変位に対する開口部を有する壁（壁C）の損傷の評価結果（実験①）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況	損傷の様子
Set 1 $\theta_{max}=1/400$		仕上げ側 ・ 上張りボードの目地部に沿った塗装のひび割れ(19) ・ 開口部の左角部で上張りボードのひび割れ (20)	
		下地側	
Set 2 $\theta_{max}=1/200$		・ 各ひび割れの拡大	
Set 3 $\theta_{max}=1/100$		・ 各ひび割れの拡大	
		・ 下張りボードのひび割れ(21)(22) ・ 上部の右端部でランナーの変形(23)	
Set 5 $\theta_{max}=1/75$		・ 下部の角部で上張りボードに斜め方向のしわ(24)	
		・ 下張りボードのひび割れ(25) ・ 下張りボードの目地周辺でビス穴の拡大(26)	
Set 7 $\theta_{max}=1/50$		・ 各ひび割れの拡大 ・ 上部の中央で上張りボードの面外方向への傾斜(27) ・ 開口部の右角部で上張りボードのひび割れ(28)	
		・ 下張りボードのひび割れ(29) ・ 下張りボードのひび割れの拡大	
Set 9 $\theta_{max}=1/33$		・ 中央で、上張りボードの面外方向への傾斜の増大および残留(30)	
		・ 下張りボードのひび割れの拡大	

赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／橙線：その他の損傷
※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

⁷ 同じ種類の損傷（発生時の外力、原因などが共通するもの）は、同じナンバリングとしている。

セット1 ($\theta_{\max}=1/400\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側上部の左側で、上張りボードの目地部に沿った塗装のひび割れ (表 5-3 中(19)) が観察された。また、開口部の左角部にある L 字型の上張りボードに、開口部の左角部を起点とする斜め左方向へのひび割れ (表 5-3 中(20)) も観察された。

セット3 ($\theta_{\max}=1/100\text{rad}$) において評価された損傷

下地側で、下張りボードのひび割れ (表 5-3 中(21)(22)) や上部のランナーの変形 (表 5-3 中(23)) が観察された。

セット5 ($\theta_{\max}=1/75\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側では、下部の角部で上張りボードに斜め方向のしわ (表 5-3 中(24)) が観察された。これらの原因は、無開口の平坦な壁 (壁 A) の場合と同じで、鉄骨骨組のせん断変形の影響が、鉄骨骨組と上張りボードの間に設けられた隙間で吸収できる範囲を超えたことだと推測される。ただし、無開口の平坦な壁 (壁 A) と異なり、シーリング材の切れは観察されなかった。下地側では、下張りボードのひび割れ (表 5-3 中(25)) や、下張りボードの目地周辺でビス穴の拡大 (表 5-3 中(26)) が観察された。

セット7 ($\theta_{\max}=1/50\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側では、開口部の上部中央の上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-3 中(27)) や開口部の右角部にある L 字型の上張りボードに、開口部の右角部を起点とするひび割れ (表 5-1 中(28)) が観察された。下地側では、下張りボードのひび割れ (表 5-3 中(29)) などが観察された。

セット9 ($\theta_{\max}=1/33\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側では、開口部の上部中央の上張りボードの面外方向への傾斜が増大し、除荷時でも残留すること (表 5-3 中(30)) が観察された。

開口部を有する壁（壁 C）の損傷の原因の考察

開口部の左右に位置する上張りボードは、面内方向に回転することで鉄骨骨組の変形に追従すると考えられる。その一方で、開口部の角部にある L 字型の上張りボードや開口部の上部にある上張りボードは、ほぼ水平を保つ梁と三方枠の水平方向の枠に挟まれているため、面内方向の回転が妨げられる。上張りボードの目地部に沿った塗装のひび割れ（表 5-1 中(19)）の原因は、上記の挙動によって、上張りボードの面内方向の回転量に差が発生したことだと推測される。また、L 字型の上張りボードのひび割れ（表 5-1 中(20)）の原因は、上記の挙動によって、上張りボード内に応力が発生したことだと推測される。図 5-1 に、開口部を有する壁（壁 C）の上張りボードのひび割れの発生メカニズムのイメージを示す。その後、無開口の平坦な壁（壁 A）と同じく、上張りボードと下張りボードの接着力の低下と、壁の対角線方向に加わる圧縮力により、上張りボードの中央部が押し出され、上張りボードの面外方向への傾斜に至ったと推測される。

下張りボードのひび割れ（表 5-3 中(25)など）の原因は、無開口の平坦な壁（壁 A）の場合と同じで、下張りボードとスタッドの挙動が異なったことと推測される。ただし、一部の下張りボードのひび割れ（表 5-3 中(21)と(29)）の起点が、端部の上張りボードと L 字型の上張りボードとの目地部分の箇所と一致する。このことから、これらの下張りボードのひび割れの原因として、異なる挙動をした 2 つの上張りボードの両方に接着されていたことも推測される。

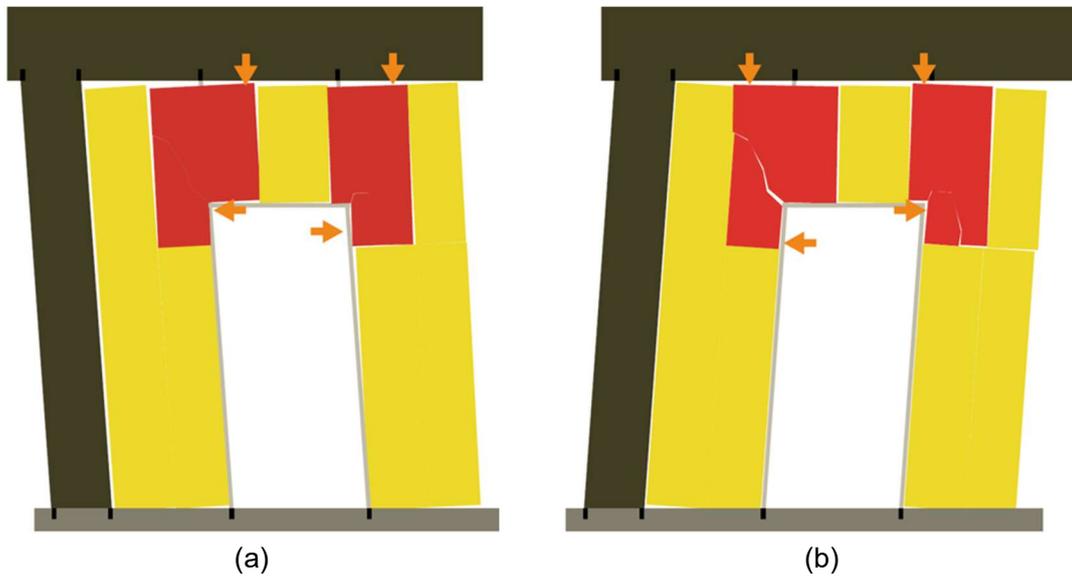
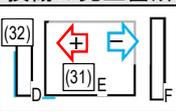
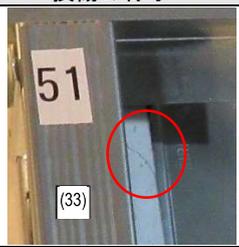
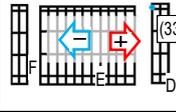
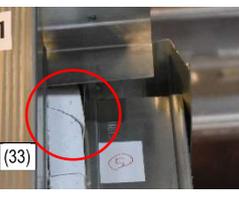
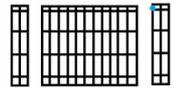
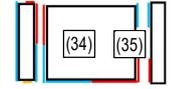
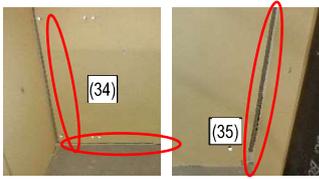
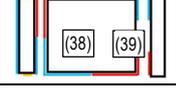
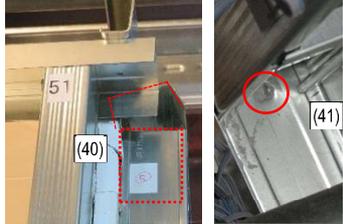
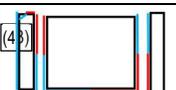
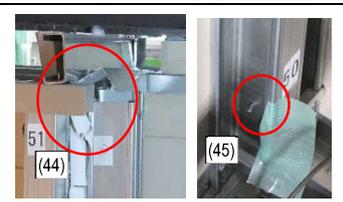
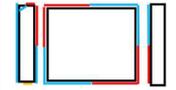
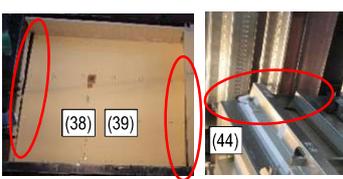


図 5-1 開口部を有する壁（壁 C）の上張りボードのひび割れの発生メカニズム；
(a) 正方向に加力時, (b) 負方向に加力時

層間変位に対する梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の損傷の評価結果

表 5-4 に層間変位に対する梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の損傷を評価した結果を示す。表 5-4 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている⁸。

表 5-4 層間変位に対する梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の損傷の評価結果（実験①）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況	損傷の様子
Set 1 $\theta_{max}=1/400$		仕上げ側 ・ 下部の角部を起点とする壁 E 周囲のシーリング材の切れ(31) ・ 壁 D と壁 C との間に隙間(32)	
		下地側 ・ 壁 D の上部の下張りボードのひび割れ(33)	
Set 2 $\theta_{max}=1/200$		・ 壁 E のシーリング材の切れの拡大	
		・ 壁 D の下張りボードのひび割れの拡大	
Set 3 $\theta_{max}=1/100$		・ 壁 E のシーリング材の切れの拡大 ・ 壁 E の加力時の水平移動に伴う、壁 D 及び壁 F との間に隙間(34)(35)	
		・ 壁 E のスタッドの水平移動(36) ・ 壁 E の下部のランナーの変形(37)	
Set 5 $\theta_{max}=1/75$		・ 壁 E と壁 D 及び壁 F との間の隙間の増大及び残留(38)(39)	
		・ 壁 D の上部のランナーの開き(40) ・ 壁 D の下部のランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形(41) ・ 壁 E の下張りボードの目地周辺でビス穴の拡大(42)	
Set 7 $\theta_{max}=1/50$		・ 壁 E の加力時の水平移動の減少 ・ 壁 D の上部の上張りボードの折れ(43)	
		・ 壁 D の上部のランナーの開きの増大及び下張りボードの破壊(44) ・ 壁 D と壁 C のスタッド同士を固定するビスの変形(45)	
Set 9 $\theta_{max}=1/33$		・ 壁 E の周囲のシーリング材の切れがほぼ全面的になる ・ 壁 E の周囲の隙間の増大	
		・ 壁 D の上部のランナーの開きの増大 ・ 先付金物と先行ピースを接合するピンのせん断破壊(46)	

赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／橙線：その他の損傷
※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

⁸ 同じ種類の損傷（発生時の外力、原因などが共通するもの）は、同じナンバリングとしている。

セット1 ($\theta_{max}=1/400rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、壁 E の周囲のシーリング材の切れ (表 5-4 中(31)) が観察された。下部の左角部を起点としていた。また、加力時に、壁 D と開口部を有する壁 (壁 C) との間に隙間 (表 5-4 中(32)) が発生することが観察された。下地側では、壁 D の上部の下張りボードの断面にひび割れ (表 5-4 中(33)) が観察された。

セット2 ($\theta_{max}=1/200rad$) において評価された損傷

仕上げ側でシーリング材の切れ (表 5-4 中(31)) が、下地側では下張りボードの断面のひび割れ (表 5-4 中(33)) が拡大することが観察された。

セット3 ($\theta_{max}=1/100rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、シーリング材の切れ (表 5-4 中(31)) が進行すると同時に、層間変位に応じて壁 E が水平移動することが観察され、その結果として壁 D 及び壁 F との間に隙間 (表 5-4 中(34)(35)) が発生することが観察された。下地側では、壁 E のスタッドの水平移動 (表 5-4 中(36)) と下部のランナーの変形が観察された (表 5-4 中(37))。

セット5 ($\theta_{max}=1/75rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、壁 E と、壁 D 及び壁 F との間の隙間が、除荷時にも残留すること (表 5-4 中(38)(39)) が観察された。下地側では、壁 D の上部のランナーが開き、加力時にはスタッドの外れ (表 5-4 中(40)) が観察された。また、壁 D の下部のランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形 (表 5-4 中(41)) が観察された。更に、壁 E の下張りボードの目地周辺で、ビス穴の拡大 (表 5-4 中(42)) が観察された。

セット7 ($\theta_{max}=1/50rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、層間変位に応じた壁 E の水平移動が減少することが観察された。壁 D の上部の上張りボードの角の折れ (表 5-4 中(43)) が観察された。下地側では、壁 D の上部のランナーの開きとスタッドの外れが除荷時でも残るようになり、周囲の下張りボードの破壊 (表 5-4 中(44)) が観察された。更に、壁 D と開口部を有する壁 (壁 C) のスタッド同士を固定するビスの変形 (表 5-4 中(45)) が観察された。

セット9 ($\theta_{max}=1/33rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、壁 E の周囲のシーリング材の切れ (表 5-4 中(31)) がほぼ全面的になったことが観察され、壁 E の周囲の隙間 (表 5-4 中(38)(39)) も増大することが観察された。下地側では、壁 D の上部のランナーの開き (表 5-4 中(44)) も増大することが観察された。また、厳密には壁 D, E, F の損傷ではないが、先付金物と先行ピースを接合するピンのせん断破壊 (表 5-4 中(46)) が観察された。

壁 D, E, F の損傷の原因の考察

目視観察の結果をまとめると、開口部を有する壁（壁 C）と壁 E に挟まれ、壁 D が鉛直軸回りに、上からみて反時計方向に回転することが確認された。そして、壁 E は加力時に水平移動し、特に正方向への加力時には、壁構面内方向に回転することが確認された。図 5-2 に、確認された損傷や挙動から、それぞれの挙動の相互関係などについて考察した結果のイメージを示す。図 5-2 では、層間変形角 $1/50\text{rad}$ までの場合と、層間変形角 $1/33\text{rad}$ の場合における正負方向への加力時の開口部を有する壁（壁 C）、壁 D、壁 E、壁 F の挙動について考察した結果を分けて示している。以下では、図 5-2 に沿って、各壁の挙動と損傷の原因について考察した結果を説明する。

まず層間変形角 $1/50\text{rad}$ までの正方向への加力時の挙動について考察した結果を説明する。開口部を有する壁（壁 C）と壁 F の上部は、鉄骨梁に接合されているため、層間変位に対して水平方向に移動する。これに対して壁 D と壁 E は、鉄骨梁に直接接合されていないため、層間変位から受ける影響が比較的小さい。しかし、正方向への加力時には、壁 F に押されるため、壁 E は正方向に水平移動する。そして、この壁 E と開口部を有する壁（壁 C）に挟まれた壁 D は、鉛直軸回りに、上からみて反時計方向に回転する⁹。壁 D 下部のランナーとスラブを固定する打込みピンの変形（表 5-4 中(41)）、壁 D と開口部を有する壁（壁 C）のスタッド同士を固定するビスの変形（表 5-4 中(45)）の原因は、この壁 D の鉛直軸回りの回転と推測される。

次に、層間変形角 $1/50\text{rad}$ までの負方向への加力時の挙動について考察した結果を説明する。図 5-3 に、壁 D の周辺の負方向への加力時の挙動のイメージを示す。壁 E は壁 D から負方向への加力を受けるが、壁 D と壁 E の交点は鉄骨梁の直下にないため、鉛直上向きの移動に対する拘束が先行ピースの曲げ抵抗のみで弱く、壁 F の下端を支点に壁 E の端部が浮き上がり、面内回転をする。このとき、図 5-3 に向かい合う赤色の矢印で示すように、壁 D と壁 E が接触している箇所に応力が集中したと推測される。壁 D 上部の下張りボードの断面のひび割れや破壊（表 5-4 中(33)(44)）、壁 D 上部のランナーの開き（とこれに伴うスタッドの外れ）（表 5-4 中(40)(44)）の原因は、この応力だと推測される。

最後に層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時の挙動について考察した結果を説明する。まず、正方向への加力時の挙動は層間変形角 $1/50\text{rad}$ までの時と同じである。その一方で、負方向の加力時は、壁 D の上部の下張りボードが破壊した結果、壁 E を壁構面内方向に回転させていた力

⁹ 壁 E は全体が水平移動する一方で、壁 C は上部のみ水平移動するため、壁 D は両端で逆方向の力を受けるため、鉛直軸回りに回転すると考えられる。

¹⁰ 壁 C が壁 D に押されて水平移動することは確認されなかった。これは壁 D が力を負担できる程の剛性を有していなかったためであると考えられる。また、壁 C の開口補強材がスラブに固定されていたことの影響もあると考えられる。

を伝えきれなくなり、壁Eが面内回転しなくなる点で異なる。写真 5-2 に、層間変形角 1/33（負方向）時の壁Dの下地側の上部の様子を示す。

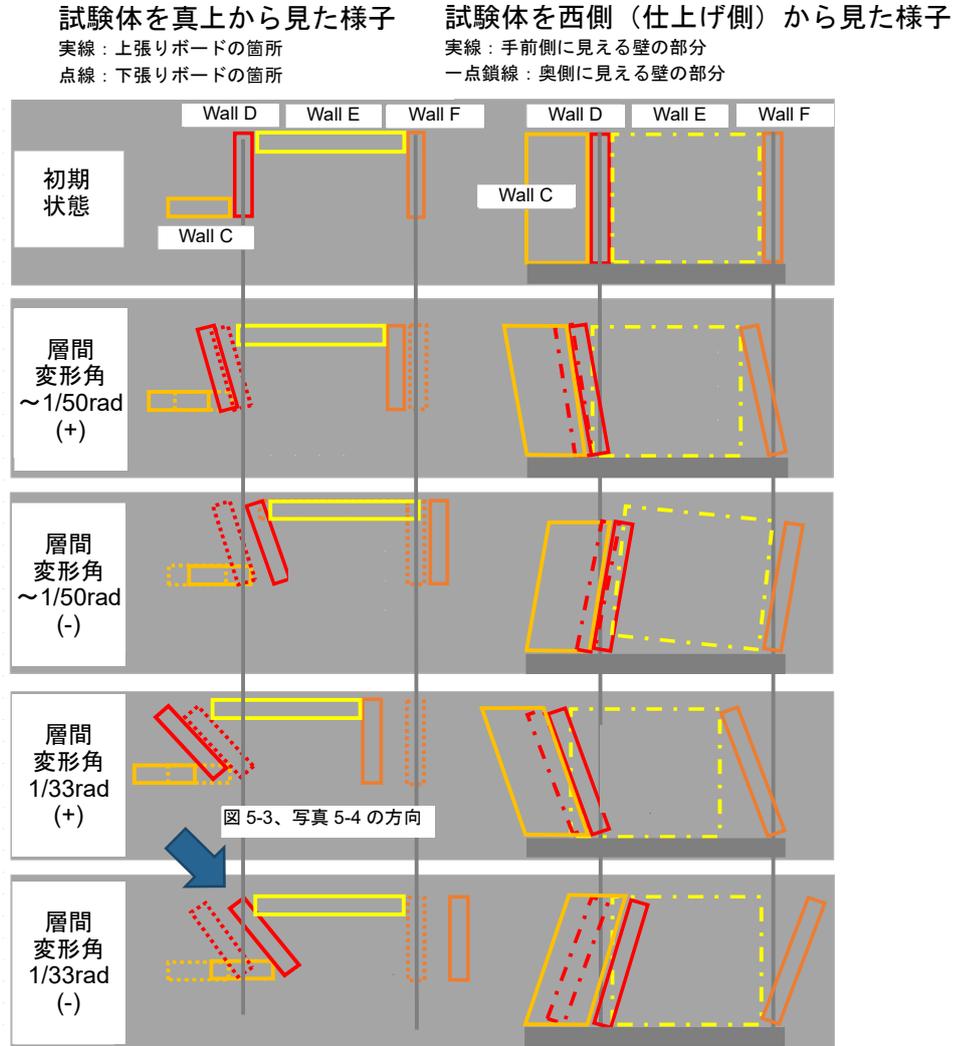


図 5-2 壁 C、壁 D、壁 E、壁 F の挙動について考察した結果のイメージ¹¹

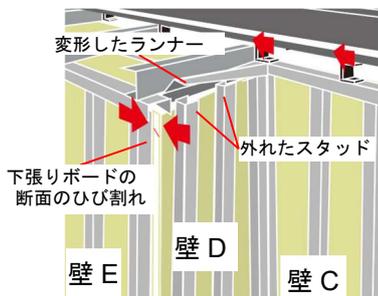


図 5-3 壁 D の周辺の負方向への加力時の挙動のイメージ

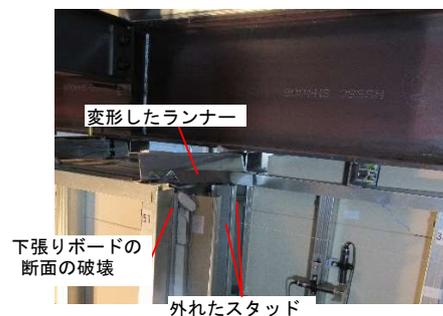


写真 5-2 層間変形角 1/33（負方向）時の壁 D の下地側の上部の様子

¹¹ ただし、層間変形角、変形、回転といった挙動を誇張して表現している。

5.1.2. ALC 外壁の損傷の評価

5.1.2.節では、実験②の結果に基づき、層間変位に対する ALC 外壁の損傷を評価した結果について説明する。

無開口の平坦な壁（壁 A）と開口部を有する壁（壁 B）に分けて、それぞれについて、層間変位に対する損傷を評価した結果を図と文章で説明する。損傷に関してはその原因を分析した結果についても説明する。

なお、セット 3、セット 5、セット 7 は、 θ_{\max} の値が直前のセットの θ_{\max} の値より小さくなるセットである。そして、これらのセットでは、新しい損傷の発生は殆ど評価されなかった。そのため、以下ではこれらのセットでの結果は省略する¹²。

また、5.1.2.節（並びに 5.1.3.節、5.1.4.節）で示す内容は、既報 [4]¹³ [2]¹⁴でも報告されている。特に八木の修士論文 [2]の付録に、実験②の観察結果の詳細が写真共に載せられている。そのため、ここでは最小限の説明に留める。

¹² 5.1.3.節のドアと、5.1.4.節の窓についても同様

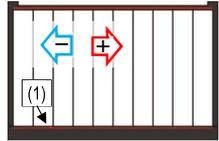
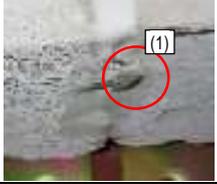
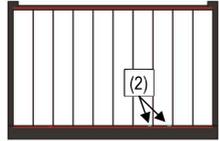
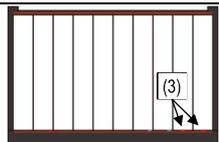
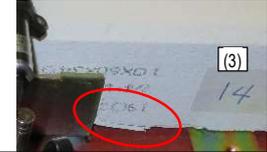
¹³ 八木尚太郎，清家剛，山田哲，石田孝徳，吉敷祥一，上瀧敬太，テンデランランディ. (2020). 鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験. 日本建築学会技術報告集, 64, 864-874. doi:10.3130/aijt.26.869

¹⁴ 八木尚太郎. (2018). 地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究 ―乾式間仕切り壁と ALC 外壁を対象とした実大載荷実験を通して―. 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会分環境学専攻.

層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の評価結果

表 5-5 に層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷を評価した結果を示す。表 5-5 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている¹⁵。

表 5-5 層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の評価結果（実験②）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況	損傷の様子
Set 1 $\theta_{\max}=1/200$		仕上げ側 ・ ALC パネルの底面のひび割れ (1)	
		下地側	
Set 4 $\theta_{\max}=1/75$		・ ALC パネルの底面のひび割れ(2)	
Set 6 $\theta_{\max}=1/50$		・ ALC パネルの底面のひび割れ(3)	 ※この写真は層間変形角 1/33rad の時のもの。

赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／橙線：その他の損傷
※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

セット 1 ($\theta_{\max}=1/200\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側で、ALC パネルの底面において、ALC パネルの目地付近でひび割れ（表 5-5 中 (1)）が観察された。

セット 4 ($\theta_{\max}=1/75\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側で、ALC パネルの底面において、受けプレート付近でひび割れ（表 5-5 中(2)）が観察された。

セット 6 ($\theta_{\max}=1/50\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側で、ALC パネルの底面において、受けプレート付近でひび割れ（表 5-5 中(3)）が観察された。

なお、これらの損傷の原因の考察は、開口部を有する壁（壁 B）の方で説明する。

¹⁵ 同じ種類の損傷（発生時の外力、原因などが共通するもの）は、同じナンバリングとしている。

層間変位に対する開口部を有する壁（壁B）の損傷の評価結果

表 5-6 に層間変位に対する開口部を有する壁（壁B）の損傷を評価した結果を示す。表 5-6 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている。

表 5-6 層間変位に対する開口部を有する壁（壁B）の損傷の評価結果（実験②）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況	損傷の様子
Set 2 $\theta_{max}=1/100$		仕上げ側 ・ ALC パネルの底面のひび割れ (4)	 ※この写真は層間変形角 1/100rad の時のもの。
Set 4 $\theta_{max}=1/75$		・ ALC パネルの底面のひび割れ (5)	
		下地側 ・ ALC パネルの角部のひび割れ (6)	
Set 6 $\theta_{max}=1/50$		・ ALC パネルの表面のひび割れ(7)(8) ・ ALC パネルの底面のひび割れ(9)	
		・ ALC パネルの表面のひび割れ(10)(11)	
Set 8 $\theta_{max}=1/33$		・ シーリング材の切れ(12) ・ ALC パネルの表面のひび割れ(13)(14)(15)(16)(17)	
		・ ALC パネルの表面のひび割れ(18)(19)	

赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／橙線：その他の損傷
※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

セット 2 ($\theta_{\max}=1/100\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側で、ALC パネルの底面において、ALC パネルの目地付近にひび割れ (表 5-6 中(4)) が観察された。

セット 4 ($\theta_{\max}=1/75\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側では、ALC パネルの底面において、ALC パネルの目地付近にひび割れ (表 5-6 中(5)) が観察された。下地側では、ドアと窓の上の ALC パネルの表面において、ALC パネルの角部にひび割れ (表 5-6 中(6)) が観察された。

セット 6 ($\theta_{\max}=1/50\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側では、窓の上に位置する ALC パネルの表面において、ボルトが位置する付近にひび割れ (表 5-6 中(7)) が観察された。また、窓の下の ALC パネルの表面において、角部にひび割れ (表 5-6 中(8)) が観察された。また、ALC パネルの底面において、ALC パネルの目地付近にひび割れ (表 5-6 中(9)) が観察された。下地側では、窓の上下に位置する ALC パネルの表面において、ボルトが位置する箇所を起点とするひび割れ (表 5-6 中(10)) が観察された。また、窓の上の ALC パネルの表面において、角部にひび割れ (表 5-6 中(11)) が観察された。

セット 8 ($\theta_{\max}=1/33\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側では、ドアもしくは窓に隣接する ALC パネル間のシーリング材の切れ (表 5-6 中(12)) が観察された。また、窓の上下に位置する ALC パネルの表面において、ボルトが位置する付近にひび割れ (表 5-6 中(13)) が観察された。更に、窓の下及び扉の上に位置する ALC パネルの表面において、角部にひび割れ (表 5-6 中(14)) が観察された。そして、窓の上の ALC パネル及び隣接する ALC パネルの表面において、頂部にひび割れ (表 5-6 中(15)) が観察された。このひび割れにより、破片が面外に飛び出していた。加えて、ドアに隣接する ALC パネルの表面において、角部にひび割れ (表 5-6 中(16)) が観察された。他には、窓とドアの間に位置する ALC パネルの表面において、中央部にひび割れ (表 5-6 中(17)) が観察された。下地側では、窓の上に位置する ALC パネルの表面において、ボルトが位置する箇所を起点とするひび割れ (表 5-6 中(18)) が観察された。また、窓の上下の ALC パネルの表面において、角部にひび割れ (表 5-6 中(19)) が観察された。

開口部を有する壁（壁 B）（並びに無開口の平坦な壁（壁 A））の損傷の原因の考察

ALC パネルの目地付近で観察されたひび割れ（表 5-5 中(1)、表 5-6 中(4) (5)）の原因は、ALC パネルの目地から溢れて ALC パネルの底面に付着したシーリング材に、ALC パネルがロックした際に発生した張力だと推測される。

ALC パネルの受けプレート付近で観察されたひび割れ（表 5-5 中(2)(3)）の原因は、ALC パネルがロックした際に、ALC パネルの底面と受けプレートが接触したと推測される。図 5-4 に、ALC パネルの底面と受けプレートの接触のイメージを示す。

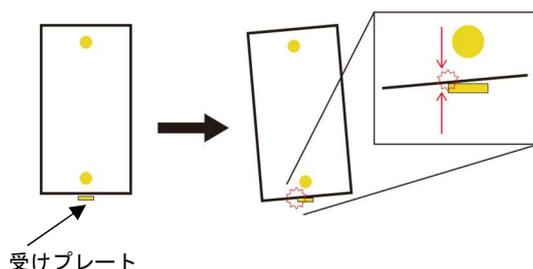


図 5-4 ALC パネルの底面と受けプレートの接触のイメージ

ALC パネルの表面において、開口補強鋼材に隣接する ALC パネルの角部に観察されたひび割れ（表 5-6 中(6)(8)(11)(14)(19)）の原因は、ALC パネルがロックし、開口補強鋼材と接触した結果、ALC パネルと開口補強鋼材の間に発生した応力と推測される。図 5-5 に、ALC パネルの角部に観察されたひび割れの発生メカニズムのイメージを示す。

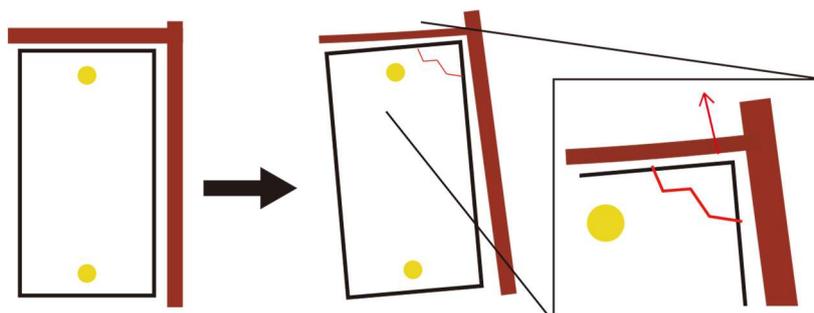


図 5-5 ALC パネルの角部に観察されたひび割れの発生メカニズムのイメージ

ALC パネルの表面において、頂部に観察されたひび割れ（表 5-6 中(7)(13)）、及びボルトが位置する箇所を起点とするひび割れ（表 5-6 中(10)(18)）の原因は、ALC パネルがロックし、開口補強鋼材と接触した結果、ALC パネルとボルトの間に発生した応力と推測さ

れる。図 5-6 に、ALC パネルのボルトが位置する付近に観察されたひび割れ及びボルトが位置する箇所を起点とするひび割れの発生メカニズムのイメージを示す。

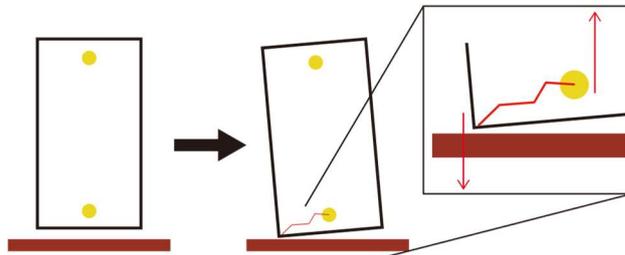


図 5-6 ALC パネルの角部に観察されたひび割れの発生メカニズムのイメージ

ALC パネルの表面において、開口補強鋼材に隣接しない ALC パネルの角部や頂部に観察されたひび割れ (表 5-6 中(15)(16)) の原因は、隣接する ALC パネル同士で、ロッキングの量が異なったことと推測される。上記で説明したように、開口補強鋼材と接触する ALC パネルは、ロッキングに対する拘束力を開口補強鋼材から受ける。そのため、開口補強鋼材との接触の有無や、接触の仕方によって、ALC パネルはそのロッキングの量がそれぞれ異なることが想定される。この結果、ALC パネル間に応力が発生し、ひび割れに至ったと推測される。図 5-7 に、開口補強鋼材に隣接しない ALC パネルの頂部に観察されたひび割れの発生メカニズムのイメージを示す。なお、ALC パネルの中央付近に観察されたひび割れ (表 5-6 中(17)) や、ALC パネル間のシーリング材の切れ (表 5-6 中(12)) も、このことが原因と推測される。

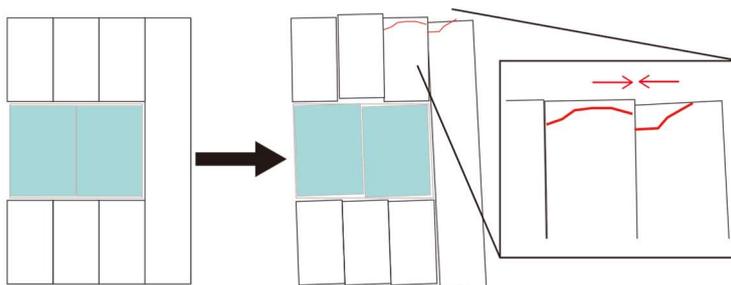


図 5-7 開口補強鋼材に隣接しない ALC パネルの頂部に観察されたひび割れの発生メカニズムのイメージ

5.1.3. ドアの損傷の評価

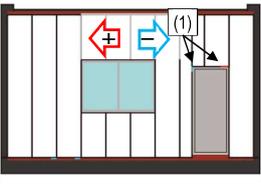
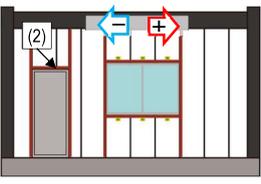
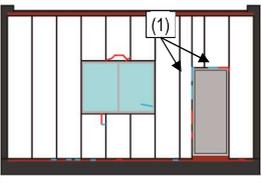
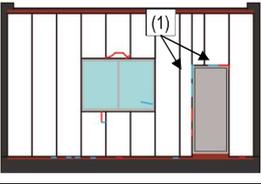
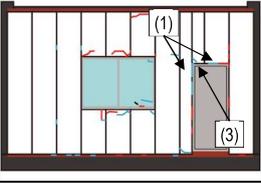
5.1.3.節では、実験②の結果に基づき、層間変位に対するドアの損傷を評価した結果について説明する。

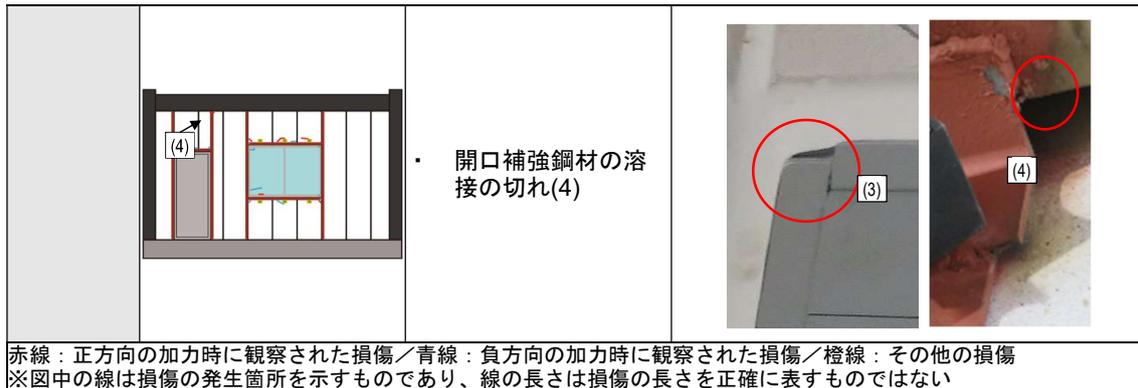
開閉機能の低下以外の損傷と、開閉機能の低下に分けて、それぞれについて、層間変位に対して評価した結果を図と文章で説明する。損傷に関してはその原因を分析した結果についても説明する。

ドアの損傷（開閉機能の低下以外）と層間変位の対応関係

表 5-7 に層間変位に対するドアの損傷（開閉機能の低下以外）を評価した結果を示す。表 5-7 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている。

表 5-7 層間変位に対するドアの損傷（開閉機能の低下以外）の評価結果（実験②）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況	損傷の様子
Set 1 $\theta_{max}=1/200$		仕上げ側 ・シーリング材の切れ(1)	
		下地側 ・モルタルのひび割れ(2)	
Set 6 $\theta_{max}=1/100$		・シーリング材の切れの拡大	
Set 6 $\theta_{max}=1/50$		・シーリング材の切れの拡大	
Set 8 $\theta_{max}=1/33$		・シーリング材の切れの拡大 ・三方枠の破断(3)	



セット 1 ($\theta_{max}=1/200rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、三方枠と ALC パネルの間のシーリング材の切れ (表 5-7 中(1)) が観察された。下地側では、三方枠と開口補強鋼材の間のモルタルにひび割れ (表 5-7 中(2)) が観察された。

セット 8 ($\theta_{max}=1/33rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、三方枠において、鉛直材と水平材の接合部の破断 (表 5-7 中(3)) が観察された。下地側では、開口補強鋼材において、鉛直材と鉄骨梁の接合部の溶接に切れ (表 5-7 中(4)) が観察された。

ドアの損傷 (開閉機能の低下以外) の原因の考察

三方枠と ALC パネルの間のシーリング材の切れ (表 5-7 中(1)) の原因は、三方枠と ALC パネル間の加力時の傾斜の量に差があったことと推測される。特に、三方枠の水平材は傾斜しないため、ロックする ALC パネルとの間には差が発生する。また、モルタルのひび割れ (表 5-7 中(2)) の原因は、せん断変形する三方枠に対して、モルタルが追従しないことと推測される。更に、三方枠の破断 (表 5-7 中(3)) の原因は、せん断変形する三方枠に対して、扉が追従しないことと推測される。最後に、開口補強鋼材の溶接の切れ (表 5-7 中(4)) の原因は、加力時に傾斜する開口補強鋼材の鉛直材と、比較的水平を保つ鉄骨梁との間の溶接に発生した引張力と推測される。

層間変位に対するドアの開閉機能の評価結果

図 5-8 に層間変位に対するドアの開閉機能の低下を評価した結果を示す。層間変形角 $+1/200\text{rad}$ の時に初めて「力を入れれば機能する」と評価され、層間変形角 $-1/200\text{rad}$ 初めての「機能しない」と評価された。実験②を通じて、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ 以内の範囲では、「正常に機能する」と評価され、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ を超える範囲では、「力を入れれば機能する」もしくは「機能しない」と評価される場合が多い結果となった。すなわち、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ がドアの開閉機能を考える上では重要な指標となっていると言える。

実際の地震の際に開閉機能が重要となるのは、揺れが収まった後の避難時である。つまり、実験でいうところの除荷時に開閉機能が機能することが求められる。実験②では、除荷時も層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ が境界となっており、層間変形角 $-1/33\text{rad}$ 経験後の除荷時に初めて「力を入れれば機能する」と評価される結果となった。

また、総じて、同じ層間変形角の量でも、負方向に加力した時の方が、開閉機能は低く評価される傾向にあった。

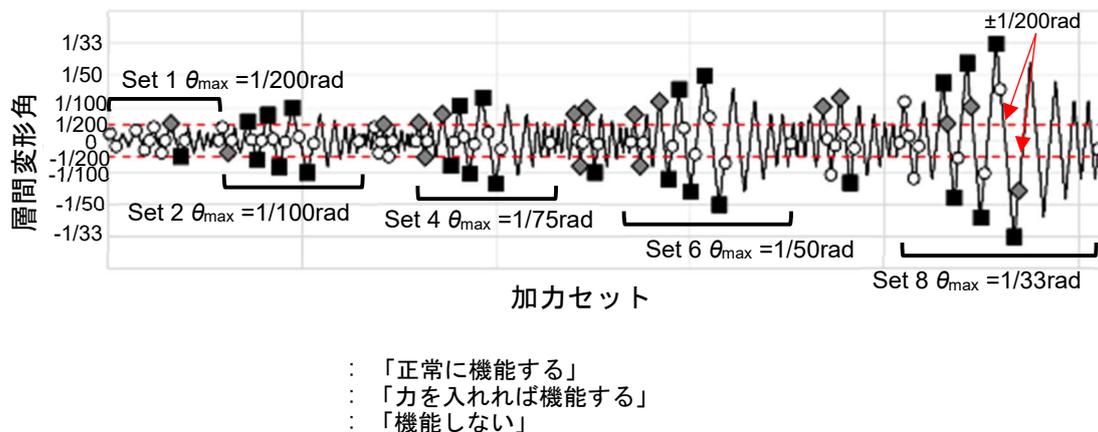


図 5-8 ドアの開閉機能の評価結果

ドアの開閉機能の低下の原因の考察

開閉機能の低下としては、主に解錠、ノブ、開扉のいずれかの機能の低下であった。**1.1.8. 節**で示したように、扉は三方枠に対してヒンジとドアクローザーを介して設置される。そのため、加力時は、三方枠のせん断変形に追従して、三方枠内で扉は構面内方向に回転する。この回転により、デッドボルトがストライクと干渉すると、解錠に支障をきたす。また、この回転により、ラッチボルトがストライクと干渉すると、ノブの回転に支障をきたす。更に、この回転により扉が三方枠と干渉すると、開扉に支障をきたす。すなわち、開閉機能の低下の原因は、ストライクとデッドボルト及びラッチボルトとの干渉、そして扉と三方枠との干渉と推測される。図 5-9 に、ドアの開閉機能の低下の発生メカニズムのイメージを示す。

すなわち、開閉機能の低下の程度は、ストライクとデッドボルト及びラッチボルトとの間隔の量、そして扉と三方枠との間隔の量に依存すると推測される。加力の正負方向によって、開閉機能の低下度合いが異なった原因としては、これらの隙間の量が各所で異なったためだと推測される。ただし、実験②では、解錠、ノブの回転、開扉の機能のそれぞれを正確に分離して記録していなかったため、これ以上の分析はできなかった。

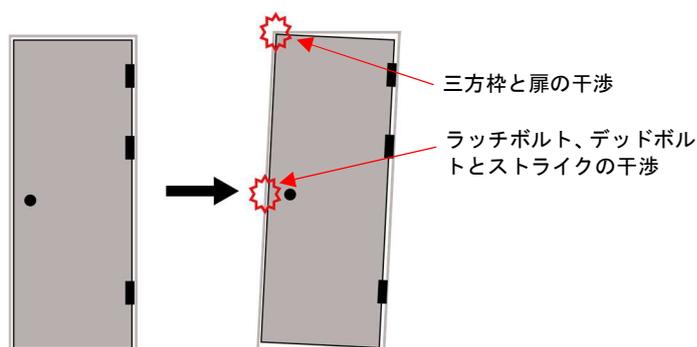


図 5-9 ドアの開閉機能の低下の発生メカニズムのイメージ

5.1.4. 窓の損傷の評価

5.1.4節では、実験②の結果に基づき、層間変位に対する窓の損傷を評価した結果について説明する。

開閉機能の低下以外の損傷と、開閉機能の低下に分けて、それぞれについて、層間変位に対して評価した結果を図と文章で説明する。損傷に関してはその原因を分析した結果についても説明する。

層間変位に対する窓の損傷（開閉機能の低下以外）の評価結果

表 5-8 に層間変位に対する窓の損傷（開閉機能の低下以外）を評価した結果を示す。表 5-8 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている。

表 5-8 層間変位に対する窓の損傷（開閉機能の低下以外）の評価結果（実験②）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況	損傷の様子
Set 1 $\theta_{max}=1/200$		下地側 ・モルタルのひび割れ(1)	
Set 6 $\theta_{max}=1/50$		・ガラスのひび割れ(2) ・開口補強鋼材の溶接の切れ(3)	
Set 8 $\theta_{max}=1/33$		仕上げ側 ・シーリング材の切れ(4)	
		・ガラスのひび割れ(5) ・ガラスのシーリング材の切れ(6) ・サッシの変形(7)	

赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／橙線：その他の損傷
※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

セット1 ($\theta_{max}=1/200rad$) においての時に評価された損傷

下地側で、サッシと開口補強鋼材間のモルタルにひび割れ (表 5-8 中(1)) が観察された。

セット6 ($\theta_{max}=1/50rad$) において評価された損傷

下地側¹⁶で、ガラスの左下の角部を起点とするひび割れ (表 5-8 中(2)) が観察された。また、開口補強鋼材の水平材と鉛直材の接合部の溶接の切れ (表 5-8 中(3)) が、4箇所全てで観察された。

セット8 ($\theta_{max}=1/33rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、窓の右上角部において、窓と ALC パネル間のシーリング材の切れ (表 5-8 中(4)) が観察された。下地側¹⁷では、ガラスの左上の角部を起点とするひび割れ (表 5-8 中(5)) が観察された。また、ガラスの下部の左側で、ガラスをサッシに固定するシーリング材の切れ (表 5-8 中(6)) が観察された。また、サッシにおいて、縦枠と上枠及び下枠との接合部での角部が折れ曲がる変形 (表 5-8 中(7)) が、4箇所全てで観察された。

窓の損傷 (開閉機能の低下以外) の原因の考察

モルタルのひび割れ (表 5-8 中(1)) の原因は、せん断変形するサッシに対して、モルタルが追従しないことと推測される。サッシの変形 (表 5-8 中(7)) の原因も、このサッシのせん断変形と推測される。サッシと ALC パネル間のシーリング材の切れ (表 5-8 中(4)) の原因は、サッシと ALC パネル間の加力時の傾斜の量に差があったことと推測される。開口補強鋼材の溶接の切れ (表 5-8 中(3)) の原因は、加力時に傾斜する開口補強鋼材の鉛直材と、比較的水平を保つ水平材との間の溶接に発生した引張力と推測される。

ガラスのひび割れ (表 5-8 中(2)(5)) の原因は、1.1.8.節で説明した通り、サッシがせん断変形した結果、ガラスの対角線の長さと、枠の対角線の長さが一致したためだと推測される。ガラスのシーリング材の切れ (表 5-8 中(4)) の原因は、ガラスのロックングと推測される。なお、ガラスのシーリング材の切れが観察された位置は、ガラスのセッティングブロックが設置されている位置と概ね一致していた。そのため、シーリング材の切れの原因としてガラスのセッティングブロックの分シーリング材が局所的に薄かったことが考えられる。

¹⁶ ガラスの損傷であるため、仕上げ側からも確認可能。

¹⁷ ガラスの損傷であるため、仕上げ側からも確認可能。

層間変位に対する窓の開閉機能の低下の評価結果

図 5-10 に層間変位に対する窓の開閉機能の低下を評価した結果を示す。層間変形角 $-1/200$ の時に初めて「力を入れれば機能する」と評価された。実験②を通じて、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ 以内の範囲では、「正常に機能する」と評価される場合が多く、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ を超える範囲では、「力を入れれば機能する」もしくは「機能しない」と評価される場合が多い結果となった。すなわち、ドアと同じく、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ がドアの開閉機能を考える上では重要な指標となっていると言える。ただし、セット6以降は、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ 以内の範囲でも、「力を入れれば機能する」と評価される場合があった。

実際の地震の際に開閉機能が重要となるのは、揺れが収まった後の避難時である。つまり、実験でいうところの除荷時に開閉機能が機能することが求められる。実験②では、除荷時も、セット6までは層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ が境界となっており、層間変形角 $-1/50\text{rad}$ 経験後の除荷時に初めて「機能しない」と評価される結果となった。

また、ドアと異なり、加力の方向で開閉機能の低下度合いの差は見られなかった。

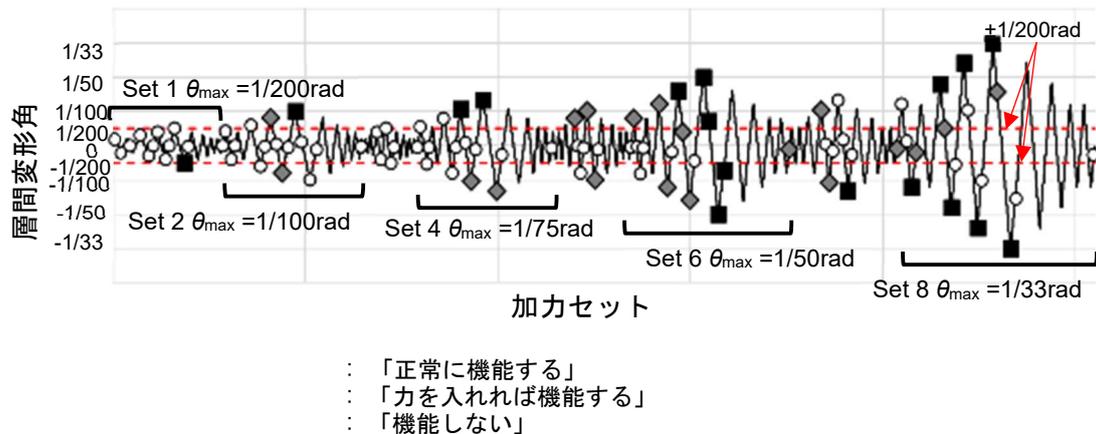


図 5-10 窓の開閉機能の評価結果

窓の開閉機能の低下の原因の考察

開閉機能の低下としては、主に解錠、障子のスライドのいずれかの機能の低下であった。**1.1.8.節**で示したように、せん断変形するサッシに対して、障子は構面内方向に回転する。この回転により、サッシと障子とが干渉すると、障子のスライドに支障をきたす。また、この回転により、クレセント錠部分に応力が集中すると、解錠に支障をきたす。すなわち、開閉機能の低下の原因は、せん断変形するサッシ及び、これに伴う障子の面内方向の回転と推測される。**図 5-11**に、ドアの開閉機能の低下の発生メカニズムのイメージを示す。ただし、実験②では、解錠、サッシのスライドの機能のそれぞれを正確に分離して記録していなかったため、これ以上の分析はできなかった。

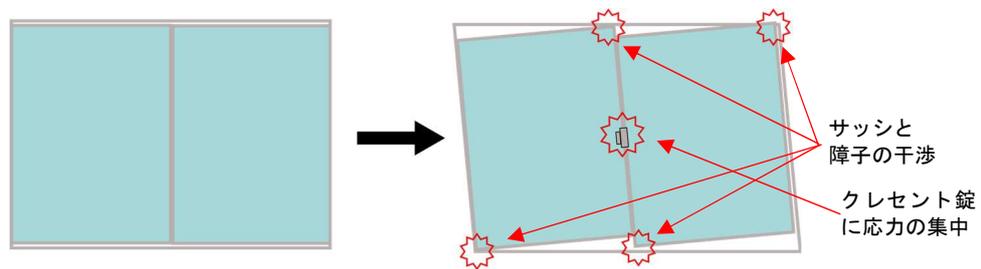


図 5-11 ドアの開閉機能の低下の発生メカニズムのイメージ

また、サッシの内部には、障子の構面外方向への脱落防止を目的として、“ストッパー”と呼ばれる部材が設置されている。**写真 5-3**に、ストッパーの外観をしめす。障子のスライドの機能の低下には、このストッパーの位置が大きく関係することが見て取れた。例えば、ストッパーが中央にある時は、層間変形角 $1/200\text{rad}$ で「機能しない」と評価された一方で、ストッパーがサッシの端に移動した時は、層間変形角 $1/75\text{rad}$ で「正常に機能する」と評価された場合があった。なお、ストッパーが移動した原因は、開閉機能の確認の際に、力をかけて強制的に障子をスライドさせたことと推測される。この時、障子と一緒にストッパーも移動し、これを繰り返した結果、ストッパーが端に移動したり、中央に戻ったりを繰り返したと考えられる。

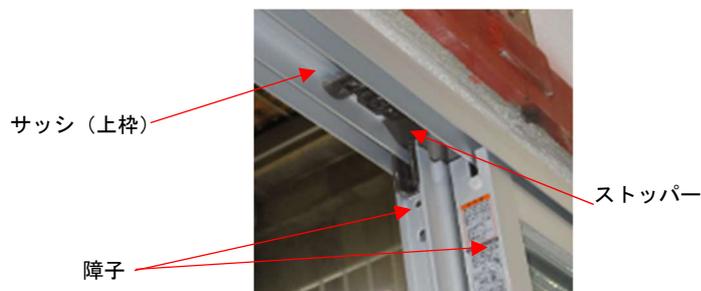


写真 5-3 “ストッパー”の外観

5.2. 異種の構造部材の層間変位に対する内外装壁の損傷の評価

5.2.節では、実験③の結果に基づき、異種の構造部材の層間変位に対する内外装壁の損傷を評価した結果について説明する。

5.2.1.節では実験③の結果に基づき、異種の構造部材の層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷を評価した結果について説明する。

5.2.2.節では実験③の結果に基づき、異種の構造部材の層間変位に対するドアの損傷を評価した結果について説明する。

5.2.1. LGS 間仕切り壁の損傷の評価

5.2.1.節では実験③の結果に基づき、異種の構造部材の層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷を評価した結果について説明する。

無開口の平坦な壁（壁 A）と開口部を有する壁（壁 B）に分けて、それぞれについて、異種の構造部材の層間変位に対する損傷を評価した結果を図と文章で説明する。主な損傷に関してはその原因を分析した結果についても説明する。

なお、各加力セットでは、正負方向への加力を 2 回繰り返しているが、2 回目の加力時に新たに発生した損傷や進行した損傷は評価されなかった。そのため、ここで示す損傷は 1 回目の加力時に評価されたものである¹⁸。

また、5.2.1.節（並びに 5.2.2.節）で示す内容の一部は既報 [5]¹⁹でも報告されている。

¹⁸ 5.1.3.節のドアと、5.1.4.節の窓についても同様

¹⁹ 八木尚太郎, 巽信彦, 磯田充樹, 吉敷祥一, 本田信一, 清家剛, 前田匡樹, 西村康志郎.(2022). 実大載荷実験を通じた RC 骨組に取り付けた乾式間仕切り壁と鋼製ドアの損傷に関する考察. 日本建築学会技術報告集(70), 1125-1130. doi:10.3130/aijt.28.1125

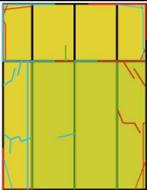
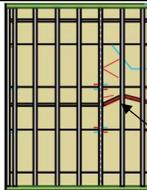
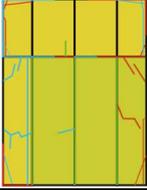
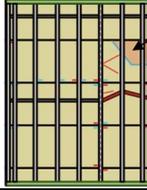
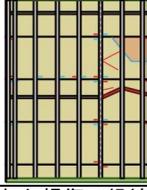
異種の構造部材の層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の評価結果

表 5-9 に、異種の構造部材の層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷を評価した結果を示す。表 5-9 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている²⁰。

表 5-9 異種の構造部材の層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の評価結果
(実験③)

Set No.	仕上げ側の損傷の発生箇所	仕上げ側の損傷の発生状況	下地側の損傷の発生箇所	下地側の損傷の発生状況
Set 1 $\theta_{max}=1/1000$		<ul style="list-style-type: none"> 角部でシーリング材の切れ(1) 上張りボードとスラブとの間に隙間(2) 		
Set 2 $\theta_{max}=1/333$		<ul style="list-style-type: none"> シーリング材の切れなどの進行 		<ul style="list-style-type: none"> スタッドの水平移動(3)
Set 3 $\theta_{max}=1/200$		<ul style="list-style-type: none"> シーリング材の切れなどの進行 		
Set 4 $\theta_{max}=1/150$		<ul style="list-style-type: none"> 下部の角部で上張りボードに斜め方向のしわ(4) 上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ(5) 		
Set 5 $\theta_{max}=1/100$		<ul style="list-style-type: none"> 上張りボードのひび割れ(6) 		<ul style="list-style-type: none"> 下張りボードの角部にひび割れ(7)
Set 6 $\theta_{max}=1/67$		<ul style="list-style-type: none"> 上張りボードの面外方向への傾斜(8) 		<ul style="list-style-type: none"> 下張りボードのひび割れ(9) 下張りボードのしわ(10) 下張りボードの目地周辺でビス穴の拡大(11)

²⁰ 同じ種類の損傷（発生時の外力、原因などが共通するもの）は、同じナンバリングとしている。

Set 7 $\theta_{\max}=1/50$		<ul style="list-style-type: none"> 上張りボードの面外方向への傾斜などの増大 		<ul style="list-style-type: none"> 上部のランナーとRC梁を接合する打ち込みピンの抜け(12) 振れ止めの変形(13)
Set 8 $\theta_{\max}=1/40$		<ul style="list-style-type: none"> 上張りボードの面外方向への傾斜などの増大 		<ul style="list-style-type: none"> 下張りボードの面外方向への傾斜(14)
Set 9 $\theta_{\max}=1/33$		<ul style="list-style-type: none"> 上張りボードの面外方向への傾斜などの増大 		<ul style="list-style-type: none"> 下張りボードの面外方向への傾斜などの増大
<p>赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／緑線：その他の損傷 ※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない</p>				

セット1 ($\theta_{\max}=1/1000\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側で、上張りボードとRC柱およびRC壁との間のシーリング材の切れ(表5-9中(1))が端部で観察された。また、上張りボードとスラブとの間にも隙間(表5-9中(2))が観察された。

セット2 ($\theta_{\max}=1/333\text{rad}$) において評価された損傷

下地側で、ランナー内を滑るようなスタッドの水平移動(表5-9中(3))が加力時に観察された。

セット4 ($\theta_{\max}=1/150\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側で、上部の角部で上張りボードに斜め方向のしわ(表5-9中(4))が観察された。また、上張りボードの水平方向の目地に沿った塗装やパテのひび割れ(表5-9中(5))が観察された。

セット5 ($\theta_{\max}=1/100\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側では、上張りボードのひび割れ(表5-9中(6))が各所で観察された。下地側では、下張りボードの角部においてひび割れ(表5-9中(7))が各所で観察された。写真5-4に上張りボードのひび割れの様子を示す。

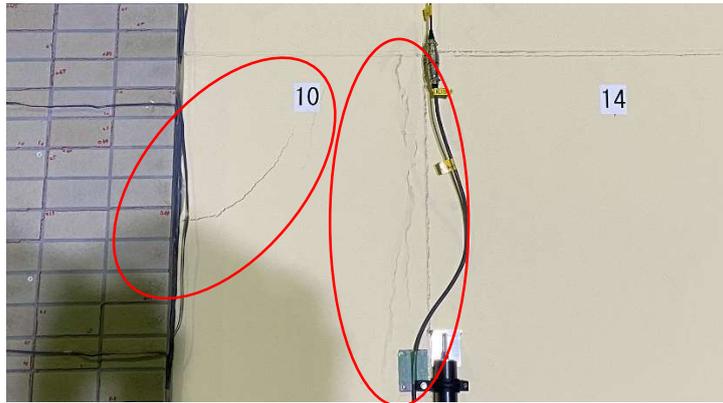


写真 5-4 上張りボードのひび割れ（表 5-9 中(6)）（セット 5 層間変形角-1/100rad 時）

セット 6 ($\theta_{max}=1/66rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、中央部の上張りボードの面外方向への傾斜（表 5-9 中(8)）が観察された。下地側では、下張りボードのひび割れ（表 5-9 中(9)）のほか、下張りボードのしわ（表 5-9 中(10)）や、目地周辺でのビス穴の拡大（表 5-9 中(11)）が観察された。写真 5-5 と写真 5-6 に上張りボードの面外方向への傾斜の様子を示す。



写真 5-5 上張りボードの面外方向への傾斜（表 5-9 中(8)）（セット 6 の層間変形角-1/67rad 時）

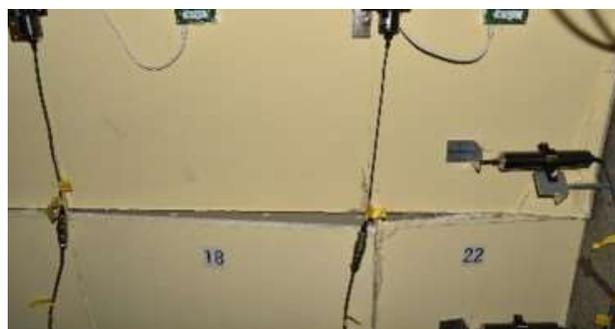


写真 5-6 上張りボードの面外方向への傾斜（表 5-9 中(8)）（セット 7 の層間変形角-1/50rad 時）

セット 7 ($\theta_{max}=1/50rad$) において評価された損傷

下地側で、上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け（表 5-9 中(12)）が観察された。打ち込みピンの周囲は抉られるように削られていることが観察された。写真 5-7 に打ち込みピンの抜けの様子を示す。また、RC 壁側で、振れ止めの変形（表 5-9 中(13)）が観察された。写真 5-8 に振れ止めの変形の様子を示す。

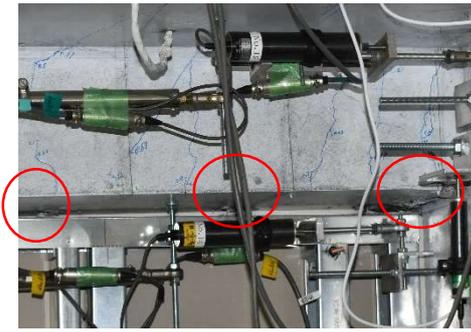


写真 5-7 打ち込みピンの抜け (表 5-9 中(12)) (セット 7 の層間変形角 1/50rad 時)

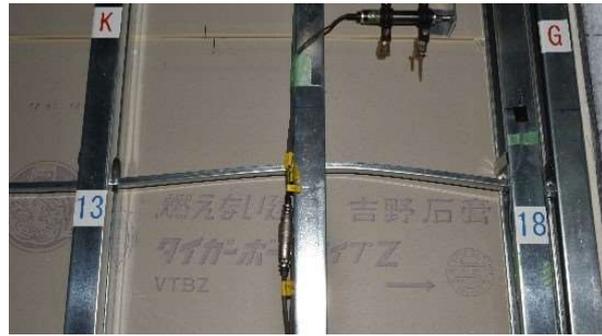


写真 5-8 振れ止めの変形 (表 5-9 中(13)) (セット 7 の層間変形角 1/50rad 時)

セット 8 ($\theta_{max}=1/40rad$) において評価された損傷

下地側で、セット 6 で観察された下張りボードのひび割れ (表 5-9 中(9)) に沿って、下張りボードの破片の面外方向への傾斜 (表 5-9 中(14)) が観察された。写真 5-9 に下張りボードの破片の面外方向への傾斜の様子を示す。



写真 5-9 下張りボードの破片の面外方向への傾斜 (表 5-9 中(14)) (セット 8 の層間変形角 1/40rad 時)

無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の原因の考察

実験③では LGS 間仕切り壁の挙動の把握のため、変位計などによる計測も行っていた。この結果については既報 [6]²¹で報告されており、損傷の原因の考察では報告された内容を適宜参照する。

既報 [6]によると、無開口の平坦な壁（壁 A）では、上張りボードと RC 架構との間に設けた隙間の幅を超えない変形までは、上張りボードがほぼ一体となって回転することで、RC 架構の変形に追従することが報告されている。また、隙間の幅を超える変形を受けると、上張りボードと RC 架構が接触して、上張りボードが面内方向に個々に回転し、上張りボードの目地においてずれ変位が発生する。シーリング材の切れ（表 5-9 中(1)）や上張りボードとスラブとの間の隙間（表 5-9 中(2)）の原因は、上記の上張りボードの一体としての回転と推測される。また、上張りボードの角部の斜め方向のしわ（表 5-9 中(4)）や上張りボードのひび割れ（表 5-9 中(6)）の原因は、RC 架構との接触と推測される。そして、上張りボードの目地に沿った塗装などのひび割れ（表 5-9 中(5)）の原因は、上記の上張りボードの個々の回転と推測される。なお、上張りボードの面外方向への傾斜（表 5-9 中(8)）の原因は、上張りボードと下張りボードの間の接着剤の接着力が低下した結果、壁の対角線方向に加わった圧縮力と推測される。

また、下張りボードのひび割れ（表 5-9 中(7)(9)）や下張りボードのしわ（表 5-9 中(10)）、下張りボードのビス穴の拡大（表 5-1 中(11)）の原因は、実験①（5.1.1.節で説明した内容）と同じく、下張りボードとスタッドの挙動が異なった結果、接続するビス部分に応力が集中したことだと推測される。より詳しく説明すると、ランナーは梁か床スラブに固定されており、RC 架構の変形に応じて水平方向に変位する。一方、スタッドは、ランナーにはめ込まれているだけで接合されていないため、ランナー内を滑ることになる。そして下張りボードはスタッドに取り付けられており、スタッドの滑りに応じて変位すると考えられる。実際に、既報 [6]では、層間変位に応じて下張りボード間のずれ変位とスタッドの水平変位が生じることが報告されている。ただし、下張りボードは RC 架構と接触した上張りボードの回転の影響も受ける。このように下張りボードは複数の方向の力を受けたことが、上張りボードと下張りボードとの接着力の低下や、下張りボードとスタッドを接合するビス穴の拡大、下張りボードのひび割れの原因となったことが推測される。特に、上張りボードの目地と位置が概ね一致する下張りボードのひび割れ（表 5-9 中(9)）は、このメカニズムにより発生した可能性が高いと考えられる。

²¹ 本田信一，巽信彦，磯田充樹，八木尚太郎，吉敷祥一，清家剛，前田匡樹，西村康志郎.(2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その 6 LGS 壁と鋼製ドアの挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021, 617-618.

ここで、写真 5-10 に、セット9 終了時の試験体の様子を示す。写真 5-10 から、RC 架構の中央にある RC 壁が、高さ中央部分に面内方向に膨らむような変形が残留していることが見て取れる。振れ止めの変形（表 5-9 中(13)）や、下張りボードの面外方向への傾斜（表 5-9 中(14)）の原因は、その発生箇所から考えて、この RC 壁の変形した部分との接触と推測される。



(a)

(b)

写真 5-10 セット9 終了時の試験体の様子; (a) 仕上げ側の様子, (b) 下地側の様子

最後に、上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け（表 5-9 中(12)）の原因は、層間変位により RC 梁が湾曲したことで、打ち込みピン周囲のコンクリートが破壊されたことと推測される。

その他の損傷に関しては、その発生メカニズムを特定することは困難である。ただし、これまでに述べた挙動が複合的に作用したことが原因であると推測される。

ここで、写真 5-11 に、セット9 終了時の面外方向に変位した上張りボードの様子を示す。セット7の時より、面外方向に変位した上張りボードは、目地処理のために貼り付けられたテープでのみ支えられている状況になっていた。なお、加力時は面外方向に変位していない上張りボードが、変位した上張りボードの裏に入り込むように変形していたため、損傷が進行する様子は見られなかった。ただし、元々上張りボードは面的に下張りボードに接合される形態であったのに対して、面外方向に変位した上張りボードは、1点で下張りボードに接合される形態に変わったと捉えることができる。そのため、影響を及ぼす外力の種類も、面内方向の層間変位から、面内方向／面外方向の慣性力になると考えられる。

そこで、損傷が発生した状態（特に上張りボードが面外方向に変位した状態）の LGS 間仕切り壁の損傷の発生と進展に、慣性力が与える影響について把握することを目的の一つとした実大実験を実施した。この実験については本研究では取り上げないが、付録 13 で紹介する。



写真 5-11 セット9 終了時の面外方向に変位した上張りボードの様子

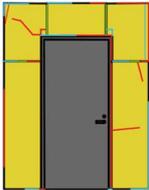
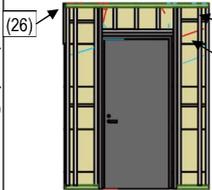
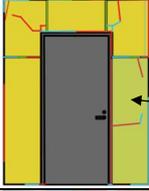
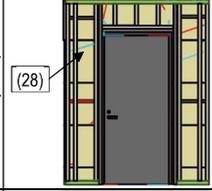
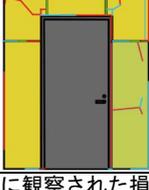
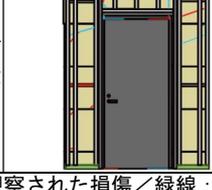
異種の構造部材の層間変位に対する開口部を有する壁（壁B）の損傷の評価結果

表 5-10 に異種の構造部材の層間変位に対する開口部を有する壁（壁 B）の損傷を評価した結果を示す。表 5-10 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている²²。

表 5-10 異種の構造部材の層間変位に対する開口部を有する壁（壁 B）の損傷の評価結果
(実験③)

Set No.	仕上げ側の損傷の発生箇所	仕上げ側の損傷の発生状況	下地側の損傷の発生箇所	下地側の損傷の発生状況
Set 1 $\theta_{max}=1/1000$		仕上げ側 ・ 上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ(15)		・ 下地側
Set 2 $\theta_{max}=1/333$		・ 開口部の左角部で上張りボードのひび割れ(16) ・ 角部でシーリング材の切れ(17)		・ スタッ드의水平移動(18)
Set 3 $\theta_{max}=1/200$				・ 上張りボードとスラブとの間に隙間(19) ・ 上張りボードと三方枠との間に隙間(20)
Set 4 $\theta_{max}=1/150$		・ 上張りボードのひび割れなどの増大		・ 上部で下張りボードのひび割れ(21)
Set 5 $\theta_{max}=1/100$		・ 上部の角部で上張りボードの斜め方向のしわ(22)		・ 下張りボードのひび割れ(23) ・ 下張りボードのしわ(24)
Set 6 $\theta_{max}=1/67$		・ 上張りボードのひび割れなどの増大		・ 下張りボードのひび割れなどの増大

²² 同じ種類の損傷（発生時の外力、原因などが共通するもの）は、同じナンバリングとしている。

Set 7 $\theta_{max}=1/50$		<ul style="list-style-type: none"> 上張りボードの面外方向への傾斜などの増大 		<ul style="list-style-type: none"> 下張りボードのひび割れ(25) 上部のランナーとRC梁を接合する打ち込みピンの抜け(26)
Set 8 $\theta_{max}=1/40$		<ul style="list-style-type: none"> 上張りボードの面外方向への傾斜(27) 		<ul style="list-style-type: none"> 振れ止めの変形(28)
Set 9 $\theta_{max}=1/33$		<ul style="list-style-type: none"> 上張りボードのひび割れなどの増大 		<ul style="list-style-type: none"> 下張りボードのひび割れなどの増大

赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／緑線：その他の損傷
※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

セット1 ($\theta_{max}=1/1000rad$) において評価された損傷

仕上げ側で、上張りボードの目地に沿った塗装やパテのひび割れ(表5-10中(15))が観察された。

セット2 ($\theta_{max}=1/333rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、開口部の左角部にあるL字型の上張りボードに、開口部の左角部を起点とする斜め左方向へのひび割れ(表5-10中(16))が観察された。また、上張りボードとRC柱およびRC壁との間のシーリング材の切れ(表5-10中(17))が端部で観察された。下地側では、ランナー内を滑るようなスタッドの水平移動(表5-10中(18))が観察された。

セット3 ($\theta_{max}=1/200rad$) において評価された損傷

仕上げ側で、上張りボードとスラブとの間に隙間(表5-10中(20))が、そして上張りボードと三方枠との間にも隙間(表5-10中(21))が観察された。

セット4 ($\theta_{max}=1/150rad$) において評価された損傷

下地側で、上部の下張りボードにひび割れ(表5-10中(21))が観察された。

セット5 ($\theta_{\max}=1/100\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側では、上部の角部で上張りボードに斜め方向のしわ（表 5-10 中(22)）が観察された。下地側では、下張りボードのひび割れ（表 5-10 中(23)）や、下張りボードのしわ（表 5-10 中(24)）が観察された。写真 5-12 に下張りボードのひび割れの様子を示す。



写真 5-12 下張りボードのひび割れ（表 5-10 中(23)）
（セット5の層間変形角 $1/100\text{rad}$ 時）

セット7 ($\theta_{\max}=1/50\text{rad}$) において評価された損傷

下地側では、開口部の角部からの下張りボードのひび割れ（表 5-10 中(25)）が観察された。写真 5-13 に下張りボードのひび割れの様子を示す。また、上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け（表 5-10 中(26)）が観察された。打ち込みピンの周囲は抉られるように削られていることが観察された。写真 5-14 に打ち込みピンの抜けの様子を示す。

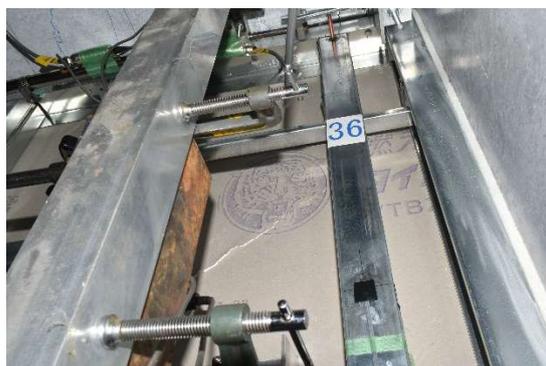


写真 5-13 下張りボードのひび割れ（表 5-10 中(25)）（セット7の層間変形角 $1/50\text{rad}$ 時）



写真 5-14 打ち込みピンの抜け（表 5-10 中(26)）（セット7の層間変形角 $1/50\text{rad}$ 時）

セット 8 ($\theta_{max}=1/40rad$) において評価された損傷

仕上げ側では、上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-10 中(27)) が観察された。写真 5-15 に上張りボードの面外方向への傾斜の様子を示す。下地側では、RC 壁側で、振れ止めの変形 (表 5-10 中(28)) が観察された。写真 5-16 に振れ止めの変形の様子を示す。



写真 5-15 上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-10 中(27)) (セット 8 の層間変形角 $1/40rad$ 時)



写真 5-16 振れ止めの変形 (表 5-10 中(28)) (セット 8 の層間変形角 $1/40rad$ 時)

開口部を有する壁（壁 B）の損傷の原因の考察

本項においても、既報 [6]²³で報告された内容を適宜参照する。

無開口の平坦な壁（壁 A）の場合と同じく、上張りボードの目地に沿った塗装などのひび割れ（表 5-10 中(15)）の原因は、上張りボードの面内方向の個々の回転と推測される。ここで、既報 [6]では、開口部を有する壁（壁 B）の上張りボードは、無開口の平坦な壁（壁 A）の上張りボードよりも早い段階で、個々に回転したことが報告されている。これは、開口部を有する壁（壁 B）において、上張りボードの目地に沿った塗装などのひび割れ（表 5-10 中(15)）が、最初に観察されたことと整合する。つまり、無開口の平坦な壁（壁 A）と異なり、開口部を有する壁（壁 B）では、上張りボードの一体としての回転ではなく、個々の回転が支配的であったことが推測される。シーリング材の切れ（表 5-10 中(17)）の発生箇所もこの推測と整合する。このため、シーリング材の切れ（表 5-10 中(17)）や上張りボードとスラブとの間の隙間（表 5-10 中(20)）、上張りボードと三方枠との間の隙間（表 5-10 中(21)）の原因も、上張りボードの面内方向の個々の回転と推測される。また、上張りボードの角部の斜め方向のしわ（表 5-10 中(22)）の原因は、RC 架構との接触と推測される。

また、開口部の左角部にある L 字型の上張りボードに確認された開口部の左角部を起点とする斜め左方向へのひび割れ（表 5-10 中(16)）の原因は、実験①（5.1.1.節で説明した内容）と同じく、L 字型の面内方向に回転させようとする力と、それを阻害する力の両方が掛かったことと推測される。下張りボードの開口部の角部からのひび割れ（表 5-10 中(25)）の原因も、同じと推測される。

その他の下張りボードのひび割れ（表 5-10 中(23)）や下張りボードのしわ（表 5-10 中(24)）の原因は、無開口の平坦な壁（壁 A）と同じく、下張りボードとスタッドの挙動が異なった結果、接続するビス部分に応力が集中したことだと推測される。

振れ止めの変形（表 5-10 中(28)）の原因は、その発生箇所から考えて、高さ中央部分に面内方向に膨らむような変形が残留した RC 壁との接触と推測される。上張りボードの面外方向への傾斜（表 5-10 中(27)）も、ドアを挟んで反対側の上張りボードには観察されなかったことから、その原因は RC 壁との接触と推測される。

上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け（表 5-10 中(26)）の原因は、無開口の平坦な壁（壁 A）と同じく、層間変位により RC 梁が湾曲したことで、打ち込みピン周囲のコンクリートが破壊されたことと推測される。

²³ 本田信一，巽信彦，磯田充樹，八木尚太郎，吉敷祥一，清家剛，前田匡樹，西村康志郎.(2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その 6 LGS 壁と鋼製ドアの挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021, 617-618.

5.2.2. ドアの損傷の評価

5.2.2.節では実験③の結果に基づき、異種の構造部材の層間変位に対するドアの損傷を評価した結果について説明する。

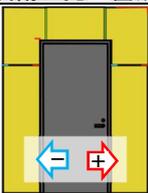
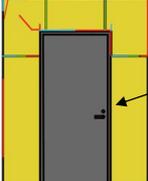
開閉機能の低下以外の損傷と、開閉機能の低下に分けて、それぞれについて、異種の構造部材の層間変位に対して評価した結果を図と文章で説明する。損傷に関してはその原因を分析した結果についても説明する。

なお、各加力セットでは、正負方向への加力を2回繰り返しているが、2回目の加力時に新たに発生した損傷や進行した損傷は評価されなかった。そのため、ここで示す損傷²⁴は1回目の加力時に評価されたものである。

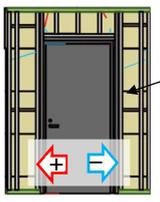
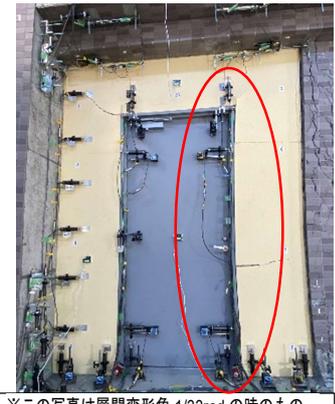
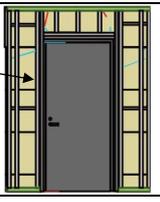
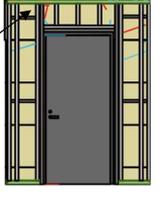
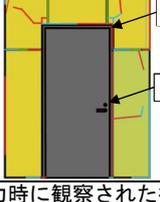
異種の構造部材の層間変位に対するドアの損傷（開閉機能の低下以外）の評価結果

表 5-11 に異種の構造部材の層間変位に対するドアの損傷（開閉機能の低下以外）を評価した結果を示す。表 5-11 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている。

表 5-11 異種の構造部材の層間変位に対するドアの損傷（開閉機能の低下以外）の評価結果（実験③）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況	損傷の様子
Set 2 $\theta_{max}=1/333$		仕上げ側 ・ ドアと枠の接触（損傷ではない）	
Set 3 $\theta_{max}=1/200$		・ 三方枠の持ち上がり(1)	
Set 5 $\theta_{max}=1/100$		・ 三方枠の変形(2)	

²⁴ ただし、開閉機能の低下以外の損傷。

		<p>(3) 下地側</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ヒンジの隙間(3) 	 <p>※この写真は層間変形角 1/33rad の時のもの。</p>
Set 6 $\theta_{max}=1/67$		<ul style="list-style-type: none"> ・ 開口補強鋼材の変形(4) 	
Set 7 $\theta_{max}=1/50$		<ul style="list-style-type: none"> ・ 開口補強鋼材と上部のランナーとを接合するビスのせん断破壊(5) 	 <p>※この写真はビスが抜け落ちた様子を示す。</p>
Set 8 $\theta_{max}=1/40$		<ul style="list-style-type: none"> ・ 三方枠の接合部の破断(6) ・ 錠部分の変形(7) 	 <p>※この写真は除荷時に開扉し、三方枠の内側を下から撮影した様子</p>
<p>赤線：正方向の加力時に観察された損傷／青線：負方向の加力時に観察された損傷／緑線：その他の損傷 ※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない</p>			

セット 2 ($\theta_{max}=1/333rad$) において評価された損傷

仕上げ側²⁵で、加力時に扉の下部と敷居が接触することが観察された。

セット 3 ($\theta_{max}=1/200rad$) において評価された損傷

仕上げ側²⁶で、加力時に三方枠の下部が浮き上がること (表 5-11 中(1)) が観察された。

²⁵ 下地側からも確認可能。

²⁶ 下地側からも確認可能。

セット 5 ($\theta_{\max}=1/100\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側²⁷では、三方枠の RC 壁側の鉛直材に、扉側が凸になるように弓なりになる変形（表 5-11 中(2)）が観察された。このため、三方枠の鉛直材同士の間隔が中央部で、加力前に比べて 2mm 程度狭まっていた。また、下地側では、加力時にヒンジに隙間（表 5-11 中(3)）が観察された。

セット 6 ($\theta_{\max}=1/67\text{rad}$) において評価された損傷

下地側で、開口補強鋼材の鉛直材に、鉛直軸周りにねじれ下地側に向けてハの字形に開くような変形（表 5-11 中(4)）が確認された。ただし、水平材と接続されている上部は変形していなかった。

セット 7 ($\theta_{\max}=1/50\text{rad}$) において評価された損傷

下地側で、開口補強鋼材と上部のランナーの接合部において、ビスのせん断破壊（表 5-11 中(5)）が確認された。

セット 8 ($\theta_{\max}=1/40\text{rad}$) において評価された損傷

仕上げ側²⁸では、三方枠の水平材と鉛直材の境に破断（表 5-11 中(6)）が確認された。また、錠部分の変形（表 5-11 中(7)）が、ドアと三方枠の隙間から確認された。写真 5-17 に、層間変形角 1/33 時の錠部分の状況を示す。

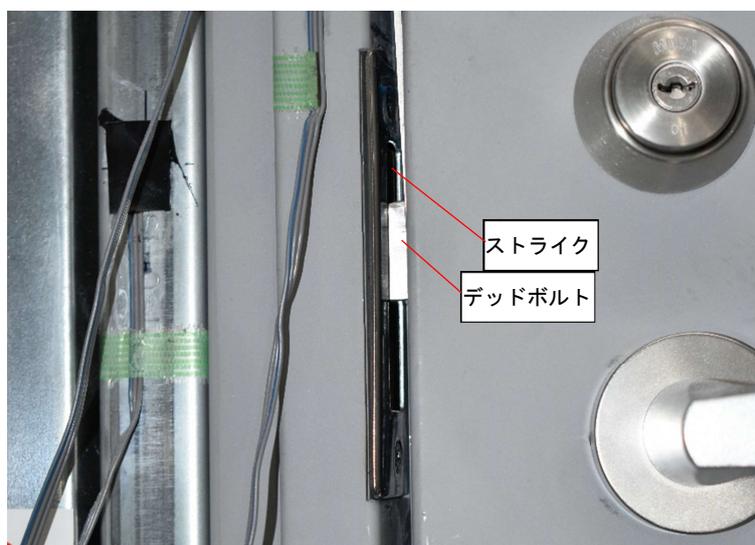


写真 5-17 錠部分の変形（表 5-11 中(7)）（セット 9 の層間変形角 1/33rad 時）

²⁷ 下地側からも確認可能。

²⁸ 下地側からも確認可能。

ドアの損傷（開閉機能の低下以外）の原因の考察

本項においても、既報 [6]²⁹で報告された内容を適宜参照する。

既報 [6]では、床面に対するドアの回転は層間変形角 $1/200\text{rad}$ 程度までは層間変形角とほぼ比例しており、それ以降は三方枠と接触することにより変形しにくくなることが報告されている。三方枠の持ち上がり（表 5-11 中(1)）や、三方枠の破断（表 5-11 中(6)）の原因は、この扉と三方枠との接触と推測される。

正方向への加力時は、吊元側が持ち上がるように変形する。ヒンジの隙間（表 5-11 中(3)）の原因はこの変形と推測される。負方向への加力時は、吊元側が下がるように変形するため、デッドボルトがストライクの縁と接触することになる。錠部分の破壊（表 5-11 中(7)）の原因は、この接触と推測される。

また、開口補強鋼材の変形（表 5-11 中(4)）は、面内方向に回転した上張りボードから押されたことが原因と推測される。また、開口補強鋼材と上部のランナーの接合部におけるビスのせん断破壊（表 5-11 中(5)）の原因は、上記の開口補強鋼材の変形と推測される。

²⁹ 本田信一，巽信彦，磯田充樹，八木尚太郎，吉敷祥一，清家剛，前田匡樹，西村康志郎.(2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その 6 LGS 壁と鋼製ドアの挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021, 617-618.

異種の構造部材の層間変位に対するドアの開閉機能の低下の評価結果

異種の構造部材の層間変位に対して、解錠、施錠、レバーハンドルの回転、開扉、閉扉の機能に分けて開閉機能の低下を評価した。ここでは、避難上、特に重要となる解錠、レバーハンドルの回転、開扉の機能を評価した結果を示す。

解錠機能について

図 5-12 に、解錠機能の評価した結果を示す。層間変形角 $+1/200\text{rad}$ の時に初めて「力を入れれば機能する」と評価され、層間変形角 -100rad の時に初めて「機能しない」と評価された。実験③を通じて、層間変形角 $-1/200\text{rad}$ から $1/100\text{rad}$ の範囲では、「正常に機能する」と評価される場合が多く、この範囲を超えると、「機能しない」と評価される場合が多い結果となった。特に負方向の加力時に機能の低下が確認された。除荷時も、層間変形角 $-1/200\text{rad}$ から $1/100\text{rad}$ が境界となっており、層間変形角 $-1/50\text{rad}$ 経験後の除荷時に初めて「機能しない」と評価される結果となった。

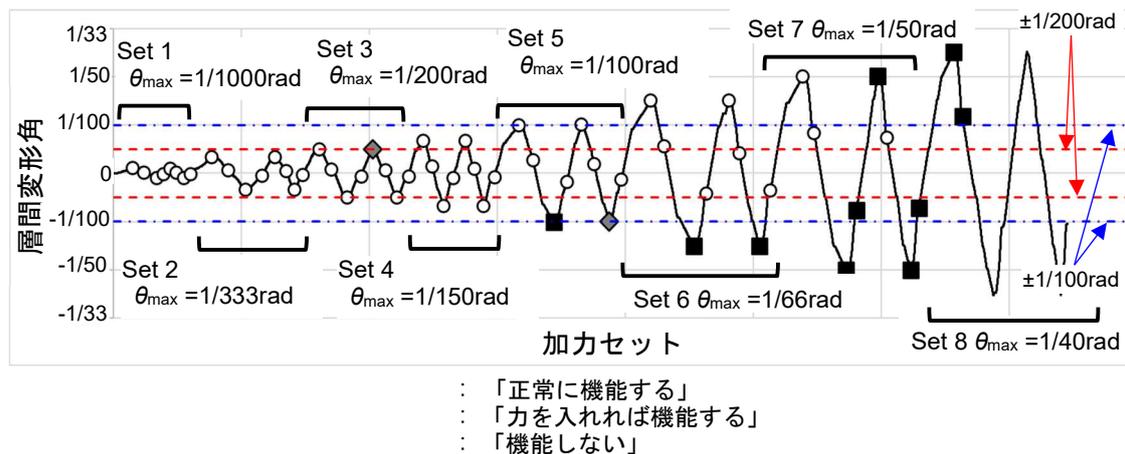


図 5-12 解錠機能の評価結果

レバーハンドルについて

レバーハンドルの回転機能は、セット 8 の層間変形角 $1/40\text{rad}$ の 2 回目の加力後の除荷時に、抵抗が感じられたほかには、正常に機能した。そのため、ここでは詳細を省略する。

開扉機能について

図 5-13 に、開扉機能の評価した結果を示す。層間変形角 $+1/200\text{rad}$ の時に初めて「力を入れれば機能する」と評価され、層間変形角 $-1/150\text{rad}$ 初めて「機能しない」と評価された。実験②を通じて、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ 以内の範囲では、「正常に機能する」と評価され、

層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ を超える範囲では、「力を入れれば機能する」もしくは「機能しない」と評価される場合が多い結果となった。除荷時も、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ が境界となっており、層間変形角 経験後の除荷時に初めて「力を入れれば機能する」と評価された。

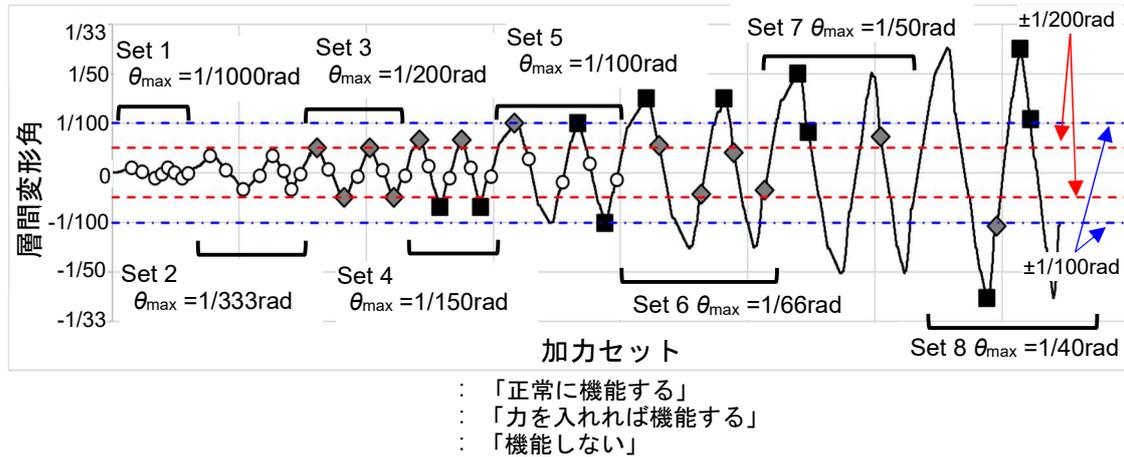


図 5-13 開扉機能の評価結果

図 5-14 に解錠、レバーハンドルの回転、開扉の3つの機能の評価結果を合わせたものを示す。例えば解錠が「正常に機能する」と評価されたが、開閉が「機能しない」と評価された場合は、総合では「機能しない」という評価とし、安全側にみた総合結果とした。層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ を超える範囲では、「力を入れれば機能する」もしくは「機能しない」と評価される場合が多い結果となった。すなわち、層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ がドアの開閉機能を考える上では重要な指標となっていると言える。

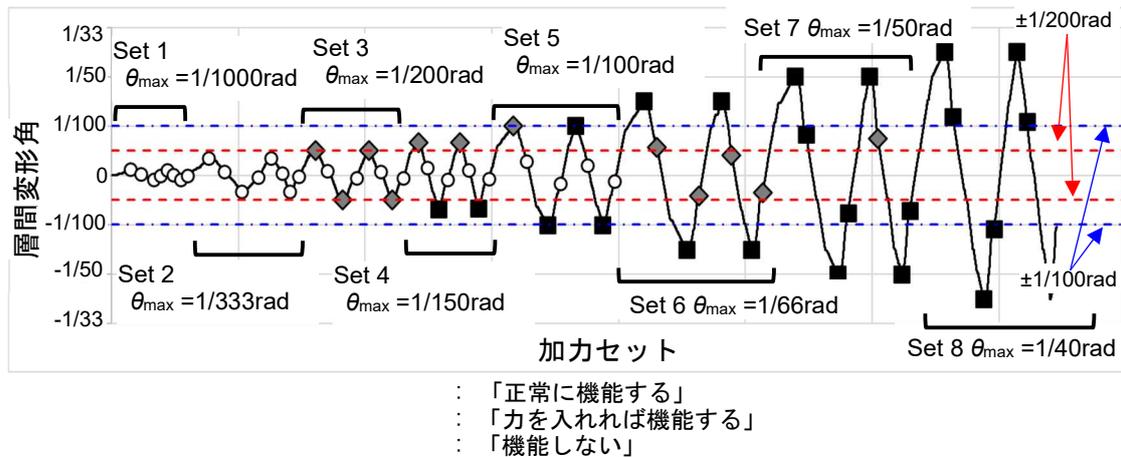


図 5-14 ドアの開閉機能の評価結果

開扉に要した力の計測結果

実験③では、開閉機能を把握するために定量的な計測も行った。具体的には、レバーハンドルの回転と開扉に関して、人力による確認時に要した力をロードセルで計測した。上記で述べた通り、レバーハンドルの回転機能は殆どの場合に正常に機能したため、ここでは結果を省略する。

図 5-15 に、横軸に層間変形角を、縦軸にロードセルの計測値を取って、人力による評価結果を示す。正常に開扉できると評価された場合は 50N 程度であるのに対して、力を入れれば開扉できると評価された場合は 100N から 300N の間にあった。機能しないと評価された場合は 300N 以上となった。

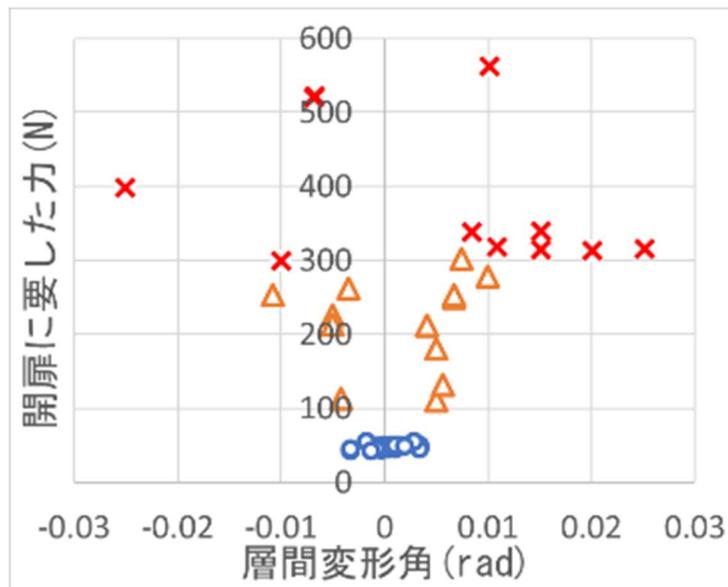


図 5-15 開閉機能の評価結果と開扉に要した力の関係

ドアの開閉機能の低下の原因の考察

5.1.3.節で考察した結果と同じく、開閉機能の低下の原因は、ストライクとデッドボルト及びラッチボルトとの干渉、そして扉と三方枠や地面との干渉と推測される。このことは、解錠機能が加力の方向によって低下度合いに差があったことと整合する。また、実験③の試験体では、ラッチボルトとストライクの縁との間にはクリアランスの量が比較的多かったのに対して、デッドボルトとストライクの縁との間のクリアランスの量は小さかった。レバーハンドルと比較して、解錠機能の低下が顕著だった原因は、このクリアランスの量にあると考えられる。

ただし、実験③では観察されたが、実験②では観察されなかった損傷として、開口補強鋼材の鉛直材に、鉛直軸周りにねじれ下地側に向けてハの字形に開くような変形（表 5-11 中(4)）がある。この開口補強鋼材の変形に追従して、三方枠の鉛直材も変形することが観察された。三方枠の鉛直材が変形した結果、三方枠の鉛直材と扉の間隔が大きくなり、上記で示した写真 5-17 から見て取れるように、三方枠と扉の間からラッチボルトが確認できるようになった。そして、この変形のため、ラッチボルトは、ストライクの上下の縁だけでなく、手前方向の縁と接触したことも、開閉機能が低下した原因と推測される。

更に、実験③では観察されたが、実験②では観察されなかった損傷として、三方枠の RC 壁側の鉛直材に、扉側が凸になるように弓なりになる変形（表 5-11 中(2)）がある。この変形のため、扉と三方枠がより接触しやすくなったことも開閉機能が低下した原因と推測される。

5.3. 層間変位と慣性力に対する窓の損傷の評価

5.3.節では、実験④の結果に基づき、層間変位と慣性力に対する窓の損傷を評価した結果について説明する。

開閉機能の低下と開閉機能の低下以外の損傷に分けて、それぞれについて、層間変位と慣性力に対して評価した結果を図と文章で説明し、損傷に関してはその原因を分析した結果についても説明する。

また、5.3.節で示す内容の一部は既報 [7]³⁰ [8]³¹でも報告されている。

³⁰ Yagi Shotaro, Teramoto Atsushi, Yeow Trevor, Seike Tsuyoshi, Kusunoki Koichi, Nakamura Izumi. (2022). VALIDATING RESILIENT DETAILING OF JAPANESE CEILINGS, WINDOWS, AND WALL TILES USING AN E-DEFENSE SHAKE-TABLE TEST. *Journal of Earthquake Engineering*. doi:10.1080/13632469.2021.1988764

³¹ 八木尚太郎, 清家剛, 楠浩一, Yeow Trevor, 中村いずみ, 小林健二, 久田隆司. (2022). 振動台実験を通じた地震により窓に生じる損傷の発生メカニズムの考察. *日本建築学会技術報告集*, 69, 585-590. doi:10.3130/aijt.28.585

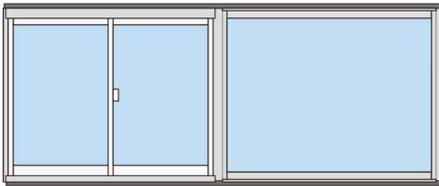
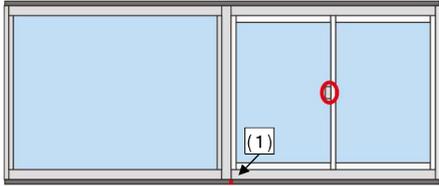
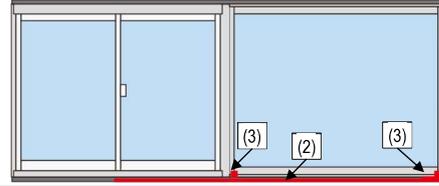
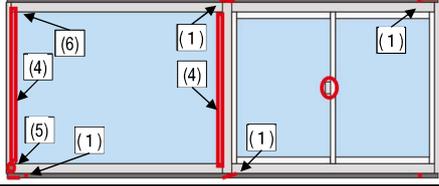
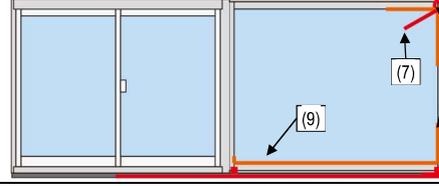
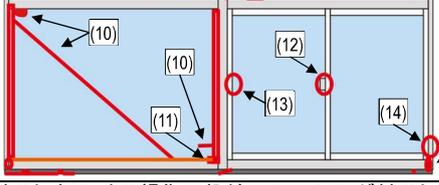
層間変位と慣性力に対する開閉機能の低下の評価結果

100%加振後、150%（1回目）加振後、160%加振後のいずれの場合でも、各階の引き違い窓は開閉可能であった。ただし、160%加振後は、クレセント錠が損傷したことにより、施錠することはできなくなった。

層間変位と慣性力に対する窓の損傷（開閉機能の低下以外）の評価結果

表 5-12 に層間変位と慣性力に対する 3 階の窓の損傷（開閉機能の低下以外）を評価した結果を示す。表 5-12 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている。

表 5-12 層間変位と慣性力に対する 3 階の窓の損傷の評価結果（実験④）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況
100% 加振後		仕上げ側
		下地側 ・ クレセントの回転（損傷ではない） ・ モルタルのひび割れ(1)
150% (1回目) 加振後		・ モルタルのひび割れ(2) ・ 縦枠の角部の変形(3)
		・ 押縁のずれ(4) ・ 縦枠と下枠との接合部の隙間(5) ・ シーリング材の切れ(6)
160% 加振後		・ ガラスのひび割れ(7) ・ 縦枠と上枠との接合部の隙間(8) ・ シーリング材の切れ(9)
		・ ガラスのひび割れ(10) ・ 下枠の変形(11) ・ クレセント受けの脱落(12) ・ 障子枠の変形(13) ・ 縦枠の内部の変形(14) ・ サッシ接合部の隙間(15)

赤線：シーリング材の切れ以外の損傷／橙線：シーリング材の切れ
 ※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

100%加振後に評価された損傷

下地側で、方位の下部においてモルタルのひび割れ（表 5-12 中(1)）が、観察された。また、損傷ではないが、クレセントが回転していることが観察された。

150%（1回目）加振後に評価された損傷

仕上げ側では、モルタルのひび割れ（表 5-12 中(2)）が水平方向に渡って観察された。また、FIX 窓のサッシにおいて、下枠との接合部分で縦枠の角部が折れ曲がる変形（表 5-12 中(3)）が観察された。

下地側では、FIX 窓の押縁の鉛直方向へのずれ（表 5-12 中(4)）が観察された。また、FIX 窓の縦枠と下枠との接合部に隙間（表 5-12 中(5)）が観察された。この隙間は、ガラス側に近づくにつれて広がるように開いていた。このほか、FIX 窓の角部でシーリング材の切れ（表 5-12 中(6)）が観察された。

160%加振後に評価された損傷

仕上げ側では、FIX 窓の合わせガラスの室外側のガラスにひび割れ³²（表 5-12 中(7)）が観察された。ひび割れは、向かって右上の角部を起点としていた。また、FIX 窓では、上枠と縦枠との接合部に隙間（表 5-12 中(8)）が観察され、ガラスのシーリング材の切れ（表 5-12 中(9)）が観察された。

下地側では、FIX 窓の合わせガラスの室内側のガラスにひび割れ³³（表 5-12 中(10)）が観察された。ひび割れは、室内側からみて左上の角部でつぶれるように発生したひび割れのほか、左上の角部を起点とする対角線上に伸びるひび割れ、右下の角部を起点とするひび割れが観察された。また、FIX 窓の下枠に、室外側に向けて下方向に下がっていく変形（表 5-12 中(11)）が観察された。更に、引き違い窓では、クレセント受けの脱落（表 5-12 中(12)）、障子の枠の変形（表 5-12 中(13)）、縦枠の内部の変形（表 5-12 中(14)）、そして縦枠と下枠の接合部に隙間（表 5-12 中(15)）が観察された。

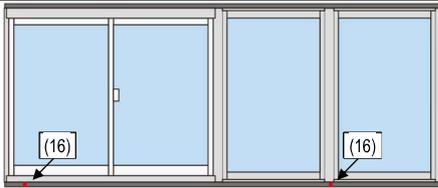
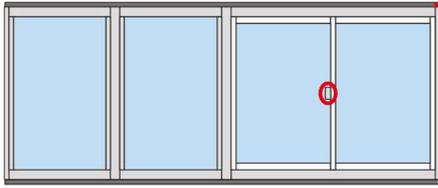
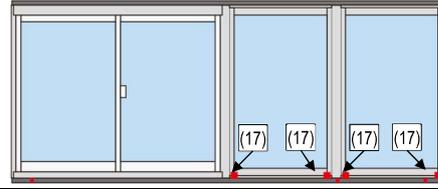
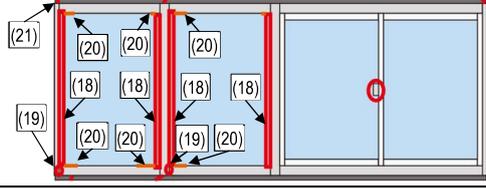
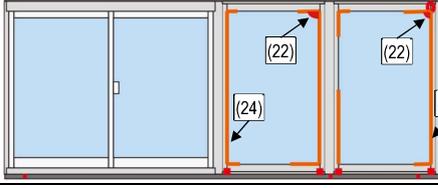
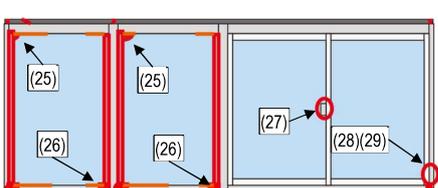
なお、これらの損傷の写真は後述の原因の考察と共に示す。

³² ガラスの損傷であるため、下地からも確認可能。

³³ ガラスの損傷であるため、仕上げ側からも確認可能。

表 5-13 に層間変位と慣性力に対する 2 階の窓の損傷（開閉機能の低下以外）を評価した結果を示す。表 5-13 中の図では、損傷の発生位置や発生時の加力方向を示し、新しく評価された損傷をナンバリングしている。

表 5-13 層間変位と慣性力に対する 2 階の窓の損傷の評価結果（実験④）

Set No.	損傷の発生箇所	損傷の発生状況
100% 加振後		<u>仕上げ側</u> ・ モルタルのひび割れ(16)
		<u>下地側</u> ・ クレセントの回転（損傷ではない）
150% (1回目) 加振後		・ 縦枠の変形(17)
		・ 押縁のずれ(18) ・ 縦枠と下枠との接合部の隙間(19) ・ シーリング材の切れ(20) ・ モルタルのひび割れ(21)
160% 加振後		・ ガラスのひび割れ(22) ・ 縦枠と上枠との接合部の隙間(23) ・ シーリング材の切れ(24)
		・ ガラスのひび割れ(25) ・ 下枠の変形(26) ・ クレセント受けの変形(27) ・ 縦枠の内部の変形(28) ・ 縦枠と下枠との接合部の隙間(29)

赤線：シーリング材の切れ以外の損傷／橙線：シーリング材の切れ
 ※図中の線は損傷の発生箇所を示すものであり、線の長さは損傷の長さを正確に表すものではない

100%加振後に評価された損傷

仕上げ側では、方位の下部ならびに引き違い窓の縦枠の下部周辺においてモルタルのひび割れ（表 5-13 中(16)）が観察された。また、下地側では、損傷ではないが、クレセントが回転していることが観察された。

150%（1回目）加振後に評価された損傷

仕上げ側では、FIX 窓のサッシにおいて、下枠との接合部分で縦枠の角部が折れ曲がる変形（表 5-13 中(17)）が観察された。

下地側では、FIX 窓の押縁の鉛直方向へのずれ（表 5-13 中(18)）が観察された。また、FIX 窓の縦枠と下枠との接合部に隙間（表 5-13 中(19)）が観察された。この隙間は、ガラス側に近づくにつれて広がるように開いていた。このほか、FIX 窓の角部でシーリング材の切れ（表 5-13 中(20)）や、FIX 窓の縦枠の上下部分でモルタルのひび割れ（表 5-13 中(21)）が観察された。

160%加振後に評価された損傷

仕上げ側では、FIX 窓の合わせガラスの室外側のガラスにひび割れ³⁴（表 5-13 中(22)）が観察された。ひび割れは、右上の角部でつぶれるように発生していた。更に、縦枠と上枠の接合部に隙間（表 5-13 中(23)）が観察された。また、FIX 窓のガラスのシーリング材の切れ（表 5-13 中(24)）が観察された。

下地側では、FIX 窓の合わせガラスの室内側のガラスにひび割れ³⁵（表 5-13 中(25)）が観察された。ひび割れは、室内側からみて左上の角部でつぶれるように発生していた。また、FIX 窓の下枠に、室外側に向けて下方向に下がっていく変形（表 5-13 中(26)）が観察された。更に、引き違い窓にクレセント錠のクレセント受けの変形（表 5-13 中(27)）、縦枠の内部の変形（表 5-13 中(28)）、縦枠と下枠の接合部に隙間（表 5-13 中(29)）が観察された。

なお、これらの損傷の写真は後述の原因の考察と共に示す。

³⁴ ガラスの損傷であるため、下地からも確認可能。

³⁵ ガラスの損傷であるため、仕上げ側からも確認可能。

窓の損傷（開閉機能の低下以外）の原因の考察

下記の損傷は3階の窓でのみ観察された。

- ・ 引き違い窓の障子の枠の変形（表 5-12 中(14)）

また、下記の損傷は2階の窓と3階の窓の両方で観察された。ただし、その程度や、加力の増加に対する進行度合いは2階と3階で異なった。

- ・ FIX窓のガラスのひび割れ（表 5-12 中(7)(10)）（表 5-13 中(22)(25)）
- ・ FIX窓の押縁のずれ（表 5-12 中(4)）（表 5-13 中(18)）
- ・ FIX窓の縦枠と下枠との接合部の隙間（表 5-12 中(5)）（表 5-13 中(19)）
- ・ FIX窓の縦枠の角部の変形（表 5-12 中(3)）（表 5-13 中(17)）
- ・ FIX窓の下枠の変形（表 5-12 中(11)）（表 5-13 中(26)）
- ・ FIX窓の縦枠と上枠との接合部の隙間（表 5-12 中(8)）（表 5-13 中(23)）
- ・ FIX窓のシーリング材の切れ（表 5-12 中(6)(9)）（表 5-13 中(22)(24)）
- ・ 引き違い窓のクレセント錠の損傷（表 5-12 中(12)）（表 5-13 中(27)）
- ・ 引き違い窓の縦枠の内部の変形（表 5-12 中(14)）（表 5-13 中(28)）
- ・ 引き違い窓の下枠と縦枠との接合部の隙間（表 5-12 中(15)）（表 5-13 中(29)）
- ・ モルタルのひび割れ（表 5-12 中(1)(2)）（表 5-13 中(16)(21)）

また、4.2.3節でも説明した通り、窓に掛かった外力には下記の4つの特徴がある。

- 1) 層間変位の程度は2階の方が3階よりも大きい
- 2) 層間変位の値は、加振波の増大につれ、増大する
- 3) 慣性力の程度は3階の方が2階よりも大きい
- 4) 慣性力は、160%加振後に小さくなった

以上の情報を用いて、下記では損傷の種類ごと³⁶⁾に原因について考察した結果を示す。

³⁶⁾ ただし、発生メカニズムが共通すると考察された損傷については、併せて説明する。

FIX 窓のガラスのひび割れ (表 5-12 中(7)(10) (表 5-13 中(22)(25)) について

FIX 窓のガラスのひび割れは、仕上げ側（室外側）及び下地側（室内側）で、160%加振後に観察された。写真 5-18 に、下地側（室内側）から見た 3 階の様子を示す。そして、写真 5-19 に、下地側（室内側）から見た 2 階の様子を示す。3 階では、角部がつぶれるようなひび割れが発生したほか、対角線上に伸びるひび割れも発生した。これに対して、2 階では、角部がつぶれるようなひび割れのみ発生した³⁷。

層間変形角が最大であった 160%加振後に発生したことから、FIX 窓のガラスのひび割れの原因は、主に層間変位であることが推測される。ガラスのひび割れが角部に集中していたことも、この推測と整合する。層間変形がより大きいにもかかわらず 2 階のガラスのひび割れのほうが軽度だったことは、縦に長い形状の 2 階の FIX 窓のほうが、枠の許容変形量が大きかったためであると考えられる。また、ガラスは、枠の変形によりロッキングさせられる力を受ける。しかし、3 階のガラスは大きく、重量があったため、ロッキングしにくかったと推測される。そして、この結果、3 階のガラスには面内方向の応力が発生し、この応力によりガラスがせん断破壊し、対角線上に伸びるひび割れが発生したと推測される。

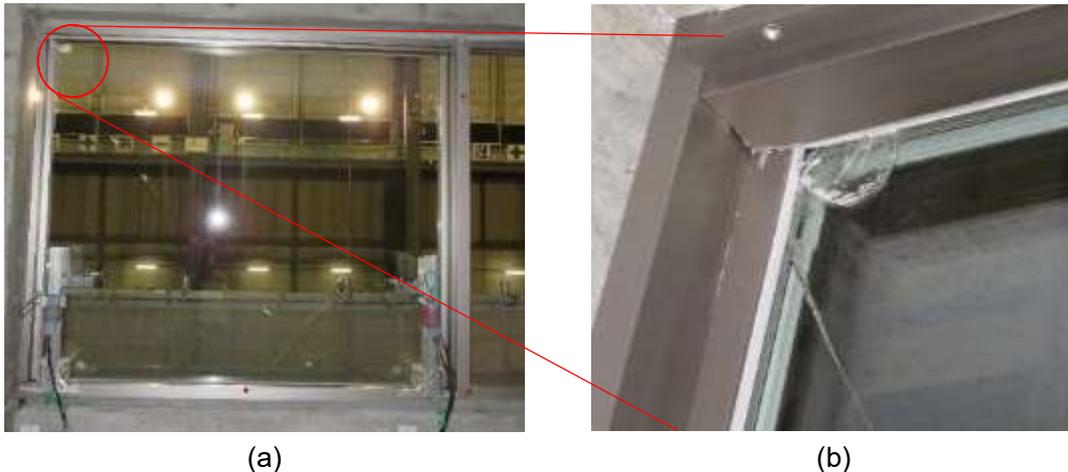
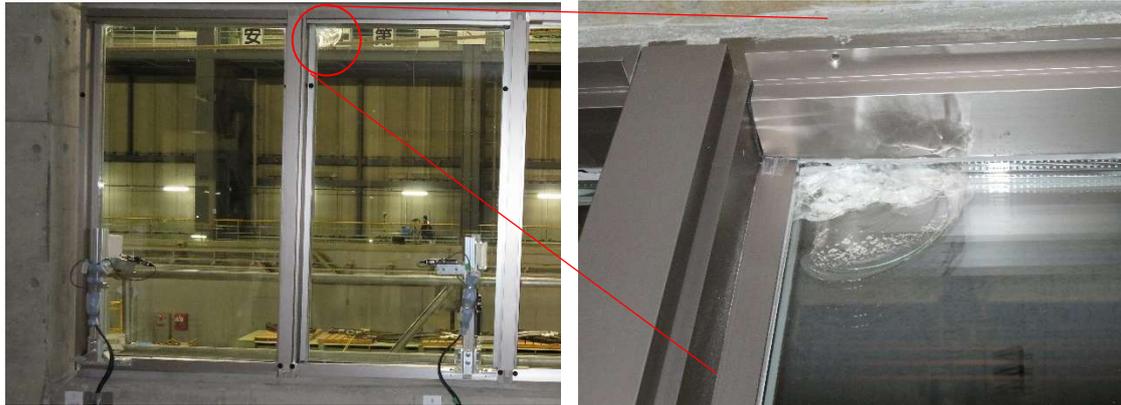


写真 5-18 3 階の FIX 窓のガラスのひび割れ; (a) 160%加振後, (b) 近接写真

³⁷ 1.7.節で紹介した式を用いて、枠の許容変形量 λ を求めると、3 階の FIX 窓は 35.8mm、2 階の FIX 窓は 65mm となり、枠の許容可能な変形角は 3 階の FIX 窓は $1/36\text{rad}$ 、2 階の FIX 窓は $1/20\text{rad}$ となる。この数値を、4.2.3.節の表 4-4 で示した層間変形角の値と比較する。垂壁と腰壁と窓が同程度の変形をしたと仮定すると、160%加振後の層間変形角は、2 階 3 階の窓ともに枠の許容可能な変形角を超えていないため、ガラスが割れたことと矛盾する。また、窓のみ変形したと仮定すると、150% (2 回目) 加振後の層間変形角は、2 階の窓の枠の許容可能な変形角を超えているため、ガラスが割れなかったことと矛盾する。これらのことから、層間変形角の大部分は窓の変形により吸収された一方で、一部は垂壁や腰壁の変形により吸収されたことが推測される。



(a)

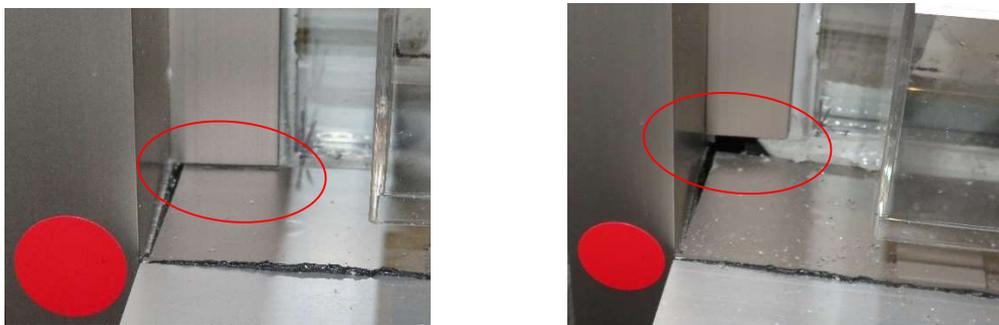
(b)

写真 5-19 2階のFIX窓のガラスのひび割れ; (a) 160%加振後, (b) 近接写真

FIX窓の押縁のずれ (表 5-12 中(4)) (表 5-13 中(18)) について

FIX窓の押縁のずれは、下地側（室内側）で、150%（1回目）加振後に観察された。また、押縁が鉛直方向にずれたことにより、3階と2階のFIX窓において、押縁と下枠との間に隙間が発生した。写真 5-20 に、下地側（室内側）から見た3階の様子を示す。そして、写真 5-21 に、下地側（室内側）から見た2階の様子を示す。160%加振後には隙間が広がったことが見て取れる。なお、押縁の上端は、上枠のガラス溝部に刺さっていた。

層間変形角が最大であった160%加振後に発生したことから、FIX窓の押縁のずれの原因は、主に層間変位であることが推測される。押縁と縦枠は固定されていないが、押縁とガラスはシーリング材で固定されている。そのため、押縁がガラスのロッキングに追従して持ち上がり上端がガラス溝部に刺さったことで、変形が残留したと推測される。



(a)

(b)

写真 5-20 3階のFIX窓の押縁と下枠との間の隙間; (a) 150%（1回目）加振後, (b)160%加振後

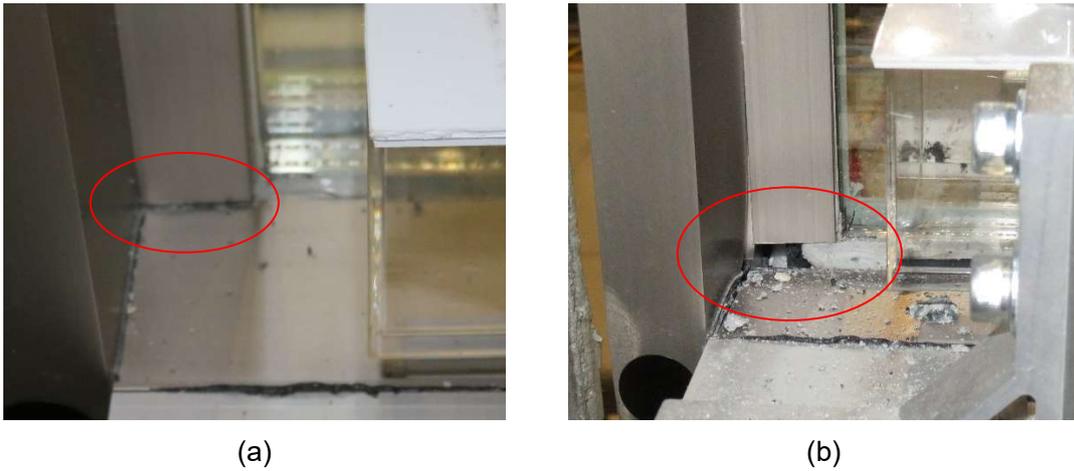


写真 5-21 2階のFIX窓の押縁と下枠との間の隙間; (a) 150% (1回目) 加振後,
(b) 160%加振後

FIX窓の縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(5)) (表 5-13 中(19)) について

FIX窓の縦枠と下枠との接合部の隙間は、下地側（室内側）で、150%（1回目）加振後に観察された。写真 5-22 に、3階の下地側（室内側）から見た様子を示す。そして、写真 5-23 に、2階の下地側（室内側）から見た様子を示す。160%加振後は、隙間の幅に大きな変化はなかったことが見て取れる。また、3階の損傷の方が顕著であることが見て取れる。

160%加振後に損傷が進行しなかったことから、FIX窓の縦枠と下枠との接合部の隙間の原因は、主に応答加速度であることが推測される。慣性力によりガラスが縦枠と衝突した結果、衝突時の衝撃で、縦枠と下枠の間に隙間が発生し、下枠と縦枠とを接合していたビスが抜けたことで、そのまま隙間が残留したと推測される。この推測は、隙間がガラス側に近づくにつれ広がるように開いていたことと整合する。また、床応答加速度の値がより大きい3階の方が顕著であったこととも整合する。

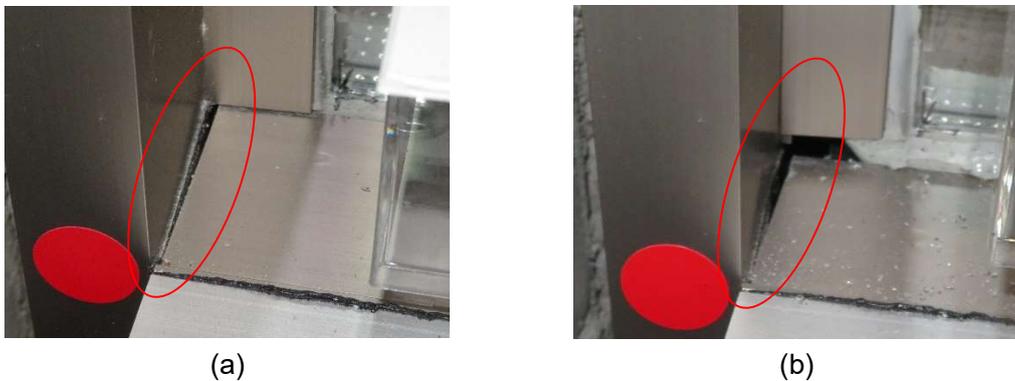


写真 5-22 3階のFIX窓の縦枠と下枠との間の隙間; (a) 150% (1回目) 加振後,
(b) 160%加振後



(a)

(b)

写真 5-23 2階のFIX窓の縦枠と下枠との間の隙間; (a) 150% (1回目) 加振後,
(b) 160%加振後

FIX窓の縦枠の角部の変形 (表 5-12 中(3)) (表 5-13 中(17)) 及び、下枠の変形 (表 5-12 中(11)) (表 5-13 中(26)) について

FIX窓の縦枠の角部の変形は、仕上げ側（室外側）で、150%（1回目）加振後に観察された。いずれも 160%加振後には損傷の進行が観察された。写真 5-24 と写真 5-25 に、仕上げ側（室外側）から見た様子を示す。

また、FIX窓の下枠の変形は、下地側（室内側）で、160%加振後に観察された。写真 5-26 と写真 5-27 に、下地側（室内側）から見た様子を示す。この下枠の変形は、2階の方が顕著であることが見て取れる。

層間変形角が最大であった 160%加振後に損傷の発生または進行が観察されたことから、FIX窓の縦枠の角部の変形及び下枠の変形の原因は、主に層間変位であることが推測される。層間変位により、窓枠がせん断変形した結果として、室外側において縦枠の角端部が下枠に押し付けられたことで、縦枠の角端部が折れると同時に、下枠の端部が下がる方向に変形したと考えられる。この推測は、層間変位の値がより大きい2階のほうが顕著であったことと整合する。

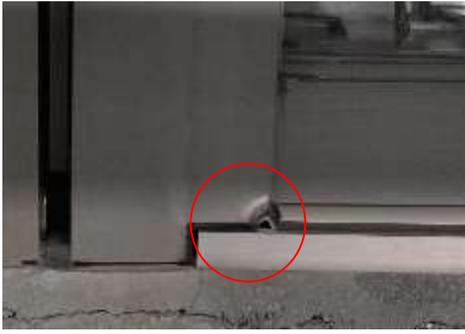


写真 5-24 3階のFIX窓の縦枠の角部の変形（160%加振後）



写真 5-25 2階のFIX窓の縦枠の角部の変形（160%加振後）



写真 5-26 3階のFIX窓の下枠の変形（160%加振後）



写真 5-27 2階のFIX窓の下枠の変形（160%加振後）

FIX窓の縦枠と上枠との接合部の隙間（表 5-12 中(8)）（表 5-13 中(23)）について

FIX窓の縦枠と上枠の接合部の隙間は、仕上げ側（室外側）で、160%加振後に観察された。写真 5-28 に、3階の仕上げ側（室外側）から見た様子を示す。そして、写真 5-29 に、2階の仕上げ側（室外側）から見た様子を示す。

層間変形角が最大であった160%加振時に発生したことから、FIX窓の縦枠と上枠の接合部の隙間の原因は、主に層間変位であることが推測される。層間変位を受けて、窓がせん断変形した際に、上枠と下枠を接合していたビスが抜けたことで、そのまま隙間が残留したと推測される。なお、3階と2階で損傷の程度に大きな差が見られないことから、原因は層間変位だけではないことも推測される。例えば、下地側（室内側）から観察された、FIX窓の縦枠と下枠との接合部の隙間と同じく、慣性力によりガラスが縦枠と衝突した際の衝撃力も原因の一つになっている可能性も考えられる。



写真 5-28 3階のFIX窓の上枠の接合部の
隙間（160%加振後）



写真 5-29 2階のFIX窓の上枠の接合部の
隙間（160%加振後）

FIX窓のシーリング材の切れ（表 5-12 中(6)(9)（表 5-13 中(22)(24)）について

FIX窓のシーリング材の切れは、仕上げ側（室外側）及び下地側（室内側）で、150%（1回目）加振後に観察された。下地側（室内側）では、上枠、下枠とガラスとの間のシーリング材に切れが観察されたが、押し縁とガラスとの間のシーリング材には観察されなかった。いずれも160%加振後に損傷の進行が観察された。

写真 5-30 に、3階のFIX窓の下地側（室内側）の下枠とガラスの間のシーリング材の中央部を示す。写真 5-31 に、2階のFIX窓の下地側（室内側）の下枠とガラスの間のシーリング材の端部を示す。3階はシーリング材の切れが下枠の中央部分まで達している一方で、2階は端部で止まっていることが見て取れる。なお、押し縁とガラスとの間のシーリング材には切れが観察されなかったが、仕上げ側（室外側）では、縦枠とガラスとの間のシーリング材に切れが観察された。写真 5-32 に2階のFIX窓の仕上げ側（室外側）において、縦枠とガラスの間のシーリング材の端部を示す。

160%加振後に損傷が進行したことから、FIX窓のシーリング材の切れの原因は、主に層間変位であることが推測される。層間変位により、上枠、下枠、縦枠に対してガラスがロックインやスウェィするのによりシーリング材が追従しきれず、切れが発生したと考えられる。なお、ガラスのひび割れの原因の説明の中でも述べたように、3階のFIX窓のガラスは、ロックインしにくく、スウェィが支配的だったと推測される。逆に、2階のFIX窓のガラスは、ロックインが支配的だったと推測される。このため、3階のFIX窓のシーリング材の切れは中央部まで進行し、2階のFIX窓のシーリング材の切れは端部にとどまったと推測される。

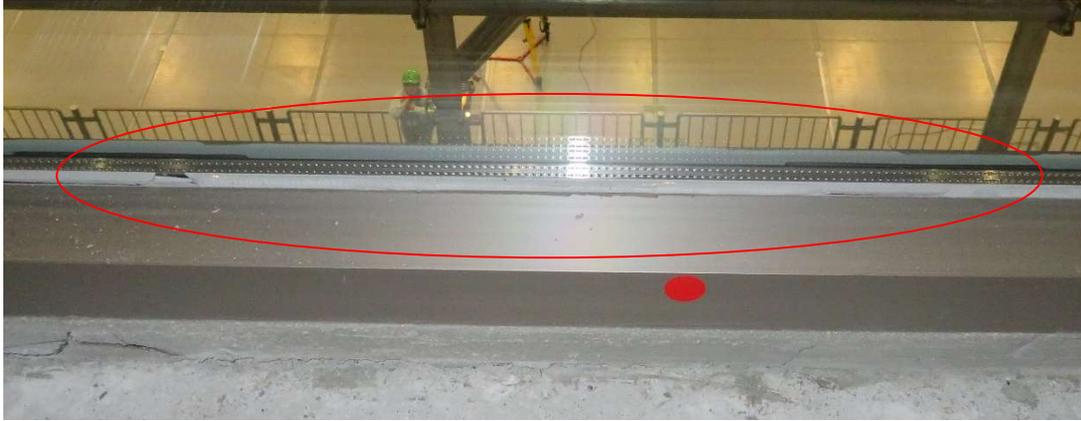


写真 5-30 3階のFIX窓の下枠とガラスの間の中央部のシーリング材の切れ（160%加振後）

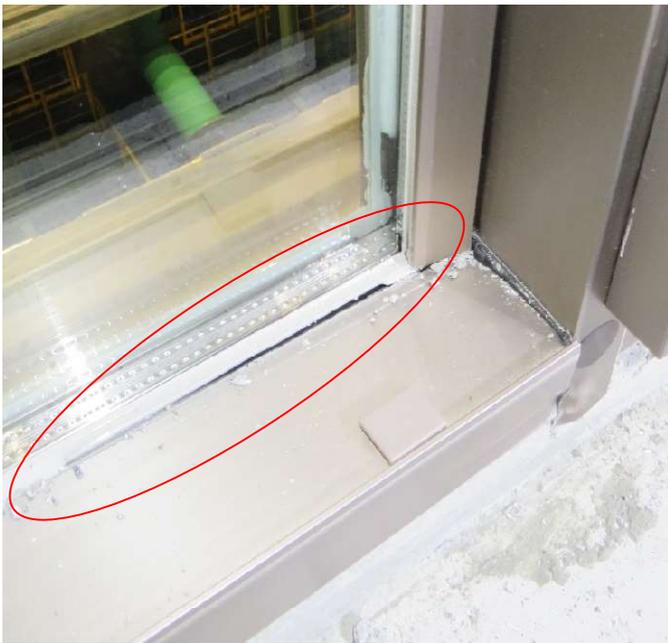


写真 5-31 2階のFIX窓の下枠とガラスの間の端部のシーリング材の切れ（160%加振後）



写真 5-32 2階のFIX窓の縦枠とガラスの間の端部のシーリング材の切れ（160%加振後）

引き違い窓のクレセント錠の損傷（表 5-12 中(12)）（表 5-13 中(27)）及び、引き違い窓の障子の枠の変形（表 5-12 中(14)）について

引き違い窓のクレセント錠の損傷としては、150%（2回目）加振時に2階のクレセント錠が解錠し、引き違い窓の障子が左右にスライドすることが観察された。その後、160%加振後には、クレセント受けの変形が観察された。**写真 5-33** に、実験前のクレセント錠を示す。そして、**写真 5-34** に、2階の引き違い窓の変形したクレセント受けを示す。また、160%加振時に3階のクレセント錠が解錠し、引き違い窓の障子が左右にスライドすることが観察された。その後、160%加振後には、クレセント受けが召合わせ框から外れ、脱落していることが観察された。**写真 5-35** にクレセント受けが外れた召合わせ框を示し、**写真 5-36** に、脱落したクレセント受けを示す。



写真 5-33 実験前のクレセント錠の様子



写真 5-34 2階の引き違い窓の変形したクレセント受け（160%加振後）



写真 5-35 3階の引き違い窓のクレセント受けが外れた召合わせ框（160%加振後）



写真 5-36 3階の引き違い窓の脱落したクレセント受け（160%加振後）

160%加振後に損傷の発生が観察されたことから、引き違い窓のクレセント錠の損傷の原因は、主に層間変位であることが推測される。**図 5-16** に、2階の引き違い窓のクレセント錠の損傷の発生メカニズムを考察した結果を示す。引き違い窓に層間変位が掛かると、窓が

せん断変形し、まず片方の障子が回転する（図 5-16 中の①）。更にせん断変形が大きくなると、もう片方の障子も回転する（図 5-16 中の②）。その後、反対方向に層間変位が掛かると、窓は逆方向にせん断変形し、片方の障子が逆向きに回転する（図 5-16 中の③）。このとき、二つの障子を接続するクレセント錠には左右に引っ張る力が掛かる。この引っ張る力により、クレセント錠が解錠したと推測される。

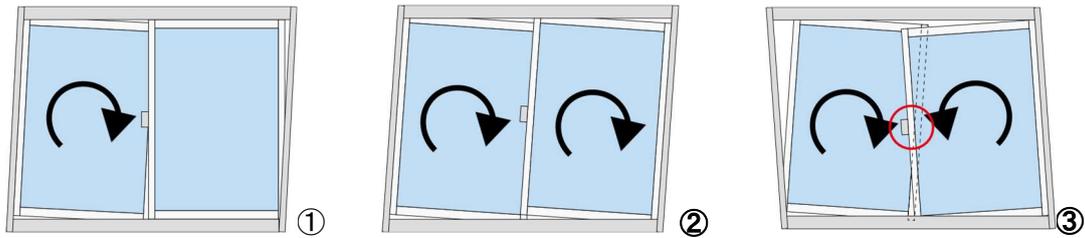


図 5-16 2階の引き違い窓のクレセント錠の損傷の発生メカニズムのイメージ

この一方で、3階の引き違い窓では、クレセント受けが脱落しているため、図 5-16 で示した挙動以外の現象も起きていることが推測される。そこで、160%加振時の2階の引き違い窓の挙動をビデオ撮影した動画で確認すると、障子がスライドし始めた直後に障子が縦枠に衝突し、部材が脱落する様子が確認できた。写真 5-37 に、衝突直後の瞬間の様子を示す。写真 5-38 に、これを部分的に拡大したものを示す。写真 5-37 と写真 5-38 では、クレセントを青色の点線で囲み、脱落した部材を赤色の一点鎖線点線で囲み示す。そして、写真 5-39 に、加振後のクレセント錠の様子を示す。同じ様に、クレセントを青色の点線で囲み示す。

また、写真 5-38 と写真 5-39 には、緑色の二点鎖線で囲んだ部分があるが、これは引き違い窓の障子の枠の変形（表 5-12 中(14)）が観察された箇所を示している。この変形が観察された障子は、クレセントと干渉しない設計となっている。そのため、この変形の原因は、クレセントとの衝突ではないことが推測される。

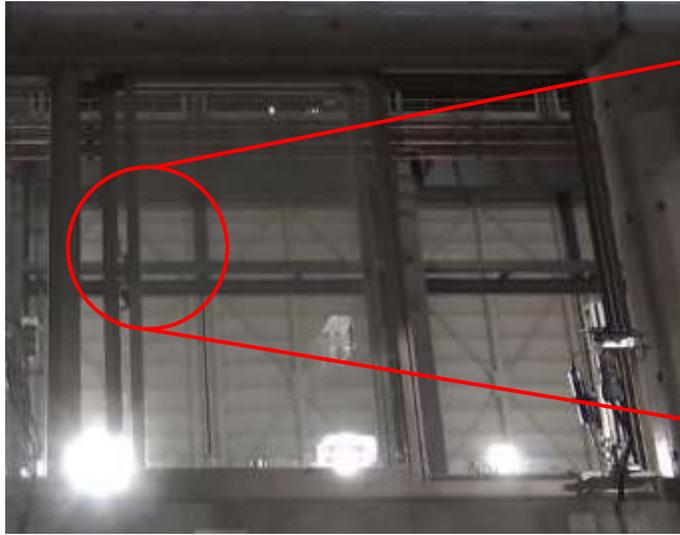


写真 5-37 3階の引き違い窓の障子が縦枠に衝突した直後の様子

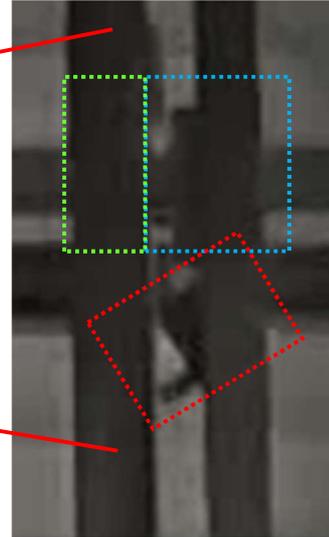


写真 5-38 近接写真

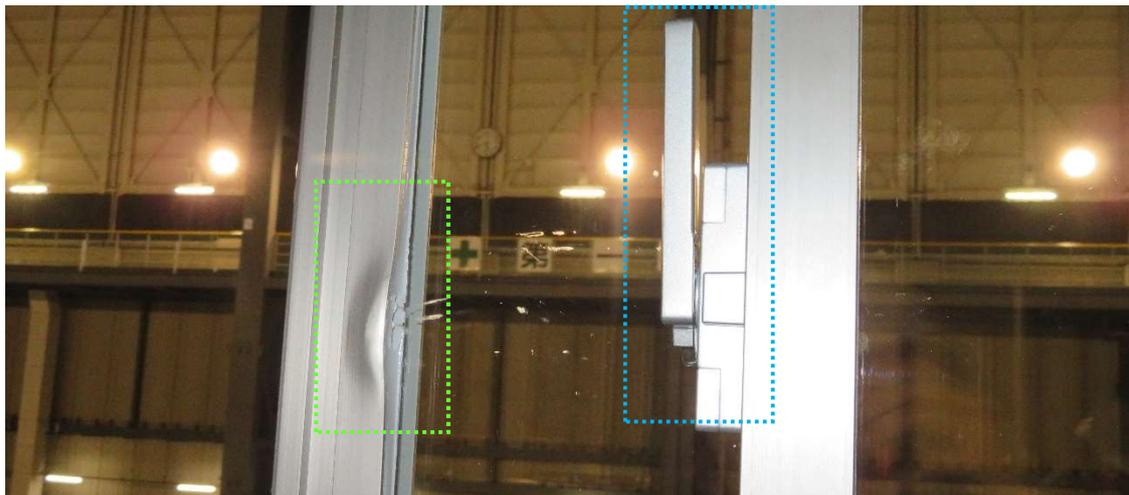


写真 5-39 3階の引き違い窓のクレセント及び障子の様子（160%加振後）

以上に基づき、3階の引き違い窓のクレセント錠の損傷の発生メカニズムを考察した結果を説明する。まずは、図 5-16 に示した一連の挙動により、3階の引き違い窓のクレセント受けに左右に引っ張る力が掛かる。ただし、2階ではクレセントがクレセント受けから外れたのに対して、3階ではクレセントがクレセント受けと噛み合ったまま、クレセント受けが召合わせ枠から外れたと推測される。その直後に、クレセントに引っかかったままのクレセント受けが、もう片方の障子と衝突したと推測される。そして、この衝突が、障子の枠の変形（表 5-12 中(14)）の原因であり、クレセント受けが落下した原因であると推測される。

このように、2階と3階の引き違い窓では、クレセント錠の損傷の形態が異なる結果となり、損傷の発生メカニズムも異なることが推測された。クレセント錠の損傷の形態や発生メカニズムが異なった原因として、床応答加速度の値の違いが考えられる。ただし、本実験の結果だけでは断定できない。クレセント受けが外れると施錠不可となり、建物の防犯性が著しく下がるため、原因のさらなる追求が今後求められる。

引き違い窓の縦枠の内部の変形（表 5-12 中(14)）（表 5-13 中(28)）

引き違い窓の縦枠の内部の変形は、下地側（室内側）で、160%加振後に観察された³⁸。写真 5-40 に3階の下地側（室内側）から見た様子を示す。そして、写真 5-41 に、2階の下地側（室内側）から見た様子を示す。3階と2階で損傷の程度が大きく変わることは確認されなかった。

160%加振後に損傷が観察したことから、引き違い窓の縦枠の内部の変形の原因は、主に層間変位もしくは障子のスライド、もしくはその両方であることが推測される。160%加振時の様子をビデオ撮影した動画で確認すると、クレセント錠が外れフリーになった障子が、窓枠が平行四辺形状に変形した瞬間に縦枠の下部と衝突していることが確認できた。

このことから、縦枠の内部の変形の原因は、障子が縦枠の下部に衝突した際の衝撃と推測される。つまり、層間変位と応答加速度の両方が原因になっていると推測される。この考察は、3階と2階で損傷の程度に差がなかったことと整合する。



写真 5-40 3階の引き違い窓の縦枠の内部
の変形（160%加振後）



写真 5-41 2階の引き違い窓の縦枠の内部
の変形（160%加振後）

³⁸ 仕上げ側（室外側）からも観察できた。

引き違い窓の下枠と縦枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(15)) (表 5-13 中(29))

引き違い窓の下枠と縦枠との接合部の隙間は、下地側（室内側）で、160%加振後に観察された。写真 5-42 に 3 階の下地側（室内側）から見た様子を示す。そして、写真 5-43 に、2 階の下地側（室内側）から見た様子を示す。3 階と 2 階で損傷の程度が大きく変わることは確認されなかった。

上記で説明したように、障子が、窓枠が平行四辺形状に変形した瞬間に縦枠の下部と衝突していた。この時の衝撃で、下枠と縦枠を接合していたビスが抜けたことで、そのまま隙間が残留したと推測される。つまり、層間変位と応答加速度の両方が原因になっていると推測される。この考察は、3 階と 2 階で損傷の程度に差がなかったことと整合する。



写真 5-42 3 階の引き違い窓の下枠と縦枠との接合部の隙間（160%加振後）



写真 5-43 2 階の引き違い窓の下枠と縦枠との接合部の隙間（160%加振後）

モルタルのひび割れ (表 5-12 中(1)(2)) (表 5-13 中(16)(21))

モルタルのひび割れは、100%加振後に、3 階の下地側（室内側）と 2 階の仕上げ側（室外側）に観察された。その後、150%（1 回目）加振後に、3 階の仕上げ側（室外側）と 2 階の下地側（室内側）にも観察された。いずれのひび割れも、窓の角部に集中して発生していた。

写真 5-44 に、各階の FIX 窓の縦枠の直下のモルタルのひび割れを、160%加振後に下地側（室内側）から見た様子を示す。

写真 5-45 には、3 階の方立の直上のモルタルのひび割れを、150%（1 回目）加振後と 160%加振後に下地側（室内側）から見た様子を示す。そして、写真 5-46 には、2 階の方立の直上のモルタルのひび割れを、150%（1 回目）加振後と 160%加振後に下地側（室内側）から見た様子を示す。

また、**写真 5-47**には、3階の方立の直下のモルタルのひび割れを、150%（1回目）加振後と160%加振後に下地側（室内側）から見た様子を示す。

3階では、モルタルの破片が落下し、窓枠と躯体を接合するアンカーが露出していた。これに対して、2階では、ひび割れのみに残っていた。そして、**写真 5-44**や**写真 5-45**に示したように、160%加振後に進行が観察されたひび割れが存在した一方で、**写真 5-45**に示したように、160%加振後に変化が観察されなかったひび割れも存在した。

3階のひび割れがより顕著であったことと、一部のひび割れは150%（1回目）加振後と160%加振後で変化がなかったことから、モルタルのひび割れの原因は、主に応答加速度であることが推測される。発生メカニズムとしては、FIX窓のガラスや引き違い窓の障子が、スウェイやスライドにより縦枠に衝突した際に、その衝撃力がサッシを通じて、下枠と垂壁や腰壁とを接続するアンカーに伝わり、アンカーが変位したことでモルタルのひび割れが発生したということが推測される。**図 5-17**に、モルタルのひび割れの発生メカニズムのイメージを示す。アンカーは下枠の端部から10cm程度ずれた位置にあるため、この推測は、モルタルのひび割れが窓の角部に集中して発生していたことと整合する。



(a)

(b)

写真 5-44 FIX窓の縦枠の直下のモルタルのひび割れ（160%加振後）；(a) 3階, (b) 2階



(a)

(b)

写真 5-45 3階のFIX窓の方立の直上のモルタルのひび割れ；(a) 150%（1回目）加振後、(b) 160%加振後



写真 5-46 2階のFIX窓の方立の直上のモルタルのひび割れ; (a) 150% (1回目) 加振後, (b) 160%加振後



写真 5-47 3階のFIX窓の方立の直下のモルタルのひび割れ; (a) 150% (1回目) 加振後, (b) 160%加振後

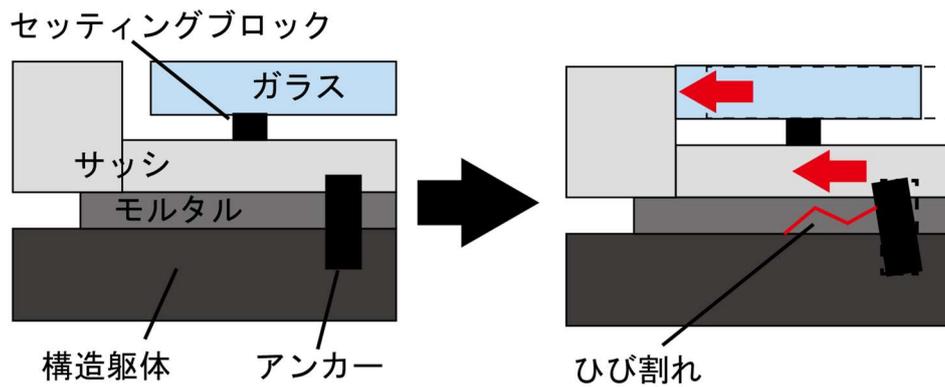


図 5-17 モルタルのひび割れの発生メカニズムのイメージ

窓の損傷（開閉機能の低下以外）の原因の考察のまとめ

表 5-14 に、損傷の原因を推測した結果を示す。窓の損傷の発生に関しては、建物の応答の中でも層間変位が支配的であると考えられていたが、慣性力の方が影響力の高い損傷も存在することを損傷の評価と原因の分析を通じて明らかにできた。

表 5-14 窓に発生した損傷の原因を推測した結果

観察された損傷の種類	推測された主な原因
FIX 窓のガラスのひび割れ FIX 窓の押縁のずれ FIX 窓の縦枠の角部の変形 FIX 窓の下枠の変形 FIX 窓の縦枠と上枠との接合部の隙間 FIX 窓のシーリング材の切れ	層間変位
FIX 窓の縦枠と下枠との接合部の隙間 モルタルのひび割れ	慣性力（応答加速度）
引き違い窓の縦枠の内部の変形 引き違い窓の下枠と縦枠との接合部の隙間	層間変位＋慣性力（応答加速度）

5.4. 内外装壁の損傷の評価のまとめ

5.4.節では、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明し、その妥当性についても論じる。

5.4.1.節では、4つの実大実験の結果に基づき、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

5.4.2.節では、4つの実大実験で観察された損傷と2.1.節で紹介した地震被害調査で観察された損傷との比較を行い、実験結果の妥当性について論じる。

5.4.1. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係

5.4.1.節では、4つの実大実験の結果に基づき、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

まず、4つの実大実験の結果のまとめを示す。

層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷の評価のまとめ (実験①)

層間変位に対する無開口の平坦壁 (壁 A) の損傷の評価のまとめ

層間変形角 $1/200\text{rad}$ までは主にシーリングの切れが観察された。そのため、層間変形角 $1/200\text{rad}$ までは層間変位による影響を上張りボードと鉄骨骨組との間に設けた隙間で吸収したと推測される。その後、仕上げ側では、上張りボードの面内方向の個々の回転、面外方向への傾斜などが観察された。下地側では、下張りボードのビス穴の拡大やひび割れが観察された。層間変位による影響をこれらの損傷により吸収していたと推測される。また、層間変形角 $1/33\text{rad}$ 経験後に、上張りボードの脱落が観察された。

ここで、上張りボードの脱落は、鉄骨骨組から受ける圧縮力だと推測された。ここで、構造部材の構面の外側に設置される ALC 外壁などと異なり、LGS 間仕切り壁は構造部材の構面の内側に設置されるため、鉄骨骨組から圧縮力を受ける。そのため、例えば、別の変形や挙動を示す構造部材に LGS 間仕切り壁が設置された場合は、発生する損傷も異なることが想定される。そこで、実験③では、異種の構造部材が損傷に与える影響について把握することも目的に含めた。

層間変位に対する直交壁 (壁 B) の損傷の評価のまとめ

他の壁と比較して、殆ど損傷が観察されなかった。壁 B は層間変位による影響を面外方向に傾斜することで吸収したと推測された。ただし、壁 B の面外方向への傾斜を妨げる要

素が無かったため、軽微な損傷に留まったものと推測される。

層間変位に対する開口部を有する壁（壁 C）の損傷の評価のまとめ

仕上げ側では、層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時より、上張りボードの目地に沿ったひび割れや、開口部の斜め上に位置する L 字型の上張りボードのひび割れなどが観察された。壁 C では上張りボードの面内方向の回転を妨げる要素があったため、ひび割れが発生したと推測される。下地側では、層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時より、下張りボードのビス穴の拡大やひび割れなどが観察された。

層間変位に対する梁から持ち出した壁（壁 D、壁 E、壁 F）の損傷の評価のまとめ

層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時より、壁 D には鉛直軸回りに回転する挙動が、壁 E には水平移動と構面内方向に回転する挙動が観察された。そして、これらの挙動に伴って、壁 D では周囲の壁との接合部での損傷が観察され、壁 E はシーリング材の切れなどの損傷が観察された。例えば、層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に、壁 D の上部のランナーが開きスタッドが外れることや、壁 D と壁 E の間に発生した隙間が除荷時も残留することが観察された。壁 F は、壁 B と同じく、層間変位による影響を面外方向に傾斜することで吸収したと推測され、損傷は観察されなかった。

層間変位に対する ALC 外壁の損傷の評価のまとめ（実験②）

層間変位に対する無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の評価のまとめ

ALC パネルの底面のひび割れ以外の損傷は観察されなかった。無開口の平坦な壁（壁 A）は、層間変位による影響を、ALC パネルのロッキングにより吸収したと推測され、ロッキングを妨げる要素が殆ど無かったため、殆ど損傷が発生しなかったことが推測される。

層間変位に対する開口部を有する壁（壁 B）の損傷の評価のまとめ

層間変形角 $1/50\text{rad}$ 以降で、開口部周辺の ALC パネルのひび割れが多数観察された。開口部を有する壁（壁 B）も層間変位による影響を ALC パネルのロッキングにより吸収したと推測される。しかし、ロッキングを妨げる要素として開口補強鋼材があったため、開口部の周辺の ALC パネルでひび割れなどの損傷が発生したと推測される。

層間変位に対するドアの損傷の評価のまとめ（実験②）

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に、三方枠の破断や開口補強鋼材の溶接の切れが観察された。また、層間変形角 $1/200\text{rad}$ を境に開閉機能が低下することが確認された。ドアは、層間変位に

よる影響を、三方枠のせん断変形及び扉の構面内方向の回転により吸収したと推測される。しかし、許容量を超えると、このせん断変形や回転により、三方枠の破断や開閉機能の低下といった損傷が発生したと推測される。

層間変位に対する窓の損傷の評価のまとめ（実験②）

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時にガラスのひび割れなどが、層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時にサッシの変形などが観察された。また、層間変形角 $1/200\text{rad}$ を境に開閉機能が低下することが確認された。窓は、層間変位による影響を、サッシのせん断変形及び障子の構面内方向の回転により吸収したと推測される。しかし、許容量を超えると、このせん断変形や回転により、ガラスのひび割れや開閉機能の低下といった損傷が発生したと推測される。ただし、窓の開閉機能の低下には、障子の構面外方向への脱落防止のために設置される“ストッパー”と呼ばれる部材の位置も影響することが推測された。

ここで、4.2.3節でも説明した通り、ガラスは枠に対して完全に固定されていいため、動的な加力を行うと、慣性力によりガラスが枠の変形に追従しなくなることが考えられる。しかし、実験②では層間変位に対する損傷の情報の収集が目的であったため、検証できなかった。そこで、実験④は、慣性力が損傷に与える影響について把握することも目的に含めた。

異種の構造部材の層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷の評価のまとめ（実験③）

異種の構造部材の層間変位に対する無開口の平坦壁（壁 A）の損傷の評価のまとめ

層間変形角 $1/200\text{rad}$ までは主にシーリングの切れが観察された。そのため、層間変形角 $1/200\text{rad}$ までは層間変位による影響を壁全体が一体となって面内方向に回転することで、上張りボードと鉄骨骨組との間に設けた隙間で吸収したと推測される。

その後、仕上げ側では、上張りボードの面内方向の個々の回転、ひび割れ、面外方向への傾斜などが観察された。下地側では、下張りボードのビス穴の拡大やひび割れ、面外方向への傾斜などが観察された。層間変位による影響をこれらの損傷により吸収していたと推測される。

なお、実験③の目的には、異種の構造部材が損傷に与える影響について把握することも含まれていた。これについて述べると、無開口の平坦な壁（壁 A）では、シーリング材の切れ、上張りボードのひび割れ、下張りボードのビス穴の拡大など実験①と共通する損傷が観察された。その一方で、振れ止めの変形（表 5-9 中(13)）や、下張りボードの面外変位（表 5-9 中(14)）、上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け（表 5-9 中(12)）は、

実験③でのみ観察され、その原因も RC 架構に特有のものと推測された。このことから、LGS 間仕切り壁の損傷を考える上では、層間変位だけではなく、周囲の構造部材の変形も考慮する必要があることが示せた。

異種の構造部材の層間変位に対する開口部を有する壁（壁 B）の損傷の評価のまとめ

層間変形角 $1/150\text{rad}$ までは、上張りボードの目地に沿ったひび割れなどが観察され、層間変位による影響を上張りボードが面内方向に個々に回転することで、上張りボードと鉄骨骨組との間に設けた隙間で吸収したと推測される。その後は、仕上げ側では、上張りボードのひび割れ、しわ、面外方向への傾斜などが観察された。下地側では、下張りボードのビス穴の拡大や、ひび割れ、面外方向への傾斜などが観察された。層間変位による影響はこれらの損傷により吸収したと推測される。

なお、実験③の目的には、異種の構造部材が損傷に与える影響について把握することも含まれていた。これについて述べると、振れ止めの変形（表 5-10 中(28)）や上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け（表 5-10 中(26)）は、実験③でのみ観察され、その原因も RC 架構に特有のものと推測された。また、上張りボードの面外方向への傾斜（表 5-10 中(27)）は、実験①でも観察されたが、その原因は RC 架構に特有のものと推測された。このことから、LGS 間仕切り壁の損傷を考える上では、層間変位だけではなく、周囲の構造部材の変形も考慮する必要があることが示せた。

異種の構造部材の層間変位に対するドアの損傷の評価のまとめ（実験③）

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に開口補強鋼材と上部のランナーとを接合するビスのせん断破壊や、層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に三方枠の破断が観察された。また、層間変形角 $1/200\text{rad}$ を境に開閉機能が観察することが確認された。ドアは、層間変位による影響を、三方枠のせん断変形及び扉の構面内方向の回転により吸収したと推測される。しかし、許容量を超えると、このせん断変形や回転により、三方枠の破断や開閉機能の低下といった損傷が発生したと推測される。

なお、実験③の目的には、異種の構造部材が損傷に与える影響について把握することも含まれていた。これについて述べると、三方枠の RC 壁側の鉛直材の扉側が凸になるように弓なりになる変形（表 5-11 中(2)）は実験③でのみ観察され、その原因も RC 架構に特有のものと推測された。このことから、ドアの損傷を考える上では、層間変位だけではなく、周囲の構造部材の変形も考慮する必要があることが示せた。

層間変位と慣性力に対する窓の損傷の評価のまとめ(実験④)

100%加振(層間変形角 $\sim 1/329$ rad、床応答加速度 ~ 0.93 g)後、150%加振(1回目)(層間変形角 $\sim 1/67$ 、床応答加速度 ~ 1.38 g)後には、モルタルのひび割れなどが観察された。160%加振(層間変形角 $\sim 1/29$ 、床応答加速度 ~ 1.40 g)後は、ガラスのひび割れやサッシの変形などが観察された。

なお、実験④の目的には、慣性力が損傷に与える影響について把握することも含まれていた。これについて述べると、層間変形角 $1/33$ (実験②で与えた層間変形角の最大値) より小さい層間変位のみ経験した 3 階の窓においても、実験②よりも多様かつ激しい損傷が観察された。このことから、窓の損傷の発生には、慣性力(応答加速度)も大きく関わる事が示唆される。

また、2階と3階の損傷の発生状況や、加振に対する進行度合いを比較することで、損傷の種類ごとに、その主な原因を推測することができた。

そして、4つの実大実験の結果に基づき、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果を表 5-15 に示す。層間変位を1/200rad まで、1/100rad まで、1/50rad まで、そして1/33rad までの区分に分けて示す。

表 5-15 4つの実大実験で観察された損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答の対応関係

概要		層間変位	~1/200rad	~1/100rad	~1/50rad	~1/33rad	
層間変位	LGS 間仕切り壁	平坦壁	・シーリング材の切れ ・ランナーの変形 ・上張りボードの切り欠き部のひび割れ ・スタッドの水平移動	・上張りボードの面内回転 ・上張りボードのしわ ・スペーサーの変形	・上張りボードの面外への傾斜 ・ビス穴の拡大	・上張りボードの脱落 ・下張りボードのひび割れ	
		開口部付き壁	・上張りボードの開口部角からのひび割れ ・上張りボードの目地のパテ等のひび割れ	・下張りボードのひび割れ ・ランナーの変形	・上張りボードのしわ ・ビス穴の拡大 ・上張りボードの面外変位	(損傷の進行のみ)	
		持ち出し壁	・上張りボードの目地のパテ等のひび割れ ・シーリング材の切れ ・下張りボードのひび割れ	・ボードスラブ間の隙間 ・スタッドの水平移動	・下部ランナーとスラブを接合するビスの変形 ・スタッドの外れ ・コーナー部のスタッド同士を接合するビスのせん断破壊	・先付金物と先行ピースを接合する打ち込みピンのせん断破壊	
	ALC 外壁	平坦壁	・パネル底面のひび割れ	(損傷の進行のみ)	(損傷の進行のみ)	(損傷の進行のみ)	
		開口部付き壁	・シーリング材の切れ	・パネル底面のひび割れ	・パネル仕上げ側のひび割れ ・パネル下地側のひび割れ ・ガラスのひび割れ ・開口補強鋼材の溶接の切れ	(損傷の進行のみ)	
		ドア	・モルタルのひび割れ ・開閉障害	(既存の損傷の進行のみ)	・除荷時に開閉障害	・三方枠の破断	
		窓	・モルタルのひび割れ ・開閉機能に障害		・除荷時に開閉障害	・シーリング材の切れ ・サッシの変形 ・サッシ接合部破壊	
	異種の構造部材の層間変位	LGS 間仕切り壁	平坦壁	・シーリング材の切れ ・ボードスラブ間の隙間 ・スタッドの水平移動	・上張りボードのしわ ・上張りボードの目地のパテ等のひび割れ ・上張りボードのひび割れ ・下張りボードのひび割れ	・上張りボードの面外変位 ・下張りボードのしわ ・ビス穴の拡大 ・上部のランナーと梁を接合する打ち込みピンの抜け ・振れ止めの変形	・下張りボードの面外変位
			開口部付き壁	・上張りボードの目地のパテ等のひび割れ ・上張りボードのひび割れ ・シーリング材の切れ ・上張りボードとスラブ間の隙間 ・上張りボードと三方枠間の隙間	・上張りボードのしわ ・下張りボードのひび割れ ・下張りボードのしわ	・上部のランナーと梁を接合する打ち込みピンの抜け	・上張りボードの面外変位 ・振れ止めの変形
	層間変位と慣性力	窓	引き違い	(層間変形角 1/867rad, 床応答加速度 0.93g に対して) ・モルタルにひび割れ		(層間変形角 1/58rad, 床応答加速度 1.40g に対して) ・サッシの変形 ・クレセント錠の破壊	(層間変形角 1/29 rad, 床応答加速度 1.08g に対して) ・サッシ接合部破壊
FIX(大判ガラス)			(層間変形角 1/834rad, 床応答加速度 0.69g に対して) ・モルタルのひび割れ	(層間変形角 1/127 rad, 床応答加速度 1.38g に対して) (損傷の進行のみ)	(層間変形角 1/58 rad, 床応答加速度 1.40g に対して) ・ガラスのひび割れ ・サッシ接合部の破壊		
FIX(分割ガラス)			(層間変形角 1/334rad, 床応答加速度 0.69g に対して) ・モルタルのひび割れ		(層間変形角 1/69 rad, 床応答加速度 1.07g に対して) ・シーリング材の切れ ・サッシの変形	(層間変形角 1/29 rad, 床応答加速度 1.08g に対して) ・ガラスのひび割れ ・サッシ接合部の破壊	

また、表 5-16 に、4 つの実大実験の結果に基づき、損傷の有無と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係をプロットした結果を示す。

損傷の有無

○	損傷が発生している
-	損傷が発生していない

表 5-16 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係

建物の応答の種類	内外装壁の種類		壁の面内方向の層間変位													
			1/1000	1/400	1/330	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33			
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁A)	シーリング材	○		○		○	○	○		○		○		
			上張りボード	-		○		○	○	○		○		○		
			下張りボード	○		○		○	○	○	○		○		○	
			下地	-		○		○	○	○	○		○		○	
		直交壁 (壁B)	シーリング材	-		-		-	-	-	-		-		-	
			上張りボード	-		○		○	○	○	○		○		○	
			下張りボード	-		-		-	-	-	-		-		-	
			下地	○		○		○	○	○	○		○		○	
		開口部を有する壁 (壁C)	シーリング材	-		-		-	-	-	-		-		-	
			上張りボード	○		○		○	○	○	○		○		○	
			下張りボード	-		-		○	○	○	○		○		○	
			下地	-		-		○	○	○	○		○		○	
		梁から持ち出した壁 (壁D,E,F)	シーリング材	○		○		○	○	○	○		○		○	
			上張りボード	○		○		○	○	○	○		○		○	
			下張りボード	○		○		○	○	○	○		○		○	
			下地	-		-		○	○	○	○		○		○	
	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁A)	シーリング材				-	-	-	-		-		-		
			パネル仕上げ側				-	-	-	-		-		-		
			パネル底面				○		○	○		○		○		
			パネル下地側				-	-	-	-		-		-		
		開口部を有する壁 (壁B)	シーリング材				-	-	-	-		-		-	○	
			パネル仕上げ側				-	-	-	-		○		○	○	
			パネル底面				-	-	-	-		○		○	○	
			パネル下地側				-	-	-	-		○		○	○	
		ドア (実験②)	開閉機能				○		○	○		○		○	○	
			シーリング材				○		○	○		○		○	○	
			枠/扉				-		-	-		-		-	○	
		窓 (実験②)	開口補強鋼材/モルタル				○		○	○		○		○	○	
開閉機能					○		○	○		○		○	○			
シーリング材					-		-	-		-		-	○			
ガラス					-		-	-		-		-	○			
サッシ					-		-	-		-		-	○			
異種の構造部材の層間変位 (RC 骨組+RC 壁)	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁A)	シーリング材	○		○	○	○	○		○	○	○	○		
			上張りボード	○		○	○	○	○	○		○	○	○		
			下張りボード	-		-	-	-	○	○	○		○	○		
			下地	-		○	○	○	○	○		○	○	○		
		開口部を有する壁 (壁B)	シーリング材	-		-	-	-	○	○		○	○	○	○	
			上張りボード	○		○	○	○	○	○		○	○	○	○	
			下張りボード	-		-	-	-	○	○		○	○	○		
			下地	-		○	○	○	○	○		○	○	○		
		ドア (実験③)	開閉機能	-		-	○	○	○	○		○	○	○	○	
			シーリング材	-		-	-	-	-	-		○	○	○	○	
			枠/扉	-		-	○	○	○	○		○	○	○	○	
			開口補強鋼材	-		-	-	-	-	-		○	○	○	○	
	層間変位と慣性力	窓 (実験④)	3階の窓 (慣性力大)	開閉機能	-				-				○			
				ガラス	-				-				○			
				シーリング材 (ガラス)	-					○				○		
				サッシ	-					○				○		
				モルタル仕上げ側	-					○				○		
				モルタル下地側	○					○				○		
		2階の窓 (層間変位大)	開閉機能	-										○		
			ガラス	-										○		
			シーリング材 (ガラス)	-										○		
			サッシ	-										○		
			モルタル仕上げ側	○										○		
			モルタル下地側	-										○		

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

更に、表 5-17 に、各壁や開口部を一体と見なして内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係をまとめたものを示す。層間変形角 1/200rad といった比較的小さい層間変形角においても損傷が発生しており、層間変形角 1/50rad~1/33rad という範囲では、全ての試験体において損傷が発生していることが分かる。

損傷の有無

○	損傷が発生している
-	損傷が発生していない

表 5-17 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係のまとめ

建物の応答の種類	内外装壁の種類		壁の面内方向の層間変位										
			1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁 A)		○		○		○	○		○		○
		直角壁 (壁 B)		○		○		○	○		○		○
		開口部を有する壁 (壁 C)		○		○		○	○		○		○
		梁から持ち出した壁 (壁 D,E,F)		○		○		○	○		○		○
	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁 A)				○		○	○		○		○
		開口部を有する壁 (壁 B)				-		○	○		○		○
		ドア (実験②)				○		○	○		○		○
	窓 (実験②)				○		○	○		○		○	
異種の構造部材の層間変位 (RC 骨組+RC 壁)	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁 A)	-		○	○	○	○		○	○	○	○
		開口部を有する壁 (壁 B)	○		○	○	○	○		○	○	○	○
		ドア (実験③)	-		-	○	○	○		○	○	○	○
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	3階の窓 (慣性力大)	-					○			○		
		2階の窓 (層間変位大)	○						○				○

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

そして、表 5-18 に、表 5-17 の行を、損傷が発生した層間変形角の小さい順に上から並び替えたものを示す。全ての実験で同じ層間変形角に対して観察を行っているわけではないため、単純に比較することはできないが、LGS 間仕切り壁の損傷が比較的早い段階で発生している傾向が読み取れる。

損傷の有無

○	損傷が発生している
-	損傷が発生していない

表 5-18 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係のまとめ（損傷の発生順）

建物の応答の種類	内外装壁の種類		壁の面内方向の層間変位										
			1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
異種の構造部材の層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験③)	開口部を有する壁 (壁 B)	○		○	○	○	○		○	○	○	○
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	2 階の窓 (層間変位大)	○						○				○
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁 A)		○		○		○	○		○		○
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	直交壁 (壁 B)		○		○		○	○		○		○
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	開口部を有する壁 (壁 C)		○		○		○	○		○		○
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	梁から持ち出した壁 (壁 D,E,F)		○		○		○	○		○		○
異種の構造部材の層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁 A)	-		○	○	○	○		○	○	○	○
層間変位	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁 A)				○		○	○		○		○
層間変位		ドア (実験②)				○		○	○		○		○
層間変位		窓 (実験②)				○		○	○		○		○
層間変位	ALC 外壁 (実験②)	開口部を有する壁 (壁 B)	-		-	○	○	○		○	○	○	○
異種の構造部材の層間変位		ドア (実験③)				-		○	○		○		○
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	3 階の窓 (慣性力大)	-					○			○		

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

5.4.2. 地震被害調査で観察された損傷との比較

5.4.2.節では、4つの実大実験で観察された損傷と2.1.節で紹介した地震被害調査で観察された損傷との比較を行い、実験結果の妥当性について論じる。

LGS 間仕切り壁について

2章の**写真 2-1**や**写真 2-2**で示した開口部の角部からのひび割れは、実験①と実験③でも観察された。また、**写真 2-3**や**写真 2-4**で示したボードの面外方向への傾斜も、実験①と実験③でも観察された。**写真 2-5**や**写真 2-6**で示した間仕切り壁が倒れこむ損傷は、加力実験では観察されなかった。ただし、この損傷を発生させた原因として、実験③で観察された、上部のランナーとRC梁を接合する打ち込みピンの抜けがあった可能性がある。その上で、壁の面外方向の慣性力により、壁が倒れこんだ可能性が考えられる。この解明は今後の課題である。

ALC 外壁について

写真 2-7や**写真 2-8**で示したALCパネルの角部からのひび割れは、実験②でも観察された。**写真 2-9**や**写真 2-10**で示したALCパネルの脱落は、加力実験では観察されなかった。ただし、この損傷を発生させた原因として、実験②で観察された、ボルト周辺のALCパネルのひび割れがあった可能性がある。その上で、壁の面外方向の慣性力により、ALCパネルが脱落した可能性が考えられる。この解明は今後の課題である。

ドアについて

実際の地震の際と同様に、開閉機能が低下することが実験②と実験③で確認された。

窓について

写真 2-12や**写真 2-17**、**写真 2-18**で示したガラスのひび割れは、実験②や実験④でも観察された。更に、**写真 2-13**や**写真 2-14**で示した枠の変形と、**写真 2-16**で示したシーリング材の切れは、実験④でも観察された。ただし、**写真 2-11**で示した窓の脱落や、**写真 2-15**で示した窓の溶接の破断は、加力実験では観察されなかった。これらの損傷に関しては、壁の面外方向の慣性力が原因であった可能性が考えられる。この解明は今後の課題である。

実験結果の妥当性

以上のように、実大実験において評価された損傷と地震被害調査で観察された損傷には共通するものがあり、これにより実大実験の結果の妥当性を示せたと言える。

ただし、下地側の損傷を中心に、実大実験で観察された損傷の一部は、地震被害調査において観察されなかった。これは、地震被害調査では、下地側の損傷の観察ができないことに起因する。

逆に、地震被害調査で観察された損傷の一部は、実大実験において観察されなかった。この原因として、実大実験では面内方向の層間変位および慣性力のみ与えたことが考えられる。今後は面内方向の層間変位や慣性力を与えた上での面外方向の慣性力や層間変位に関する検討が課題である。

5章の小括

5章では、4つの実大実験の結果について説明し、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明した。

まず、5.1節では、実験①と実験②の結果に基づき、層間変位に対する内外装壁の損傷を評価した結果について説明した。LGS 間仕切り壁には、無開口の平坦な壁において層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に上張りボードの脱落などが評価され、開口部を有する壁において層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時より上張りボードのひび割れなどが評価され、梁から持ち出した壁において層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時より直交する壁のランナーの開きなどが評価された。ALC 外壁には、無開口の平坦な壁において損傷が殆ど評価されず、開口部を有する壁において層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時より ALC パネルのひび割れなどが評価された。ドアと窓には、層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時より開閉機能の低下が評価された。

次に、5.2節では、実験③の結果に基づき、異種の構造部材の層間変位に対する内外装壁の損傷を評価した結果について説明した。LGS 間仕切り壁には、無開口の平坦な壁において、層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時より上張りボードの面外方向への傾斜などが評価され、開口部の平坦な壁において、層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時より個々の上張りボードの面内回転に伴う損傷が評価された。ドアには、層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時より開扉や解錠の機能の低下が評価された。一部の損傷の原因は変形が残留した RC 壁からの応力と考察された。

次に、5.3節では、実験④の結果に基づき、層間変位と慣性力に対する窓の損傷を評価した結果について説明した。160%入力後（層間変形角 $1/85\sim-1/58\text{rad}$ 、床応答加速度 1.43g 経験）にガラスのひび割れやサッシの損傷などが評価された。そして、損傷の中には、層間変位が主な原因と考察される損傷だけでなく、慣性力が主な原因と考察される損傷もあった。

最後に、5.4節では、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明し、その妥当性についても論じた。

以上、5章では、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした³⁹。

これに対して6章では、実験で観察された損傷について、損傷がもたらす被害を評価し、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物との対応関係を明らかにする。

³⁹ ただし、実施した4つの実大実験の範囲の中で。

5章 参考文献

- [1] 八木尚太朗, 伊山潤, 福島佳浩, 吉敷祥一, 石田孝徳, 清家剛, 山田哲.(2021). 鉄骨骨組に取り付けられた乾式間仕切り壁の大変形時における損傷と加速度計による傾斜計測を用いたその検出の可能性. 日本建築学会構造系論文集, 788, 1400-1411. doi:10.3130/aijs.86.1400
- [2] 八木尚太朗.(2018). 地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究 ―乾式間仕切り壁とALC外壁を対象とした実大載荷実験を通して―. 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会分環境学専攻.
- [3] 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛.(2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139
- [4] 八木尚太朗, 清家剛, 山田哲, 石田孝徳, 吉敷祥一, 上瀧敬太, テンデランランディ.(2020). 鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含むALC外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験. 日本建築学会技術報告集, 64, 864-874. doi:10.3130/aijt.26.869
- [5] 八木尚太朗, 巽信彦, 磯田充樹, 吉敷祥一, 本田信一, 清家剛, 前田匡樹, 西村康志郎.(2022). 実大載荷実験を通じたRC骨組に取り付けた乾式間仕切り壁と鋼製ドアの損傷に関する考察. 日本建築学会技術報告集(70), 1125-1130. doi:10.3130/aijt.28.1125
- [6] 本田信一, 巽信彦, 磯田充樹, 八木尚太朗, 吉敷祥一, 清家剛, 前田匡樹, 西村康志郎.(2021). 非構造部材を有する実大RC造架構の静的載荷実験 その6 LGS壁と鋼製ドアの挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021, 617-618.
- [7] Yagi Shotaro, Teramoto Atsushi, Yeow Trevor, Seike Tsuyoshi, Kusunoki Koichi, Nakamura Izumi. (2022). VALIDATING RESILIENT DETAILING OF JAPANESE CEILINGS, WINDOWS, AND WALL TILES USING AN E-DEFENSE SHAKE-TABLE TEST. *Journal of Earthquake Engineering*. doi:10.1080/13632469.2021.1988764
- [8] 八木尚太朗, 清家剛, 楠浩一, Yeow Trevor, 中村いずみ, 小林健二, 久田隆司.(2022). 振動台実験を通じた地震により窓に生じる損傷の発生メカニズムの考察. 日本建築学会技術報告集, 69, 585-590. doi:10.3130/aijt.28.585

6章 内外装壁の被害の評価

6.1. 内外装壁の被害の評価の概要.....	214
6.1.1. 内外装壁の被害の評価の目的.....	215
6.1.2. 内外装壁の被害の評価に関連する先行事例.....	216
6.1.3. 内外装壁の被害の評価の方法.....	218
6.2. 内外装材が担う性能の整理.....	219
6.3. 内外装壁の損傷が性能に与える影響の分析.....	221
6.4. 内外装壁の被害の評価.....	231
6.4.1. 内外装壁の損傷の被害度の評価.....	231
6.4.2. 内外装壁の被害と建物の応答との対応関係.....	236
6章の小括	242
6章の参考文献.....	243

6章では、実験で観察された損傷について、損傷がもたらす被害を評価し、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

6.1.節では、内外装壁の損傷がもたらす被害の評価の目的、関連する先行事例、そして方法について説明する。

6.2.節では、内外装壁が担う性能を整理した結果について説明する。

6.3.節では、内外装壁の損傷が性能に与える影響を分析した結果について説明する。

6.4.節では、内外装壁の被害を評価した結果について説明し、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

6.1. 内外装壁の被害の評価の概要

6.1.節では、内外装壁の損傷がもたらす被害の評価の目的、関連する先行事例、そして方法について説明する。

6.1.1.節では、内外装壁の被害を評価する目的について説明する。

6.1.2.節では、内外装壁の被害の評価に関連する先行事例について説明する。

6.1.3.節では、先行事例を踏まえて計画した、被害の評価の方法について説明する。

6.1.1. 内外装壁の被害の評価の目的

6.1.1.節では、内外装壁の被害を評価する目的について説明する。

5章では、4つの実大実験の結果に基づき、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明した。

今後、更に知見が蓄積され、内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係が十分に明らかになれば、建物の設計者は地震時に内外装壁に発生する損傷を想定できるようになる。

ただし、建物の設計者が求めている情報は“ひび割れ”といった損傷ではなく、“経済的被害”や“人的被害”といった被害であると考えられる。そして、内外装材の専門家でない限り、“ひび割れ”といった損傷が、どのような被害をもたらすのか正確にイメージすることは難しい。

また、2.2.1.節で紹介したように、内外装壁に求められる耐震性について、各種文献で、“人命に及ぼす危険を回避すること”や“財産を保護すること”など損傷ではなく、被害を指す表現が使われている。

以上より、地震による内外装壁の損傷だけではなく、地震による内外装壁の被害について、建物の応答との対応関係を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、実施した4つの実大実験で観察された損傷に対して、損傷を被害に変換することを目的とした評価を行う。

6.1.2. 内外装壁の被害の評価に関連する先行事例

6.1.2.節では、内外装壁の被害の評価に関連する先行事例について説明する。

損傷を被害に変換することを目的とした評価の方法を計画するにあたり、関連する先行事例について調査した。

先行事例の概要

2003年の金子らの研究 [1]¹では、1995年の兵庫県南部地震で観察されたLGS間仕切り壁やALC外壁の損傷／被害の程度を分類している。2013年の寺本らによる研究 [2]²では、2011年の東北地方太平洋沖地震などで観察されたALC外壁の損傷／被害の程度を分類している。

また、「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」 [3]³では、層間変位に対する検討の中で、損傷の程度を分類している。「災害に係る住家の被害認定基準運用指針」 [4]⁴、「被災建築物応急危険度判定調査表」 [5]⁵、「被災文教施設の応急危険度判定」 [6]⁶でも、建物の内外装材の被害の程度を分類している。

更に、八木の修士論文 [7]⁷では、“対応の必要性”の評価として、加力実験で観察された損傷に対して、実際の地震での損傷だと想定した際に、修復などの対応の緊急性の評価を行っている。

なお、それぞれの細かい内容については、**付録5**で説明する。

¹ 金子美香, 神原浩, 田村和夫. (2003). 1995年兵庫県南部地震の被害調査に基づく非構造部材の耐震性評価. 日本建築学会技術報告集, 9(17), doi:10.3130/aijt.9.563

² 寺本隆幸, 清家剛, 大迫勝彦, 渡壁守正, 鈴木正裕. (2013). ALC間仕切り壁の地震被害と今後の対策: その1 東日本大震災におけるALC帳壁の地震被害と課題. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013, 1421-1422.

³ 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

⁴ 内閣府 (防災担当). (2021年3月). 災害に係る住家の被害認定基準運用指針. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/r303shishin_all.pdf

⁵ 被災建築物応急危険度判定研究会. (1998). 被災建築物応急危険度判定マニュアル. 東京都: 日本建築防災協会・全国被災建築物応急危険度判定協議会.

⁶ 文部科学省大臣官房文教施設企画部. (2014年7月). 被災文教施設応急危険度判定方法について. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: http://web-honbu.jimu.nagoya-u.ac.jp/fmd/06other/shisetukanribu/image/link_sisaku/oukyuu_kikenndo_hannteihouhou.pdf

⁷ 八木尚太郎. (2018). 地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究—乾式間仕切り壁とALC外壁を対象とした実大載荷実験を通して—. 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会分環境学専攻.

先行事例での評価手法と本研究の目的との比較

金子らや寺本らの地震で観察された損傷の修復しやすさに着目した評価は、生じた損傷の被災度/被害度を補修・復旧に必要な作業の規模の目安に基づいて分類している。これは地震後に建物の利用を再開する際には、発生した損傷（ほぼ無被害のものを除き）は、全て完全に修復する前提のもとに成り立っている。つまり、損傷が存在する状況でのリスク（安全性など）を明示できる分類にはなっていない。しかし、建物によってはある程度の損傷の発生を許容し、なおかつ、完全な修復を待たずに建物の利用の再開を優先する場合も考えられる。例えば、避難所や災害対策拠点として使われる建物や医療施設といった建物は、多少住環境が悪くとも、建物の利用再開が急がれる。そのような建物を設計する際には、損傷が発生した状態でのリスクを明示できる評価方法が望ましく、本研究で行う被害の評価はこれを目指すものである。

また、損傷が存在する状況でのリスクを明示できる分類ということでは、「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説及び耐震設計施工要領」 [3]⁸における損傷程度の区分には、“脱落、重要な機能の低下（ドアの開閉不能など）”というカテゴリーが該当する。本研究で行う被害の評価の区分の中にも、同じようなカテゴリーが入ってくると考えられる。

住家の被害認定や応急危険度判定については、短時間で大量の物件を評価することが求められるため、区分の基準が大まかであり、該当する損傷の種類が限られる。

八木の修士論文で行われている“対応の必要性の評価”は、本研究で行う“被害度の評価”が目指す内容と似ている。ただし、“対応の必要性の評価”は損傷の有すリスクを単純に示すことだけが目的であるのに対して、本研究で行う被害の評価は、設計者が建物を設計する上での参考資料となる情報を提供するためにも行う。例えば、「部材の脱落」という損傷と「接合部の破断（部材の脱落の直前）」という損傷があったとすると、“対応の必要性の評価”では双方とも同じ評価結果となる。しかし、「脱落」しない限り避難はできるため、設計者にとっては脱落と「脱落の手前」では大きな差があると考えられる⁹。

⁸ 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

⁹ また、“対応の必要性の評価”では、「避難所等では早急な対応の必要はないが～」など、建物の種類に依存するような表現をしていた。しかし、地震時に安全である建物を目指すという意味では、避難所も商業施設もオフィスも住宅も同じであり、その目指す度合いについては建物の設計者や施主の判断にゆだねられるべきである。

6.1.3. 内外装壁の被害の評価の方法

6.1.3.節では、先行事例を踏まえて計画した、被害の評価の方法について説明する。

評価に求められる条件

6.1.2.節で紹介した事例を踏まえると、本研究で行う評価では、損傷が発生した状態でのリスクを明示できることが望ましい。また、全ての損傷について区分できることが求められる。更に、「脱落」と「脱落直前」の違いを評価できることや、建物の種類に関わらず評価の結果を応用できることが求められる。

評価の方法

そこで、本研究で行う内外装壁の被害の評価は下記の3ステップとする。

- 1) 内外装材が担う性能を整理する
- 2) 建物の応答ごとに、各損傷について、1) で挙げた性能に与える影響の分析を行う
- 3) 与える影響の分析に基づいて、損傷がもたらす被害の程度の評価（損傷の被害度の評価と称す）を行う

評価の精度

なお、LGS 間仕切り壁の損傷が耐火性に与える影響を定量的に検討した研究 [8]¹⁰や、ALC 外壁の損傷が水密性に与える影響を定量的に検討した研究 [9]¹¹はあるが、全ての損傷と性能の定量的な関係性については検討されていない。

そのため、ステップ 2)の分析では、定量的な分析（例えば、空調性能が何%低下したのか）は行わず、例えば、空調性能の低下が考えられるのか考えられないのかという評価に留める。

¹⁰ 福田一夫，三谷一房，林徹，河内武(2012). 集合住宅の乾式耐火遮音戸境壁における地震履歴後の耐火性および遮音性 その1 計画概要と面内加力実験の結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012, 1275-1276.

¹¹ 法身祐治，林徹，太田匡信，佐藤高行.(2016). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その1 試験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016, 889-890.

6.2. 内外装材が担う性能の整理

6.2.節では、内外装壁が担う性能を整理した結果について説明する。

これは内外装壁の被害の評価の1ステップ目にあたる。

LGS 間仕切り壁と ALC 外壁が担う性能の整理

LGS 間仕切り壁と ALC 外壁は、建物の内部の空間を仕切るために設置されるものである。その性能としては、平常時においては“音を遮る”、“熱や空気を遮る”などが挙げられる。ALC 外壁の場合“水や風を遮る”ことも挙げられる。本研究ではこれらをまとめ密閉性と称す。火災時においては、延焼を防ぐ性能を担うこともあるが、これも密閉性の中に含める。

また、室空間の意匠を作ることも性能の一つとして考えることができる。本研究においては、この性能を意匠性と称す。

更に、地震時においては耐震性が発揮されることも重要となる。なお、耐震性とは、「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」 [3]¹²で示されている耐震設計・施工の目標の例を踏まえて、地震時に脱落・倒壊・転倒による危険を及ぼさないこと、そして避難行動に危険を及ぼさないこととする。

ドアと窓が担う性能の整理

ドアと窓は、建物の外部と内部の空間を仕切るため、かつ、通行可能にするために設置されるものである。開閉に関する性能は、解錠／施錠と開扉／閉扉に大きく分けることができる。ここで、解錠と開扉の性能は避難行動の上で重要になる。そこで本研究では、解錠と開扉の性能を耐震性に含めるとする。また、施錠と閉扉の性能は、建物の防犯性を確保する上で重要になる。そこで、本研究では、施錠と閉扉の性能を防犯性と称す。

密閉性、意匠性、耐震性については、LGS 間仕切り壁や ALC 外壁と同じである。

¹² 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

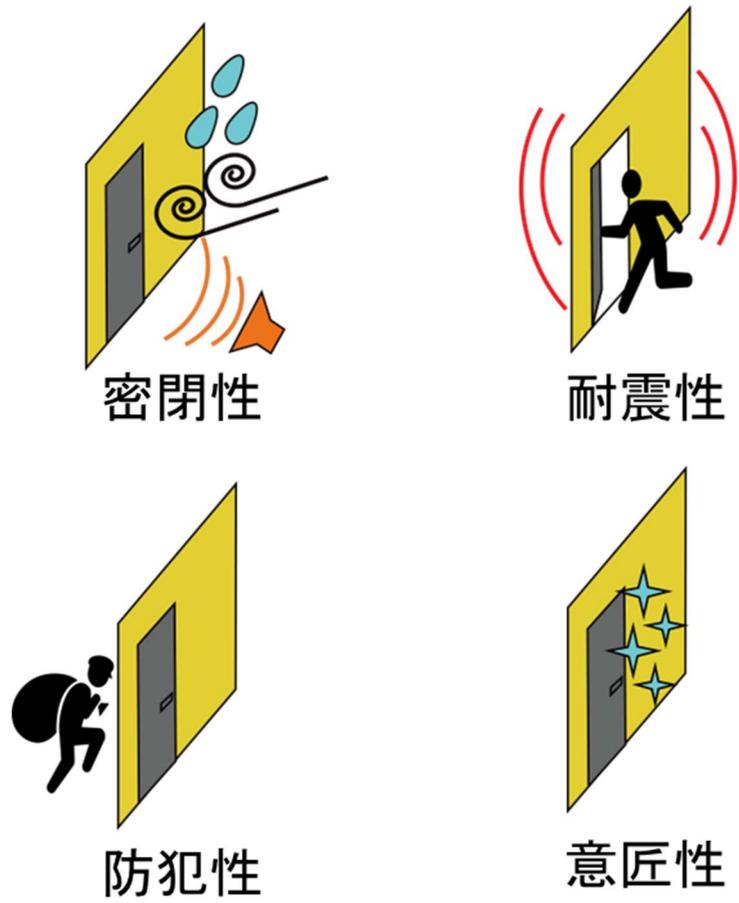


図 5-1 内外装壁が担う性能の例のイメージ

6.3. 内外装壁の損傷が性能に与える影響の分析

6.3.節では、内外装壁の損傷が性能に与える影響を分析した結果について説明する。
これは内外装壁の被害の評価の2ステップ目にあたる。

4つの実大実験で観察された、158の損傷のそれぞれについて、6.2節で整理した性能に与える影響について分析した。ここでは分析の概要と結果を示す。分析の詳細な過程は**付録6**にまとめて示す。

層間変位に対する損傷について（実験①と実験②）

LGS 間仕切り壁の損傷の分析

表 6-1 に実験①における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷を分析した結果を示す。

シーリング材の切れやボードのひび割れなど密閉性を低下させる可能性があるとして分析された損傷のほか、上張りボードの面内方向の回転や下張りボードのビス穴の拡大など耐震性を低下させる可能性があるとして分析された損傷があった。また、上張りボードの面外方向の変位など部材が脱落する手前の状態になる損傷や、上張りボードの脱落という落下物による人的被害を及ぼす可能性がある損傷があった一方で、スペーサーの爪の外れなど性能に影響を与えないと分析された損傷もあった。

表 6-1 実験①における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の分析結果

損傷	応答	分析結果
シーリング材の切れ（表 5-1 中(1)）	1/400	密閉性を低下させる可能性がある (1/100rad~) 意匠性を低下させる
ランナーの端部の変形（表 5-1 中(2)）	1/400	耐震性を低下させる可能性がある (1/75rad~)
下張りボードのひび割れ（表 5-1 中(3)）	1/400	密閉性を低下させる可能性がある
上張りボードのひび割れ（表 5-1 中(4)）	1/200	密閉性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
スタッドの水平移動（ランナーの傷）（表 5-1 中(5)）	1/200	（影響を与えない）
個々の上張りボードの面内方向の回転（表 5-1 中(6)）	1/100	耐震性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
上張りボードの斜め方向のしわ（表 5-1 中(7)）	1/100	意匠性を低下させる
ランナーの端部の変形（表 5-1 中(8)）	1/100	（影響を与えない）
スペーサーの爪の外れ（表 5-1 中(9)）	1/100	（影響を与えない）
上張りボード間の隙間（表 5-1 中(10)）	1/75	密閉性を低下させる可能性がある
下張りボードのひび割れ（表 5-1 中(11)）	1/75	密閉性を低下させる可能性がある
スペーサーの爪の外れ（表 5-1 中(12)）	1/75	（影響を与えない）
上張りボードの面外方向への傾斜（表 5-1 中(13)）	1/50	耐震性を低下させる （部材が脱落する手前の状態） 密閉性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
下張りボードのビス穴の拡大（表 5-1 中(14)）	1/50	耐震性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある
上張りボードの脱落（表 5-1 中(15)）	1/33	落下物による人的被害を及ぼす可能性がある 避難経路の妨害による人的被害を及ぼす可能性がある 密閉性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
下張りボードのひび割れ（表 5-1 中(16)）	1/33	密閉性を低下させる可能性がある

表 6-2 に実験①における直交壁（壁 B）の損傷を分析した結果を示す。

意匠性を低下させると分析された損傷のみであった。

表 6-2 実験①における直交壁（壁 B）の損傷の分析結果

損傷	応答	分析結果
スタッドの変形（表 5-2 中(17)）	1/400	（影響を与えない）
上張りボードの目地の開き（表 5-2 中(18)）	1/200	意匠性を低下させる

表 6-3 に実験①における開口部を有する壁（壁 C）の損傷を分析した結果を示す。

上張りボードのひび割れなど耐震性を低下させる可能性があり、意匠性も低下させると分析された損傷があるなど、概ね無開口の平坦な壁（壁 A）と同じ結果となった。

表 6-3 実験①における開口部を有する壁（壁 C）の損傷の分析結果

損傷	応答	分析結果
上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ（表 5-3 中(19)）	1/400	耐震性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
上張りボードの開口部の角部からのひび割れ（表 5-3 中(20)）	1/400	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある
下張りボードのひび割れ（表 5-3 中(21)）（表 5-3 中(22)）	1/100	密閉性を低下させる可能性がある
ランナーの端部の変形（表 5-3 中(23)）	1/100	（影響を与えない）
上張りボードの斜め方向のしわ（表 5-3 中(24)）	1/75	意匠性を低下させる
下張りボードのひび割れ（表 5-3 中(25)）	1/75	密閉性を低下させる可能性がある
下張りボードのビス穴の拡大（表 5-3 中(26)）	1/75	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある 耐震性を低下させる
上張りボードの面外方向への傾斜／残留（表 5-3 中(27)）（表 5-3 中(30)）	1/50	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある 耐震性を低下させる（1/33rad～） （部材が脱落する手前の状態）
上張りボードの開口部の角部からのひび割れ（表 5-3 中(28)）	1/50	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある
下張りボードのひび割れ（表 5-3 中(29)）	1/50	密閉性を低下させる可能性がある

表 6-4 に実験①における梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の損傷を分析した結果を示す。

この壁だけに観察されたランナーの開きや下部のランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形などは、耐震性を低下させると分析された。シーリング材の切れは、除荷時には閉じることが観察されたため、密閉性や意匠性に影響を与えないと分析された。

表 6-4 実験①における梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の損傷の分析結果

損傷	発生(rad)	分析結果
壁 E 周囲のシーリング材の切れ（表 5-4 中(31)）	1/400	（影響を与えない）
壁 D と壁 C との間の隙間（表 5-4 中(32)）	1/400	密閉性を無くす（1/75rad～） 意匠性を低下させる（1/75rad～）
壁 D の下張りボードのひび割れ（表 5-4 中(33)）	1/400	密閉性を低下させる可能性がある
壁 E と壁 D 及び壁 F との間の隙間／残留（表 5-4 中(34) (35)）（表 5-4 中(38) (39)）	1/100	密閉性を無くす（1/75rad～） 意匠性を低下させる（1/75rad～）
壁 E のスタッドの水平移動（表 5-4 中(36)）	1/100	（影響を与えない）
壁 E のランナーの端部の変形（表 5-4 中(37)）	1/100	（影響を与えない）
壁 D の上部のランナーの開き（表 5-4 中(40)）	1/75	耐震性を低下させる
壁 D の下部のランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形（表 5-4 中(41)）	1/75	耐震性を低下させる
壁 E の下張りボードのビス穴の拡大（表 5-4 中(42)）	1/75	耐震性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある
壁 D の上張りボードの折れ（表 5-4 中(43)）	1/50	密閉性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
壁 D の下張りボードの破壊（表 5-4 中(44)）	1/50	密閉性を低下させる可能性がある
壁 D と壁 C のスタッド同士を固定するビスの変形（表 5-4 中(45)）	1/50	（影響を与えない）
先付金物と先行ピースを接合するピンのせん断破壊（表 5-4 中(46)）	1/33	耐震性を低下させる

ALC 外壁の損傷の分析

表 6-5 に実験②における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷を分析した結果を示す。
いずれの損傷も性能に影響を与えないと分析された。

表 6-5 実験②における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-5 中(1))	1/200	(影響を与えない)
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-5 中(2))	1/75	(影響を与えない)
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-5 中(3))	1/50	(影響を与えない)

表 6-6 に実験②における開口部を有する壁（壁 B）の損傷を分析した結果を示す。

ALC パネルの表面のひび割れはいずれも意匠性や密閉性を低下させる可能性がある
と分析され、特に構造部材との接合部周辺のひび割れに関しては耐震性も低下させる可能性
があると分析された。

表 6-6 実験②における開口部を有する壁（壁 B）の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-6 中(4))	1/100	(影響を与えない)
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-6 中(5))	1/75	(影響を与えない)
ALC パネルの角部のひび割れ (表 5-6 中(6))	1/50	(影響を与えない)
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(7))	1/50	意匠性を低下させる 耐震性を低下させる可能性がある 密閉性を低下させる可能性がある
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(8))	1/50	密閉性を低下させる可能性がある
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-6 中(9))	1/50	(影響を与えない)
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(10))	1/50	耐震性を低下させる可能性がある
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(11))	1/50	(影響を与えない)
シーリング材の切れ (表 5-6 中(12))	1/33	(影響を与えない)
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(13))	1/33	意匠性を低下させる 耐震性を低下させる可能性がある 密閉性を低下させる可能性がある
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(14))	1/33	密閉性を低下させる可能性がある
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(15)(16))	1/33	密閉性を低下させる可能性がある 耐震性を低下させる (部材が脱落する手前の状態)
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(17))	1/33	密閉性を低下させる可能性がある
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(18))	1/33	耐震性を低下させる可能性がある
ALC パネルの角部のひび割れ (表 5-6 中(19))	1/33	(影響を与えない)

ドアの損傷の分析

表 6-7 に実験②におけるドアの損傷を分析した結果を示す。

影響を与えないと分析された損傷がある一方で、三方枠の破断や開口補強鋼材の溶接の切れなど、意匠性、密閉性、耐震性に影響を与えると分析された損傷があった。また、開閉機能の低下については、除荷時でも機能が低下している段階から耐震性や避難経路の妨害による人的被害を及ぼす可能性があるとして分析された。

表 6-7 実験②におけるドアの損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
シーリング材の切れ (表 5-7 中(1))	1/200	(影響を与えない)
モルタルのひび割れ (表 5-7 中(2))	1/200	(影響を与えない)
三方枠の破断 (表 5-7 中(3))	1/33	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
開口補強鋼材の溶接の切れ (表 5-7 中(4))	1/33	耐震性を低下させる可能性がある
開閉機能の低下	1/200	耐震性を低下させる (1/33rad~) 避難経路の妨害による人的被害を及ぼす 可能性がある (1/33rad~)

窓の損傷の分析

表 6-8 に実験②における窓の損傷を分析した結果を示す。

微小であったモルタルのひび割れや除荷に閉じることが観察されたシーリング材の切れは性能に影響を与えないと分析された。その一方で、サッシの変形やガラスのシーリング材の切れなど意匠性や密閉性に影響すると分析される損傷もあった。また、ガラスのひび割れは脱落には至っていないものの、接触により怪我をするリスクがあるため安全性を低下させると分析された。

表 6-8 実験②における窓の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
モルタルのひび割れ (表 5-8 中(1))	1/200	(影響を与えない)
ガラスのひび割れ (表 5-8 中(2))	1/50	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる 安全性を低下させる
開口補強鋼材の溶接の切れ (表 5-8 中(3))	1/50	耐震性を低下させる可能性がある
シーリング材の切れ (表 5-8 中(4))	1/33	(影響を与えない)
ガラスのひび割れ (表 5-8 中(5))	1/33	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる 安全性を低下させる
ガラスのシーリング材の切れ (表 5-8 中(6))	1/33	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある
サッシの変形 (表 5-8 中(7))	1/33	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある
開閉機能の低下	1/200	耐震性を低下させる (1/50rad~) 避難経路の妨害による人的被害を及ぼす 可能性がある (1/50rad~)

異種の構造部材の層間変位に対する損傷について（実験③）

LGS 間仕切り壁の損傷の分析

表 6-9 に実験③における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷を分析した結果を示す。

概ね実験①の LGS 間仕切り壁の損傷の分析結果と同じとなった。実験③だけに観察されたランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜けは、耐震性を低下させると分析された。その一方で、同じく実験③だけに観察された振れ止めの変形は性能に影響を与えないと分析された。

表 6-9 実験③における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
角部のシーリング材の切れ (表 5-9 中 (1))	1/1000	密閉性を低下させる可能性がある (1/333rad~) 意匠性を低下させる (1/333rad~)
上張りボードとスラブとの間の隙間 (表 5-9 中 (2))	1/1000	密閉性を低下させる可能性がある (1/67rad~) 意匠性を低下させる (1/67rad~)
スタッドの水平移動 (表 5-9 中 (3))	1/333	(影響を与えない)
上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-9 中 (4))	1/150	意匠性を低下させる
上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-9 中 (5))	1/150	耐震性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
上張りボードのひび割れ (表 5-9 中 (6))	1/100	密閉性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
下張りボードの角部のひび割れ (表 5-9 中 (7))	1/100	密閉性を低下させる可能性がある
上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中 (8))	1/67	耐震性を低下させる (部材が脱落する手前の状態) (1/50rad~) 密閉性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
下張りボードのひび割れ (表 5-9 中 (9))	1/67	密閉性を低下させる可能性がある
下張りボードのしわ (表 5-9 中 (10))	1/67	(影響を与えない)
下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-9 中 (11))	1/67	耐震性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある
ランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け (表 5-9 中 (12))	1/50	耐震性を低下させる
振れ止めの変形 (表 5-9 中 (13))	1/50	(影響を与えない)
下張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中 (14))	1/40	耐震性を低下させる 密閉性を低下させる可能性がある

表 6-10 に実験③における開口部を有する壁（壁 B）の損傷を分析した結果を示す。

実験①の LGS 間仕切り壁や実験③の無開口の平坦な壁（壁 A）と概ね同じと結果なった。実験③の開口部を有する壁（壁 B）だけに観察された上張りボードと三方枠との間の隙間などは、除荷時も残留した段階から密閉性や意匠性に影響を与えると分析された。

表 6-10 実験③における開口部を有する壁（壁 B）の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-10 中(15))	1/1000	耐震性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
上張りボードの開口部の角部でのひび割れ (表 5-10 中(16))	1/333	密閉性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
シーリング材の切れ (表 5-10 中(17))	1/333	密閉性を低下させる可能性がある (1/100rad~) 意匠性を低下させる (1/100rad~)
スタッドの水平移動 (表 5-10 中(18))	1/333	(影響を与えない)
上張りボードとスラブとの間の隙間 (表 5-10 中(19))	1/200	密閉性を低下させる可能性がある (1/67rad~) 意匠性を低下させる (1/67rad~)
上張りボードと三方枠との間の隙間 (表 5-10 中(20))	1/200	密閉性を低下させる可能性がある (1/67rad~) 意匠性を低下させる (1/67rad~)
下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(21))	1/150	密閉性を低下させる可能性がある
上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-10 中(22))	1/100	意匠性を低下させる
下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(23))	1/100	密閉性を低下させる可能性がある
下張りボードのしわ (表 5-10 中(24))	1/100	(影響を与えない)
下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(25))	1/50	密閉性を低下させる可能性がある
上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け (表 5-10 中(26))	1/50	耐震性を低下させる
上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-10 中(27))	1/40	耐震性を低下させる (部材が脱落する手前の状態) 密閉性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
振れ止めの変形 : (表 5-10 中(28))	1/40	(影響を与えない)

ドアの損傷の分析

表 6-11 に実験③におけるドアの損傷を分析した結果を示す。

三方枠の持ち上がりや開閉機能の低下は、除荷時にも残留した段階から性能に影響を与えると分析された。また、三方枠の変形など意匠性を低下させると分析された損傷の他、開口補強鋼材の変形や上部のランナーとの接合部のビスのせん断破壊など耐震性を低下させると分析された損傷があった。

表 6-11 実験③におけるドアの損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
三方枠の持ち上がり (表 5-11 中(1))	1/200	密閉性を低下させる可能性がある (1/67rad~) 意匠性を低下させる (1/67rad~)
三方枠の変形 (表 5-11 中(2))	1/100	意匠性を低下させる
ヒンジの隙間 (表 5-11 中(3))	1/100	(影響を与えない)
開口補強鋼材の変形 (表 5-11 中(4))	1/67	耐震性を低下させる
開口補強鋼材と上部のランナーとを接合するビスのせん断破壊 (表 5-11 中(5))	1/50	耐震性を低下させる
三方枠の接合部の破断 (表 5-11 中(6))	1/40	密閉性を低下させる可能性がある 意匠性を低下させる
錠部分の変形 (表 5-11 中(7))	1/40	避難経路の妨害による人的被害を及ぼす
開閉機能の低下	1/200	耐震性を低下させる (1/67rad~) 避難経路の妨害による人的被害を及ぼす (1/67rad~)

層間変位と慣性力に対する損傷について（実験④）

窓の損傷の分析

表 6-12 に実験④における 3 階の窓の損傷を分析した結果を示す。

モルタルのひび割れは、破片の剥落や貫通が確認された段階で密閉性を低下させると分析された。また、枠の変形やずれなどは、意匠性と密閉性を低下させると分析された。ガラスのひび割れは、実験②では安全性のみ低下させると分析されたが、実験④ではガラスの剛性を低下させると考えられたため耐震性を低下させ、部材が脱落する手前の状態にあると分析された。また、クレセント受けの脱落は施錠の機能を無くすため、防犯性を低下させると分析された。

表 6-12 実験④における 3 階の窓の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
モルタルのひび割れ (表 5-12 中(1))	100%加振後	密閉性を低下させる (160%加振後)
モルタルのひび割れ (表 5-12 中(2))	150% (1 回目) 加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる (160%加振後)
縦枠の角部の変形 (表 5-12 中(3))	150% (1 回目) 加振後	意匠性を低下させる
押縁のずれ (表 5-12 中(4))	150% (1 回目) 加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(5))	150% (1 回目) 加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
シーリング材の切れ (表 5-12 中(6))	150% (1 回目) 加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
ガラスのひび割れ (表 5-12 中(7))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる 安全性を低下させる
縦枠と上枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(8))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
シーリング材の切れ (表 5-12 中(9))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
ガラスのひび割れ (表 5-12 中(10))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる 安全性を低下させる 耐震性を低下させる 部材が脱落する手前の状態
下枠の変形 (表 5-12 中(11))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
クレセント受けの脱落 (表 5-12 中(12))	160%加振後	意匠性を低下させる 防犯性を低下させる
障子枠の変形 (表 5-12 中(13))	160%加振後	意匠性を低下させる
縦枠の内部の変形 (表 5-12 中(14))	160%加振後	意匠性を低下させる
縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(15))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる

表 6-13 に実験④における 2 階の窓の損傷を分析した結果を示す。
3 階の窓と概ね同じ結果となった。

表 6-13 実験④における 2 階の窓の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
モルタルのひび割れ (表 5-13 中(16))	100%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる (160%加振後)
縦枠の角部の変形 (表 5-12 中(3))	150% (1 回目) 加振後	意匠性を低下させる
押縁のずれ (表 5-13 中(18))	150% (1 回目) 加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(19))	150% (1 回目) 加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
シーリング材の切れ (表 5-13 中(20))	150% (1 回目) 加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
モルタルのひび割れ (表 5-13 中(21))	150% (1 回目) 加振後	密閉性を低下させる (160%加振後)
ガラスのひび割れ (表 5-13 中(22))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる 安全性を低下させる
縦枠と上枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(23))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
シーリング材の切れ (表 5-13 中(24))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
ガラスのひび割れ (表 5-13 中(25))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる 安全性を低下させる
下枠の変形 (表 5-13 中(26))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる
クレセント受けの脱落 (表 5-13 中(27))	160%加振後	意匠性を低下させる 防犯性を低下させる
縦枠の内部の変形 (表 5-13 中(28))	160%加振後	意匠性を低下させる
縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(29))	160%加振後	意匠性を低下させる 密閉性を低下させる

内外装壁の損傷が性能に与える影響を分析した結果のまとめ

4つの実大実験で観察された、158の損傷のそれぞれについて、6.2節で整理した性能に与える影響について分析した結果、損傷が性能に与える影響として以下の12種類があった。

- ・落下物による人的被害を及ぼす可能性がある
- ・避難経路の妨害による人的被害を及ぼす可能性がある
- ・耐震性を低下させる（部材が脱落する手前の状態）
- ・耐震性を低下させる
- ・耐震性を低下させる可能性がある
- ・安全性を低下させる
- ・防犯性を低下させる
- ・意匠性を低下させる
- ・密閉性を無くす
- ・密閉性を低下させる
- ・密閉性を低下させる可能性がある
- ・影響を与えない

逆に、内外装壁の性能に与える影響に着目すると、内外装壁の損傷は以下の12のカテゴリーに分類できる¹³。

- ・落下物による人的被害を及ぼす可能性がある損傷
- ・避難経路の妨害による人的被害を及ぼす可能性がある損傷
- ・耐震性を低下させる（部材が脱落する手前の状態）損傷
- ・耐震性を低下させる損傷
- ・耐震性を低下させる可能性がある損傷
- ・安全性を低下させる損傷
- ・防犯性を低下させる損傷
- ・意匠性を低下させる損傷
- ・密閉性を無くす損傷
- ・密閉性を低下させる損傷
- ・密閉性を低下させる可能性がある損傷
- ・影響を与えない損傷

6.4節では、このカテゴリー分けを利用して内外装壁の被害の評価を行う。

¹³ ただし、複数のカテゴリーに該当する損傷が多い。

6.4. 内外装壁の被害の評価

6.4.節では、内外装壁の損傷の被害を評価した結果について説明し、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

6.4.1.節では、内外装壁の損傷の被害度を評価した結果について説明する。

6.4.2.節では、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

6.4.1. 内外装壁の損傷の被害度の評価

6.4.1.節では、内外装壁の損傷の被害度を評価した結果について説明する。

これは内外装壁の被害の評価の3ステップ目にあたる。

内外装壁の損傷の被害度の評価

6.3.節で示した、内外装壁の性能に与える影響に着目した12の損傷のカテゴリーごとに、該当する損傷の被害度の評価を行う。

落下物による人的被害を及ぼす可能性がある損傷の評価¹⁴

このカテゴリーに該当する損傷は、人に衝突した場合、人的被害を発生させる。そして、建築基準法により、内外装材は脱落しないことが定められている。そのため、このカテゴリーに該当する損傷は、地震時に発生させていけない損傷と言える。また、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

避難経路の妨害による人的被害を及ぼす可能性がある損傷¹⁵

このカテゴリーに該当する損傷が、避難経路の扉や避難口として利用される窓において発生した場合は、避難が困難となってしまう、人的被害を発生させる。そのため、このカテゴリーに該当する損傷は、地震時に発生させていけない損傷と言える。また、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

¹⁴ このカテゴリーには、“上張りボードの脱落”（表 5-1 中(15)）が該当する。

¹⁵ このカテゴリーには、“上張りボードの脱落”（表 5-1 中(15)）や“錠部分の変形”（表 5-11 中(7)）の他に、実験②のドアと窓、そして実験③のドアで観察された“開閉機能の低下”が該当する。

耐震性を低下させる損傷（部材が脱落する手前の状態）¹⁶

このカテゴリーに該当する損傷は、接合部を破壊する損傷であり、部材の接合部の保持力を大幅に低下させる損傷である。具体的には、地震後に、別の地震や風など追加の外力が作用した場合に部材の脱落を発生させうる。つまり、この損傷を放置した場合、地震後に人的被害を発生させる可能性が高い。そのため、このカテゴリーに該当する損傷は、地震後に迅速な対応¹⁷が必要となる損傷と言える。また、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

耐震性を低下させる損傷¹⁸

このカテゴリーに該当する損傷は、接合部を破壊する損傷であり、部材の接合部の保持力を低下させる損傷である。具体的には、この損傷を放置した場合、別の地震や風など追加の外力が作用した場合に人的被害を発生させる可能性がある。ただし、このカテゴリーに該当する損傷は、複数ある接合部の中でも、一部のみを破壊する。そのため、部材の脱落が即座に発生するものではないと考えられる¹⁹。そのため、このカテゴリーに該当する損傷は、迅速な対応が推奨される損傷と言える。また、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

耐震性を低下させる可能性がある損傷²⁰

このカテゴリーに該当する損傷は、接合部を拘束する損傷、もしくは、接合部を部分的に破壊する損傷であり、部材の接合部の保持力を低下させる可能性がある損傷である。具体的には、この損傷を放置した場合、別の地震や風など追加の外力が作用した場合に人的被害を発生させる可能性がある。ただし、このカテゴリーに該当する損傷は、接合部が完全に破壊しているわけではないため、部材の脱落が即座に発生するものではないと考えられる²¹。そのため、このカテゴリーに該当する損傷は、迅速な対応が推奨される損傷と言える。また、

¹⁶ このカテゴリーには、“上張りボードの面外方向への傾斜／残留”（表 5-1 中(13)）（表 5-3 中(27)）（表 5-9 中(8)）（表 5-3 中(30)）（表 5-10 中(27)）や “ALC パネルのひび割れ”（表 5-6 中(15)(16)）、“ガラスのひび割れ”（表 5-12 中(10)）が該当する。

¹⁷ 対応とは、補修だけでなく、部材の撤去や、周囲への立ち入りを禁止することも指す。

¹⁸ このカテゴリーには、“下張りボードのビス穴の拡大”（表 5-1 中(14)）（表 5-3 中(26)）（表 5-4 中(42)）（表 5-9 中(11)）や“壁 D の上部のランナーの開き”（表 5-4 中(40)）、“壁 D の下部のランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形”（表 5-4 中(41)）、“先付金物と先行ピースを接合するピンのせん断破壊”（表 5-4 中(46)）、“ランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け”（表 5-9 中(12)）（表 5-10 中(26)）、“下張りボードの面外方向への傾斜”（表 5-9 中(14)）、“開口補強鋼材と上部のランナーとを接合するビスのせん断破壊”（表 5-11 中(5)）などが該当する。

¹⁹ 今後の課題として、損傷が実際に与える影響の定量的な検討がある。

²⁰ このカテゴリーには、“ランナーの端部の変形”（表 5-1 中(2)）や、“個々の上張りボードの面内方向の回転”（表 5-1 中(6)）、“上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ”（表 5-3 中(19)）（表 5-9 中(5)）（表 5-10 中(15)）、“ALC パネルの表面のひび割れ”（表 5-6 中(7)）（表 5-6 中(13)）（表 5-6 中(18)）、“開口補強鋼材の溶接の切れ”（表 5-7 中(4)）（表 5-8 中(3)）、“開口補強鋼材の変形”（表 5-11 中(4)）などが該当する。

²¹ 今後の課題として、損傷が実際に与える影響の定量的な検討がある。

修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

安全性を低下させる損傷²²

このカテゴリーに該当する損傷は、鋭利な破片を発生させる損傷であり、不用意に触れると怪我をする可能性がある。つまり、この損傷を放置した場合、地震後に人的被害を発生させる可能性がある。そのため、このカテゴリーに該当する損傷は、迅速な対応が推奨される損傷と言える。また、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

防犯性を低下させる損傷²³

このカテゴリーに該当する損傷は、窓の施錠が不可能となる損傷である。つまり、建物への出入りが自由になり、建物の防犯性が失われることになる。この損傷を放置した場合、地震後に人的被害や経済的被害を発生させる可能性がある。そのため、このカテゴリーに該当する損傷は、迅速な対応が推奨される損傷と言える。また、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

意匠性を低下させる損傷²⁴

このカテゴリーに該当する損傷は、仕上げ側の損傷、つまり、建物の利用者が目視できる範囲の損傷である。そのため、デザイン性の喪失の他に、建物の利用者を不安にさせる影響を与える可能性がある。つまり、この損傷を放置した場合、地震後に心理的な人的被害や、集客性の低下による経済的被害を発生させる可能性がある。ただし、このカテゴリーに該当する損傷は、地震時に迅速な対応は必要ないと言える。一方で、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

密閉性を無くす損傷²⁵

このカテゴリーに該当する損傷は、壁と壁の間に隙間を発生させるため、室内空間の密閉性を無くす損傷である。そのため、防火性、水密性、気密性が失われることになる。この損傷を放置した場合、地震後に地震後に火事が発生した場合に人的被害を発生させる可能性がある。ただし、このカテゴリーに該当する損傷は、地震時に迅速な対応は必要ないと言える。また、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

²² このカテゴリーには、“ガラスのひび割れ”（表 5-8 中(2)）（表 5-8 中(5)）（表 5-12 中(7)）（表 5-12 中(10)）（表 5-13 中(22)）（表 5-13 中(25)）が該当する。

²³ このカテゴリーには、“クレセント受けの脱落”（表 5-12 中(12)）、クレセント受けの脱落（表 5-13 中(27)）が該当する。

²⁴ このカテゴリーには、“上張りボードの斜め方向のしわ”（表 5-1 中(7)）（表 5-3 中(24)）、“ALC パネルの表面のひび割れ”（表 5-6 中(8)）（表 5-6 中(14)）（表 5-6 中(17)）などが該当する。

²⁵ このカテゴリーには、“壁 D と壁 C との間の隙間”（表 5-4 中(32)）や、“壁 E と壁 D 及び壁 F との間の隙間／残留”（表 5-4 中(34)(35)）（表 5-4 中(38)(39)）が該当する。

密閉性を低下させる損傷²⁶

このカテゴリーに該当する損傷は、部材の接合部の間に隙間を発生させるため、室内空間の密閉性を低下させる損傷である。そのため、水密性、気密性が失われることになる。水密性が失われるため、例えば、降雨の場合に建物内に浸水が発生する。つまり、この損傷を放置した場合、地震後に経済的被害を発生させる可能性がある。ただし、このカテゴリーに該当する損傷は、地震時に迅速な対応は必要ないと言える。一方で、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

密閉性を低下させる可能性がある損傷²⁷

このカテゴリーに該当する損傷は、部材の接合部の間に隙間を発生させるため、室内空間の密閉性を低下させる可能性があり、水密性、気密性が失われている可能性がある。水密性が失われると、例えば、降雨の場合に建物内に浸水が発生する。つまり、この損傷を放置した場合、地震後に経済的被害を発生させる可能性がある。ただし、このカテゴリーに該当する損傷は、地震時に迅速な対応は必要ないと言える。一方で、修復や撤去の費用の分や、その作業に充てる時間の分の経済的被害を発生させる。

影響を与えない損傷²⁸

このカテゴリーに該当する損傷は、ごく微小な損傷や、施工性を高めるための部材のみに発生した損傷である。そのため、耐震性や密閉性を低下させない。また、仕上げ材に覆われる部分の損傷であるため、意匠性も低下させない。そのため、この損傷は被害を発生させない。すなわち、このカテゴリーに該当する損傷は、地震時に対応する必要がないと言える。

²⁶ このカテゴリーには、“三方枠の破断”（表 5-7 中(3)）や、“モルタルのひび割れ”（表 5-12 中(1)）（表 5-13 中(21)）（表 5-12 中(2)）（表 5-13 中(16)）、“押縁のずれ”（表 5-12 中(4)）（表 5-13 中(18)）、“縦枠と上枠との接合部の隙間”（表 5-12 中(8)）（表 5-13 中(23)）、“縦枠と下枠との接合部の隙間”（表 5-12 中(5)）（表 5-12 中(15)）（表 5-13 中(19)）（表 5-13 中(29)）、“シーリング材の切れ”（表 5-12 中(6)）（表 5-12 中(9)）（表 5-13 中(20)）（表 5-13 中(24)）、“下枠の変形”（表 5-12 中(11)）（表 5-13 中(26)）が該当する。

²⁷ このカテゴリーには、“シーリング材の切れ”（表 5-1 中(1)）、“下張りボードのひび割れ”（表 5-1 中(3)）（表 5-1 中(11)）（表 5-1 中(16)）（表 5-3 中(21)）（表 5-3 中(22)）（表 5-3 中(25)）（表 5-3 中(29)）（表 5-4 中(33)）、“上張りボードのひび割れ”（表 5-1 中(4)）（表 5-3 中(20)）（表 5-3 中(28)）、“ALC パネルの表面のひび割れ”（表 5-6 中(8)）（表 5-6 中(14)）（表 5-6 中(17)）などが該当する。

²⁸ このカテゴリーには、“スタッドの水平移動”（表 5-1 中(5)）、“ランナーの端部の変形”（表 5-1 中(8)）、“スパーサーの爪の外れ”（表 5-1 中(9)）（表 5-1 中(12)）、“ALC パネルの底面のひび割れ”（表 5-5 中(1)）などが該当する。

内外装壁の損傷の被害度の評価結果のまとめ

表 6-14 に、前項で内外装壁の損傷の被害度の評価結果と対応の必要性について考察した結果を示す。

損傷の被害度は計 6 段階に分類され、便宜上、それぞれにレベル①からレベル⑤という名称を付ける。

表 6-14 損傷の被害度の評価と対応の必要性

損傷のカテゴリー	損傷の被害度の評価結果	対応の必要性	レベル名
<ul style="list-style-type: none"> ・落下物による人的被害を及ぼす可能性がある損傷 ・避難経路の妨害による人的被害を及ぼす可能性がある損傷 	人的被害を発生させる／経済的被害を発生させる	(発生させてはならない)	【⑤】
<ul style="list-style-type: none"> ・耐震性を低下させる(部材が脱落する手前の状態) 損傷 	地震後に人的被害を発生させる可能性が高い／経済的被害を発生させる	迅速な対応が必要である	【④】
<ul style="list-style-type: none"> ・耐震性を低下させる損傷 ・耐震性を低下させる可能性がある損傷 ・安全性を低下させる損傷 ・防犯性を低下させる損傷 	地震後に人的被害を発生させる可能性がある／経済的被害を発生させる	迅速な対応が推奨される	【③】
<ul style="list-style-type: none"> ・意匠性を低下させる損傷 	地震後に心理的な人的被害を発生させる可能性がある／経済的被害を発生させる	迅速な対応は必要ない	【②】
<ul style="list-style-type: none"> ・密閉性を無くす損傷 ・密閉性を低下させる損傷 ・密閉性を低下させる可能性がある損傷 	経済的被害を発生させる	迅速な対応は必要ない	【①】
<ul style="list-style-type: none"> ・影響を与えない損傷 	被害を発生させない	対応は必要ない	【①】

6.4.2. 内外装壁の被害と建物の応答との対応関係

6.4.2.節では、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明する。

6.4.1.節では、4つの実大実験で観察された158の損傷について被害度の評価を行った。その結果、損傷の被害度の評価結果は、レベル①からレベル⑤の計6段階に分類された。この6段階を用いて内外装壁の被害と層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした。

表 6-15に内外装壁の被害と層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を整理した結果を示す。なお、整理した過程の詳細は付録7にまとめた。

損傷の被害度のレベル

⑤	地震時に人的被害が発生しうる／経済的被害が発生している
④	地震後に人的被害を発生する可能性が高い／経済的被害が発生している
③	地震後に人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
②	地震後に心理的な人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
①	経済的被害が発生している
①	被害が発生していない
-	損傷が発生していない

表 6-15 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係

建物の応答の種類	内外装壁の種類			壁の面内方向の層間変位											
				1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33	
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁A)	シーリング材		①		①		②	②		②		②	
			上張りボード		-		②		③	③		④		⑤	
			下張りボード		①		①		①	①		③		③	
			下地		-		①		①	③		③		③	
		直交壁 (壁B)	シーリング材		-		-		-		-		-		-
			上張りボード		-		②		②	②		②		②	
			下張りボード		-		-		-		-		-		-
		下地	シーリング材		①		①		①	①		①		①	
			上張りボード		-		-		-		-		-		-
			下張りボード		-		-		-		-		-		-
		開口部を有する壁 (壁C)	シーリング材		-		-		-		-		-		-
			上張りボード		③		③		③	③		③		④	
			下張りボード		-		-		①	③		③		③	
			下地		-		-		①	①		①		①	
		梁から持ち出した壁 (壁D,E,F)	シーリング材		①		①		①	①		①		①	
			上張りボード		①		①		①	②		②		②	
	下張りボード			①		①		①	②		③		③		
	下地			-		-		①	③		③		③		
	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁A)	シーリング材					-		-		-		-	
			パネル仕上げ側						-		-		-		
			パネル底面				①		①	①		①		①	
			パネル下地側				-		-		-		-		
		開口部を有する壁 (壁B)	シーリング材		-		-		-		-		-		①
			パネル仕上げ側		-		-		-		-		③		④
			パネル底面		-		-		①	①		①		①	
			パネル下地側		-		-		-		-		③		③
		ドア (実験②)	開閉機能				①		①	①		①		①	⑤
			シーリング材				①		①	①		①		①	
枠/扉						-		-		-		-		②	
開口補強鋼材/モルタル					①		①	①		①		①	③		
窓 (実験②)	開閉機能				①		①	①		①		①	⑤		
	シーリング材				-		-		-		-		①		
	ガラス				-		-		-		③		③		
	シーリング材 (ガラス)				-		-		-		-		②		
	サッシ				-		-		-		-		②		
開口補強鋼材/モルタル				①		①	①		①		①	③			
異種の構造部材の層間変位 (RC骨組+RC壁)	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁A)	シーリング材	①		②	②	②		②	②	②	②		
			上張りボード	①		①	①	③	③		③	④	④	④	
			下張りボード	-		-	-	-	①		③	③	③	③	
			下地	-		①	①	①	①		①	③	③	③	
	開口部を有する壁 (壁B)	シーリング材	-		-	-	-	②		②	②	②	②		
		上張りボード	③		③	③	③	③		③	③	④	④		
		下張りボード	-		-	-	①		①	①	①	①	①		
		下地	-		①	①	①	①		①	③	③	③		
	ドア (実験③)	開閉機能	-		-	①	①	①		①	①	①	①	⑤	
		シーリング材	-		-	-	-	-		②	②	②	②		
		枠/扉	-		-	①	①	②		②	②	②	②		
		開口補強鋼材	-		-	-	-	-		③	③	③	③		
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	3階の窓 (慣性力大)	開閉機能	-								③			
			ガラス	-								④			
			シーリング材 (ガラス)	-					②		②				
		サッシ	-					②		②					
		モルタル仕上げ側	-					②		②					
		モルタル下地側	①					①		①					
	2階の窓 (層間変位大)	開閉機能	-										③		
		ガラス	-										③		
		シーリング材 (ガラス)	-							②			②		
		サッシ	-							②			②		
		モルタル仕上げ側	②							②			②		
		モルタル下地側	-							①			①		

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

更に、表 6-16 に、各壁や開口部を一体と見なして内外装壁の被害と建物の応答との対応関係をまとめたものを示す。整理の方法としては、層間変位の程度に対して、最も被害度が高い損傷のレベルを表の数値として表した。例えば、被害度がレベル⑤の損傷とレベル②の損傷が発生している場合、表では「③」表した。

損傷の被害度のレベル

⑤	地震時に人的被害が発生しうる／経済的被害が発生している
④	地震後に人的被害を発生する可能性が高い／経済的被害が発生している
③	地震後に人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
②	地震後に心理的な人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
①	経済的被害が発生している
①	被害が発生していない
-	損傷が発生していない

表 6-16 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係のまとめ

建物の応答の種類	内外装壁の種類		壁の面内方向の層間変位										
			1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁 A)		②		②		③	③		④		⑤
		直交壁 (壁 B)		①		②		②	②		②		②
		開口部を有する壁 (壁 C)		③		③		③	③		③		④
		梁から持ち出した壁 (壁 D,E,F)		①		①		①	③		③		③
	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁 A)				①		①	①		①		①
		開口部を有する壁 (壁 B)				-		①	①		③		④
		ドア (実験②)					①		①	①		①	
	窓 (実験②)					①		①	①		⑤		⑤
異種の構造部材の層間変位 (RC 骨組 + RC 壁)	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁 A)	-		②	②	③	③		③	④	④	④
		開口部を有する壁 (壁 B)	③		③	③	③	③		③	③	④	④
	ドア (実験③)		-		-	①	①	②		⑤	⑤	⑤	⑤
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	3階の窓 (慣性力大)	-					②			④		
		2階の窓 (層間変位大)	②						②				③

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

⑤と表記された部分に関する考察

⑤と表された部分²⁹は、地震時に人的被害が発生しうる、かつ、経済的被害が発生している状況を示す。これは建築基準法で示された最低ラインに達していない状況である。すなわち、大地震の際に層間変形角 $1/67\text{rad}$ を超える建物においては、窓やドアについて耐震対策が必要になることが示唆される。更に、最大層間変形角が $1/33\text{rad}$ を超える建物においては、LGS 間仕切り壁についても耐震対策が必要になることが示唆される。

④と表記された部分に関する考察

④と表された部分³⁰は、地震後に他の外力（余震や風など）によって人的被害を発生させる可能性が高い、かつ、経済的被害が発生している状況を指す。これは、建物の利用を再開するにあたって応急的な対応が必要となる状況である。すなわち、地震後に即座に利用を再開させたい³¹、かつ、最大層間変形角が $1/50\text{rad}$ を超える建物においては、LGS 間仕切り壁や窓について耐震対策が必要になることが示唆される。

③と表記された部分に関する考察

③と表記された部分³²は、地震後に他の外力（余震や風など）によって人的被害を発生させる可能性がある、かつ、経済的被害が発生している状況を指す。これは、建物の利用を再開するにあたって、再開が急がれる建物であれば対応を後回しにしても構わないが、安全のためには対応が推奨される状況である。ただし、耐震性などの低下が考えられるため、最終的には修復が必要となる。つまり、最大層間変形角が $1/200\text{rad}$ に達する建物において、地震後に修復なしで継続利用したい場合は、内外装壁の耐震対策が必要になることが示唆される。

①並びに②と表記された部分に関する考察

①並びに②と表記された部分は、直接的な人的被害は発生させないが、経済的被害が発生している状況である。つまり、対応は後回しにしても構わないが、最終的には修復が必要となる状況である。

²⁹ LGS 間仕切り壁（実験①の無開口の平坦な壁）の層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時や、ドアと窓（実験①ならびに実験③）の層間変形角 $1/67\text{rad}$ 以上の時が該当する。LGS 間仕切り壁に関しては、上張りボードの脱落のためこの結果となった。ドアと窓に関しては、開閉機能の低下のため、この結果となった。

³⁰ LGS 間仕切り壁（実験①ならびに実験③の無開口の平坦な壁と開口部を有する壁）の層間変形角 $1/50\text{rad}$ 以上の時や、ALC 外壁（実験②の開口部を有する壁）の層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時、窓（実験④の3階の窓）の層間変形角 $1/50\text{rad}$ +慣性力（ $1.38g$ ）の時が該当する。LGS 間仕切り壁に関しては、上張りボードの面外方向への傾斜などのためこの結果となった。窓に関しては、ガラスのひび割れのためこの結果となった。

³¹ 損傷を特定し、修復や立入禁止にするなどの対応を施す時間を取りたくない場合のこと。

³² LGS 間仕切り壁（実験①ならびに実験③の開口部を有する壁）の層間変形角 $1/1000\text{rad}$ 以上の時などが該当する。LGS 間仕切り壁に関しては、上張りボードの単体の回転のためこの結果となった。

そして、表 6-17 に、表 6-16 の行を、被害度の順に上から並び替えたものを示す。全ての実験で同じ層間変形角に対して観察を行えているわけではないため、単純に比較することはできないが、ドア、窓、LGS 間仕切り壁の被害度が高い傾向が読み取れ、被害度⑤や④は層間変形角 $1/67\text{rad}$ 以上で発生していることが読み取れる。また、LGS 間仕切り壁は被害度レベル③を経るのに対して、ドアや窓は被害度レベル③を経ることなく、⑤に達することが読み取れる。

層間変形角の増大に伴う被害度のレベルの上がり方に着目すると、ドアや窓に関しては、レベル①から急にレベル⑤に達することが分かる。これは、ドアや窓においては、開閉機能の低下といったレベル⑤に該当する被害をもたらす損傷が、接合部の破損といったレベル③に該当する被害をもたらす損傷と同時、もしくはより小さい層間変形角で発生するためである。

その一方で、LGS 間仕切り壁や ALC 外壁ではレベル①や②から、レベル③を経て、レベル④や⑤に到達することが分かる。これは、ボードの脱落や破片の発生といったレベル④や⑤に該当する被害をもたらす損傷に先んじて、接合部の破損といったレベル③に該当する被害をもたらす損傷が発生するためである。

損傷の被害度のレベル

⑤	地震時に人的被害が発生しうる／経済的被害が発生している
④	地震後に人的被害を発生する可能性が高い／経済的被害が発生している
③	地震後に人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
②	地震後に心理的な人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
①	経済的被害が発生している
①	被害が発生していない
-	損傷が発生していない

表 6-17 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の被害と
壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係のまとめ（被害度順）

建物の応答の種類	内外装壁の種類	壁の面内方向の層間変位										
		1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
異種の構造部材の層間変位	ドア (実験③)	-		-	①	①	②		⑤	⑤	⑤	⑤
層間変位	窓 (実験②)				①		①	①		⑤		⑤
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)		②		②		③	③		④		⑤
層間変位	無開口の平坦な壁 (壁 A)				①		①	①		①		⑤
異種の構造部材の層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験③)	-		②	②	③	③		③	④	④	④
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	-					②			④		
異種の構造部材の層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験③)	③		③	③	③	③		③	③	④	④
層間変位	開口部を有する壁 (壁 B)		③		③		③	③		③		④
層間変位	開口部を有する壁 (壁 C)		③		③		③	③		③		④
層間変位	ALC 外壁 (実験②)				-		①	①		③		④
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)		①		①		①	③		③		③
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	②						②				③
層間変位	2階の窓 (層間変位大)							②				③
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)		①		②		②	②		②		②
層間変位	直交壁 (壁 B)		①		②		②	②		②		②
層間変位	ALC 外壁 (実験②)				①		①	①		①		①
層間変位	無開口の平坦な壁 (壁 A)				①		①	①		①		①

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

6章の小括

6章では、実験で観察された損傷について、損傷がもたらす被害を評価し、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明した。

まず、6.1節では、内外装壁の損傷がもたらす被害の評価の目的、関連する先行事例、そして方法について説明した。

次に、6.2節では、内外装壁が担う性能を整理した結果について説明した。本研究では内外装壁が担う性能として、LGS 間仕切り壁と ALC 外壁は密閉性、意匠性、耐震性、窓とドアは防犯性、密閉性、意匠性、耐震性と定める。

次に、6.3節では、内外装壁の損傷が性能に与える影響を分析した結果について説明した。内外装壁の性能に与える影響に着目すると損傷は12のカテゴリーに分類された。

6.4節では、内外装壁の性能に与える影響に着目して分類したカテゴリーごとに、内外装壁の被害を評価した結果について説明し、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした結果について説明した。内外装壁の被害は6段階に分類された。そして、内外装壁の被害と建物の応答との対応関係から、大地震の際に層間変形角 $1/67\text{rad}$ を超える建物では窓やドアについて耐震対策が必要になることや、地震後に即座に利用を再開させたいかつ大地震の際に層間変形角 $1/50\text{rad}$ を超える建物ではLGS 間仕切り壁や窓について耐震対策が必要になることが示唆された。

以上、6章では、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした³³。

これに対して7章では、実験で観察された損傷と損傷がもたらす被害について、診断の難易度を評価し、内外装壁の損傷と被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の対応関係について、診断の観点を含めて明らかにする。

³³ ただし、実施した4つの実大実験の範囲の中で。

6章 参考文献

- [1] 金子美香, 神原浩, 田村和夫.(2003). 1995年兵庫県南部地震の被害調査に基づく非構造部材の耐震性評価. 日本建築学会技術報告集, 9(17), doi:10.3130/aijt.9.563
- [2] 寺本隆幸, 清家剛, 大迫勝彦, 渡壁守正, 鈴木正裕.(2013). ALC 間仕切壁の地震被害と今後の対策 : その1 東日本大震災における ALC 帳壁の地震被害と課題. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013, 1421-1422.
- [3] 日本建築学会.(2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.
- [4] 内閣府(防災担当).(2021年3月). 災害に係る住家の被害認定基準運用指針. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/r303shishin_all.pdf
- [5] 被災建築物応急危険度判定研究会.(1998). 被災建築物応急危険度判定マニュアル. 東京都: 日本建築防災協会・全国被災建築物応急危険度判定協議会.
- [6] 文部科学省大臣官房文教施設企画部.(2014年7月). 被災文教施設応急危険度判定方法について. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: http://web-honbu.jimu.nagoya-u.ac.jp/fmd/06other/shisetukanribu/image/link_sisaku/oukyuu_kikenndo_hannteihouhou.pdf
- [7] 八木尚太郎.(2018). 地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究 —乾式間仕切り壁と ALC 外壁を対象とした実大載荷実験を通して—. 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会分環境学専攻.
- [8] 福田一夫, 三谷一房, 林徹, 河内武(2012). 集合住宅の乾式耐火遮音戸境壁における地震履歴後の耐火性および遮音性 その1 計画概要と面内加力実験の結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012, 1275-1276.
- [9] 法身祐治, 林徹, 太田匡信, 佐藤高行.(2016). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その1 試験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016, 889-890.

7章 内外装壁の診断の観点を含む評価

7.1. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の概要.....	246
7.1.1. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の目的.....	246
7.1.2. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の方法.....	247
7.2. 内外装壁の損傷の発生位置の分析.....	248
7.3. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価.....	256
7.3.1. 内外装壁の損傷の診断性の評価.....	256
7.3.2. 内外装壁の損傷と建物の応答との診断の観点を含む対応関係.....	258
7.4. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の概要.....	263
7.4.1. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の目的.....	263
7.4.2. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の方法.....	264
7.5. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価.....	266
7.6. 内外装壁の耐震性の向上に向けた課題.....	272
7章の小括.....	280
7章の参考文献.....	281

7章では、実験で観察された損傷と、6章で評価した被害について、診断の観点を含む評価をし、内外装壁の損傷と被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明し、内外装壁の耐震性の向上に向けた課題を示す。

7.1.節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の目的と方法について説明する。

7.2.節では、内外装壁の損傷の発生位置を分析した結果について説明する。

7.3.節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価をした結果について説明し、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明する。

7.4.節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の目的と方法について説明する。

7.5.節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価を行い、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明する。

7.6.節では、評価結果を踏まえ、内外装壁の耐震性の向上に向けた課題を示す。

7.1. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の概要

7.1.節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の目的と方法について説明する。

7.1.1.節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の目的について説明する。

7.1.2.節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の方法について説明する。

7.1.1. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の目的

7.1.1.節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の目的について説明する。

1.1.3.節や2.3.節でも説明したように、地震の発生後には、地震による内外装壁の損傷に対する応急的な対応（周囲を立ち入り禁止にするなど）の判断や、修復の判断のために、損傷の診断（損傷を検出し、その程度を把握すること）が行われる。なお、診断の目的については付録8でも説明している。

しかし、現状の内外装壁の地震後の診断は、建物の管理者による床や地面からの目視調査でのみ行われている。その結果として、吊り天井では、目視調査で容易に確認できない天井裏（天井懐内）の損傷が見過ごされ、放置される事例が報告されている [1]¹ [2]²。これを受けて、天井懐内の損傷を目視以外の方法で診断する手法の研究が行われている [3]³ [4]⁴ [5]⁵。

このように、目視調査で容易に確認できない範囲に損傷が発生する可能性について、天井については検討が行われ、対策も始まっているのに対して、LGS 間仕切り壁、ALC 外壁、ドア、窓といった内外装壁については、未検討となっており、対策も講じられていない。

そこで、本研究では、実施した4つの実大実験で観察された158の損傷に対して、目視調査で容易に確認できない範囲に損傷が発生する可能性について検討することを目的とした評価を行う。

¹ 塩入徹. (2018). 天井の劣化診断（非構造部材の再確認）. 建築技術, 824, 152-155.

² 塩入徹. (2022). 天井被害の実情（ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術）. 建築技術, 869, 92-93.

³ 仁田佳宏, 石田正美, 尾内俊夫, 渡壁守正, 稲井慎介. (2015). Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船を用いた天井部の目視検査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005, 1277-1278.

⁴ 岩崎充実, 仁田佳宏, 渡壁守正, 稲井慎介, 西谷章. (2011). 天井部材についての構造ヘルスマニタリング. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 525-526.

⁵ 岩崎充実, 仁田佳宏, 渡壁守正, 稲井慎介, 西谷章. (2012). ロボットを用いた天井部材の目視検査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012, 1209-1210.

7.1.2. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の方法

7.1.2.節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の方法について説明する。

評価に求められる条件

本研究で行う評価では、従来行われている床や地面からの目視調査により、損傷が診断可能か否かを明示できることが求められる。

評価の方法

そこで、本研究で行う内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価は下記の 2 ステップとする。

- 1) 内外装壁の損傷の発生位置の分析を行う
- 2) 発生位置の分析に基づいて、損傷の診断の難易度の評価（診断性の評価と称す）を行う

なお、実際は床や地面と損傷との距離が、損傷の診断されやすさには大きく影響することが想定される。ただし、双眼鏡などを用いればこの点は解決する。そこで、本研究では、距離は考慮に入れず床や地面からの目視調査で確認しやすいかしくいかについて評価する。

7.2. 内外装壁の損傷の発生位置の分析

7.2.節では、内外装壁の損傷の発生位置を分析した結果について説明する。
これは内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の1ステップ目にあたる。

4つの実大実験で観察された、158の損傷のそれぞれについて、発生位置を分析した。ここでは分析の結果を示す。分析の過程は付録9にまとめて示す。

層間変位に対する損傷について（実験①と実験②）

LGS 間仕切り壁の損傷の分析

表 7-1 に実験①における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷を分析した結果を示す。

上張りボードの損傷やシーリング材の損傷などの仕上げ側の損傷と、下張りボードの損傷やランナーの損傷などの下地側の損傷があった。

表 7-1 実験①における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
シーリング材の切れ (表 5-1 中(1))	1/400	仕上げ側の損傷 (1/100rad までは除荷時に閉じていた)
ランナーの端部の変形 (表 5-1 中(2))	1/400	下地側の損傷
下張りボードのひび割れ (表 5-1 中(3))	1/400	下地側の損傷
上張りボードのひび割れ (表 5-1 中(4))	1/200	仕上げ側の損傷
スタッドの水平移動 (ランナーの傷) (表 5-1 中(5))	1/200	下地側の損傷
個々の上張りボードの面内方向の回転 (表 5-1 中(6))	1/100	仕上げ側の損傷
上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-1 中(7))	1/100	仕上げ側の損傷
ランナーの端部の変形 (表 5-1 中(8))	1/100	下地側の損傷
スペーサーの爪の外れ (表 5-1 中(9))	1/100	下地側の損傷
上張りボード間の隙間 (表 5-1 中(10))	1/75	仕上げ側の損傷
下張りボードのひび割れ (表 5-1 中(11))	1/75	下地側の損傷
スペーサーの爪の外れ (表 5-1 中(12))	1/75	下地側の損傷
上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-1 中(13))	1/50	仕上げ側の損傷
下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-1 中(14))	1/50	下地側の損傷
上張りボードの脱落 (表 5-1 中(15))	1/33	仕上げ側の損傷
下張りボードのひび割れ (表 5-1 中(16))	1/33	下地側の損傷

表 7-2 に実験①における直交壁（壁 B）の損傷を分析した結果を示す。

無開口の平坦な壁（壁 A）と同じく、仕上げ側の損傷と下地側の損傷があった。

表 7-2 実験①における直交壁（壁 B）の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
スタッドの変形 (表 5-2 中(17))	1/400	下地側の損傷
上張りボードの目地の開き (表 5-2 中(18))	1/200	仕上げ側の損傷

表 7-3 に実験①における開口部を有する壁（壁 C）の損傷を分析した結果を示す。
無開口の平坦な壁（壁 A）と同じく、仕上げ側の損傷と下地側の損傷があった。

表 7-3 実験①における開口部を有する壁（壁 C）の損傷の分析結果

損傷	発生(rad)	分析結果
上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ（表 5-3 中(19)）	1/400	仕上げ側の損傷
上張りボードの開口部の角部からのひび割れ（表 5-3 中(20)）	1/400	仕上げ側の損傷
下張りボードのひび割れ（表 5-3 中(21)）（表 5-3 中(22)）	1/100	下地側の損傷
ランナーの端部の変形（表 5-3 中(23)）	1/100	下地側の損傷
上張りボードの斜め方向のしわ（表 5-3 中(24)）	1/75	仕上げ側の損傷
下張りボードのひび割れ（表 5-3 中(25)）	1/75	下地側の損傷
下張りボードのビス穴の拡大（表 5-3 中(26)）	1/75	下地側の損傷
上張りボードの面外方向への傾斜/残留（表 5-3 中(27)）（表 5-3 中(30)）	1/50	仕上げ側の損傷
上張りボードの開口部の角部からのひび割れ（表 5-3 中(28)）	1/50	仕上げ側の損傷
下張りボードのひび割れ（表 5-3 中(29)）	1/50	下地側の損傷

表 7-4 に実験①における梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の損傷を分析した結果を示す。
無開口の平坦な壁（壁 A）と同じく、仕上げ側の損傷と下地側の損傷があった。

表 7-4 実験①における梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の損傷の分析結果

損傷	発生(rad)	分析結果
壁 E 周囲のシーリング材の切れ（表 5-4 中(31)）	1/400	仕上げ側の損傷（除荷時に閉じていた）
壁 D と壁 C との間の隙間（表 5-4 中(32)）	1/400	仕上げ側の損傷（1/75rad までは除荷時に閉じていた）
壁 D の下張りボードのひび割れ（表 5-4 中(33)）	1/400	下地側の損傷
壁 E と壁 D 及び壁 F との間の隙間/残留（表 5-4 中(34) (35)）（表 5-4 中(38) (39)）	1/100	仕上げ側の損傷（1/75rad までは除荷時に閉じていた）
壁 E のスタッドの水平移動（表 5-4 中(36)）	1/100	下地側の損傷
壁 E のランナーの端部の変形（表 5-4 中(37)）	1/100	下地側の損傷
壁 D の上部のランナーの開き（表 5-4 中(40)）	1/75	下地側の損傷
壁 D の下部のランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形（表 5-4 中(41)）	1/75	下地側の損傷
壁 E の下張りボードのビス穴の拡大（表 5-4 中(42)）	1/75	下地側の損傷
壁 D の上張りボードの折れ（表 5-4 中(43)）	1/50	仕上げ側の損傷
壁 D の下張りボードの破壊（表 5-4 中(44)）	1/50	下地側の損傷
壁 D と壁 C のスタッド同士を固定するビスの変形（表 5-4 中(45)）	1/50	下地側の損傷
先付金物と先行ピースを接合するピンのせん断破壊（表 5-4 中(46)）	1/33	下地側の損傷

ALC 外壁の損傷の分析

表 7-5 に実験②における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷を分析した結果を示す。

いずれも仕上げ側の損傷ではあるが、ALC パネルの底面という本来は他の ALC パネルや基礎部分といった他の部材に隠される位置の損傷であった。

表 7-5 実験②における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-5 中(1))	1/200	他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-5 中(2))	1/75	他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-5 中(3))	1/50	他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷

表 7-6 に、実験②における開口部を有する壁（壁 B）の損傷を分析した結果を示す。

無開口の平坦な壁（壁 A）と同じく他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷があった。このほかに、ALC パネルの表面の損傷の中でも試験体の仕上げ側に面した損傷や、シーリング材の損傷などの仕上げ側かつ他部材に隠されない位置の損傷があった。更に、ALC パネルの損傷の中でも試験体の内側に面し、本来は内装材などにより隠される損傷である下地側の損傷があった。

表 7-6 実験②における壁 B の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-6 中(4))	1/100	他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-6 中(5))	1/75	他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷
ALC パネルの角部のひび割れ (表 5-6 中(6))	1/50	下地側の損傷
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(7))	1/50	仕上げ側の損傷
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(8))	1/50	仕上げ側の損傷
ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-6 中(9))	1/50	他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(10))	1/50	下地側の損傷
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(11))	1/50	下地側の損傷
シーリング材の切れ (表 5-6 中(12))	1/33	仕上げ側の損傷 (除荷時には閉じていた)
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(13))	1/33	仕上げ側の損傷
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(14))	1/33	仕上げ側の損傷
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(15)(16))	1/33	仕上げ側の損傷
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(17))	1/33	仕上げ側の損傷
ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(18))	1/33	下地側の損傷
ALC パネルの角部のひび割れ (表 5-6 中(19))	1/33	下地側の損傷

ドアの損傷の分析

表 7-7 に実験②におけるドアの損傷を分析した結果を示す。

三方枠の損傷やシーリング材の損傷など仕上げ側の損傷と、開口補強鋼材の損傷やモルタルの損傷など本来は内装材などにより隠される下地側の損傷があった。なお、開閉機能の低下については7.3.節で論じる。

表 7-7 実験②におけるドアの損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
シーリング材の切れ (表 5-7 中(1))	1/200	仕上げ側の損傷
モルタルのひび割れ (表 5-7 中(2))	1/200	下地側の損傷
三方枠の破断 (表 5-7 中(3))	1/33	仕上げ側の損傷
開口補強鋼材の溶接の切れ (表 5-7 中(4))	1/33	下地側の損傷
開閉機能の低下	1/200	(7.3.節で説明する)

窓の損傷の分析

表 7-8 に実験②における窓の損傷を分析した結果を示す。

ガラスの損傷やシーリング材の損傷などの仕上げ側の損傷と、開口補強鋼材の損傷やモルタルの損傷など本来は内装材などにより隠される下地側の損傷があった。なお、開閉機能の低下については7.3.節で論じる。

表 7-8 実験②における窓の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
モルタルのひび割れ (表 5-8 中(1))	1/200	下地側の損傷
ガラスのひび割れ (表 5-8 中(2))	1/50	仕上げ側の損傷
開口補強鋼材の溶接の切れ (表 5-8 中(3))	1/50	下地側の損傷
シーリング材の切れ (表 5-8 中(4))	1/33	仕上げ側の損傷
ガラスのひび割れ (表 5-8 中(5))	1/33	仕上げ側の損傷
ガラスのシーリング材の切れ (表 5-8 中(6))	1/33	仕上げ側の損傷
サッシの変形 (表 5-8 中(7))	1/33	仕上げ側の損傷
開閉機能の低下	1/200	(7.3.節で説明する)

異種の構造部材の層間変位に対する損傷について（実験③）

LGS 間仕切り壁の損傷の分析

表 7-9 に実験③における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷を分析した結果を示す。

概ね実験①の LGS 間仕切り壁の損傷の分析結果と同じとなった。実験③だけに観察されたランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜けは下地側の損傷であった。

表 7-9 実験③における無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
角部のシーリング材の切れ (表 5-9 中(1))	1/1000	仕上げ側の損傷 (1/333rad までは除荷時に閉じていた)
上張りボードとスラブとの間の隙間 (表 5-9 中(2))	1/1000	仕上げ側の損傷 (1/67rad までは除荷時に閉じていた)
スタッドの水平移動 (表 5-9 中(3))	1/333	下地側の損傷
上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-9 中(4))	1/150	仕上げ側の損傷
上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-9 中(5))	1/150	仕上げ側の損傷
上張りボードのひび割れ (表 5-9 中(6))	1/100	仕上げ側の損傷
下張りボードの角部のひび割れ (表 5-9 中(7))	1/100	下地側の損傷
上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中(8))	1/67	仕上げ側の損傷
下張りボードのひび割れ (表 5-9 中(9))	1/67	下地側の損傷
下張りボードのしわ (表 5-9 中(10))	1/67	下地側の損傷
下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-9 中(11))	1/67	下地側の損傷
ランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け (表 5-9 中(12))	1/50	下地側の損傷
振れ止めの変形 (表 5-9 中(13))	1/50	下地側の損傷
下張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中(14))	1/40	下地側の損傷

壁 B (開口部を有する壁) の損傷の分析

表 7-10 に実験③における開口部を有する壁 (壁 B) の損傷を分析した結果を示す。

概ね実験①の LGS 間仕切り壁の損傷の分析結果と同じとなった。実験③の開口部を有する壁 (壁 B) だけに観察された上張りボードと三方枠との間の隙間などは仕上げ側の損傷であるが、除荷時にも残留した段階を発生した段階とみなす。

表 7-10 実験③における開口部を有する壁 (壁 B) の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-10 中(15))	1/1000	仕上げ側の損傷
上張りボードの開口部の角部でのひび割れ (表 5-10 中(16))	1/333	仕上げ側の損傷
シーリング材の切れ (表 5-10 中(17))	1/333	仕上げ側の損傷 (1/100rad までは除荷時に閉じていた)
スタッドの水平移動 (表 5-10 中(18))	1/333	下地側の損傷
上張りボードとスラブとの間の隙間 (表 5-10 中(19))	1/200	仕上げ側の損傷 (1/67rad までは除荷時に閉じていた)
上張りボードと三方枠との間の隙間 (表 5-10 中(20))	1/200	仕上げ側の損傷 (1/67rad までは除荷時に閉じていた)
下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(21))	1/150	下地側の損傷
上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-10 中(22))	1/100	仕上げ側の損傷
下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(23))	1/100	下地側の損傷
下張りボードのしわ (表 5-10 中(24))	1/100	下地側の損傷
下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(25))	1/50	下地側の損傷
上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け (表 5-10 中(26))	1/50	下地側の損傷
上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-10 中(27))	1/40	仕上げ側の損傷
振れ止めの変形 : (表 5-10 中(28))	1/40	仕上げ側の損傷

ドアの損傷の分析

表 7-11 に実験③におけるドアの損傷を分析した結果を示す。

概ね実験②のドアの損傷の分析結果と同じとなった。

表 7-11 実験③におけるドアの損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
三方枠の持ち上がり (表 5-11 中(1))	1/200	仕上げ側の損傷 (1/67rad までは除荷時に閉じていた)
三方枠の変形 (表 5-11 中(2))	1/100	仕上げ側の損傷
ヒンジの隙間 (表 5-11 中(3))	1/100	仕上げ側の損傷
開口補強鋼材の変形 (表 5-11 中(4))	1/67	下地側の損傷
開口補強鋼材と上部のランナーとを接合するビスのせん断破壊 (表 5-11 中(5))	1/50	下地側の損傷
三方枠の接合部の破断 (表 5-11 中(6))	1/40	仕上げ側の損傷
錠部分の変形 (表 5-11 中(7))	1/40	仕上げ側の損傷
開閉機能の低下	1/200	(7.3. 節で説明する)

層間変位と慣性力に対する損傷について（実験④）

表 7-12 に実験④における 3 階の窓の損傷を分析した結果を示す。

モルタルの損傷は本来内装材などにより隠される下地側の損傷である。一方で、枠の損傷やシーリング材の損傷、ガラスの損傷は室内および室外の両方から目視で確認できる仕上げ側の損傷である。

表 7-12 実験④における 3 階の窓の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
モルタルのひび割れ (表 5-12 中(1))	100%加振後	下地側の損傷 (160%加振後～)
モルタルのひび割れ (表 5-12 中(2))	150% (1 回目) 加振後	下地側の損傷
縦枠の角部の変形 (表 5-12 中(3))	150% (1 回目) 加振後	仕上げ側の損傷
押縁のずれ (表 5-12 中(4))	150% (1 回目) 加振後	仕上げ側の損傷
縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(5))	150% (1 回目) 加振後	仕上げ側の損傷
シーリング材の切れ (表 5-12 中(6))	150% (1 回目) 加振後	仕上げ側の損傷
ガラスのひび割れ (表 5-12 中(7))	160%加振後	仕上げ側の損傷
縦枠と上枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(8))	160%加振後	仕上げ側の損傷
シーリング材の切れ (表 5-12 中(9))	160%加振後	仕上げ側の損傷
ガラスのひび割れ (表 5-12 中(10))	160%加振後	仕上げ側の損傷
下枠の変形 (表 5-12 中(11))	160%加振後	仕上げ側の損傷
クレセント受けの脱落 (表 5-12 中(12))	160%加振後	仕上げ側の損傷
障子枠の変形 (表 5-12 中(13))	160%加振後	仕上げ側の損傷
縦枠の内部の変形 (表 5-12 中(14))	160%加振後	仕上げ側の損傷
縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(15))	160%加振後	仕上げ側の損傷

表 7-13 に実験④における 2 階の窓の損傷を分析した結果を示す。
3 階の窓と概ね同じ結果となった。

表 7-13 実験④における 2 階の窓の損傷の分析結果

損傷	発生 (rad)	分析結果
モルタルのひび割れ (表 5-13 中(16))	100%加振後	仕上げ側の損傷
縦枠の角部の変形 (表 5-12 中(3))	150% (1 回目) 加振後	仕上げ側の損傷
押縁のずれ (表 5-13 中(18))	150% (1 回目) 加振後	仕上げ側の損傷
縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(19))	150% (1 回目) 加振後	仕上げ側の損傷
シーリング材の切れ (表 5-13 中(20))	150% (1 回目) 加振後	仕上げ側の損傷
モルタルのひび割れ (表 5-13 中(21))	150% (1 回目) 加振後	下地側の損傷 (160%加振後～)
ガラスのひび割れ (表 5-13 中(22))	160%加振後	仕上げ側の損傷
縦枠と上枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(23))	160%加振後	仕上げ側の損傷
シーリング材の切れ (表 5-13 中(24))	160%加振後	仕上げ側の損傷
ガラスのひび割れ (表 5-13 中(25))	160%加振後	仕上げ側の損傷
下枠の変形 (表 5-13 中(26))	160%加振後	仕上げ側の損傷
クレセント受けの脱落 (表 5-13 中(27))	160%加振後	仕上げ側の損傷
縦枠の内部の変形 (表 5-13 中(28))	160%加振後	仕上げ側の損傷
縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(29))	160%加振後	仕上げ側の損傷

内外装壁の損傷の発生位置を分析した結果のまとめ

4 つの実大実験で観察された、158 の損傷のそれぞれについて、発生位置について分析した結果、損傷の発生位置として以下の 3 種類があった。

- ・ 仕上げ側
- ・ 仕上げ側だが他部材に隠される位置
- ・ 下地側

逆に、発生位置に着目すると、内外装壁の損傷は以下の 3 つのカテゴリーに分類できる。

- ・ 仕上げ側の損傷
- ・ 他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷
- ・ 下地側の損傷

7.3.節では、このカテゴリー分けを利用して内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価を行う。

7.3. 内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価

7.3.節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価をした結果について説明し、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明する。

7.3.1.節では、内外装壁の損傷の診断性を評価した結果について説明する。

7.3.2.節では、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明する。

7.3.1. 内外装壁の損傷の診断性の評価

7.3.1.節では、内外装壁の損傷の診断性を評価した結果について説明する。

これは内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の2ステップ目にあたる。

内外装壁の損傷の診断性の評価

7.2.節で示した、内外装壁の損傷の発生位置に着目した3つの損傷のカテゴリーごとに、該当する損傷の診断性の評価を行う。

仕上げ側の損傷

このカテゴリーに該当する損傷は、地面や室内から行われる目視調査で確認できる。

他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷

このカテゴリーに該当する損傷は、地面や室内から行われる目視調査では確認できず、部材の解体などや、センサなどを用いた特殊な作業が必要となる。

下地側の損傷

このカテゴリーに該当する損傷は、地面や室内から行われる目視調査では確認できず、部材の解体などや、センサなどを用いた特殊な作業が必要となる。

また、6.3.節では評価の対象としなかった開閉機能の低下は、目視では診断できないが、床からの目視調査を行う際に確認できる。そのため、ここでは目視調査で容易に確認できる範囲の損傷とみなす。

内外装壁の損傷の診断性の評価結果

表 7-14 に、内外装壁の損傷の診断性の評価結果を示す。損傷の診断性は、計 2 段階に分類された。

表 7-14 診断性の観点から見る損傷の診断性の評価結果

損傷のカテゴリー	損傷の診断性の評価結果
仕上げ側の損傷	目視調査で容易に確認できる（地面や室内からの目視調査で確認できる）範囲の損傷
開閉機能の低下	
下地側の損傷	目視調査で容易に確認できない（解体などの作業をもつての未確認できる）範囲の損傷
他部材に隠される位置の仕上げ側の損傷	

この評価結果を踏まえると、内外装壁の損傷の発生状況を診断の観点から考えると、次の 4 つのカテゴリーが考えられる。

- ・ 損傷が発生していない
- ・ 目視調査で容易に確認できる範囲にのみ損傷が発生している
- ・ 目視調査で容易に確認できる範囲と、容易に確認できない範囲の両方に損傷が発生している
- ・ 目視調査で容易に確認できない範囲にのみ損傷が発生している

表 7-15 に、診断性の観点から考える内外装壁の損傷の発生状況のカテゴリーをまとめたものを示す。便宜上、各カテゴリーにレベル A からレベル C と名称を付ける。

表 7-15 診断性の観点から考える損傷の発生状況のカテゴリー

診断の観点を含む内外装壁の損傷の発生状況	カテゴリー名
目視調査で容易に確認できない範囲にのみ損傷が発生している	【C】
目視調査で容易に確認できる範囲と容易に確認できない範囲に損傷が発生している	【B】
目視調査で容易に確認できる範囲にのみ損傷が発生している	【A】
損傷が発生していない	-

7.3.2. 内外装壁の損傷と建物の応答との診断の観点を含む対応関係

7.3.2.節では、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明する。

7.3.1.節では、4つの実大実験で観察された158の損傷について、診断性の評価を行った。そして、評価結果を踏まえ、内外装壁の損傷の発生状況を診断の観点から考えると、次の4つのカテゴリーが考えられることを示した。そこで、この4つのカテゴリーを用いて、内外装壁の損傷と建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした。

表 7-16 に、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を整理した結果を示す。なお、整理した過程の詳細は付録 10 にまとめた。

損傷の診断の観点から見たカテゴリー

損傷の診断の観点から見たカテゴリー	目視調査で容易に確認できる範囲の損傷	目視調査で容易に確認できない範囲の損傷	表 7-16 での表現方法
C	無	有	
B	有	有	
A	有	無	
-	無	無	

表 7-16 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の損傷と
壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係

建物の応答の種類	内外装壁の種類			壁の面内方向の層間変位																				
				1/1000	1/400	1/330	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33										
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁 A)	シーリング材																					
			上張りボード		-																			
			下張りボード																					
			下地		-																			
		直交壁 (壁 B)	シーリング材		-																			
			上張りボード		-																			
			下張りボード		-																			
			下地																					
		開口部を有する壁 (壁 C)	シーリング材		-																			
			上張りボード																					
			下張りボード		-																			
			下地		-																			
	梁から持ち出した壁 (壁 D,E,F)	シーリング材																						
		上張りボード		-																				
		下張りボード																						
		下地		-																				
	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁 A)	シーリング材																					
			パネル仕上げ側																					
			パネル底面																					
			パネル下地側																					
開口部を有する壁 (壁 B)		シーリング材																						
		パネル仕上げ側																						
		パネル底面																						
		パネル下地側																						
ドア (実験②)		開閉機能																						
		シーリング材																						
		枠/扉																						
窓 (実験②)		開口補強鋼材/モルタル																						
	開閉機能																							
	シーリング材																							
	ガラス																							
	開口補強鋼材/モルタル																							
異種の構造部材の層間変位 (RC 骨組 + RC 壁)	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁 A)	シーリング材	-																				
			上張りボード	-																				
			下張りボード	-																				
			下地	-																				
	開口部を有する壁 (壁 B)	シーリング材	-																					
		上張りボード																						
		下張りボード	-																					
		下地	-																					
	ドア (実験③)	開閉機能	-																					
		シーリング材	-																					
		枠/扉	-																					
		開口補強鋼材	-																					
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	3階の窓 (慣性力大)	開閉機能	-																				
			ガラス	-																				
			シーリング材 (ガラス)	-																				
		サッシ	-																					
		モルタル仕上げ側	-																					
		モルタル下地側	-																					
	2階の窓 (層間変位大)	開閉機能	-																					
		ガラス	-																					
		シーリング材 (ガラス)	-																					
		サッシ	-																					
モルタル仕上げ側																								
モルタル下地側	-																							

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

更に、表 7-17 に、各壁や開口部を一体と見なして内外装壁の被害と建物の応答との診断の観点を含む対応関係をまとめたものを示す。

損傷の診断の観点から見たカテゴリー

損傷の診断の観点から見たカテゴリー	目視調査で容易に確認できる範囲の損傷	目視調査で容易に確認できない範囲の損傷	表 7-17 での表現方法
C	無	有	
B	有	有	
A	有	無	
-	無	無	

表 7-17 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の損傷と

壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係のまとめ

建物の応答の種類	内外装壁の種類		壁の面内方向の層間変位												
			1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33		
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁 A)													
		直交壁 (壁 B)													
		開口部を有する壁 (壁 C)													
		梁から持ち出した壁 (壁 D,E,F)													
	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁 A)													
		開口部を有する壁 (壁 B)				-									
		ドア (実験②)													
	窓 (実験②)														
異種の構造部材の層間変位 (RC 骨組 + RC 壁)	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁 A)	-												
		開口部を有する壁 (壁 B)													
		ドア (実験③)	-		-										
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	3階の窓 (慣性力大)	-												
		2階の窓 (層間変位大)													

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

C と表記された部分に関する考察

C と表記された部分⁶は、床や地面から目視した範囲では無傷に見えるため、地震後に内外装壁の損傷が見過ごされる可能性が非常に高い状態を指す。すなわち、中地震に対して、層間変形角 $1/200\text{rad}$ から $1/120\text{rad}$ に達する建物においては、床や地面から目視した範囲で内外装壁が無傷に見えても、実際は損傷が発生している可能性があることが示唆される。

この損傷が、内外装壁の性能を低下させるものであった場合問題となる。なお、実験①では開口部を有する壁（壁 C）のみ該当する部分が無かった。これは開口部を有する壁（壁 C）では、早々に上張りボードのひび割れという容易に確認できる損傷が発生したためである。

B と表記された部分に関する考察

B と表記された部分⁷は、床や地面から目視できない範囲にも損傷が発生しているため、地震後に内外装壁の損傷が見過ごされる可能性がある。特に、床や地面から目視できる範囲の損傷が軽微である場合、解体を伴わない修復が施されることが考えられ、下地側などの損傷が見過ごされ放置されることになる。更に、床や地面から目視できる範囲の被害の程度が、目視できない範囲の程度より小さい場合、目視調査の結果が危険側に誤ったものになりうる。

⁶ LGS 間仕切り壁（実験①の無開口な平坦な壁、直交壁、梁から持ち出した壁）の層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時や、ALC 外壁（無開口の平坦な壁、開口部を有する壁）、窓（実験②）の層間変形角 $1/75\text{rad}$ 以下の時が該当する。LGS 間仕切り壁に関しては、スタッドの水平移動に伴う損傷や、下張りボードのひび割れのためこの結果となった。ALC 外壁に関しては、ALC パネルの角部のひび割れのためこの結果となった。窓に関しては、モルタルのひび割れのためこの結果となった。

⁷ 損傷の数が極端に少なかった ALC 外壁（無開口の平坦な壁）を除き、層間変形角 $1/67\text{rad}$ 以上の時に全ての試験体が該当した。

そして、表 7-18 に、表 7-17 の行を、診断の観点から見たカテゴリーの順に上から並び替えたものを示す。全ての実験で同じ層間変形角に対して観察を行えているわけではないため、単純に比較することはできないが、ALC 外壁の損傷が比較的診断が困難であることが読み取れる。また、梁から持ち出した壁を筆頭に、LGS 間仕切り壁の損傷も比較的診断が困難であることが読み取れる

損傷の診断の観点から見たカテゴリー

損傷の診断の観点から見たカテゴリー	目視調査で容易に確認できる範囲の損傷	目視調査で容易に確認できない範囲の損傷	表 7-18 での表現方法
C	無	有	
B	有	有	
A	有	無	
-	無	無	

表 7-18 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係のまとめ
(診断の観点から見たカテゴリー順)

建物の応答の種類	内外装壁の種類		壁の面内方向の層間変位										
			1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
層間変位	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁 A)											
層間変位	ALC 外壁 (実験②)	開口部を有する壁 (壁 B)				-							
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	梁から持ち出した壁 (壁 D,E,F)											
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁 A)											
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	直交壁 (壁 B)											
層間変位	ドア (実験②)												
層間変位	窓 (実験②)												
異種の構造部材の層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁 A)	-										
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	3階の窓 (慣性力大)	-										
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	2階の窓 (層間変位大)											
異種の構造部材の層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験③)	開口部を有する壁 (壁 B)											
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	開口部を有する壁 (壁 C)											
異種の構造部材の層間変位	ドア (実験③)		-		-								

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

7.4. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の概要

7.4.節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の目的と方法について説明する。

7.4.1.節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の目的について説明する。

7.4.2.節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の方法について説明する。

7.4.1. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の目的

7.4.1.節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の目的について説明する。

7.3.節で行った、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価の結果、床や地面からの目視調査では容易に確認できない範囲にも内外装壁の損傷が発生することが分かった。すなわち、地震後に見過ごされる可能性がある損傷が存在することが分かった。更に、容易に確認できない範囲にのみ損傷が発生する可能性があることも分かった。

容易に確認できない範囲に発生した損傷が地震後に見過ごされ、その損傷が内外装壁の性能を低下させる損傷であった場合、修復されることなく内外装壁の性能は低下したまま放置されることになる。特に、耐震性を低下させる損傷であった場合、次の地震などの際に想定外の損傷並びに被害が発生する可能性が考えられる。また、密閉性を低下させる損傷であった場合、雨などの際に内外装壁内部への水の侵入が発生しやすくなり、劣化のペースが早くなる可能性が考えられる。

更に、容易に確認できない範囲に発生した損傷がもたらす被害の方が、容易に確認できる範囲に発生した損傷がもたらす被害より深刻であった場合（つまり、見た目より実際の方が深刻であった場合）、本来必要な応急的な対応や修復が施されない可能性が考えられる。

その一方で、容易に確認できない範囲に発生した損傷が地震後に見過ごされたとしても、その損傷が内外装壁の性能に影響を与えないものであった場合、問題はないことになる。つまり、診断に関する課題を検討する上では、内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係の診断の観点を含む対応関係を明らかにするだけ不十分であり、内外装壁の被害と建物の応答の診断の観点を含む対応関係を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、実施した4つの実大実験で観察された158の損傷に対して、床や地面からの目視調査で容易に確認できない範囲に発生する損傷がもたらす被害について検討することを目的とした評価を行う。

7.4.2. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の方法

7.4.2.節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の方法について説明する。

評価に求められる条件

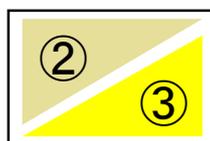
この評価には、床や地面からの目視調査で容易に確認できる範囲の被害と、できない範囲の被害を明らかにできることが求められる。

評価の方法

そこで、4つの実大実験で観察された損傷を、7.3.節で行った損傷の診断性の評価の結果を踏まえて、容易に確認できる範囲の損傷と、容易に確認できない範囲の損傷に分ける。

次に、それぞれの範囲ごとに、6章で行った内外装壁の損傷の被害度の評価の方法を用いて、損傷の被害度の評価を実施する。すなわち、それぞれの範囲の損傷の被害度を、表 6-14 で示したレベル①からレベル⑤の指標で表す。

そして、それぞれの範囲の損傷の被害度のレベルの最大値をハイフンで繋げたものを、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の結果として表す。図 7-1 に例を示す。



目視調査で容易に確認できる範囲の損傷の被害度のレベルの最大値が②であるということ

目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の被害度のレベルの最大値が③であるということ

図 7-1 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の結果の例

すなわち、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価の結果としては、全 36 パターンが考えられる。図 7-1 の例のように、目視調査で容易に確認できない範囲に発生した損傷がもたらす被害の方が、容易に確認できる範囲に発生した損傷がもたらす被害より深刻であった場合（つまり、見た目より実際の方が深刻であった場合）、本来必要な応急的な対応や修復が施されない可能性が特に考えられる。

7.5. 内外装壁の被害の診断の観点を含む評価

7.5節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価を行い、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明する。

表 7-19 に内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を整理した結果を示す。整理した過程の詳細は付録 11 にまとめた。

損傷の被害度のレベル

⑤	地震時に人的被害が発生しうる／経済的被害が発生している
④	地震後に人的被害が発生する可能性が高い／経済的被害が発生している
③	地震後に人的被害が発生する可能性がある／経済的被害が発生している
②	地震後に心理的な人的被害が発生する可能性がある／経済的被害が発生している
①	経済的被害が発生している
①	被害が発生していない
-	損傷が発生していない

表 7-19 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係

建物の応答の種類	内外装壁の種類		壁の面内方向の層間変位											
			1/1000	1/400	1/330	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33	
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁A)	シーリング材	0		0		2	2		2		2	
			上張りボード	-		2		3	3		4		5	
			下張りボード	1		1		1	1		3		3	
			下地	-		0		0	3		3		3	
		直交壁 (壁B)	シーリング材	-		-		-	-		-		-	
			上張りボード	-		2		2	2		2		2	
			下張りボード	-		-		-	-		-		-	
			下地	0		0		0	0		0		0	
		開口部を有する壁 (壁C)	シーリング材	-		-		-	-		-		-	
			上張りボード	3		3		3	3		3		4	
			下張りボード	-		-		1	3		3		3	
			下地	-		-		0	0		0		0	
		梁から持ち出した壁 (壁D,E,F)	シーリング材	0		0		0	0		0		0	
			上張りボード	0		0		0	2		2		2	
			下張りボード	1		1		1	3		3		3	
			下地	-		-		0	3		3		3	
	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁A)	シーリング材					-						
			パネル仕上げ側					-						
			パネル底面			0		0	0		0		0	
			パネル下地側					-			-		-	
		開口部を有する壁 (壁B)	シーリング材										0	
			パネル仕上げ側								3		4	
			パネル底面					0	0		0		0	
			パネル下地側								3		3	
		ドア (実験②)	開閉機能			0		0	0		0		5	
			シーリング材			0		0	0		0		0	
			枠/扉										2	
		窓 (実験②)	開口補強鋼材/モルタル			0		0	0		0		3	
開閉機能				0		0	0		5		5			
シーリング材											0			
ガラス									3		3			
サッシ											2			
異種の構造部材の層間変位 (RC骨組+RC壁)	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁A)	シーリング材	-		2	2	2	2		2	2	2	
			上張りボード	-		-	3	3		3	4	4	4	
			下張りボード	-		-	-	1		3	3	3	3	
			下地	-		0	0	0	0		0	3	3	
		開口部を有する壁 (壁B)	シーリング材					2			2	2	2	
			上張りボード	3		3	3	3		3	3	4	4	
			下張りボード	-		-	1	1		1	1	1	1	
			下地	-		-	-	-		-	3	3	3	
		ドア (実験③)	開閉機能	-		-	0	0			5	5	5	
			シーリング材	-		-	-	-		2	2	2	2	
			枠/扉	-		-	0	2		2	2	2	2	
			開口補強鋼材	-		-	-	-		3	3	3	3	
	層間変位と慣性力	3階の窓 (慣性力大)	開閉機能	-							3			
			ガラス	-							4			
			シーリング材 (ガラス)	-				2			2			
			サッシ	-				2			2			
			モルタル仕上げ側	-				2			2			
			モルタル下地側	0				0			1			
		2階の窓 (層間変位大)	開閉機能	-									3	
			ガラス	-									3	
			シーリング材 (ガラス)	-					2				2	
			サッシ	-					2				2	
			モルタル仕上げ側	2					2				2	
			モルタル下地側	-									1	

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

※左上と右下の数値はそれぞれ目視調査で容易に確認できる範囲とできない範囲の被害度を示す

更に、表 7-20 に、各壁や開口部を一体と見なして内外装壁の被害と建物の応答との対応関係をまとめたものを示す。整理の方法としては、層間変位の程度に対して、最も被害度が高い損傷のレベルを表の数値として表した。例えば、被害度がレベル④の損傷とレベル②の損傷が発生している場合、表では「④」表した。

損傷の被害度のレベル

⑤	地震時に人的被害が発生しうる／経済的被害が発生している
④	地震後に人的被害を発生する可能性が高い／経済的被害が発生している
③	地震後に人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
②	地震後に心理的な人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
①	経済的被害が発生している
④	被害が発生していない
-	損傷が発生していない

表 7-20 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の被害と

壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係のまとめ

建物の応答の種類	内外装壁の種類		壁の面内方向の層間変位										
			1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①)	無開口の平坦な壁 (壁 A)		④ ①		② ①		③ ①	③ ③		④ ③		⑤ ③
		直交壁 (壁 B)		- ④		② ④		② ④	② ④		② ④		② ④
		開口部を有する壁 (壁 C)		③ -		③ -		③ ①	③ ③		③ ③		④ ③
		梁から持ち出した壁 (壁 D,E,F)		④ ①		④ ①		④ ①	② ③		② ③		② ③
	ALC 外壁 (実験②)	無開口の平坦な壁 (壁 A)				- ④		- ④	- ④		- ④		- ④
		開口部を有する壁 (壁 B)				-		- ④	- ④		③ ③		④ ③
		ドア (実験②)					④ ④		④ ④	④ ④		④ ④	
	窓 (実験②)					④ ④		④ ④	④ ④		⑤ ③		⑤ ③
異種の構造部材の層間変位 (RC 骨組 + RC 壁)	LGS 間仕切り壁 (実験③)	無開口の平坦な壁 (壁 A)	④ ④		② ④	② ④	③ ④	③ ①		③ ③	④ ③	④ ③	④ ③
		開口部を有する壁 (壁 B)	③ -		③ ④	③ ④	③ ①	③ ①		③ ①	③ ③	④ ③	④ ③
	ドア (実験③)		-		-	④ ④	④ ④	② ④		⑤ ③	⑤ ③	⑤ ③	⑤ ③
層間変位と慣性力	窓 (実験④)	3階の窓 (慣性力大)	- ④					② ④			④ ①		
		2階の窓 (層間変位大)	② ④						② ④				③ ①

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

※左上と右下の数値はそれぞれ目視調査で容易に確認できる範囲とできない範囲の被害度を示す

以下では、評価と整理の結果に基づき、目視調査で容易に確認できない範囲の被害に関する説明と、目視調査で容易に確認できる範囲とできない範囲の被害を比較した結果についての説明をする。

目視調査で容易に確認できない範囲の被害の説明

本研究で実施した実験においては、LGS 間仕切り壁では、最大層間変形角が $1/200\text{rad}$ 以下の比較的建物の応答に対しても目視調査で容易に確認できない範囲にも、比較的軽微ではあるが被害をもたらす損傷が発生していた。その後、最大層間変形角が $1/100\text{rad}$ を超えると、目視調査で容易に確認できない範囲において、人的被害をも発生させる損傷が発生していた。更に最大層間変形角が $1/50\text{rad}$ に達すると、ALC 外壁においても、目視調査で容易に確認できない範囲において、人的被害をも発生させる損傷が発生していた。

以上より、実際の建物においても床や地面からの目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が、中地震（最大層間変形角 $1/200\text{rad}$ 想定）では経済的被害のみもたらし、大地震（最大層間変形角 $1/50\text{rad}$ 想定）では人的被害をももたらす可能性があることが示唆される。

目視調査で容易に確認できる範囲の被害とできない範囲の被害の比較

本研究で実施した実験においては、多くの場合で、床や地面からの目視調査で容易に確認できる範囲の損傷がもたらす被害の方が、容易に確認できない範囲の損傷によりもたらされる被害より深刻であると評価された。特に ALC 外壁、ドア、窓は、全ての場合でこの評価に該当した。

つまり、ALC 外壁、ドア、窓については、損傷がもたらす被害の程度を把握する上では、床や地面からの目視調査のみで十分ということになる（ただし、具体的な損傷まで把握するためには不十分である）。

この傾向が見られた要因として、容易に確認できる範囲の損傷の方が人的被害につながりやすいことが考えられる。例えば、部材の脱落が問題になりうるのは仕上げ側に発生した場合のみである。また、部材の脱落の寸前であるにも関わらず、それが仕上げ側の見た目に見えないことは考えにくい。そのため、容易に確認できない範囲の損傷の被害度が、本研究で設定したレベル④やレベル⑤と評価されることは無い。

ドアや窓に関しては、目視調査で容易に確認できる範囲の面積の方が広いことも関係していると考えられる。LGS 間仕切り壁や ALC 外壁は、片面が他の部材に覆われてしまうのに対して、ドアや窓は、開口補強鋼材と接合部をカバーするモルタルの部分のみが覆われる。

その一方で、LGS 間仕切り壁の梁から持ち出した壁（実験①の壁 D、E、F）のみ逆の傾向が見られ、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷がもたらす被害の方が深刻であると評価された。つまり、見た目の方より実際の方が深刻であるということである。

特に、最大層間変形角が $1/75\text{rad}$ 以上では、目視調査で容易に確認できない範囲でのみ、人的被害につながる損傷（耐震性を低下させる接合部の損傷）が発生していると評価された。

この傾向が見られた要因として、実験での載荷時（地震における揺れている最中）には、部材が変位し損傷が発生するが、除荷後（地震後）には、部材の変位が元に戻ることが考えられる。具体的には、梁から持ち出した壁の壁 D は、5.1節の図 5-2 で示したように、載荷時に鉛直軸回りに回転し、下張りボードのひび割れやランナーの開き、隣の壁との接合部の破壊といった損傷を発生させるが、除荷時には元に戻る。そのため、下地側の接合部の破壊やランナーの開きが残留している一方で、上張りボード側から見た見た目は損傷が発生していないように見えることになる。

最後に、表 7-21 に、表 7-20 の行を、被害度の順に上から並び替えたものを示す。

損傷の被害度のレベル

⑤	地震時に人的被害が発生しうる／経済的被害が発生している
④	地震後に人的被害を発生する可能性が高い／経済的被害が発生している
③	地震後に人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
②	地震後に心理的な人的被害を発生する可能性がある／経済的被害が発生している
①	経済的被害が発生している
①	被害が発生していない
-	損傷が発生していない

表 7-21 実施した実大実験に基づく地震による内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係のまとめ
(被害度順)

建物の応答の種類	内外装壁の種類	壁の面内方向の層間変位										
		1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
異種の構造部材の層間変位	ドア (実験③)	-		-	①①	①①	②①		⑤③	⑤③	⑤③	⑤③
層間変位	窓 (実験②)				①①		①①			⑤③		⑤③
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①) 無開口の平坦な壁 (壁 A)		①①		②①		③①	③③		④③		⑤③
層間変位	ドア (実験②)				①①		①①			①①		⑤③
異種の構造部材の層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験③) 無開口の平坦な壁 (壁 A)	①①		②①	②①	③①	③①		③③	④③	④③	④③
層間変位と慣性力	窓 (実験④) 3階の窓 (慣性力大)	-	①				②①			④①		
異種の構造部材の層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験③) 開口部を有する壁 (壁 B)	③-		③①	③①	③①	③①		③①	③③	④③	④③
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①) 開口部を有する壁 (壁 C)		③-		③-		③①	③③		③③		④③
層間変位	ALC 外壁 (実験②) 開口部を有する壁 (壁 B)				-		-①	-①		③③		④③
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①) 梁から持ち出した壁 (壁 D,E,F)		①①		①①		①①	②③		②③		②③
層間変位と慣性力	窓 (実験④) 2階の窓 (層間変位大)	②①					②①					③①
層間変位	LGS 間仕切り壁 (実験①) 直交壁 (壁 B)		-①		②①		②①	②①		②①		②①
層間変位	ALC 外壁 (実験②) 無開口の平坦な壁 (壁 A)				-①		①	-①		-①		-①

※グレーの部分は観察を行っていない範囲

※左上と右下の数値はそれぞれ目視調査で容易に確認できる範囲とできない範囲の被害度を示す

7.6. 内外装壁の耐震性の向上に向けた課題

7.6.節では、評価結果を踏まえ、内外装壁の耐震性の向上に向けた課題を示す。

前提の整理

内外装壁の耐震性の向上に向けた課題を示すにあたり、前提となる条件を整理する。

内外装壁の一般化

まず、本研究で行った実験の成果を一般化させることについて説明する。

本研究では、間仕切り壁の代表としてLGS間仕切り壁を取り上げ、外壁の代表としてALC外壁を取り上げた。

間仕切り壁は一般的に下地材とボード材で構成される。そして、耐震性に配慮した仕様も開発されているが、一般的には普及していない。この点において、LGS間仕切り壁に関する本研究を通じて見られた傾向（地震による損傷、損傷がもたらす被害、損傷と被害の診断の難易度）は、間仕切り壁全般にも該当すると考察される。

外壁は一般的にパネル材で構成される。そして、追従性を高めることなどで耐震性に配慮した仕様が一般的に普及している。この点において、ALC外壁に関する本研究を通じて見られた傾向（地震による損傷、損傷がもたらす被害、損傷と被害の診断の難易度）は、外壁全般にも該当すると考察される。

そこで、7.6.節では、間仕切り壁、外壁、ドア、窓という用語を用いて、内外装壁の耐震性の向上に向けた課題について論じる。

地震時の時系列に沿った内外装壁に求められる耐震性

次に、地震時の時系列に沿って、内外装壁に求められる耐震性について論じる。

まず、地震発生から避難行動において内外装壁は、人的被害を発生させない状態にあるべきである。具体的には、部材の脱落が発生していない状態かつ避難経路を妨げない状態にあるべきである。これは、2.2.1.節でも説明したように、建築基準法や指針でも最低限のラインとして示されていることである。

次に、建物の応急的な利用時⁸において内外装壁は、余震などに対しても人的被害を発生させない状態にあるべきである。具体的には、脱落寸前の破片などが発生していない状態にあるべきである。言い換えると、脱落寸前の破片などが発生している場合は建物の応急的な利用を始める前に、周囲を立ち入り禁止にするか、破片を撤去するなどの対応が必要である。

最後に、建物の通常の利用時⁹において内外装壁は、地震前の状態に戻っているべきである。言い換えると、内外装壁の性能を低下させる損傷がすべて修復されているべきである。

実験の成果に基づく地震時の内外装壁の状態の考察

次に、本研究で実施した実験の成果に基づき、地震時の内外装壁が取りうる状態について考察した結果を示す。

図 7-2 と図 7-3 に、中地震と大地震に分けて、地震時の内外装壁の損傷の状態を考察した結果のイメージを示す。なお、中地震については、実験における最大層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時の損傷とその評価結果に基づき考察した。大地震については、最大層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時の損傷とその評価結果に基づき考察した。

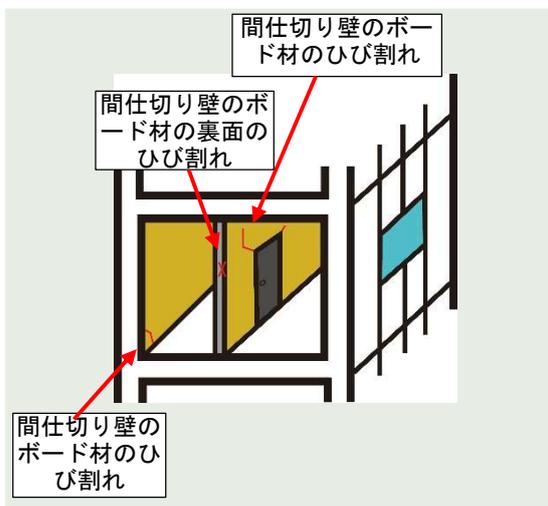


図 7-2 実施した実大実験に基づく
中地震（最大層間変形角 $1/200\text{rad}$ 想定）
に対する内外装壁の状態のイメージ

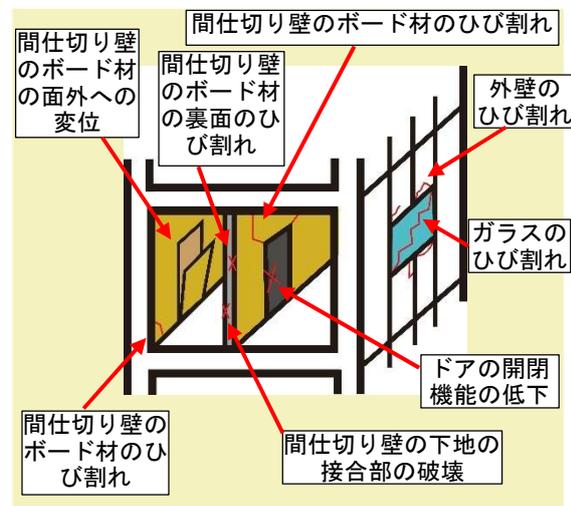


図 7-3 実施した実大実験に基づく
大地震（最大層間変形角 $1/50\text{rad}$ 想定）に
対する内外装壁の状態のイメージ

⁸ 応急的な利用とは、修復などの対応がなされていない損傷が存在する状態で建物を利用することである。学校の体育館が避難所として利用されるなど、本来の用途とは異なる場合が多々ある。

⁹ 地震前の状況に戻ること。

内外装壁の耐震性の到達度

内外装壁の耐震性の向上に向けた課題について示すにあたり、前提として前項で整理した、地震時の時系列に沿った内外装壁に求められる耐震性と、実験の成果に基づく地震時の内外装壁の状態の考察の比較を通じて、内外装壁の耐震性の到達度について論じる。

まず、実施した実大実験に基づく壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答に対する内外装壁の状態のイメージを整理した。整理した結果を図 7-4 に示す。なお、整理の上では、表 7-22 に示す記号を用いて内外装壁のイメージを表した。

図 7-4 に示すように、本研究では、壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答に対する、地震による内外装壁の損傷、損傷がもたらす被害、地震後の診断における課題について明らかにし、整理できた。以降は、3.1.2.節で説明したように、建物の応答の中でも、中地震動に対する建物の最大層間変形角として想定する $1/200\text{rad}$ と、大地震動に対する建物の最大層間変形角として想定する $1/50\text{rad}$ の時の内外装壁の状態に着目し、内外装壁の耐震性についての議論を進める。

表 7-22 内外装壁のイメージの表記方法

分類	表記	内外装壁の状態
損傷の有無	✓	損傷有り
	-	損傷無し
損傷がもたらす被害の程度	■	人的被害をもたらす可能性有り (NG)
	⊠	余震時などに人的被害をもたらす可能性大 (迅速な対応が必要)
	◻	余震時などに人的被害をもたらす可能性有り (迅速な対応が推奨)
	□	経済的被害をもたらす
	-	被害無し
目視調査による診断の妥当性	✕	見かけより実態の被害度の方が深刻 (耐震性に関わる損傷有り)
	×	見かけより実態の被害度の方が深刻 (耐震性に関わる損傷無し)
	△	目視で容易に確認できない範囲に損傷有り
	-	目視で容易に確認できる範囲にのみ損傷有り

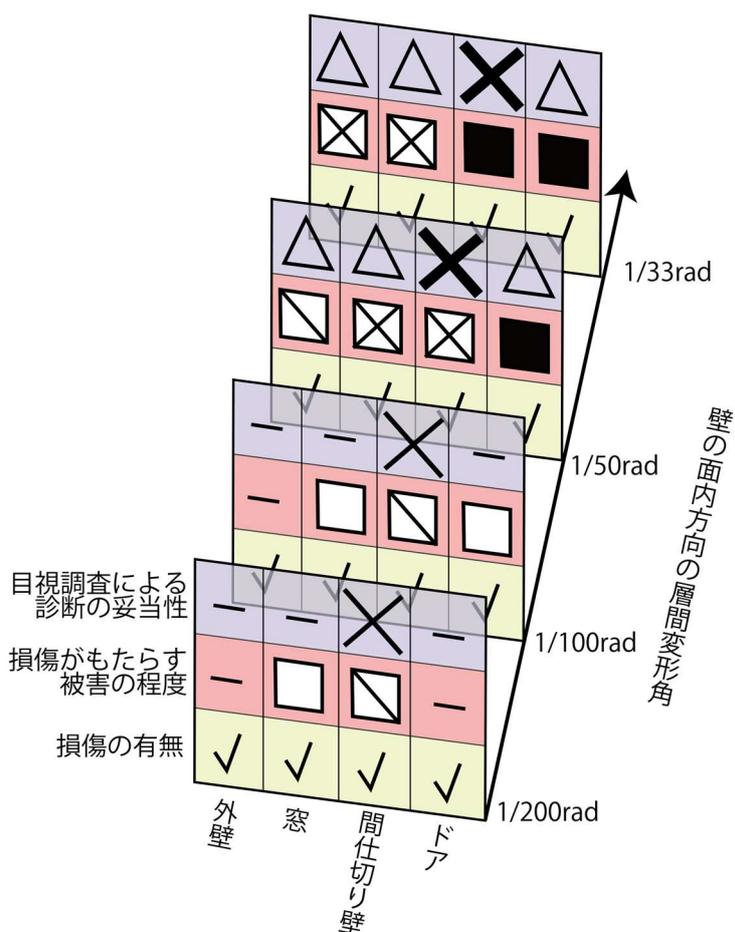


図 7-4 実施した実大実験に基づく壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答に対する内外装壁の状態のイメージ

中地震（最大層間変形角 1/200rad 想定）に対する内外装壁の耐震性の到達度

中地震（最大層間変形角 1/200rad 想定）に対しては、ドア、窓、外壁には、性能を低下させる損傷が発生しないと想定される。そのため、避難行動、建物の応急的な利用、建物の通常の利用を問題なく行える。

間仕切り壁には、ひび割れなどの損傷が発生するが、部材の脱落など人的被害につながる損傷は発生しないと想定される。そのため、避難行動は問題なく行える。また、損傷に対して周囲を立ち入り禁止にするなどの対応が推奨されるが、建物応急的な利用に関しては絶対ではない。更に、通常の見視調査¹⁰では確認できない下地側にも損傷が発生するが、人的被害に関わる損傷ではないことが想定される。そのため、建物の応急的な利用を再開するにあたっては、見視調査で十分である。ただし、建物の通常の利用を再開するにあたっては、損傷を修復する必要があるため、見視調査だけでは不十分である。

大地震（最大層間変形角 1/50rad 想定）に対する内外装壁の耐震性の到達度

大地震（最大層間変形角 1/50rad 想定）に対しては、外壁には、ひび割れなどの損傷が下地側含め発生するが、部材の脱落など人的被害につながる損傷は発生しないと想定される。そのため、避難行動は問題なく行え、建物の応急的な利用に関しても見視調査で十分であり、周囲を立ち入り禁止にするなどの対応も推奨される程度にとどまることが想定される¹¹。

一方で、窓には、ガラスのひび割れという、人的被害に直結はしないものの、人的被害のリスクを高める損傷の発生が想定される。そのため、避難行動までは問題なく行えるが、建物の応急的な利用時には、損傷の周囲を立ち入り禁止にするなどの対応が必要になる。なお、この損傷の診断は見視調査で十分である。

そして、間仕切り壁に関しても、上張りボードが面外方向に変位し、人的被害には直結しないものの、部材の脱落寸前の状態になることが想定される。そのため、避難行動までは問題なく行えるが、建物の応急的な利用時には、損傷の周囲を立ち入り禁止にするなどの対応が必要になる。なお、この損傷の診断は見視調査で十分である。ただし、見視調査の範囲ではひび割れといった密閉性や意匠性を低下させる損傷だけ発生しているように見えるが、実際は下地側で接合部の破壊といった耐震性を低下させる損傷も発生している可能性が想定される。そのため、見視調査だけでは危険側に誤った診断になる可能性がある。

最後に、ドアには、開閉機能の低下という避難行動に危険を及ぼす損傷の発生が想定される。そのため、無事に避難できたとしても建物の応急的な利用時にはドアを無理にでも開け、開け放しにしておくなどの対応が必要である。この損傷の診断は見視調査で十分である。

図 7-5 と図 7-6 に、以上の議論を整理したものを示す。

¹⁰ 床や地面から行う見視調査のこと。以降は、単に見視調査と称す。

¹¹ ただし、耐震性に配慮した仕様が採用されていない ALC 外壁の場合はこの限りでない。

中地震（層間変形角 1/200rad 想定）に対して

	外壁	窓	間仕切り壁	ドア
避難行動時	無被害	無被害	問題ない	無被害
↓				
建物の応急的な利用時	無被害	無被害	損傷の対応推奨 目視調査で十分	無被害
↓				
建物の通常の利用時	無被害	無被害	損傷の修復必要 目視調査だけでは不十分	無被害

図 7-5 実施した実大実験に基づく中地震（最大層間変形角 1/200rad 想定）に対する内外装壁の耐震性の状態の考察

大地震（層間変形角 1/50rad 想定）に対して

	外壁	窓	間仕切り壁	ドア
避難行動時	問題ない	問題ない	問題ない	危険を及ぼす
↓				
建物の応急的な利用時	損傷の対応推奨 目視調査で十分	損傷の対応必要 目視調査で十分	損傷の対応必要 目視調査だけでは危険	損傷の対応必要 目視調査で十分
↓				
建物の通常の利用時	損傷の修復必要 目視調査だけでは不十分	損傷の修復必要 目視調査だけでは不十分	損傷の修復必要 目視調査だけでは危険	損傷の修復必要 目視調査だけでは不十分

図 7-6 実施した実大実験に基づく大地震（最大層間変形角 1/50rad 想定）に対する内外装壁の耐震性の状態の考察¹²

¹² 窓については、実験②ではなく実験④の結果に基づいて考察した。

内外装壁の耐震性の課題

内外装壁の耐震性の到達度の議論に基づき内外装壁の耐震性の向上に向けた課題を示す。

中地震（最大層間変形角 1/200rad 想定）に対しては、内外装壁は最低限の耐震性を有していると言える。ただし、間仕切り壁に関しては、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が見過ごされるリスクを無くすため、新しい診断方法の構築が課題であると言える。

大地震（最大層間変形角 1/50rad 想定）に対しては、内外装壁の部材によって耐震性の到達度に大きく差が現れた。

外壁は、避難を含めた建物の応急的な利用の地震直後からの開始までは、求められる耐震性に達していると言える。このことは、1章で説明した外壁の耐震性に関する検討が比較的進んでいることと整合する。ただし、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が見過ごされるリスクを無くすため、新しい診断方法の構築が課題であると言える。

窓と間仕切り壁は、避難行動に関しては求められる耐震性に達していると言える¹³。ただし、ガラスのひび割れや上張りボードの面外方向への傾斜など、応急的な対応が必要と評価させる損傷が発生しているため、地震後の利用の再開が急がれる建物（役所、病院、避難所として使われる施設など）においては、耐震対策を講じることが求められる。また、外壁と同じく、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が見過ごされるリスクを無くすため、新しい診断方法の構築が課題であると言える。特に間仕切り壁については、見た目の方がより実際の方が深刻である可能性があるため、構築が特に急がれる。

ドアは、開閉機能の低下のため、安全な避難行動を妨げる恐れがあると言え、最低限求められる耐震性にも達していないと言える。すなわち、ドアについては、耐震対策を講じた仕様の普及が急務である。また、外壁と同じく、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が見過ごされるリスクを無くすため、新しい診断方法の構築が課題であると言える。

また、**図 7-7** と **図 7-8** に、被害の観点から見た耐震性の程度を縦軸に、診断の観点から見た耐震性の程度を横軸にとって、内外装材の耐震性の到達度をプロットしたものを示す。図において、下に位置するほど被害の観点から見た耐震性が高く、左に位置するほど診断の観点から見た耐震性が高い。この図からも、被害の観点から見た耐震性に関しては、中地震に対しては間仕切り壁のみに課題があることが分かるが、大地震に対してはドアの課題が特に問題となることが分かる。また、診断の観点から見た耐震性に関しては、大地震に対しては全ての部材において課題があるが、特に間仕切り壁の課題が顕著であることもわかる。今後は、これらの耐震性を高め、図の左下にシフトさせることが求められる。ただし、全ての内外装壁が一番左下のコマにある必要はない。

¹³ ただし、本研究ではガラスにフィルムを貼っていたため、ガラスのひび割れが破片の脱落に繋がらなかった点に留意する必要がある。

被害の観点から見た耐震性の程度	避難行動に危険を及ぼす				
	応急的な利用のために損傷の対応が必要				
	損傷の対応無しで応急的な利用が可能			間仕切り壁	
	無被害 (損傷の対応無しで通常の利用が可能)	外壁 ドア 窓			
		無被害 (診断が不要)	目視調査 だけで十分	目視調査だけでは不十分	目視調査だけでは危険
診断の観点から見た耐震性の程度					

図 7-7 実施した実大実験に基づく中地震（最大層間変形角 1/200rad 想定）に対する内外装壁の耐震性の到達度のプロット

被害の観点から見た耐震性の程度	避難行動に危険を及ぼす			ドア	
	応急的な利用のために損傷の対応が必要			窓	間仕切り壁
	損傷の対応無しで応急的な利用が可能			外壁	
	無被害 (損傷の対応無しで通常の利用が可能)				
		無被害 (診断が不要)	目視調査 だけで十分	目視調査だけでは不十分	目視調査だけでは危険
診断の観点から見た耐震性の程度					

図 7-8 実施した実大実験に基づく大地震（最大層間変形角 1/50rad 想定）に対する内外装壁の耐震性の到達度のプロット

7章の小括

7章では、実験で観察された損傷と、6章で評価した被害について、診断の観点を含む評価をし、内外装壁の損傷と被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明し、内外装壁の耐震性の向上に向けた課題を示した。

まず、7.1節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価目的と方法について説明した。次に、7.2節では、内外装壁の損傷の発生位置を分析した結果について説明した。

そして、7.3節では、内外装壁の損傷の診断の観点を含む評価をした結果について説明し、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明した。多くの場合において、床や地面からの目視調査で容易に確認できる範囲（仕上げ側など）と、容易に確認できない範囲（下地側など）の両方に損傷が発生することが分かった。

次に、7.4節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価目的と方法について説明した。

次に、7.5節では、内外装壁の被害の診断の観点を含む評価を行い、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした結果について説明した。

最後に、7.6節では、評価結果を踏まえ、内外装壁の耐震性の向上に向けた課題を示した。中地震に対しては、内外装壁は最低限の耐震性を有しているが、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の診断方法の構築が課題であることを示した。大地震に対しては、外壁は最低限の耐震性を有していること、地震後に利用の再開が急がれる建物では窓と間仕切り壁の耐震対策が求められること、ドアは耐震対策の普及が課題であることを示した。また、LGS 間仕切り壁に関しては、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷による被害のほう
が深刻である可能性もあるため、新しい診断方法の構築が特に急がれることを示した。

以上、7章では、耐震対策の必要性と新しい診断方法の構築の必要性という課題を示した。なお、耐震対策については、付録2で紹介する既往研究などにより方法が確立されており、これらが普及すれば解決すると考えられる。一方で、診断方法については、新しい方法の確立には至っておらず、例えば間仕切り壁について未検討となっている。

これに対して8章では、新しい診断方法の可能性について既往研究の調査を踏まえ検討し、構築に向けた今後の展望を示す。

7章 参考文献

- [1] 塩入徹. (2018). 天井の劣化診断（非構造部材の再確認）. 建築技術, 824, 152-155.
- [2] 塩入徹. (2022). 天井被害の実情（ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術）. 建築技術, 869, 92-93.
- [3] 仁田佳宏, 石田正美, 尾内俊夫, 渡壁守正, 稲井慎介. (2015). Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船を用いた天井部の目視検査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005, 1277-1278.
- [4] 岩崎充実, 仁田佳宏, 渡壁守正, 稲井慎介, 西谷章. (2011). 天井部材についての構造ヘルスマニタリング. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 525-526.
- [5] 岩崎充実, 仁田佳宏, 渡壁守正, 稲井慎介, 西谷章. (2012). ロボットを用いた天井部材の目視検査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012, 1209-1210.

8章 内外装壁の損傷の診断方法の展望

8.1. 内外装壁の損傷の診断に関する課題.....	284
8.2. 内外装壁の損傷の診断方法に関する研究状況.....	285
8.2.1. 内外装壁の損傷の診断方法に関する技術の検討状況.....	286
8.2.2. 構造部材の損傷の診断方法に関する技術の応用の可能性.....	288
8.2.3. 経年劣化による内外装材の損傷の診断方法に関する技術の応用の可能性 ...	290
8.3. 内外装壁の損傷の診断方法の構築に向けた課題.....	292
8.3.1. 内外装壁の損傷の診断方法の候補.....	292
8.3.2. 内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件.....	294
8.3.3. 内外装壁の損傷の診断方法の候補と求められる条件との比較.....	298
8章の小括	304
8章の参考文献.....	305

8章では、内外装壁の損傷の診断方法について、課題や研究状況などを踏まえた上で、その構築に向けた展望について論じる。

8.1.節では、7章の内容などを踏まえ内外装壁の損傷の診断に関する課題について論じる。

8.2.節では、診断方法に関する研究の状況と検討されている技術について説明する。

8.3.節では、内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件などを踏まえ、内外装壁の損傷の診断方法の構築に向けた課題について論じる。

8.1. 内外装壁の損傷の診断に関する課題

8.1.節では、7章の内容などを踏まえ内外装壁の損傷の診断に関する課題について論じる。

7章で説明した通り、床や地面からの目視調査で容易に確認できない範囲にも、経済的被害や人的被害をもたらす損傷が発生する可能性がある。一方で、地震の発生後には、建物の管理者による床や地面からの目視調査のみ行われる場合が殆どである。そのため、損傷が見過ごされている可能性があり、建物の応急的な利用開始に関して不適切な判断が下されている可能性や、性能が低下したまま建物の日常利用が開始されている可能性が考えられる。

また、役所や病院、避難所として利用される建物などは、地震発生直後から建物の利用を再開できることが求められる。また近年では、オフィスビルにおいても地震発生直後から業務を継続できることが重視されている。このような利用再開が急がれる建物においては、地震後に行われる診断がなるべく短時間で済むことが求められると言える。一方で、現状行われている目視調査だけでは、全居室の診断には、数十分から数時間の単位の時間を要することになると考えられる。エレベーターが使えなくなるオフィスビルでは、特に時間を要することになると考えられる。

更に、床や地面からの目視調査には、部材の脱落などの損傷により人的被害が発生するリスクが伴う。特に、6章で行った損傷の被害度の評価において、レベル④に該当する損傷、すなわち部材が脱落する手前の状態に内外装壁があった場合は、建物に近づく前や居室に立ち入る前に把握できていることが好ましい。しかし、一方で、現状行われている目視調査では、建物に近づき、居室に立ち入らない限り損傷や被害について把握できない。

以上より、内外装壁の損傷の診断に関する課題としては、まず、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の診断の実現のほか、短時間での診断と遠隔からの診断の実現がある。

8.2. 内外装壁の損傷の診断方法に関する研究状況

8.2節では、診断方法に関する研究の状況と検討されている技術について説明する。地震による内外装壁の損傷の診断方法のほか、先進的に研究が行われている地震による構造部材の損傷の診断方法や、経年劣化による内外装壁の損傷の診断方法についても説明する。

8.2.1節では、地震による内外装壁の損傷の診断方法に関する研究の状況と、検討されている技術について説明する。

8.2.2節では、地震による構造部材の損傷の診断方法に関する研究の状況と、検討されている技術について説明する。

8.2.3節では、経年劣化による内外装壁の損傷の診断方法に関する研究の状況と、検討されている技術について説明する。

8.2.1. 内外装壁の損傷の診断方法に関する技術の検討状況

8.2.1.節では、地震による内外装壁の損傷の診断方法に関する研究の状況と、検討されている技術について説明する。

研究の状況

内外装壁の地震による損傷を診断する技術に関しては、近年その数が増加しつつあるものの、数が非常に限られる。

野々山優輔ら「カーテンウォールの耐震性能を評価する数値解析と Gyro によるセンサリングシステムのための実験研究」(2021)

2021年の野々山らによる研究 [2]¹では、外壁に3軸ジャイロセンサを設置し、地震時のカーテンウォールの回転角を計測することで、耐震性能の評価を試みている。

日建設計「地震時建物被災度判定システム」

日建設計が計測機器メーカーと共同で開発した「地震時建物被災度判定システム」 [9]²は、建物内に設置した加速度センサや変位計などの計測結果から、構造部材だけでなく、外装材といった内外装壁や、天井などの内外装材、設備や家具など非構造部材の被災度まで判定できる。

¹ 野々山優輔, 長江拓也, 梶原浩一, 神崎喜和, 太田匡信. (2021). カーテンウォールの耐震性能を評価する数値解析と Gyro によるセンサリングシステムのための実験研究. 日本建築学会技術報告集, 27(65), 125-130. doi:10.3130/aijt.27.125

² 日建設計. (2022年4月). 地震被災度判定システム. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: https://www.nikken.co.jp/ja/about/portfolio/am42sv0000000ay-att/NS_LCD-sheet03_49.pdf

以下では内外装材に関する研究を紹介する。

関根麻里子ら「災害拠点建物の安全即時評価および継続使用性即時判定（その24）光ファイバセンサを用いた外装タイルの剥離検知および構造部材の損傷モニタリング」（2020）

松原大祐ら「外装タイルの剥離検知モニタリング技術の確立に関する研究 その1 タイル外壁の剥離検知モニタリングにおける基礎的検討」（2019）

関根麻里子ら「外装タイルの剥離検知モニタリング技術の確立に関する研究 その2 光ファイバセンサを用いた実験的検討」（2019）

関根らによる一連の研究では、外壁タイルの損傷を打音、加速度センサ、サーモグラフィカメラ、パイゲージ、光ファイバー、3D スキャンなどの各種計測技術を用いて診断する方法について検討が行われている [3]³ [4]⁴ [5]⁵。

幸田雄太ら「非構造材の点検を目的として撮影された写真の差分分析による損傷検知に関する基礎的研究」（2020）

幸田らによる一連の研究では、地震や経年劣化による損傷を含めた非構造部材の総合的な健全度評価の手法として、カメラ画像から機械学習を用いて被害を検出する方法について検討が行われている [6]⁶。

仁田佳宏ら「Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船を用いた天井部の目視検査」（2015）

仁田らによる一連の研究では、カメラを搭載したドローンなどにより天井の裏の損傷を診断する方法について検討が行われている [7]⁷。

八木尚太郎他ら「天井の地震被害のモニタリング方法に関する研究 カメラ画像を用いた方法に着目して」（2018）

八木らの研究 [8]⁸では、天井裏の損傷は目視調査による確認が難しいことに触れ、その上で防犯カメラを天井裏に設置し損傷を診断する方法について検討が行われている。

³ 関根麻里子, 早野博幸, 寺本篤史, 大久保孝昭, 川口莉穂, 楠浩一. (2020). 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 (その24) 光ファイバセンサを用いた外装タイルの剥離検知および構造部材の損傷モニタリング. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1191-1192.

⁴ 松原大祐, 大久保孝昭, 寺本篤史, 楠浩一, 日比野陽, 川口莉穂, 早野博幸, 城出真弥, 関根麻里子. (2019). 外装タイルの剥離検知モニタリング技術の確立に関する研究 その1 タイル外壁の剥離検知モニタリングにおける基礎的検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 679-680.

⁵ 関根麻里子, 城出真弥, 早野博幸, 寺本篤史, 大久保孝昭, 松原大祐, 川口莉穂, 楠浩一, 日比野陽. (2019). 外装タイルの剥離検知モニタリング技術の確立に関する研究 その2 光ファイバセンサを用いた実験的検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 681-682.

⁶ 幸田雄太, 川口健一, 水本旭洋, 松田裕貴. (2020). 構造材の点検を目的として撮影された写真の差分分析による損傷検知に関する基礎的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1033-1034.

⁷ 仁田佳宏, 石田正美, 尾内俊夫, 渡壁守正, 稲井慎介. (2015). Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船を用いた天井部の目視検査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005, 1277-1278.

⁸ 八木尚太郎, 清家剛, 金容善. (2018). 天井の地震被害のモニタリング方法に関する研究 カメラ画像を用いた方法に着目して. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018, 349-350.

8.2.2. 構造部材の損傷の診断方法に関する技術の応用の可能性

8.2.2.節では、地震による構造部材の損傷の診断方法に関する研究の状況と、検討されている技術について説明する。

また、地震による構造部材の損傷の診断方法の技術の、地震による内外装壁の損傷の診断方法への応用可能性について論じる。

研究の状況

内外装壁（内外装材）と比較すると、地震による構造部材の損傷は建物の倒壊など大規模な被害に直結しやすいため、その対策が急務であった。そのため、損傷の診断の分野においても、内外装壁と比較し、研究開発が進んでいる。

藤野陽三，日本鋼構造協会「構造物のモニタリング技術」（2020）

「構造物のモニタリング技術」（2020） [10]⁹では、構造部材のヘルスマニタリング¹⁰に活用されている技術（センサ）として、加速度計、速度計、変位計が挙げられている。更に、先進的な事例として、ドローンの活用や、赤外線サーモグラフィ、電磁波、X線、超音波、打診といった技術の活用についても紹介されている。

⁹ 藤野陽三，日本鋼構造協会. (2020). 構造物のモニタリング技術. 東京都: コロナ社.

¹⁰ 建築におけるヘルスマニタリングとは、建物にセンサを設置して振動などの物理量を計測し、信号処理などを行うことで、蓄積された損傷の発生箇所や程度について自動的に判断し、今後の進展状況について予測する技術とされる。そして、構造部材を対象としたヘルスマニタリング技術は、超高層の建物などを始めとして普及段階に入りつつあり、地震により発生した損傷を診断する技術としても活用が期待されている。

地震による構造部材の損傷の診断方法の技術の、地震による内外装壁の損傷の診断方法への応用可能性

上記のように、地震による構造部材の損傷の診断方法は、実装段階にまで入っており、内外装壁（内外装材）と比較し先進的である。しかし、地震による構造部材の損傷の診断方法の技術を、地震による内外装壁の損傷の診断方法の技術としてそのまま応用することは困難である。

その理由として、まず、知見の少なさが挙げられる。構造部材と比較すると、内外装壁の設計や施工は、これまで経験的になされてきた側面が強く、地震時の内外装壁の挙動の力学的評価に注目が集まったのは比較的最近のことである。そのため、地震によりどのような箇所にもどのような損傷が発生するのか、損傷を捉えるためにはどのような計測を行えばよいのかといった観点からの系統的な知見は十分には蓄積されていない状況にある。

また、内外装壁と構造部材の違いとして、内外装壁は多数の部材にまたがって接合されていること、異なる性質を持つ様々な材料が組み合わさって一つの部材を構成していることが挙げられる。このため、単体として挙動が複雑であることに加え、周辺部材とも相互に影響し合うため、挙動の理解が難しい。

更に、内外装壁は建物もしくは部屋ごとに、その平面計画や用途などの条件により様々な形状を取りうることも挙げられる。構造部材が事前に綿密な設計をされるのに対して、内外装壁は、その仕様は設計者によって決定されるものの、実際の接合部のディテールや設備との取り合いなどについては、現場での微調整や設計変更が行われることも多い。

最後に、内外装壁に覆われて外部に露出しない構造部材と比較すると、外装材やプールの内壁（および天井）など腐食環境に面する内外装壁（内外装材）については経年劣化も著しく、時間と共に挙動や性能が変わることが予想されることも挙げられる。

このような特徴のため、地震による構造部材の損傷の診断と比較すると、地震による内外装壁の損傷の発生箇所の特特定や損傷の予測は困難となる。そのため、地震による構造部材の損傷の診断方法の技術を、地震による内外装壁の損傷の診断にそのまま応用できるわけではなく、独自の検討を行う必要があると言える。

8.2.3. 経年劣化による内外装材の損傷の診断方法に関する技術の応用の可能性

8.2.3.節では、経年劣化による内外装壁の損傷の診断方法に関する研究の状況と、検討されている技術について説明する。

また、経年劣化による内外装材の損傷の診断方法の技術の、地震による内外装壁の損傷の診断方法への応用可能性について論じる。

研究の状況

8.2.2.節で説明したように、内外装材には腐食環境に面するものもあるため、経年劣化による損傷を診断することを目的とした技術については、研究開発がいくつか行われている。

2011年から2018年の日本建築学会大会の材料施工部門での発表された研究において、建物の損傷の診断に関する研究をピックアップした。計246本あり、構造部材の損傷の診断に関する報告が163本あり、内外装材の損傷の診断に関する報告が77本あった（うち外装材の損傷の診断に関する報告が53本）。内外装材の損傷の診断に関する77本の報告のうち、66本が経年劣化による損傷の診断に関する報告であり、7本が品質や施工不良に関する報告であり、地震による損傷の診断に関するものは2本であった（いずれも天井が対象）。

内外装材の経年劣化による損傷の診断に関する報告の中で検討されていた主な技術としては、赤外線カメラ（21本）、画像診断（カメラ撮影）（16本）、打音検査（22本）、ドローン（16本）があった。なお、ドローンは単体で検討されることは無く、赤外線カメラ、画像診断、打音検査と複合して検討されていた [11]¹¹。

経年劣化による内外装材の損傷の診断方法の技術の、地震による内外装壁の損傷の診断方法への応用可能性

地震による内外装材の損傷の診断方法と比較すると、経年劣化による内外装材の損傷を診断することに関する研究の方が数としては多い。しかし、経年劣化による内外装材の損傷を診断方法の技術を、地震による内外装壁の損傷の診断方法の技術としてそのまま応用することは困難である。

¹¹ 宮内博之. (2022). 無限の技術：ドローン（世界はどこまで計測できるか）. 建築雑誌, 137(1761), 22-23.

その理由として、まず、地震による内外装材の損傷の形態と、経年劣化による内外装材の損傷の形態が異なることが挙げられる。例えば、地震による天井被害の例として、軽量鉄骨下地の座屈が挙げられるが、このような被害は経年劣化では発生しないと考えられ、地震による損傷に特有のものであると言える。

次に、診断に使える時間の長さの違いが挙げられる。地震後に建物の応急的な利用¹²を行うことの可否を判断するための診断は、専門家が不在の状態ですら、場合によっては数分単位、遅くとも数時間単位での診断と判定が求められることになる。これらの特徴は、専門家が現地に赴き数時間から数週間かけて実施することができる経年劣化による損傷の診断とは大きく異なる。

また、経年劣化による内外装材の損傷の診断では、使用する機材（技術）は、専門家である業者が有しており、常にどこかの建物で利用される場合が多いと考えられる。その一方で、地震による損傷の診断では、即時性を考えると、建物ごとに使用する機材（技術）が常備される場合が多いと考えられる。地震は数年から数十年のスパンで起きるため、地震による損傷を診断する機材（技術）は、数年から数十年の間、使用されずに保管されるか、日常において別の目的のために運用されることになる。この点において、経年劣化による損傷の診断と地震による損傷の診断は大きく異なる。

更に、地震時に特有の条件として、時間を選ぶことができないことがある。経年劣化による損傷の診断は、日中に行われる場合が多いと考えられる。その一方で、地震が夜間に起き、診断が即時に求められる場合は、夜間に診断が行われることになる。更に、地震の際には停電が起きることも想定される。そのため、光源や電源がない状態でも診断が求められる場合が想定される。この点において、光源や電源が確保された状態で行われる経年劣化による損傷の診断と大きく異なる。

このような特徴のため、経年劣化による内外装壁の損傷の診断と比較すると、地震による内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件はより厳しいものとなる。そのため、経年劣化による内外装壁の損傷の診断方法の技術を、地震による内外装壁の損傷の診断方法にそのまま応用できるわけではなく、独自の検討を行う必要があると言える。

¹² 応急的な利用とは、修復などの対応がなされていない損傷が存在する状態で建物を利用することである。学校の体育館が避難所として利用されるなど、本来の用途とは異なる場合が多々ある。

8.3. 内外装壁の損傷の診断方法の構築に向けた課題

8.3.節では、内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件などを踏まえ、内外装壁の損傷の診断方法の構築に向けた課題について論じる。

8.3.1.節では、8.2.節の内容を踏まえ、内外装壁の損傷の診断方法の候補について提案する。

8.3.2.節では、8.1.節と8.2.節の内容を踏まえ、内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件について論じる。

8.3.3.節では、内外装壁の損傷の診断方法の候補と求められる条件との比較を通じて、診断方法の構築に向けた課題について論じる。

8.3.1. 内外装壁の損傷の診断方法の候補

8.3.1.節では、8.2.節の内容を踏まえ、内外装壁の損傷の診断方法の候補について提案する。

診断方法での活用が期待される技術の候補

8.2.節で紹介した内容を踏まえ、ここでは地震による内外装壁の損傷の診断方法において、将来的な活用が期待される技術の候補を提案する。

以下が技術の候補である。便宜上、計測する現象や物理量ごとにカテゴライズして示す。

画像ベースの技術¹³

- ・サーモグラフィーカメラ
- ・X線
- ・超音波
- ・ドローン
- ・画像診断

変位（ひずみ）ベースの技術

- ・変位計
- ・3D スキャン
- ・光ファイバー
- ・ジャイロセンサ
- ・加速度センサ（傾斜計として利用）

¹³ 現状行われている、床や地面からの目視調査も画像ベースに分類されることが考えることができる。

振動ベースの技術

- ・打音（マイク）
- ・加速度センサ

診断における技術の運用方法の候補

ここで、同じ技術を用いても、その運用方法によって診断方法が異なってくることが考えられる。

まず、計測結果に基づく損傷の判定を、人が行うことと機械が行うことの2通りが考えられる。

更に、人が行う方法にも、特殊な知識や技能を持った専門家が判定する方法と、専門知識を有さない人が判定する方法が考えられる。なお、人が判定する場合、建物の管理者が該当すると考えられる。建物の管理者は専門知識を有さないが、教育することは可能である。

そして、機械が行う方法にも、閾値を定める方法と、機械学習による方法が考えられる。なお、前者の方が設定は簡単であるが汎用性は低いことが考えられる。

以上、診断方法は技術と判定方法の組み合わせによって決定されることができると示し、技術と判定方法の候補を提案した。なお、8.3.3節では、候補の具体的な例を挙げ、8.3.2節で議論する条件との比較を通じて、内外装壁の損傷の診断方法の構築に向けた課題について論じる。

8.3.2. 内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件

8.3.2節では、8.1節と8.2節の内容を踏まえ、内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件について論じる。

8.1節では内外装壁の診断に関する課題について論じた。まず、内外装壁の損傷の診断に関する課題としては、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の診断を挙げた。すなわち、内外装壁の損傷の診断方法には精度の条件が求められると言える。

次に、短時間での診断を挙げた。すなわち、内外装壁の損傷の診断方法には迅速性の条件が求められると言える。

そして、遠隔からの診断を挙げた。すなわち、内外装壁の損傷の診断方法には遠隔化（無人化）の条件が求められると言える。

8.2節では、経年劣化による内外装壁の損傷の診断と、地震による内外装壁の損傷の診断の違いについて論じた。まず、経年劣化による損傷の診断は専門家により実施されるが、地震による損傷の診断は専門家が不在の状況でも行われることを挙げた。すなわち、内外装壁の損傷の診断方法には利便性（自動化）の条件が求められると言える。

次に、経年劣化による損傷の診断は常日頃から行われており、機材が常に稼働している状態にあるが、地震による損傷の診断は数年から数十年のスパンで行われるため、機材が地震による損傷の診断の用途で活用されることはまれである可能性があることを挙げた。このことから、地震による損傷の診断方法に用いる機材は、日常時においても別の用途で活用できることが好ましいと言える。すなわち、内外装壁の損傷の診断方法には多用途性の条件が求められると言える。また、数年から数十年間活用されなくても、定期的にメンテナンスは必要になる。すなわち、内外装壁の損傷の診断方法にはメンテナンス性の条件が求められると言える。

そして、経年劣化による損傷の診断は実施する時間を選ぶことができ、電源も確保されているのに対して、地震による損傷の診断を実施する時間は選ぶことができず、夜間に実施する場合も想定され、電源が取れない場合も想定されることを挙げた。すなわち、内外装壁の損傷の診断方法には省エネ性（含む光源の必要性）の条件が求められると言える。

最後に、内外装壁の損傷の診断方法の導入においては、コストをなるべく抑えることも求められると言える。すなわち、内外装壁の損傷の診断方法にはコストの条件が求められると言える。

以上より、地震による内外装壁の損傷の診断方法には、以下の条件が求められると言える。

- ・精度の条件
- ・迅速性の条件
- ・遠隔化の条件
- ・簡便性の条件
- ・多用途性の条件
- ・メンテナンス性の条件
- ・省エネ性の条件
- ・コストの条件

以下では、それぞれの条件について更に論じる。

精度の条件の概要

下地側など、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷を診断できることが求められる。ただし、その程度にもいくつかの段階があると考えられる。

もっとも荒い精度として、損傷がある可能性を判別できるということが考えられる。この精度が確保されていれば、目視調査の妥当性や、仕上げ材の解体調査の必要性について議論することができる。

次に、損傷の発生箇所を特定できることが考えられる。仕上げ材の解体工事の面積を最小限に絞れるため、経済的メリットは大きいと考えられる。

最後に、損傷の程度（すなわち目視調査と同程度の情報量）まで把握できることが考えられる。損傷の程度まで把握することができれば、修復などの対応が後回しにできるのか、周囲を立ち入り禁止にするなど応急的な対応を行うべきなのかという議論ができる。

以上より、精度の条件にも段階があり、段階により診断結果の使われ方が変わると言える。

迅速性の条件の概要

地震後の利用再開が急がれる建物においては、場合によっては数分単位、遅くとも数時間単位での診断と判定が求められる。更に、リアルタイムで診断ができれば、避難経路の誘導や、初動対応等の判断における根拠として利用することができる [12]¹⁴。ただし、地震後に利用再開が急がれない建物であれば、数日から数週間かけて診断するということも考えられる。以上より、迅速性の条件にも段階があり、段階により診断結果の使われ方が変わると言える。

遠隔化の条件の概要

遠隔から損傷を診断できることは、地震後に建物に立ち入り目視調査を実施する人の安全を確保する上で重要である。また診断方法として、遠隔から荒い精度の診断をし、細かくは目視調査など建物に立ち入る診断で行うという2段階の診断方法が考えられる。

簡便性の条件の概要

地震による損傷の診断は専門家が不在の状況でも行われる。この解決策として、建物の管理者に専門的な教育を施すことも考えられる。もしくは、診断結果を遠方の専門家に送り、遠方から専門家の支持を仰ぐ方法も考えられる。ただし、いずれもその手間を考えると、診断方法が専門的な知識を有さない者であっても利用できるものである方が好ましい。そのため、定量的な閾値を設けて、マニュアル的にもしくは自動判断できる診断方法であることが好ましい。もしくは、機械学習などで自動判断できる診断方法であることが好ましい。

多用途性の条件の概要

診断方法に用いる機材が、日常時では別の用途で利用できることが経済的には好ましい。例えば、日常では、経年劣化による損傷の診断や防犯を目的として利用されている機材が、地震による損傷の診断のためにも利用できることなどが考えられる。

メンテナンス性の条件の概要

診断方法に用いる機材が地震の際に正常に利用できるように、日常時のメンテナンスが重要となる。例えば、機材が建物に固定されるものではなく、持ち運び可能なものであれば、メンテナンスが容易であることが想定される。しかし、例えば機材が下地側や高所に固定されるものであった場合、メンテナンスは困難になることが想定される。

¹⁴ 日本建築学会. (2015). 逃げないですむ建物とまちをつくる 一大都市を襲う地震等の自然災害とその対策一. 東京都: 技報堂出版株式会社.

省エネ性の条件の概要

地震時には停電が起きることも想定される。そのため、診断に用いる機材は外部電源を必要としないことが重要となる。すなわち、内蔵バッテリーで駆動可能であることが好ましい。また、夜間の地震の場合は光源が限られる可能性もある。そのため、機材は暗い状態であっても使用可能であることが好ましい。

コストの条件の概要

新しい機材の導入の判断をする上で、コストは重要な項目の一つである。特に地震による損傷の診断方法においては、例えば日常時には利用しない機材となると、高額なものは導入しにくい。また、低コストの機材であっても、必要となる数によってはトータルコストが高くなる。つまり、コストに関しては、単純な機材のコストだけではなく、その運用方法も含めないと評価しにくい。また、機材の価格は、技術の発展と共に、短期間で大きく変動する。

以上、地震による内外装壁の損傷の診断に求められる条件について論じた。なお、8.3.3.節では、これらの条件と、8.3.1.節で挙げた診断方法の候補の具体例との比較を通じて、内外装壁の損傷の診断方法の構築に向けた課題について論じる。

8.3.3. 内外装壁の損傷の診断方法の候補と求められる条件との比較

8.3.3.節では、内外装壁の損傷の診断方法の候補と求められる条件との比較を通じて、診断方法の構築に向けた課題について論じる。

求められる条件に対する診断方法の候補の適正の考察

まず、8.3.2.節で論じた求められる条件に対する、8.3.1.節で提案した診断方法の候補の適正について考察する。

精度の条件に対する診断方法の候補の適正の考察

精度に関しては、カメラや3D スキャナを用いた画像ベースの技術を用いた診断方法は下地側など目視調査で容易に確認できない範囲の損傷は診断できないケースが殆どと考えられる。一方で、変位ベースの技術を用いた診断方法は、部材の変形や変位の履歴を追えるため損傷の有無を捉えられる可能性がある。また、画像ベースの中でも X 線やサーモグラフィカメラを用いた診断方法、もしくは振動ベースの技術を用いた診断方法であれば、損傷の有無や位置までは捉えられる可能性がある。

迅速性の条件に対する診断方法の候補の適正の考察

迅速性に関しては、ジャイロセンサ、光ファイバセンサ、加速度センサなどの機材を建物に地震の前から設置しておく診断方法であれば、リアルタイムでの診断が可能だと考えられる。一方で、カメラ、サーモグラフィカメラ、ドローン、3D スキャナなどの機材を人が手動で運用する診断方法や操縦する診断方法は迅速性に劣ると考えられる。また、打音、X 線や超音波など一度の診断範囲が比較的狭い技術を用いた診断方法は、特に迅速性に劣ると考えられる。

遠隔化の条件に対する診断方法の候補の適正の考察

遠隔化に関する条件に関しては、ジャイロセンサ、光ファイバセンサ、加速度センサなどの機材を地震の前から建物に設置しておく診断方法であれば、遠隔からの診断が可能だと考えられる。また、持ち運び可能な機材であれば、ドローンに搭載して遠隔から操縦することが可能だと考えられる。

簡便性の条件に対する診断方法の候補の適正の考察

簡便性に関しては、ジャイロセンサ、光ファイバセンサ、加速度センサ、3D スキャナなど変化を数値で捉えられる技術を用いた診断方法であれば、閾値が設定しやすく、自動化もしやすいと考えられる。一方で、カメラなど画像ベースの方法は、画像情報を数値に変換するか、もしくは機械学習と組み合わせれば自動化できると考えられる。また、画像ベースの診断方法は、非専門家であっても直感的に損傷を判別できることも考えられる。

多用途性の条件に対する診断方法の候補の適正の考察

多用途性の条件に関しては、画像ベースの技術であれば、日常時の写真撮影や防犯など多用途性に富むことが考えられる。また、機材を建物に設置しておく診断方法は、経年劣化による損傷の診断に活用できることが考えられる。

メンテナンス性の条件に対する診断方法の候補の適正の考察

メンテナンス性に関しては、手持ちできるカメラやドローンなどは持ち運び可能な技術を用いた診断方法であれば、メンテナンスは比較的容易であると考えられる。一方で、機材を地震の前から建物に設置しておく診断方法はメンテナンスに足場が必要になる場合などが考えられる。また、壁にビス固定するような取り外し可能な機材であれば、比較的メンテナンスしやすいと考えられるが、部材に埋め込むような取り外し不可能な機材の場合、メンテナンスに工事が必要となる。

省エネ性の条件に対する診断方法の候補の適正の考察

省エネ性の条件に関しては、持ち運び可能な機材を運用する診断方法であれば、バッテリー駆動できると考えられる。機材を建物に設置しておく診断方法は、地震時にバッテリー駆動できるようになっていれば問題ない。また、カメラなど画像ベースの診断方法は、基本的に光源を別で確保する必要がある。ただし、サーモグラフィーカメラは光の反射ではなく、熱容量の差を捉えるものであるため、光源は必要ない。

コストの条件に対する診断方法の候補の適正の考察

コストの条件に関しては、運用方法や技術発展により変わるものであるため、ここでは加味しないこととする。

求められる条件に対する診断方法の性能のパターン

前項で行った内外装壁の損傷の診断方法の候補と求められる条件との比較を踏まえ、次に、求められる条件に対する診断方法の性能のパターンについて論じる。

求められる条件に対する診断方法の性能は、下記のように分けられる。

精度の条件に対する診断方法の性能

- ・ 目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の程度まで把握できる診断方法
- ・ 目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の位置まで把握できる診断方法
- ・ 目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の有無まで把握できる診断方法

迅速性の条件に対する診断方法の性能

- ・ リアルタイムで診断可能な診断方法
- ・ 数時間以内に診断可能な診断方法
- ・ 数日以内に診断可能な診断方法

遠隔化の条件に対する診断方法の性能のパターン

- ・ 遠隔からの診断が可能な診断方法
- ・ ドローンに機材を搭載することで遠隔から診断することが可能な診断方法
- ・ 遠隔からの診断が不可能な診断方法

簡便性の条件に対する診断方法の性能

- ・ 自動化されている診断方法
- ・ 専門知識が不要な診断方法
- ・ 専門知識が必要な診断方法

多用途性の条件に対する診断方法の性能

- ・ 多用途に利用可能な診断方法
- ・ 経年劣化の検出に利用可能な診断方法
- ・ 他の目的に使えない診断方法

メンテナンス性の条件に対する診断方法の性能

- ・ 機材の持ち運びが可能な診断方法
- ・ 機材の取り外しが可能な診断方法
- ・ 機材の取り外しが困難な診断方法

省エネ性の条件に対する診断方法の性能のパターン

- ・ 光源不要、バッテリー駆動可能な診断方法
- ・ 光源必要、バッテリー駆動可能な診断方法
- ・ バッテリー駆動不可能な診断方法

求められる条件に対する診断方法の候補の適正の評価

これまでの議論を踏まえ、8.3.1.節で提案した診断方法の候補の中から具体例を取り上げ、求められる条件に対する適正を考察し、整理した。整理の基準としては、前項で示した求められる条件に対する診断方法の3段階の性能を用いて設定した。

表 8-1 に整理の対象とした診断方法を示す。なお、現状行われている建物の管理者による床や地面からの目視調査も含めている (①)。

表 8-1 評価の対象とした診断方法

診断方法		
#	技術	判定方法
①	目視調査 ¹⁵	人 (非専門家)
②	防犯カメラ ¹⁶	人 (非専門家)
③	防犯カメラ ¹⁷	自動 (機械学習)
④	サーモグラフィカメラ ¹⁸	人 (専門家)
⑤	X線 ¹⁹	人 (専門家)
⑥	変位計 ²⁰	自動 (基準値)
⑦	光ファイバー ²¹	自動 (基準値)
⑧	ジャイロセンサ ²²	自動 (基準値)
⑨	加速度センサ (傾斜計) ²³	自動 (基準値)
⑩	打音 ²⁴	人 (専門家)
⑪	加速度センサ ²⁵	自動 (基準値)

表 8-2 に設定した整理の基準を示す。

表 8-2 求められる条件に対する診断方法の整理の基準

	精度	迅速性	遠隔化	簡便性	多用途性	メンテナンス性	省エネ性
◎	程度まで	リアルタイム	遠隔可能	自動判定	多用途に使える	持ち運び可	光源不要
○	損傷の位置	数時間	ドローン搭載可能	定量的な判定	劣化診断に使える	取り外し可	光源必要
△	損傷の有無	数日	遠隔不可	定性的な判定	使えない	取り外し不可	バッテリー駆動不可

¹⁵ 建物の管理者 (非専門家) が地面や床から目視調査を行うことを想定する (従来の診断方法)。

¹⁶ 建物の管理者 (非専門家) が防犯カメラの画像情報を用いて定性的な調査を行うことを想定する。

¹⁷ 防犯カメラの画像情報に対して AI が判定することを想定する。

¹⁸ 専門家がサーモグラフィカメラの画像情報を用いて定性的な調査を行うことを想定する。

¹⁹ 専門家が X 線装置の画像情報から定性的な調査を行うことを想定する。

²⁰ 内外装壁に変位計を設置し変形や変位の履歴から定量的な判断を自動で行うことを想定する。

²¹ 内外装壁に光ファイバーを設置し変形や変位の履歴から定量的な判断を自動で行うことを想定する。

²² 内外装壁にジャイロセンサを設置し変形や変位の履歴から定量的な判断を自動で行うことを想定する。

²³ 内外装壁に加速度センサを設置し変形や変位の履歴から定量的な判断を自動で行うことを想定する。

²⁴ 専門家が打音検査により損傷の定性的な調査を行うことを想定する。

²⁵ 内外装壁に加速度センサを設置し固有振動数の推移から定量的な判断を自動で行うことを想定する。

表 8-3 に考察し、整理した結果を示す。

現状行われている床や地面からの目視調査による診断方法 (①) や防犯カメラを用いた診断方法 (②、③) では、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が診断できないため空白となっている。新しい診断方法に求められる条件として、本研究で最も重要視するのはこの精度である²⁶。この点においては、損傷の程度まで把握できると考察される診断方法は挙げた具体例の中には無かった。ただしサーモグラフィーを用いた診断方法 (④)、X 線を用いた診断方法 (⑤)、打音を用いた診断方法 (⑩) は損傷の位置までは把握できると考察された。一方で、これらの診断方法は、本研究で 2 番目に重要視する迅速性が低いと考察された。また、簡便性も低いと考察された。

変位計を用いた診断方法 (⑥)、光ファイバーを用いた診断方法 (⑦)、ジャイロセンサを用いた診断方法 (⑧)、加速度センサを用いた診断方法 (⑨、⑪) は、診断の条件に対しては、損傷の有無までは把握できると考察された。更に、迅速性や遠隔化の条件に対する性能が高いと考察された。

表 8-3 求められる条件に対する診断方法の考察を整理した結果

#	診断方法		精度	迅速性	遠隔化	簡便性	多用途性	メンテナンス性	省エネ性
	技術	判定							
①	目視調査	人 (非専門家)	—	○	△	○	◎	◎	○
②	防犯カメラ	人 (非専門家)	—	○	◎	○	◎	○	○
③	防犯カメラ	自動 (機械学習)	—	◎	◎	◎	◎	○	○
④	サーモグラフィーカメラ	人 (専門家)	○	△	○	△	◎	◎	◎
⑤	X 線	人 (専門家)	○	△	△	△	◎	◎	◎
⑥	変位計	自動 (基準値)	△	◎	◎	◎	○	○	◎
⑦	光ファイバー	自動 (基準値)	△	◎	◎	◎	○	△	◎
⑧	ジャイロセンサ	自動 (基準値)	△	◎	◎	◎	○	○	◎
⑨	加速度センサ (傾斜計)	自動 (基準値)	△	◎	◎	◎	○	○	◎
⑩	打音	人 (専門家)	○	△	○	△	◎	◎	○
⑪	加速度センサ	自動 (基準値)	△	◎	◎	◎	○	○	◎

²⁶ 7 章で示した診断の観点から見た耐震性の課題を解決する上で重要となるということ。

診断方法の構築に向けた課題

以上より、7章で示した診断の観点から見た耐震性の課題を解決するための新しい診断方法として、計測機器を事前に建物に設置しておき判断が自動で行われる診断方法の有用性が考えられる。ただし、損傷と計測結果の対応関係を明らかにし、閾値を設定することが課題として挙げられる。なお、本研究で実施した実大実験の一部では、加速度センサによる内外装壁の計測を行っていた。そこで付録12では、内外装壁の損傷と加速度センサの計測結果の対応関係について検討し、加速度センサを事前に建物に設置しておく診断方法の有用性について考察した結果について説明する。

一方で、計測機器を事前に建物に設置しておく診断方法は、多用途性とメンテナンス性が他の方法と比較して低いと考察された。そのため、診断方法の普及のためには、地震による損傷の診断以外の用途を示すことや、メンテナンスの頻度を極力少なくすることなどが課題である。

また、サーモグラフィカメラやX線を用いた診断方法は、床や地面からの目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の位置まで非破壊で把握できる可能性があるため、時間を比較的かけられる診断においては、有用な手段になりうる。これについても、計測結果と損傷の対応関係を明らかにすることが今後の課題である。

8章の小括

8章では、内外装壁の損傷の診断方法について、課題や研究状況などを踏まえた上でその構築に向けた展望について論じた。

まず、8.1節では、7章の内容などを踏まえ内外装壁の損傷の診断に関する課題について論じた。内外装壁の損傷の診断に関する課題としては、まず、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の診断のほか、短時間での診断と遠隔からの診断が挙げられる。

次に、8.2節では、診断方法に関する研究の状況と検討されている技術について説明した。地震による内外装壁の損傷の診断に関する研究開発の数が限られる一方で、地震による構造部材の損傷の診断や経年劣化による内外装壁の損傷の診断については新しい診断方法の実用段階まで来ている。技術としては、サーモグラフィーカメラ、X線、ドローン、変位計、3Dスキャン、光ファイバー、ジャイロセンサ、加速度センサ、打音などが検討されている。

最後に、8.3節では、内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件などを踏まえ、内外装壁の損傷の診断方法の構築に向けた課題について論じた。7章で示した診断の観点から見た耐震性の課題を解決するための新しい診断方法として、計測機器を事前に建物に設置しておき判断が自動で行われる診断方法の有用性が考えられる。ただし、損傷と計測結果の対応関係を明らかにし、閾値を設定することが課題として挙げられる。更に、地震による損傷の診断以外の用途を示すことやメンテナンスの頻度を極力少なくすることも課題として挙げられる。

8章 参考文献

- [1] 伊山潤, 福島佳浩, 八木尚太朗. (2022). 非構造部材のヘルスマonitoring (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 74-77.
- [2] 野々山優輔, 長江拓也, 梶原浩一, 神崎喜和, 太田匡信. (2021). カーテンウォールの耐震性能を評価する数値解析と Gyro によるセンサリングシステムのための実験研究. 日本建築学会技術報告集, 27(65), 125-130. doi:10.3130/ajjt.27.125
- [3] 関根麻里子, 早野博幸, 寺本篤史, 大久保孝昭, 川口莉穂, 楠浩一. (2020). 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 (その 24) 光ファイバセンサを用いた外装タイルの剥離検知および構造部材の損傷モニタリング. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1191-1192.
- [4] 松原大祐, 大久保孝昭, 寺本篤史, 楠浩一, 日比野陽, 川口莉穂, 早野博幸, 城出真弥, 関根麻里子. (2019). 外装タイルの剥離検知モニタリング技術の確立に関する研究 その 1 タイル外壁の剥離検知モニタリングにおける基礎的検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 679-680.
- [5] 関根麻里子, 城出真弥, 早野博幸, 寺本篤史, 大久保孝昭, 松原大祐, 川口莉穂, 楠浩一, 日比野陽. (2019). 外装タイルの剥離検知モニタリング技術の確立に関する研究 その 2 光ファイバセンサを用いた実験的検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 681-682.
- [6] 幸田雄太, 川口健一, 水本旭洋, 松田裕貴. (2020). 構造材の点検を目的として撮影された写真の差分分析による損傷検知に関する基礎的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1033-1034.
- [7] 仁田佳宏, 石田正美, 尾内俊夫, 渡壁守正, 稲井慎介. (2015). Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船を用いた天井部の目視検査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005, 1277-1278.
- [8] 八木尚太朗, 清家剛, 金容善. (2018). 天井の地震被害のモニタリング方法に関する研究 カメラ画像を用いた方法に着目して. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018, 349-350.
- [9] 日建設計. (2022年4月). 地震被災度判定システム. 参照日: 2022年7月25日, 参照先 : https://www.nikken.co.jp/ja/about/portfolio/am42sv00000000ay-att/NS_LCD-sheet03_49.pdf
- [10] 藤野陽三, 日本鋼構造協会. (2020). 構造物のモニタリング技術. 東京都: コロナ社.
- [11] 宮内博之. (2022). 無限の技術: ドローン (世界はどこまで計測できるか). 建築雑誌, 137(1761), 22-23.

- [12] 日本建築学会. (2015). 逃げないですむ建物とまちをつくる 一大都市を襲う地震等の自然災害とその対策－. 東京都: 技報堂出版株式会社.
- [13] DEVICESANALOG. ADXL355 Overview. 参照日: 2022 年 07 月 25 日, 参照先:
<https://www.analog.com/jp/products/adxl355.html>
- [14] 日本建築学会. (2018). 2016 熊本地震災害調査報告. 東京都: 日本建築学会.

9章 まとめ

9.1. 研究の総括	308
9.2. 研究の結論	310
9.3. 研究のその他の成果.....	318
9.4. 今後の課題	322

本研究では、内外装壁の耐震性について設計者が把握できるようにすることと、診断に関する課題の明確化と解決を通じ、地震後を含めた内外装壁の耐震性の確保を目指した。そして、実建物を模した試験体を用いた実大実験と損傷の被害度の評価を通じて、地震による内外装壁の損傷と損傷がもたらす被害について、壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることで、耐震性について設計者が把握し確保できるための情報を提供し、ドア、間仕切り壁、窓の耐震性の向上が課題であることを示した。更に、損傷の診断性の評価などを通じて、地震後において必要な耐震性を確保できるための情報を提供し、人的被害や経済的被害に関わる損傷が目視調査で見過ごされる可能性があるという課題を明らかにした。そして、特に間仕切り壁において課題となっていることを示し、その解決に向けた展望について説明した。

9章では、研究の総括、研究の結論、研究のその他の成果、そして今後の課題について述べる。

9.1. 研究の総括

9.1.節では、本研究の総括として、各章の概要を示す。

1章 序論

建物において間仕切り壁や外壁などの内外装壁は、断熱性など住環境の快適性を確保する上で重要である。その一方で、天井や構造部材と比較して、内外装壁は耐震性の検討が遅れており、地震による内外装壁の損傷の中には、経済的被害や人的被害をもたらすものもある。そこで、本研究では、内外装壁の耐震性の向上を目指し、建物の応答に対する、地震による内外装壁の損傷や損傷がもたらす被害について、地震後に行われる損傷の診断の観点を含めて明らかにすることを目的とした。研究の主な方法は、実建物を模した試験体を用いた4つの実大実験と、実験で観察された損傷に対して行う損傷がもたらす被害や診断の観点を含む評価とした。

2章 地震被害調査などから見る内外装壁の耐震性

2章では、地震被害調査で観察された内外装壁の損傷と、各種文献に記載された内外装壁に求められる耐震性との比較を通じて、内外装壁の耐震性を設計者が把握できていないことを示した。更に、天井において目視調査で容易に確認できない範囲の損傷が見過ごされた実例の紹介を通じて、内外装壁においても見過ごされる損傷が存在しうることを示した。

3章 内外装壁の耐震性に関する既往研究に基づく課題の検討

3章では、内外装壁の耐震性に関する既往研究の調査を通じて、地震による内外装壁の損傷に関しては、地震時の建物の応答の中でも壁の面内方向の層間変位 ($1/200\text{rad} \sim 1/50\text{rad}$) との対応関係が重要であることを示した。また、地震による内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係について、既往研究では下地まで含めた検討や構造部材とセットでの検討が少ないといった課題があることを示し、十分に整理されていないことを示した。

4章 内外装壁の実大実験の概要

4章では、3章の内容を踏まえて計画した、4つの実大実験の概要について説明した。実験①と実験②は、鉄骨骨組にLGS間仕切り壁、ALC外壁、ドア、窓を鉄骨骨組に設置した試験体を用いて、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位との対応関係を明らかにすることを目的とした。実験③は、LGS間仕切り壁とドアをRC造の架構(含むRC壁)に設置した試験体を用いて、内外装壁の損傷と異種の構造部材の壁の面内方向の層間変位との対応関係を明らかにすることを目的とした。実験④は、窓をRC骨組に設置した試験体を用いて、窓の損傷と壁の面内方向の層間変位と慣性力との対応関係を明らかにすることを目的とした。

5章 内外装壁の損傷の評価

5章では、実大実験で観察された計158の損傷に対して、損傷の内容の整理、発生時の建物の応答の整理、発生位置の整理、原因の考察を通じて、内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした。また、内外装壁の損傷の発生に構造部材の種類が与える影響や慣性力が与える影響を明らかにした。

6章 内外装壁の被害の評価

6章では、実大実験で観察された損傷について、損傷がもたらす被害の程度の評価を通じて、内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした。具体的には、最大層間変形角 $1/67\text{rad}$ 以上ではドアや窓の損傷に起因する人的被害が発生しうることや、最大層間変形角 $1/50\text{rad}$ 以上では LGS 間仕切り壁の損傷に起因する人的被害が発生しうることなどを示した。

7章 内外装壁の診断の観点を含む評価

7章では、実大実験で観察された損傷について、診断の難易度の評価を行い、6章の内容と組み合わせることを通じて、内外装壁の損傷と損傷がもたらす被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係を明らかにした。更に、中地震（最大層間変形角 $1/200\text{rad}$ 想定）においては、内外装壁は最低限の耐震性を有しているが、目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の診断が課題になることや、大地震（最大層間変形角 $1/50\text{rad}$ 想定）においては、外壁は最低限の耐震性を有しているが、ドアの耐震性が課題になること、地震後に利用の再開が急がれる建物では窓と間仕切り壁の耐震性も課題になること、そして、特に間仕切り壁に関しては目視調査で容易に確認できない範囲の損傷の診断が課題になることなど、診断の観点を含めた内外装壁の耐震性の課題を示した。

8章 内外装壁の損傷の診断方法の展望

8章では、周辺分野の研究状況の調査などを通じて、7章で示した課題の解決に向けた地震による内外装壁の損傷の新しい診断方法の構築の方策を示した。具体的には、地震による構造部材の損傷や経年劣化による内外装材の損傷の診断方法で採用されている技術の調査を通じて、地震による内外装壁の損傷の診断方法への応用の可能性と、応用に向けた課題を示した。

9.2. 研究の結論

9.2節では、本研究を通じて結論として導かれたことについて説明する。

まず、本研究の目的を再掲する。

- ・内外装壁の耐震性について設計者が把握できるようにすることと、診断に関する課題の明確化と解決を通じ、地震後を含めた内外装壁の耐震性の確保を目指し、地震による内外装壁の損傷や損傷がもたらす被害について、地震後に行われる損傷の診断の観点を含めて明らかにする。

また、具体的な目的を以下とした。

- ・実建物を模した試験体を用いた実大実験を通じて、内外装壁の損傷と、壁の面内方向の層間変位（ $1/200\text{rad}$ - $1/33\text{rad}$ ）を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにする。
- ・実験で観察された損傷について、損傷がもたらす被害や診断の観点を含む評価を通じて、損傷や損傷がもたらす被害と建物の応答との対応関係を地震後に行われる損傷の診断の観点を含めて明らかにする。

この目的に対する本研究の結論について説明する。

損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係について

内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係について、本研究の成果を踏まえて結論を述べる。

まず、中地震（最大層間変形角 $1/200\text{rad}$ 想定）に対して、LGS 間仕切り壁に代表される内壁は、無開口の平坦な壁では局所的なシーリング材の切れなどが発生し、開口部を有する壁では開口部角部からの上張りボードのひび割れが発生し、梁から持ち出した壁では袖壁の鉛直軸回りの回転に伴う下張りボードのひび割れが発生することが考えられる。これに対して、ALC 外壁に代表される外壁や、ドア、窓に関しては除荷時に残留する損傷は殆ど発生しないことが考えられる。

次に、大地震（最大層間変形角 $1/50\text{rad}$ 想定）に対して、LGS 間仕切り壁に代表される内壁には、無開口の平坦な壁や開口部を有する壁では上張りボードの面外方向への変位や下張りボードのビス穴の拡大などが発生し、袖壁の鉛直軸回りの回転に伴う梁から持ち出した壁では下地の接合部の損傷が発生することが考えられる。ALC 外壁に代表される外壁においても、開口部周辺のパネルのひび割れなどの発生が考えられる。ドアについては、除荷

時も開閉機能の低下が残留し扉を開けにくくなることが考えられる¹。窓については、サッシの変形やガラスのひび割れなどの発生が考えられる。また、地震による間仕切り壁やドアの損傷について検討する上では、内外装壁を設置する構造部材の種類や挙動の影響も考慮する必要があり、地震による窓の損傷について検討する上では、壁の面内方向の慣性力の影響も考慮する必要があると考えられる。

被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係について

内外装壁の損傷がもたらす被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係について、本研究の成果を踏まえて結論を述べる。

中地震（最大層間変形角 1/200rad 想定）に対しては、人的被害をもたらす損傷は殆ど発生しないと考えられる。唯一、開口部を有する間仕切り壁には、耐震性を低下させる可能性がある損傷の発生が想定されるため、地震後には修復などの対応が必要であると考えられる。間仕切り壁には、その他にもボード材のひび割れなど経済的被害をもたらす損傷が発生することが考えられる。次に、大地震（最大層間変形角 1/50rad 想定）に対しては、人的被害をもたらす損傷の発生も考えられる。例えば、間仕切り壁のボードが脱落手前の状態になり余震の際に脱落に至る可能性や、ドアの開閉機能の低下により避難経路が阻害される可能性が考えられる。更に大きい層間変位（最大層間変形角 1/33rad 想定）に達する建物では、間仕切り壁のボードの脱落や、外壁パネルや窓ガラスが脱落手前の状態になる可能性も考えられる。

診断の観点を含めた対応関係について

内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含めた対応関係について、本研究の成果を踏まえて結論を述べる。中地震（最大層間変形角 1/200rad 想定）そして特に大地震（最大層間変形角 1/50rad 想定）に対して、床や地面からの目視調査で容易に確認できる範囲だけでなく、容易に確認できない範囲にも内外装壁の損傷が発生する可能性が高いと考えられる。なお、外壁、ドア、窓に関しては、容易に確認できる範囲の損傷がもたらす被害の程度の方が、容易に確認できない範囲の損傷がもたらす被害の程度よりも深刻であると考えられる。つまり、目視調査に基づき、居室の利用再開の可否の判断を下してもよいと考えられる。その一方で、間仕切り壁については、逆の場合が存在する可能性が考えられる。すなわち、間仕切り壁は見た目より深刻という可能性が考えられる。

¹ ドアや窓の開閉機能の低下については、正確には経験した層間変位の最大値ではなく、除荷時の残留値が関係している。ドアについては、本研究で実施した実験において除荷時に開閉機能の低下が発生した時は、残留値が層間変形角 1/200rad 程度もしくはそれ以上であった（図 5-8 と図 5-14 参照）。

本研究により期待される効果

本研究では、地震による内外装壁の損傷や、損傷がもたらす被害について、診断の観点を含めて、壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を実大実験と損傷の評価を通じて明らかにした。本研究は 4 つの実大実験の結果をベースとしたケーススタディー的な研究ではあるが、実験は、実際の建物を再現した構造部材に内外装壁を公共工事標準仕様書に準拠して施工した試験体に対して実際の地震動を模した加力を行ったものである。また、対象として取り上げた LGS 間仕切り壁、ALC 外壁、ドア、窓の仕様は、中低層の非住宅の建物で一般的に採用されているものである。すなわち、本研究で明らかにした内容と結論は、中低層の非住宅の建物に一般的に適用できると考えられる。このことを踏まえて、ここでは本研究により期待される効果について説明する。

本研究により期待される効果として、内外装壁の耐震性の確実かつ効率的な確保の実現と、下地なども含めた地震による内外装壁の損傷の確実な検出の実現が挙げられる。図 9-1 に本研究により期待される効果と、効果に至る過程を示す。それぞれについて説明する。

内外装壁の耐震性の確実かつ効率的な確保の実現が期待されることについて

本研究を建物の設計者が参照し、地震時に想定される建物の応答²と対応させることで、地震時に発生が想定される内外装壁の損傷と被害について検討することができる。更に、想定される内外装壁の損傷と被害を建物に求められる耐震性と比較することで、内外装壁の追加の耐震対策の必要性について検討できる。そして、この検討の結果として耐震対策が講じられることで、内外装壁の耐震性が確実かつ効率的に確保されることが期待される。

また、例えば、本研究で行った層間変形角 1/200rad と 1/50rad に対する損傷や被害の評価の結果から図 9-2 に示すような内外装壁の追加の耐震対策の必要性の検討が行えるフローチャートを作成することができる。

以上より、本研究により内外装壁の耐震性の確実かつ効率的な確保の実現が期待される。

地震による内外装壁の損傷の確実な検出の実現が期待されることについて

本研究を建物の管理者が参照することで、地震後に行われる目視調査で内外装壁の損傷や被害を見逃す可能性があることを把握でき、目視調査の不確実さと目視調査以外の診断方法の導入の必要性について検討できる。そして、この検討の結果として、今後の研究により確立が期待される新しい診断方法が適切に導入されることで、地震による内外装壁の損傷の確実な検出が期待される。また、例えば、本研究で行った層間変形角 1/200rad と 1/50rad に対する損傷や被害の診断の観点を含む評価の結果から図 9-3 に示すような目視調査以外の診断方法の導入の必要性の検討が行えるフローチャートを作成することができる。

以上より、本研究により地震による内外装壁の損傷の確実な検出の実現が期待される。

² 1 章でも述べた通り、地震波の設定と動的解析が必要となるが、地震に対する建物の応答は算出可能である。

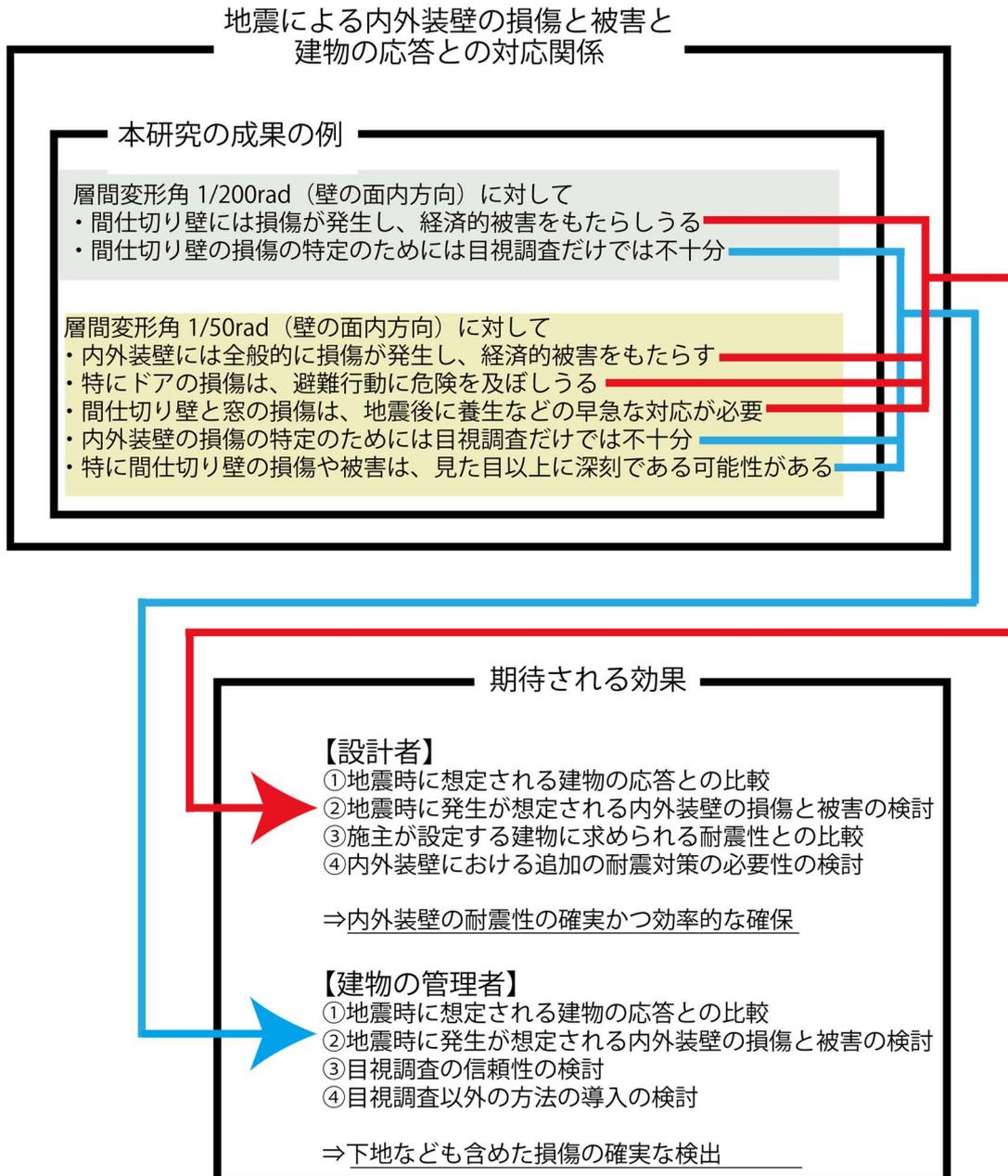


図 9-1 本研究により期待される効果と効果に至る過程

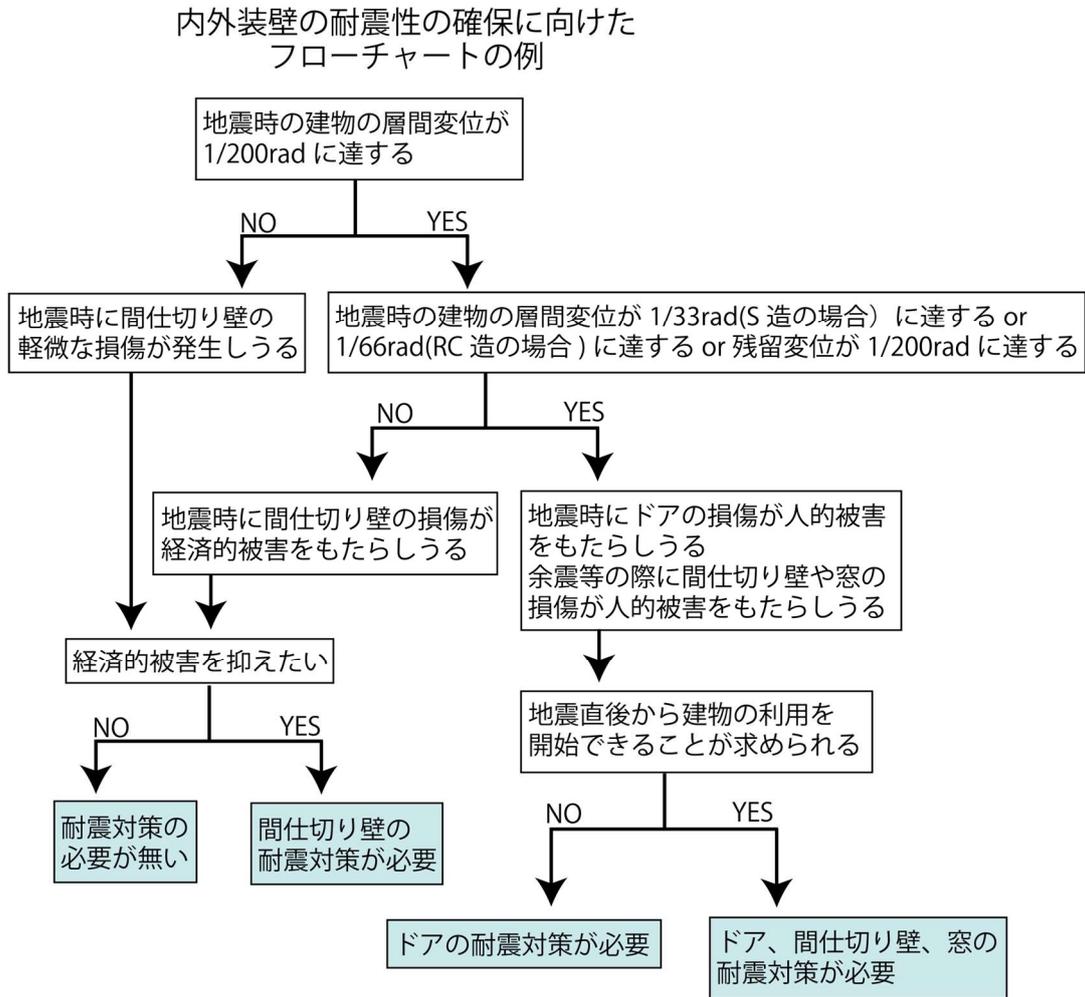
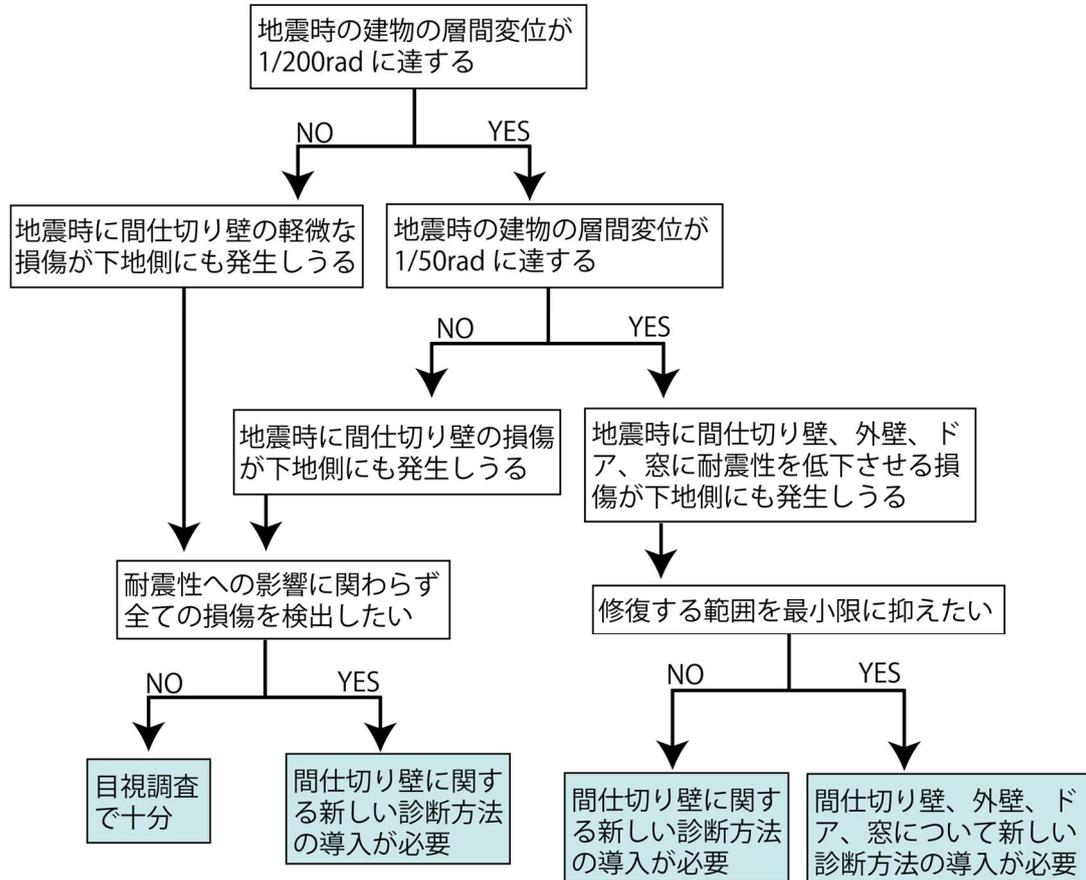


図 9-2 本研究の内容に基づき作成した
内外装壁の追加の耐震対策の必要性の検討に向けたフローチャートの例



※新しい診断方法は確立されていない

図 9-3 本研究の内容に基づき作成した
目視調査以外の診断方法の導入の必要性の検討に向けたフローチャートの例

また、本研究ではこれまで検討がされなかった内外装壁の損傷の診断に着目することで、内外装壁の耐震性について診断の観点からの新たな課題を明らかにした。今後は、この課題の解決策となる地震による内外装壁の損傷の新しい診断方法の構築が求められる。そこで、本研究では既存の技術の応用可能性などについて論じ、診断方法の構築に向けた方策を示した。

本研究で成しえたこと

本研究では、内外装壁の耐震性について設計者が把握できるようにすることと、診断に関する課題の明確化と解決を通じ、地震後を含めた内外装壁の耐震性の確保を目指した。そして、本研究では、実建物を模した試験体を用いた実大実験と損傷の被害度の評価を通じて、地震による内外装壁の損傷と損傷がもたらす被害について、壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることで、耐震性について設計者が把握し確保できるための情報を提供した。そして、ドア、間仕切り壁、窓の耐震性の向上が課題であることを示した。なお、耐震性の向上のためには、1章で説明したように、内外装壁の剛性もしくは追従性を上げることや、構造部材の剛性と強度を高めることなどが考えられる。更に、損傷の診断性の評価などを通じて、地震後において必要な耐震性を確保できるための情報を提供し、人的被害や経済的被害に関わる損傷が目視調査で見過ごされる可能性があるという課題を明らかにした。そして、特に目視調査に代わる診断方法の構築が間仕切り壁において課題であることを示し、その解決に向けた展望について説明した。

本研究で得られた成果を図 9-4 にまとめた。

以上、本研究は、建物の設計者が内外装壁の耐震性について把握できるようにすること及び診断に関する課題の明確化と解決に向けた方策を立てることを成しえ、内外装壁の耐震性の確実かつ効率的な確保の実現と地震による内外装壁の損傷の確実な検出の実現が期待される成果を導き出すことで、内外装壁の耐震性の向上に貢献できた。

ただし、本研究では地震時の建物の応答の中でも壁の面内方向の層間変位を中心に扱った。そのため、今後は、内外装壁の損傷や被害と壁の面外方向の層間変位や慣性力といった建物の応答との対応関係の検討が求められる。このことについては9.4.節でも説明する。

内外装壁	層間変形角	
	1/200	1/50
ドア		
窓		
LGS 無開口		
LGS 開口壁		
ALC 開口壁		
LGS 持ち出し壁		
ALC 無開口		

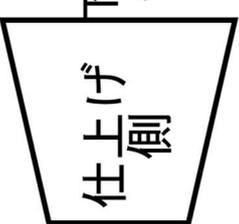
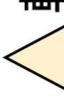
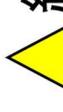
	
 無被害	 軽微な被害
 経済的被害	 人的被害手前
 人的被害	

図 9-4 本研究の成果のまとめ

- ドアや窓は、層間変形角 1/50 経過後は、残留変形により開閉機能が低下するため、人的被害を発生させると評価された。
- LGS 間仕切り壁は、ボードの脱落による人的被害の発生恐れがあると評価された。
- 更に、梁から持ち出した LGS 間仕切り壁は、下地側、すなわち、見えない範囲の被害のほうが深刻であると評価された。
- 以上より、結論として、地震時に層間変形角 1/50rad を超えることが想定される建物においては、耐震性の高い開口部の設置が必要であり、LGS 間仕切り壁など、複数の面材や下地からなる壁は目視以外の診断方法の構築が必要である。

9.3. 研究のその他の成果

9.3.節では、本研究で得られたその他の成果について説明する。

地震被害調査の報告

内外装壁の耐震対策の研究開発のためには、まずは内外装壁の損傷の実態について把握することが重要である。しかし、これまでは構造部材の耐震性の確保が優先されてきた背景から、内外装壁の地震被害に関する情報の報告は少ない。そのため、本研究の2.1.節で説明した内外装壁の地震被害調査の内容は、内外装壁の耐震性の向上に向けた成果と言える。

内外装壁の損傷の原因の考察

実験①のLGS間仕切り壁において、無開口の平坦壁（壁A）と開口部を有する壁（壁C）の損傷形態を比較すると、無開口の平坦壁（壁A）では上張りボードのひび割れが比較的少なかったが、面外方向への傾斜が顕著で最終的に脱落に至った。これに対して、開口部を有する壁（壁C）では上張りボードのひび割れが顕著であったが脱落までは至らなかった。実験③でも同じ傾向が見られた。上張りボードの脱落がもたらす被害の方が深刻であるため、損傷形態としては開口部を有する壁（壁C）の方が好ましいと捉えることができる。5章では内外装壁の損傷の原因を考察した結果、上張りボードの脱落の原因は上張りボードと下張りボード間の接着力の低下と、壁の対角線方向に加わる圧縮力と考察された。一方で、開口部を有する壁（壁C）は開口部の存在が原因で上張りボードのひび割れが発生したと考察された。ただし、この上張りボードのひび割れにより壁の対角線方向に加わる圧縮力の影響を解消できたため、上張りボードの脱落を防げたことと捉えることができる。このことを踏まえると、上張りボードの脱落を防ぐ方策として、ひび割れが発生しやすい機構にしておくことが考えられる。また、構造部材とのクリアランスの量を大きくとることで、壁の対角線方向に加わる圧縮力の影響を低下させることも有効と考えられる。ただし、クリアランスを設ける分の密閉性の低下を別の方法でカバーする必要がある。

また、実験①の梁から持ち出した壁（壁D,E,F）は、壁D（加力方向に対して直交に設けられた壁）の鉛直軸回りの回転に伴う損傷が観察された。この原因として、層間変位に対して壁E（加力方向に対して水平に設けられた壁）が追従しきれなかったことが考察された。このことを踏まえると、梁から持ち出した壁の損傷を防ぐ方策として、壁Eの先行ピースや壁Dの上部のランナーの厚みを増すことや接合部のピンの量を増やし剛性を高めることで、壁Eの層間変位に対する追従性を高めることが考えられる。また、持ち出し部分の長さを短くし、回転量を抑えることでも損傷を軽減化できると考えられる。もしくは、壁B（壁

Dと同様に加力方向に対して直交に設けられた壁だが、上部が天井スラブに接合されている壁)のように、上部を天井スラブに固定し、強制的に層間変位に追従させることも損傷を抑える上では有効だと考えられる。

異なる構造形式が損傷に与える影響の検討

実験①では、鉄骨造のラーメンにLGS間仕切り壁を設置したものを試験体とした。これに対して、実験③では、RC造のラーメンと壁で構成される架構にLGS間仕切り壁を設置したものを試験体とした。実験で観察された損傷の中には、実験③でのみ観察された損傷も存在した。そして、該当する損傷の原因は、RC壁の残留変形や、RC梁のコンクリート部分の破壊など、RC造に設置されたLGS間仕切り壁に特有のものだと評価された。この知見を活かし、例えば、RC壁とLGS間仕切り壁の間にクリアランスを多めに設けてRC壁の残留変形の影響を吸収させることで、内外装壁の耐震性を上げることができることが示唆される。

慣性力が窓の損傷の発生に与える影響の検討

窓の地震による損傷には、枠の変形、すなわち層間変位が大きく影響するとされている。これに対して、実験④では、比較的大きい慣性力が作用した窓と、比較的大きい層間変位が作用した窓を用意し、それぞれに発生した損傷を比較検討した。その結果、双方の窓に発生した損傷には異なる点が見られた。そして、損傷の中には、発生 of 主な原因が慣性力だと評価される損傷が存在した。この知見を活かし、例えば、慣性力が大きくなることがわかっている上層の階に取り付ける窓は下枠と縦枠間のビスを増やし接合部の強度を上げ、層間変位が大きくなることが分かっている下層の階に取り付ける窓はガラスのエッジクリアランスを多くとるなど、原因となる現象に着目した耐震対策を講じることで、内外装壁の耐震性を効率的に向上させられることが示唆される。以上より、本研究で行った慣性力が窓の損傷の発生に与える影響の分析は、内外装壁の耐震性の向上に向けた成果と言える。

以上より、本研究で行った内外装壁の損傷の原因の考察(含む、異なる構造形式であることや慣性力が与える影響の検討)は、内外装壁の損傷を防止させる方策の開発に発展させられる点において、内外装壁の耐震性の向上に向けた成果と言える。

地震による内外装壁の損傷の評価方法の構築

本研究では、6章と7章で説明したように、地震による内外装壁の損傷について、被害と診断の評価を行った。具体的には、損傷がもたらす被害の程度（被害度）と、損傷の診断の難易度（診断性）に着目した評価方法を構築し、実践した。本研究で構築した評価方法は、今後行われる実大実験にも適用でき、観察された損傷を整理し、知見を蓄積する上での指針となりうる。更に、耐震性の高い内外装壁の開発を行うメーカーや、診断方法の開発を行うメーカーが、製品の性能を表す上での指標として、本研究で構築した評価方法を用いることも考えられる。以上より、本研究において地震による内外装壁の損傷の評価方法の構築を行ったことは、内外装壁の耐震性の向上に向けた成果と言える。

地震による内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件の整理

本研究では、8.3節で論じたように、地震による内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件を整理し、求められる条件に対する診断方法の課題について考察した。整理した条件と考察した課題は、今後、各種メーカーが内外装壁の損傷の診断方法に関する研究開発を行う上での手がかりになると言える。逆に、今後研究開発が進み、診断方法の選択肢が増えた暁には、本研究で整理した条件が、診断方法の特性を表す指標として活用されることが期待される。以上より、本研究において地震による内外装壁の損傷の診断方法に求められる条件の整理を行ったことは、内外装壁の耐震性の向上に向けた成果と言える。

地震後に内外装壁の損傷から建物が経験した最大層間変形角を推定する手法について

本研究では、実建物を模した試験体を用いた実大実験と損傷の被害度の評価を通じて、地震による内外装壁の損傷と損傷がもたらす被害について、壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにすることで、耐震性について設計者が把握し確保できるための情報を提供した。更に、損傷の診断性の評価などを通じて、人的被害や経済的被害に関わる損傷が目視調査で見過ごされる可能性があるという課題を明らかにすることで、地震後において必要な耐震性を確保できるための情報を提供した。つまり、本研究では、設計者が算出した地震時の建物の応答を用いて、地震時に発生が想定される内外装壁の損傷や損傷がもたらす被害について、その診断の難易度を含めて把握できる方法を提供したことになる。

ここで、本研究を逆の用途で用いることも考えられる。つまり、本研究の内容を参照することで、地震後に目視観察などで把握された内外装壁の損傷から、地震により建物が経験した最大層間変形角などを推定できる可能性も考えられる。ここでは、この用途としての本研究の有用性について論じる。

本研究で実施した実験②では、層間変形角 $1/50\text{rad}$ を境に ALC 外壁の開口部周囲のひび割れが多数発生した。また、実験①と実験③では、層間変形角 $1/50\text{rad}$ を境に平坦な無開口壁において上張りボードの面外方向への傾斜が発生した。また、実験②と実験③では、残留層間変形角が $1/200\text{rad}$ 以上になるとドアの開閉機能が低下する傾向が見られた。このように、地震後に目視観察などで把握された内外装壁の損傷から、地震により建物が経験した最大層間変形角などを推定できることが示唆される。

また、本研究を通じて、LGS 間仕切り壁については、無開口の平坦壁、開口部を有する壁、梁から持ち出した壁などにおいて、壁の面内方向の層間変位に対する損傷の発生パターンが分かってきた。この発生パターンから、損傷が発生しうる箇所の絞り込みができると考えられる。

ただし、この有用性の検証のためには、より多くの実大実験を重ね、内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係に関するデータを重ねることが必要である。また、施工不良や経年劣化が与える影響の検討も必要である。

9.4. 今後の課題

9.4.節では、内外装壁の耐震性の向上に向けた今後の課題について説明する。

更なる実大実験の実施

本研究では、地震による内外装壁の損傷には、壁の面内方向の層間変位の影響が大きいとされていることを踏まえ、地震による内外装壁の損傷や損傷をもたらす被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係を明らかにした。また、本研究では地震による窓の損傷には、壁の面内方向の慣性力の影響もあることを示した。その一方で、地震による内外装壁の損傷には、壁の面外方向の慣性力の影響もあるとされている。特に2.1.節で紹介したような間仕切り壁の面外方向への倒れや窓の脱落といった損傷は本研究で実施した実大実験では観察されなかった。ただし、本研究で実施した実大実験では、倒れや脱落の原因となりうる損傷は観察された。つまり、今後は、本研究で実施したような壁の面内方向の層間変位や慣性力により損傷が発生した状態で、面外方向の層間変位や慣性力を与えたときの状況に関する検証が必要であると考えられる。なお、外壁に関して面外方向の力について考慮する際は、風圧力に対する設計との議論も必要である³。

また、実験①②③においては、同じ層間変位を繰り返す加力としたが、繰り返す加力に対する損傷の進展などは殆ど見られなかった。この原因として、最初の加力の際に損傷などにより部材間や部材無いで“遊び”が生まれ、この遊びにより繰り返す加力による影響は吸収されたことが考えられる。ただし、更に、LGS間仕切り壁の上張りボードの面外方向への傾斜といった損傷により、上張りボードと下張りボードの間には大きい“遊び”が生まれ、接合形態は面的な接着から点的な接着に変わったと捉えることができる。この状態では、慣性力による影響が大きくなる可能性も考えられる。すなわち、層間変位の繰り返しについて更に検討を深める必要性は低いことが考察されるが、層間変位を与えた後、もしくは同時に慣性力を与えたときの検討の必要性はあることが考察される。

また、本研究では、ベースとなる実験①、②に対して、RC造であることが損傷などの発生に与える影響の把握を目的とした実験③や、慣性力が損傷などの発生に与える影響の把握を目的とした実験④を行った。

実験③にのみ見られたLGS間仕切り壁の損傷、すなわちRC造であることが影響したLGS間仕切り壁の損傷としては、振れ止めの変形、下張りボードの面外方向への傾斜、上部のランナーと梁を接合する打ち込みピンの抜けなどがあった。ただし、いずれの損傷も層間変形

³ ただし、面外方向は慣性力よりも設計風圧力のほうが大きいことが通常であるため、面外方向の慣性力についての検証は不要ということも考えられる。

角 $1/50\text{rad}$ 以上で発生した損傷であった。すなわち、RC 造の建物は層間変形角 $1/50\text{rad}$ 以上に達しないという前提のもとにおいては、LGS 間仕切り壁を RC 造に設置した試験体を用いた実験は実施する必要は得に無く、LGS 間仕切り壁の損傷の情報収集の目的のためには LGS 間仕切り壁を鉄骨造に設置した試験体を用いた実験で十分であることが示唆される。

また、ドアの開閉機能の低下については、ドアを鉄骨造に設置した試験体を用いた実験②に対して、ドアを RC 造に設置した試験体を用いた実験③の方が早い段階で発生することとなった。両実験において、ドアの開閉機能の低下が層間変形角 $1/200\text{rad}$ を境に発生することは共通していた。しかし、除荷時に着目すると、ドアを鉄骨造に設置した試験体を用いた実験②では最大層間変形角 $1/33\text{rad}$ の除荷時までドアの開閉機能の低下が見られなかったのに対して、ドアを RC 造に設置した試験体を用いた実験③では最大層間変形角 $1/66\text{rad}$ の除荷時にドアの開閉機能の低下が見られた。これには、RC 造が残留変形を生じやすく、早い段階で残留変形が $1/200\text{rad}$ 以上に達したことや、RC 造の残留変形に伴う層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に発生した扉枠の変形などが関係していると考えられる。ただし、LGS 間仕切り壁と同じく、RC 造の建物が層間変形角 $1/100\text{rad}$ あるいは $1/66\text{rad}$ 以上に達しないという前提のもとにおいては、LGS 間仕切り壁を鉄骨造に設置した試験体を用いた実験で十分であることが示唆される。

層間変位のみ与えた実験②と慣性力も与えた実験④の窓の損傷を比較すると、層間変形角 $1/200\text{rad}$ 未満の範囲においても、損傷の程度に差が見られる。このことから、窓については層間変位だけではなく、慣性力も与える振動台実験などが必要となることが示唆される。

以上より、今後は更なる実大実験の実施による、地震による内外装壁の損傷や被害と建物の応答との対応関係の検討が課題である。ただし、個人で行える加力実験には限りがある。そのため、各研究者や、メーカー、ゼネコンなどが個別に実施する実大実験を利用させてもらうことが重要になる。この実現のためには、実験で観察された損傷について、用語を統一したうえで、写真や図示などで損傷に関する情報を公開してもらうことが必要になる。

その一方で、本研究で実施した実大実験では、無開口の平坦な LGS 間仕切り壁、開口部を有する LGS 間仕切り壁、梁から持ち出した LGS 間仕切り壁は壁の面内方向の層間変形角に対して人的被害をもたらさうる損傷が発生した。そのため、今後、LGS 間仕切り壁の実験を行うにあたっては、これらの条件の試験体での検証が重要となり、知見を蓄積することが求められる。その一方で、実験①の加力方向に直交しかつ上部が上階スラブに接合された LGS 間仕切り壁（壁 B）は、大地震における発生のみ想定される層間変形角 $1/50\text{rad}$ に対しても被害を殆どもたらさない損傷のみ発生した。すなわち、今後、LGS 間仕切り壁の実験を行うにあたっては、この条件の試験体での検証の優先度は低いと言える。また、実験②の無開口の平坦な ALC 外壁（壁 A）についても同じことが言える。

既往研究による成果との比較

本研究では、3.1節で地震による内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係について実大実験に基づく報告のある既往研究について調査した結果について説明した。既往研究では、損傷の位置に関する報告が少ないことや、表記にばらつきがあることを踏まえ、本研究では、独自の实大実験を計画し、実施した。本研究で実施した実大実験の結果と既往研究により報告された内容には、整合する部分がある。例えば、LGS 間仕切り壁の上張りボードの脱落については、本研究を含め層間変形角 $1/50\text{rad}$ 以上の範囲でしか発生が報告されていない。また、ALC 外壁のひび割れについては、本研究を含め層間変形角 $1/100\text{ rad}$ から $1/50\text{ rad}$ にかけての発生が特に報告されている。更にドアの開閉機能の低下については、本研究を含め層間変形角 $1/200\text{rad}$ を境に発生し、層間変形角 $1/50\text{rad}$ の除荷時に残留することが報告されている。

その一方で、LGS 間仕切り壁の上張りボードのひび割れなどについては、本研究の結果と既往研究により報告された内容が必ずしも一致していない。更に、既往研究の中でも一致していない。この背景には表記にばらつきがあることがまず考えられる。つまり、行った目視調査の精度に差があるため、ひび割れを認識したタイミングが異なる可能性がある。本研究では、層間変形角ごとに機械的に撮影した写真を活用し、損傷が発生したタイミングをほぼ正確に捉えられている。その一方で、損傷の把握を主たる目的としない研究に関しては、目視調査の精度が低い可能性もある。その他に、内外装壁の寸法やボード材の種類など細かい仕様の違いが損傷の形態に表れている可能性が考えられる。そのため、地震による内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係について完全に明確にするためには、要素実験の成果などと組み合わせるなど、更なる検討の必要がある。

新しい診断方法の確立

本研究では、地震後に行われる損傷の診断においては、地面や床からの目視調査では不十分である場合があることを示した。そして、この解決に向けた、計測機器を事前に建物に設置しておき判断が自動で行われる診断方法の有用性について論じた。ただし、この実現には、損傷と計測結果の対応関係を明らかにし、閾値を設定することが今後の課題である。例えば、本研究では、内外装壁の損傷と加速度センサの計測結果の対応関係について検討した（付録12）が、その他のセンサについても同様の検討を行うこと求められる。また、普及のためには、地震による損傷の診断以外の用途を示すことや、メンテナンスの頻度を極力少なくすることなども課題である。

そして、壁に計測機器を設置する方法以外にも、ドローンなど遠隔化が期待される技術、赤外線サーモグラフィなど目視による確認が容易でない範囲の損傷の状態まで把握できることが期待される技術、画像診断といった自動化が期待される技術など、他の技術を用いた診断方法の検討も並行して行われることが望ましい。

損傷と被害の関係性の明確化

本研究では、内外装壁の被害を評価するため、損傷が内外装壁の性能に与える影響を分析した。ただし、定量的な分析（例えば、空調性能が何%低下したのか）は行わず、空調性能の低下が考えられるのか、考えられないのかという判断に留めた。実際には、ひび割れの幅や長さによって影響の程度が変わることが想定される。そのため、今後は、部材実験などを通じ、損傷と被害の関係性を定量的に評価することが求められる。

参考文献一覧

ALC 協会. (2013). ALC パネル取付け構法標準・同解説 平成 25 年版.

ALC 協会. 施工事例. 参照日: 2022 年 7 月 26 日, 参照先: <http://www.alc-a.or.jp/gallery.html>

ALC 協会. 取り付け構法. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: <http://www.alc-a.or.jp/installation.html>

BoukampJ. (1961). BEHAVIOR OF WINDOW PANELS UNDER IN-PLANE FORCES. Bulletin of the Seismological Society of America, 51(1), 85-109. doi:10.1785/BSSA0510010085

Department of Homeland Security / Emergency Preparedness and Response Directorate / Federal Emergency Management Agency / Mitigation Division / Washington, D.C. (2003 年 1 月). HAZUS-MH MR1 ADVANCEED ENGINEERING BUILDING MODULE TECHNICAL and USER' S MANUAL. 参照日: 2022 年 7 月 25 日, 参照先: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-09/fema_hazus_advanced-engineering-building-module_user-manual.pdf

DEVICESANALOG. ADXL355 Overview. 参照日: 2022 年 07 月 25 日, 参照先: <https://www.analog.com/jp/products/adxl355.html>

FLIRTELEDYNE. FLIR E85. 参照日: 2022 年 7 月 25 日, 参照先: <https://www.flir.jp/support/products/e85/#Documents>

Tenderan Randy, 上瀧敬太, 石田孝徳, 山田哲, 清家剛, 吉敷祥一, 長谷川隆, 伊山潤, 八木尚太朗, 櫻田頌吾. (2019). Experimental Study on Full Scale Steel Frame Considering Multiple Strong Earthquakes Part 2: Loading history and measurement plan. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 1189-1190.

Tenderan Randy, 上瀧敬太, 石田孝徳, 八木尚太朗, 吉敷祥一, 伊山潤, 長谷川隆, 清家剛, 山田哲. (2020). Cyclic Loading Test of Full-Scale Steel Frame with ALC Exterior Wall (Part 1: Outline of the test and experimental progress) . 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1183-1184.

Trevor Zhiwing YeowKusunoki, Izumi Nakamura, Yo Hibino, Satoru Fukai, Walid Ahmad SafiKoichi.

(2020). E-Defense Shake-table Test of a Building Designed for Post-disaster Functionality. *Journal of Earthquake Engineering*. doi:10.1080/13632469.2020.1865219

相子恒夫, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男. (1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その 5 建具・シーリング材の状況. *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 1998, 115-116.

安達和男. (2006). 設計実務者からみた建物と非構造部材 (非構造部材の耐震設計・施工の安全性を問う) . *建築技術*, 680, 102-103.

Ishida Takanori, Tenderan Randy, Kohtaki Keita, Kishiki Shoichi, Iyama Jun, Hasegawa Takashi, Seike Tsuyoshi, and Yamada Satoshi. (2021). Experimental study on full-scale steel moment-resisting frames with nonstructural walls subjected to multiple earthquakes. *Engineering Structures*, 242. doi:10.1016/j.engstruct.2021.112549.

石原直, 田口尚, 石田琢志, 渡辺貴樹, 渡壁守正, 鈴木正裕, 長谷川隆, 五十嵐規矩夫. (2014). 中間梁に支持された 2 段積み ALC 間仕切壁の地震時面外挙動に関する実験 : その 1 振動台実験の計画と ALC パネルの強度. *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 2014, 445-446.

磯田充樹, 沖佑典, 巽信彦, 吉敷祥一, 石原直. (2022). 面内変形と面外慣性力を受ける軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の損傷限界. *2022 年度日本建築学会関東支部研究報告集*, 92, 181-184.

伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男. (1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その 1 実験概要. *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 1998, 107-108.

稲井慎介, 手塚純一, 成田修英. (2018). 地震力を負担する乾式間仕切り壁の剛性に関する実験的研究. *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 1093-1094.

伊山潤, 松尾真太郎, 吉敷祥一, 石田孝徳, 東康二, 城戸將江, 岩下勉, 澤田樹一郎, 山田哲, 清家剛. (2018). 熊本地震で被災した鉄骨造文教施設の被害調査の概要. *日本建築学会技術報告集*, 24(56), 183-188. doi:10.3130/aijt.24.183

伊山潤, 福島佳浩, 八木尚太郎. (2022). 非構造部材のヘルスマonitoring (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術) . *建築技術*, 869, 74-77.

岩崎充実, 仁田佳宏, 渡壁守正, 稲井慎介, 西谷章. (2011). 天井部材についての構造ヘルスマニタリング. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 525-526.

岩崎充実, 仁田佳宏, 渡壁守正, 稲井慎介, 西谷章. (2012). ロボットを用いた天井部材の目視検査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012, 1209-1210.

大枝千秋, 芹沢達, 大和久孝. (1972). はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 : その1. 単窓静加力実験 : 構造. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 47, 513-514.

大枝千秋, 芹沢達, 和泉正哲, 室田達郎. (1972). はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 : その2 実物建物にはめ込んで静的繰り返し変形を与えた場合 : 構造. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 47, 515-516.

大森信次, 寺内伸, 阿知良充. (1989). 層間変形に伴うサッシとガラスのクリアランスの採り方と設計法. 日本建築学会大会学術講演梗概, 1991, 619-620.

加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛. (2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139

金子美香, 神原浩, 田村和夫. (2002). 非構造部材の耐震性に関する一考察. 日本建築学会大会学術講演梗概, 2002, 79-80.

金子美香, 神原浩, 田村和夫. (2003). 1995年兵庫県南部地震の被害調査に基づく非構造部材の耐震性評価. 日本建築学会技術報告集, 9(17), doi:10.3130/aijt.9.563

金子美香, 神原浩, 塩原等, 寺田岳彦, 田村和夫. (2006). 軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験. 2005年度日本建築学会 関東支部研究報告集, 76, 77-80.

川口健一. (2014). 人命保護と安全な天井設計 安全性評価 (安全な天井設計と天井脱落対策技術基準早わかり). 建築技術, 773, 80-81.

川口健一. (2014). 人命保護と安全な天井設計 フェールセーフ (安全な天井設計と天井脱落対策技術基準早わかり). 建築技術, 773, 82-83.

菊地雅史, 小山明男, 小宮岳枝, 小林正人, 中山政則, 横家尚. (2003). ALC 帳壁部材の耐震

安全性に関する基礎的研究：その 1.実験概要および構法の違いによる影響. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003, 195-196.

吉敷祥一.(2018). 乾式間仕切壁の耐震性能を再確認（非構造部材の再確認）. 建築技術, 824, 118-121.

吉敷祥一, 清家剛, 元結正次郎, 輿石直幸.(2018). 軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その 1 研究背景と目的. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1073-1074.

気象庁. 日本付近で発生した主な地震被害（平成 8 年以降）. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/higai/higai1996-new.html>

北代尚稔, 衣笠秀行, 向井智久, 加藤博人, 田尻清太郎, 脇山善夫, 隈澤文俊, 瀧川公策.(2010). 地震による建築物の損傷状況,機能維持に着目した実大試験体実験：その 8 非構造 RC 外壁の計測概要と損傷状態. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 85-86.

桐井製作所. KIRII 耐震天井で探す. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: 桐井製作所: https://www.kirii.co.jp/products/aseismic_ceiling/

桐井製作所. 建築用鋼製壁下地材. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: <https://www.kirii.co.jp/products/wall/steel-wall.html>

隈澤文俊, 脇山善夫, 加藤博人, 向井智久, 田尻清太郎, 安達和男.(2010). 地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験：その 9 間仕切り壁および扉の挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 87-88.

熊本県.(2018). 平成 28 年熊本地震 熊本県はいかに動いたか（初動・応急対応編）. 東京都: ぎょうせい.

倉斗道夫.(2006). カーテンウォール（非構造部材の耐震設計・施工の要点）. 建築技術, 680, 126-129.

上瀧敬太, 石田孝徳, テンデランランディ, 八木尚太郎, 吉敷祥一, 伊山潤, 長谷川隆, 清家剛, 山田哲.(2020). Cyclic Loading Test of Full-Scale Steel Frame with ALC Exterior Wall（Part 2: Load-deformation relationship and ultimate behavior of steel frame）. 日本建築学会大会学術講

演梗概集, 2020, 1185-1186.

上瀧敬太, 石田孝徳, テンデランランディ, 八木尚太郎, 吉敷祥一, 伊山潤, 長谷川隆, 清家剛, 山田哲. (2020). 多数回の地震動を想定した実大鉄骨骨組の実験 (その5: ALC外壁付き骨組の実験概要および実験結果その1). 2020年度日本建築学会関東支部研究報告, 90, 453-456.

上瀧敬太, 石田孝徳, テンデランランディ, 八木尚太郎, 吉敷祥一, 伊山潤, 長谷川隆, 清家剛, 山田哲. (2020). 多数回の地震動を想定した実大鉄骨骨組の実験 (その6: ALC外壁付き骨組の実験結果その2 および考察). 2020年度日本建築学会関東支部研究報告集, 90, 457-460.

幸田雄太, 川口健一, 水本旭洋, 松田裕貴. (2020). 構造材の点検を目的として撮影された写真の差分分析による損傷検知に関する基礎的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1033-1034.

古賀誠一, 山崎之典, 西脇武, 石本貞夫, 品川肇. (1999). 乾式間仕切壁の動的層間変形能の調査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999, 1121-1122.

国土交通省住宅局. (2018年5月). 防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン(新装版). 参照日: 2022年7月22日, 参照先: <https://www.mlit.go.jp/common/001292547.pdf>

国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所. (2019). 既存建築物の非構造部材の耐震診断指針・同解説. 東京都: 日本建築防災協会, 耐震改修支援センター.

国土交通省大臣官房長官官舎部. (2021). (平成25年制定) 官庁施設の総合耐震・対津波計画基準及び同解説 令和3年版. 東京都: 公共建築協会.

国土交通省大臣官房官庁官舎部. (2022年5月10日). 公共建築工事標準仕様書(建築工事編) 令和4年版. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: <https://www.mlit.go.jp/common/001473539.pdf>

国土交通省 国土技術政策総合研究所. 構造ヘルスマニタリング技術の解説資料(案). 参照日: 2022年7月25日, 参照先: http://www.nilim.go.jp/lab/ieg/tasedai/shiryu/100223_2_4_4.pdf

小寺賢, 鈴木弘之, 大宮喜文, 鈴木淳一, 市原嵩紘, 村井亮介, 伊藤卓, 大熊晃一路. (2009).

地震により損傷を受けた乾式間仕切壁の耐火性能：その1：実験概要、観察結果. 2008年度日本建築学会関東支部研究報告集, 79, 549-552.

後藤哲郎, 広沢雅也, 山下一也, 石塚忠行. (1981). 8階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験：その9. ドア耐震性に関する実験概要及結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 56, 1695-1696.

後藤哲郎, 広沢雅也, 山下一也. (1981). 8階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験：その10. ドア耐震性に関する実験結果の検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 56, 1697-1698.

坂本巧, 伊藤弘, 山下武則. (1977). 非耐力壁の層間変位追従性に関する研究 その2：構造系. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 52, 1253-1254.

坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎. (1987). ALCパネル外壁の耐震性に関する実験的研究：その1. 構法及び実験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 201-202.

坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎. (1987). ALCパネル外壁の耐震性に関する実験的研究：その2. 平面試験体の試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 203-204.

坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎. (1987). ALCパネル外壁の耐震性に関する実験的研究：その3. 立体試験体の試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 205-206.

櫻庭記彦. (2015). グリッドサポート工法による高耐震化・落下防止対策 TEPIA 先端技術館（天井設計の新しいチャレンジ）. 建築技術, 785, 162-163.

櫻庭記彦. (2015). 国内初の石こうボードに代わる軽量捨て貼り下地の採用例 建築会館ホール（天井設計の新しいチャレンジ）. 建築技術, 785, 136-137.

佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 荒井智一, 金井貴浩, 高岡昌史, 岩下裕樹, 吉澤睦博, 壁谷澤寿海, 清家剛, 山田哲, 福山洋, 太田勤, 江口亨, 伊山潤, 石原直, 磯部大吾郎. (2015). 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のための E-ディフェンス加振実験 報告書. 防災科学技術研究所研究資料(391).

佐藤孝一.(2006).ALC パネル・押出成形セメント板（非構造部材の耐震設計・施工の要点）. 建築技術, 680, 121-125.

三協アルミ. 勝手口／汎用ドア・引戸. 参照日: 2022 年 7 月 26 日, 参照先: <https://alumi.st-grp.co.jp/products/entrance/hanyo/>

塩入徹.(2018). 天井の劣化診断（非構造部材の再確認）. 建築技術, 824, 152-155.

塩入徹.(2022). 天井被害の実情（ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術）. 建築技術, 869, 92-93.

篠澤朋宏, 五十田博, 村瀬伸吾, 森拓郎, 清水秀丸, 小松幸平.(2009). 木造軸組構法住宅の窓ガラス入りサッシ付き壁と階段の静加力実験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009, 337-338.

芝村朋宏, 清家剛, 山田哲, 三浦謙二, 八木尚太郎, 中川椋太郎.(2020). 鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験 その 3 窓と扉の開閉確認結果. 日本建築学会大会学術講演梗概, 2020, 1171-1172.

樹脂サッシ工業会.(2022). 再資源化を志向した樹脂サッシ窓の解体マニュアル（詳細版）.

白崎了悟, 金井貴浩.(2016). 軽量化天井（見上げれば安全な天井設計）. 建築技術, 798, 124-125.

白鳥勝彦, 藁科全興, 堀口泰, 斉藤健司.(2015). フラットバーとネットを用いたフェイルセーフ天井改修 アピオあおもり（天井設計の新しいチャレンジ）. 建築技術, 785, 160-161.

清家剛, 池田賢, 高橋大祐, 橋本敏男.(2002). 内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形能試験：その 2 試験結果及び考察. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 361-362.

清家剛.(2012). ガラスの被害から見る今後の検討課題（非構造部材の耐震性を設計・施工する）. 建築技術, 749, 152-155.

清家剛.(2020). 間仕切壁に求められる耐震設計技術（非構造部材に求められる耐震・台風設計）. 建築技術, 842, 90-93.

清家剛.(2020). 落ちない, 倒れない, 飛んでいかない, 非構造部材の設計 (非構造部材に求められる耐震・耐風設計). 建築技術, 842, 64-66.

清家剛, 八木尚太郎, 都築濤, 楠浩一, 中村いずみ, 中川椋太郎, 渡邊千加.(2020). 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 20 実験および天井・窓の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1293-1294.

清家剛, 八木尚太郎, 巽信彦, 磯田充樹, 吉敷祥一, 前田匡樹, 西村康志郎.(2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その 5 鋼製ドアの機能の確認結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021, 615-616.

清家剛.(2022). 間仕切壁の耐震対策 (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 94-97.

清家剛.(2022). 建築物に潜むリスク (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 60-61.

清家剛, 八木尚太郎.(2022). 非構造部材の耐震性を計測する(世界はどこまで計測できるか). 建築雑誌, 137(1761), 16-17.

関根麻里子, 城出真弥, 早野博幸, 寺本篤史, 大久保孝昭, 松原大祐, 川口莉穂, 楠浩一, 日比野陽.(2019). 外装タイルの剥離検知モニタリング技術の確立に関する研究 その 2 光ファイバセンサを用いた実験的検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 681-682.

関根麻里子, 早野博幸, 寺本篤史, 大久保孝昭, 川口莉穂, 楠浩一.(2020). 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 (その 24) 光ファイバセンサを用いた外装タイルの剥離検知および構造部材の損傷モニタリング. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1191-1192.

高橋大祐, 橋本敏男, 池田賢, 清家剛.(2002). 内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形能試験 : その 1 研究概要及び試験方法. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 359-360.

田附遼太, 平田延明, 藤田起章, 林徹, Alex Shegay, 前田匡樹, 吉敷祥一, 八木尚太郎, 西村康志郎.(2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その 3 タイル仕上げの実験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021, 611-612.

- 都築滯, 八木尚太郎, 清家剛, 小林健二, 楠浩一, 中村いずみ, 中川椋太郎, 渡邊千加. (2020). 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その 22 窓の損傷および挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1297-1298.
- 坪内信朗. (2006). ガラス窓 (非構造部材の耐震設計・施工の要点) . 建築技術, 680, 134-135.
- 手塚純一. (2015). ワイヤーによる落下防止装置 (親ワイヤー+落下防止金物) 京王線東府中駅 (天井設計の新しいチャレンジ) . 建築技術, 785, 164-165.
- 寺内伸, 中山實. (1975). サッシとガラスの面内変形に対する安全性の検討 : 材料・施工. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 50, 247-248.
- 寺内伸. (1977). サッシの面内変形に対するガラス周囲のシール材の挙動について. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 52, 259-260.
- 寺内伸, 大森信次. (1991). 層間変形に対するサッシとガラスの最適シーリング目地設計方法の研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1991, 251-252.
- 寺本隆幸, 清家剛, 大迫勝彦, 渡壁守正, 鈴木正裕. (2013). ALC 間仕切壁の地震被害と今後の対策 : その 1 東日本大震災における ALC 帳壁の地震被害と課題. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013, 1421-1422.
- 鳥谷修平, 長江拓也, 福山國夫, 藤谷秀雄, 城戸史郎, 中谷成男, 梶原浩一, 中島正愛. (2007). 高層建物の地震応答再現実験に組み込まれた ALC 外壁システムに関する概要 : 高層建物の非構造部材・家具什器に関する E-ディフェンス振動実験-その 8. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2007, 565-566.
- 富松太基. (2006). 出入口扉 (非構造部材の耐震設計・施工の要点) . 建築雑誌, 680, 136-137.
- 日建設計. (2022 年 4 月). 地震被災度判定システム. 参照日: 2022 年 7 月 25 日, 参照先: https://www.nikken.co.jp/ja/about/portfolio/am42sv00000000ay-att/NS_LCD-sheet03_49.pdf
- 内閣府防災担当. (2013 年 8 月). 事業継続ガイドライン ―あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応―. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: <https://www.bousai.go.jp/kyoiku/kigyuu/pdf/guideline03.pdf>

内閣府（防災担当）. (2021年3月). 災害に係る住家の被害認定基準運用指針. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/r303shishin_all.pdf

内閣府（防災担当）. 住家等の被害に関する各種調査. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: <https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/h3003chosa.pdf>

永井昌志, 山崎健一, 河辺伸二. (1998). 現場タイル張り ALC 縦壁ロッキング構法の層間変形追従性能に関する実験的研究 : その 1. 層間変形追従性能試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 121-122.

中川椋太郎, 清家剛, 山田哲, 石田孝徳, 吉敷祥一, 伊山潤, 三浦謙二, 上瀧敬太, 八木尚太朗, 芝村朋宏. (2020). 鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験 その 2 開口面の挙動と損傷. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1169-1170.

長江拓也, 藤谷秀雄, 福山國夫, 梶原浩一, 城戸史郎. (2009). 超高層建物の地震応答を受ける ALC 版外壁の耐震性能 -E-ディフェンス振動台実験-. 日本建築学会技術報告集, 15(31), 667-672. doi:10.3130/aijt.15.667

名知博司, 松尾隆士, 片山篤. (2010). 層間変位ムーブメントを受ける異形ガラスの面内挙動に関する研究 : その 2 シーリング材の拘束効果の影響. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 91-92.

西田和生, 伊藤弘, 坂本功. (1982). RC 造実大 7 層試験体による窓ガラスの耐震安全性に関する実験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 57, 501-502.

西田和生, 伊藤弘, 坂本功, 山内泰之. (1986). 日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)56: 鉄骨造実大 6 層建物による非構造部材の耐震実験(その 7. ドアの実験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 61, 311-312.

西田和生, 伊藤弘, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男. (1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その 3 ALC パネルの動き. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 111-112.

西村康志郎, 藤田起章, ShegayAlex, 参川朗, 田附遼太, 前田匡樹, 吉敷祥一. (2021). 非構

造部材を有する実大RC造架構の静的載荷実験 その1 研究の位置づけと実験計画の概要. 日本建築学会学術講演梗概集, 2021, 607-608.

仁田佳宏, 石田正美, 尾内俊夫, 渡壁守正, 稲井慎介. (2015). Wi-Fi カメラ搭載小型無人飛行船を用いた天井部の目視検査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005, 1277-1278.

日本規格協会. (2015). JIS A 4702 : 2015 ドアセット.

日本建築学会. (2000). 阪神・淡路大震災調査報告 建築編 5 非構造部材 材料施工. 東京都: 日本建築学会.

日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

日本建築学会. (2005). 2005 年福岡県西方沖地震災害調査報告.

日本建築学会. (2015). 逃げないですむ建物とまちをつくる 一大都市を襲う地震等の自然災害とその対策一. 東京都: 技報堂出版株式会社.

日本建築学会. (2018). 2016 熊本地震災害調査報告. 東京都: 日本建築学会.

日本建築学会. (2019). 東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材. 東京都: 日本建築学会.

日本建築学会. アーカイブ検索. 参照日: 2022 年 7 月 22 日, 参照先: <https://www.aij.or.jp/archive-search.html>

日本建築構造技術者協会. 『地震-7』- 基準法と地震の大きさ (その2) <建築基準法を守ると、どの程度の地震に耐えられるのか>. 参照日: 2022 年 7 月 27 日, 参照先: https://www.jsca.or.jp/vol5/p4_4_tec_terms/200506/20050624.php

日本建築防災協会, 機能ガラス普及推進協議会. (2014). 安全・安心ガラス設計施工指針 増補版. 東京都: 日本建築防災協会

日本サッシ協会. (2018). サッシ・ドア関連用語集. 東京都: 日本サッシ協会.

日本耐震天井施工協同組合.(2022). 天井耐震診断調査研究報告書 一天井の耐震診断から見えてくること一. 東京都: 日本耐震天井施工協同組合.

野々山優輔, 長江拓也, 梶原浩一, 神崎喜和, 太田匡信.(2021). カーテンウォールの耐震性能を評価する数値解析と Gyro によるセンサリングシステムのための実験研究. 日本建築学会技術報告集, 27(65), 125-130. doi:10.3130/ajjt.27.125

荻原達也, 細内正紀, 横家尚, 横木光一郎.(2002). 現場タイル張り ALC パネルの層間変形追従性能に関する実験的研究 : その 2 ロッキング構法へのタイル張り. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 355-356.

濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 高橋光雄, 富田和男廣波純二, 伊藤弘, 西田和生、.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その 2 単層加力試験の結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 109-110.

林徹, 三谷一房, 河内武, 大内渉, 林幸輝.(2011). 集合住宅における内装間仕切壁の面内加力実験 : その 2 変形モードと損傷状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 753-754.

林徹, 法身祐治, 太田匡信, 佐藤高行.(2016). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 2 試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016, 891-892.

林徹, 法身祐治, 太田匡信, 佐藤高行.(2017). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 3 開口部まわりの挙動について. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017, 1139-1140.

原甲己, 西村康志郎, 伊山潤, 八木尚太郎, 福島佳浩, 宮崎祥太, 吉敷祥一, 前田匡樹.(2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その 8 : 加速度センサを用いた計測結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021, 621-622.

被災建築物応急危険度判定研究会.(1998). 被災建築物応急危険度判定マニュアル. 東京都: 日本建築防災協会・全国被災建築物応急危険度判定協議会.

福田知広, 伊山潤, 福島佳浩, 清家剛, 八木尚太郎.(2019). 乾式間仕切り壁付き鉄骨骨組みの繰り返し載荷実験 その 5 加速度センサによる傾斜および面外振動性状計測. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 1469-1440.

福田一夫, 三谷一房, 林徹, 河内武(2012). 集合住宅の乾式耐火遮音戸境壁における地震履歴後の耐火性および遮音性 その1 計画概要と面内加力実験の結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012, 1275-1276.

藤田起章. (2020). RC 造建物の残存耐震性能評価法の提案と縮小架構振動台実験及び実大架構静的載荷実験による検証. 東北大学.

藤野陽三, 日本鋼構造協会. (2020). 構造物のモニタリング技術. 東京都: コロナ社.

ベターリビング. (2019). 有料住宅部品評価基準及び付加認定基準の評価基準 玄関ドア BLE FD : 2019②.

法身祐治, 林徹, 太田匡信, 佐藤高行. (2016). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その1 試験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016, 889-890.

本田信一, 巽信彦, 磯田充樹, 八木尚太郎, 吉敷祥一, 清家剛, 前田匡樹, 西村康志郎. (2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その6 LGS 壁と鋼製ドアの挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021, 617-618.

松岡祐一, マコーミックジェイソン, 吹田啓一郎, 中島正愛. (2008). 軽量鉄骨下地間仕切壁とそれに囲まれた鋼製下地天井の耐震性能. 日本建築学会構造系論文集, 632, 1857-1864. doi:10.3130/aijs.73.1857

松岡祐一, 吹田啓一郎, 山田哲, 島田侑子, 赤澤資貴, 松宮智央. (2009). 実大4層鉄骨造建物の震動台実験における外装材の耐震性能評価 . 日本建築学会構造系論文集, 641, 1353-1361. doi:10.3130/aijs.74.1353

松尾隆士, 名知博司, 片山篤. (2010). 層間変位ムーブメントを受ける異形ガラスの面内挙動に関する研究 : その1 ガラス形状とロッキング率の関係. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 89-90.

松尾隆士, 名知博司. (2012). ロッキング率算定式の提案: その3 層間変位ムーブメントを受ける異形ガラスの面内挙動に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012, 955-956.

松原大祐, 大久保孝昭, 寺本篤史, 楠浩一, 日比野陽, 川口莉穂, 早野博幸, 城出真弥, 関根麻里子. (2019). 外装タイルの剥離検知モニタリング技術の確立に関する研究 その1 タ

イル外壁の剥離検知モニタリングにおける基礎的検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 679-680.

三谷一房, 林徹, 河内武, 大内渉, 林幸輝.(2011). 集合住宅における内装間仕切壁の面内加力実験 : その1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 751-752.

水谷吉克, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その4 パネルのひびわれ状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 113-114.

宮内博之.(2022). 無限の技術 : ドローン (世界はどこまで計測できるか) . 建築雑誌, 137(1761), 22-23.

宮崎祥太, 伊山潤, 福島佳浩, 福田知広, 清家剛, 八木尚太郎.(2020). 鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験 その4 加速度センサによる傾斜および面外振動性状計測. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1173-1174.

文部科学省大臣官房文教施設企画部.(2014年7月). 被災文教施設応急危険度判定方法について. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: http://web-honbu.jimu.nagoya-u.ac.jp/fmd/06other/shisetukanribu/image/link_sisaku/oukyuu_kikenndo_hannteihouhou.pdf

八木尚太郎, 清家剛, 金容善.(2018). 天井の地震被害のモニタリング方法に関する研究 カメラ画像を用いた方法に着目して. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018, 349-350.

八木尚太郎.(2018). 地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究 一乾式間仕切り壁とALC外壁を対象とした実大載荷実験を通して一. 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻.

八木尚太郎, 清家剛, 荻原健二, 新田互, 本田信一, 吉敷祥一.(2019). 鉄骨骨組みに取り付けられた乾式間仕切り壁の繰り返し載荷実験 その4 損傷の観察および結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019, 1437-1438.

八木尚太郎, 清家剛, 山田哲, 石田孝徳, 吉敷祥一, 伊山潤, 三浦謙二, 上瀧敬太, 芝村朋宏, 中川椋太郎.(2020). 鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験 その1 実験概要及び無開口面の挙動と損傷. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1167-1168.

八木尚太朗, 清家剛, 山田哲, 石田孝徳, 吉敷祥一, 上瀧敬太, テンデランランディ. (2020). 鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験. 日本建築学会技術報告集, 64, 864-874. doi:10.3130/ajjt.26.869

八木尚太朗, 伊山潤, 福島佳浩, 吉敷祥一, 石田孝徳, 清家剛, 山田哲. (2021). 鉄骨骨組に取り付けられた乾式間仕切り壁の大変形時における損傷と加速度計による傾斜計測を用いたその検出の可能性. 日本建築学会構造系論文集, 788, 1400-1411. doi:10.3130/aijs.86.1400

八木尚太朗, 清家剛, 巽信彦, 磯田充樹, 吉敷祥一, 前田匡樹, 西村康志郎. (2021). 非構造部材を有する実大 RC 造架構の静的載荷実験 その 4 LGS 壁と鋼製ドアの損傷の目視観察結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021, 613-614.

八木尚太朗, 清家剛, 楠浩一, Yeow Trevor, 中村いずみ, 小林健二, 久田隆司. (2022). 振動台実験を通じた地震により窓に生じる損傷の発生メカニズムの考察. 日本建築学会技術報告集, 69, 585-590. doi:10.3130/ajjt.28.585

八木尚太朗, 巽信彦, 磯田充樹, 吉敷祥一, 本田信一, 清家剛, 前田匡樹, 西村康志郎. (2022). 実大載荷実験を通じた RC 骨組に取り付けた乾式間仕切り壁と鋼製ドアの損傷に関する考察. 日本建築学会技術報告集(70), 1125-1130. doi:10.3130/ajjt.28.1125

八木尚太朗, 福島佳浩, 前田匡樹, Shegay Alex, 巽信彦, 吉敷祥一, 西村康志郎, 伊山潤, 原甲己. (2022). MEMS 加速度センサによる実大 RC 骨組の変形測定. 日本建築学会技術報告集, 69, 661-666.

Yagi Shotaro, Teramoto Atsushi, Yeow Trevor, Seike Tsuyoshi, Kusunoki Koichi, Nakamura Izumi. (2022). VALIDATING RESILIENT DETAILING OF JAPANESE CEILINGS, WINDOWS, AND WALL TILES USING AN E-DEFENSE SHAKE-TABLE TEST. *Journal of Earthquake Engineering*. doi:10.1080/13632469.2021.1988764

山田哲. (2022). 非構造部材を守る制震技術(ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 78-81.

山田哲, 上瀧敬太, 石田孝徳, TenderanRandy, 清家剛, 吉敷祥一, 長谷川隆, 伊山潤, 八木尚太朗, 櫻田頌吾. (2019). Experimental Study on Full Scale Steel Frame Considering Multiple Strong Earthquakes Part 1: Outline of the specimen. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019,

1197-1188.

脇山善夫.(2020). 扉に求められる耐震設計技術（非構造部材に求められる耐震・耐風設計）. 建築技術, 842, 98-99.

脇山善夫, 清家剛.(2006). 非構造部材の地震被害が語るもの（非構造部材の耐震設計・施工の安全性を問う）. 建築技術, 680, 98-101.

脇山善夫, 渡壁守正, 稲井慎介, 石岡拓, 飯塚信一, 高井茂光, 森田高市, 石原直.(2011). 体育館におけるガラス窓の地震被害を模擬した実験的検討：その1 研究の背景および実験検討のための解析. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 401-402.

渡辺博司, 佐藤謙和, 坪内信朗.(1997). 震後に開放可能な RC・SRC 造建物用鋼製ドア：その2 RC 壁の損傷を想定した耐震性試験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997, 941-942.

渡邊千加, 八木尚太郎, 清家剛, 都築濤, 楠浩一, 中村いずみ, 荻原健二, 中川椋太郎.(2020). 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定 その21 天井の損傷および挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2020, 1295-1296.

付録

付録 1. 内外装壁に関する研究の変遷.....	344
付録 2. 内外装壁の耐震対策.....	347
付録 3. 建物の地震による被害の全体像.....	351
付録 4. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係に関する既往研究.....	355
付録 5. 内外装壁の被害の評価に関連する先行事例の内容.....	377
付録 6. 損傷が性能に与える影響の分析の過程.....	381
付録 7. 内外装壁の被害と建物の応答との対応関係の整理.....	405
付録 8. 地震時に行われる内外装壁の損傷の診断の目的.....	415
付録 9. 損傷の発生位置の分析の過程.....	417
付録 10. 内外装壁の損傷と建物の応答の対応関係の診断の観点を含む整理.....	433
付録 11. 内外装壁の被害と建物の応答との対応関係の診断の観点を含む整理.....	441
付録 12. 加速度センサを用いた診断方法のケーススタディー.....	449
付録 13. 追加で実施した実大実験の概要.....	475
付録 14. 実大実験の詳細図面.....	483

付録1. 内外装壁に関する研究の変遷

付録 1 では、内外装壁に関するこれまでの研究の変遷について説明する。図 1-1、図 1-2、図 1-3、図 1-4 に、これまでに発表された間仕切り壁、ALC 外壁、ドア、窓・ガラスに関連する研究報告の内容を分類した結果¹を示す。

図 1-1~1-4 より、内外装壁に関する研究は、環境の分野で多く行われていることが読み取れる。その一方で、ここ 20 年では構造の分野でも多く行われていることが読み取れる。特に、間仕切り壁、ALC 外壁、ドアは 2010 年代にその数が急増している。この背景には 2011 年の東北地方太平洋沖地震で、内外装壁の損傷による被害が大きく取り上げられたことがあると考えられる²。また、窓は 2000 年代にその数が急増している。この背景には 2003 年の宮城県沖地震や 2005 年の福岡県西方沖地震で、ガラスの損傷による被害が大きく取り上げられたことがあると考えられる³。

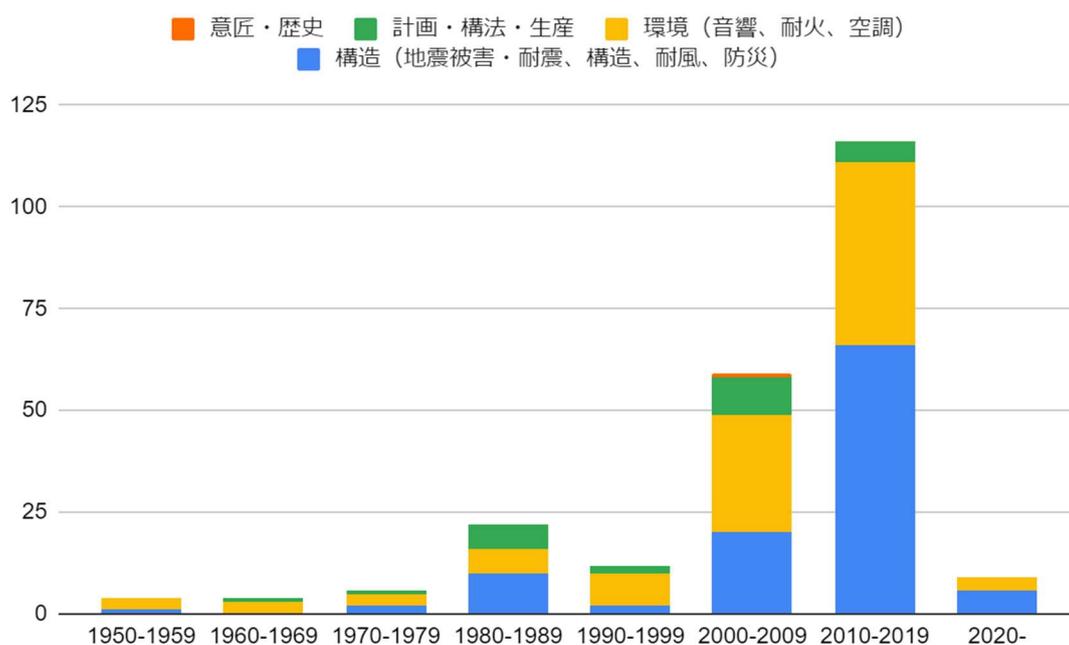


図 1-1 間仕切り壁に関する研究の変遷

¹ 日本建築学会のアーカイブ検索で、「壁」、「ドア」、「窓」、「ガラス」の単語で検索をかけてヒットした研究報告を、そのタイトルに基づいて分類した

² 日本建築学会. (2019). 東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材. 東京都: 日本建築学会.

³ 脇山善夫, 清家剛. (2006). 非構造部材の地震被害が語るもの (非構造部材の耐震設計・施工の安全性を問う). 建築技術, 680, 98-101.

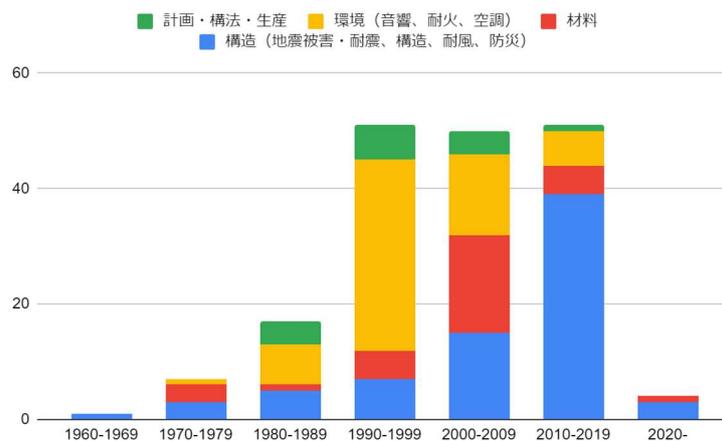


図 1-2 ALC 外壁の研究に関する研究の変遷

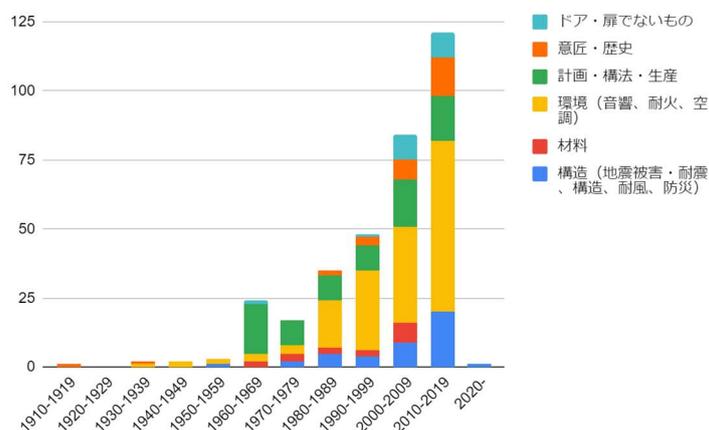


図 1-3 ドアの研究に関する研究の変遷

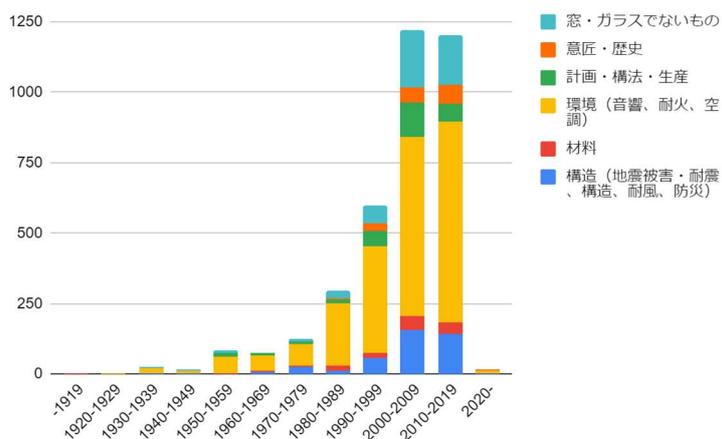


図 1-4 窓・ガラスの研究に関する研究の変遷

付録2. 内外装壁の耐震対策

付録 2 では、現在、研究開発が行われている内外装壁（内外装材）の耐震対策について説明する。

1.1.2.節で説明した通り、内外装壁の耐震対策のパターンはいくつかある。まず、内外装壁の接合部の剛性を上げることや、逆に追従性を上げることで、内外装壁自体の耐震性を高める方法がある。次に、建物を固くすることや、免振構造にすることにより、建物の変形や揺れを抑えることで、内外装壁に掛かる外力を抑える方法がある。そして、内外装壁にネットを掛けるなどし、脱落といった損傷を被害に繋げさせない方法もある。

以下では、それぞれについて、具体的な文献を挙げて説明する。

内外装壁に発生する損傷を抑える方法

ここでは、内外装壁の耐震性を高める方法について説明する。この方法には、内外装壁の耐力を高める方法と、内外装壁の追従性を高める方法の 2 種類がある。

内外装壁の耐力を高める方法

地震時に、内外装壁に発生する損傷を軽減化する方法として、まず、外力に対する内外装壁の耐力を高める方法がある。具体的な手法としては、部材の厚みを大きくすること、接合部の剛性を高めること、部材を新たに追加することなどがある。

例えば、吊り天井の中でも、人が日常的に立ち入られる部屋の、高さ 6m を超え、面積 200 m² を超え、更に天井の単位面積質量が 2kg を超えるものは特定天井と呼ばれ、地震に対する耐震性を確保することが建築基準法で定められている。そして、構造耐力上安全な天井の構造方法として仕様が示されている。この仕様と、在来の吊り天井の仕様との違いとして、下地材が十分な強度を有していること（部材の厚みなどが確保されていること）、接合部が緊結されていること、斜め部材が適切に配置されていることがある。

こうした手法の効果は、例えば 2015 年の佐々木らの研究¹などで検証されている。LGS 間

¹ 佐々木智大，青井淳，田川浩之，梶原浩一，荒井智一，金井貴浩，高岡昌史，岩下裕樹，吉澤睦博，壁谷澤寿海，清家剛，山田哲，福山洋，太田勤，江口亨，伊山潤，石原直，磯部大吾郎。(2015). 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のための E-ディフェンス加振実験 報告書. 防災科学技術研究所研究資料(391).

仕切り壁についても、例えば 2019 年の稲井らの研究²などで検証されている。

また、示された仕様では、天井の単位面積質量の制限や、段差部分の制限なども設けられている。このように、軽量化することで接合部の負担を軽減化させたり、段差部分など応力が集中する部分をなくしたりすることも、外力に対する耐力を高める手法である。

外力に対する追従性を高める手法

また、外力に対する耐力を高めるのではなく、外力に対する追従性を高める方法もある。具体的な手法としては、部材と部材の間に空間を持たせることで応力の伝達や衝突を防ぐことや、接合部の自由度を上げて回転や水平移動を可能にさせることなどがある。1.8.節で説明した、ALC 外壁の面内方向の回転や、窓のガラスのスウェーやロックングはこれに該当する。カーテンウォールを設計する場合も、この手法が取られる³。

内外装壁に掛かる外力を抑える方法

ここでは、内外装壁に掛かる外力を抑える方法について説明する。

この方法は、内外装壁に工夫を施すのではなく、構造部材に工夫を施す方法である。内外装壁に掛かる外力は、揺れによる慣性力と、層間変位による強制変形力である。そのため、構造部材の剛性が高くなるように設計し、層間変位の制限を設けることで、地震時の内外装壁の損傷を軽減化させることができる。官庁施設では、この手法が取られており、大規模の地震に対しても、RC 造は層間変形角 1/200 rad、SRC 造は層間変形角 1/200 rad、鉄骨造は層間変形角 1/100 rad の制限値を設けている⁴。また、建物を免震構造や制震構造を採用し、建物の応答を抑える手法もある⁵。

内外装壁の地震による損傷を被害に繋げさせない方法

ここでは、内外装壁の損傷を被害に繋げさせない方法について説明する。この方法は、損傷の発生は許容させるが、それを被害に結び付けさせないという方法である。

具体的な手法としては、内外装壁の各部材をワイヤーで構造部材に繋げておく手法がある。

² 稲井慎介, 手塚純一, 成田修英. (2018). 地震力を負担する乾式間仕切り壁の剛性に関する実験的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1093-1094.

³ 倉斗道夫. (2006). カーテンウォール (非構造部材の耐震設計・施工の要点). 建築技術, 680, 126-129.

⁴ 国土交通省大臣官房長官官繕部. (2021). (平成 25 年制定) 官庁施設の総合耐震・対津波計画基準及び同解説 令和 3 年版. 東京都: 公共建築協会.

⁵ 山田哲. (2022). 非構造部材を守る制震技術 (ニューノーマル時代に備える建築物に潜むリスク回避術). 建築技術, 869, 78-81.

これにより、地震の際に例えば天井が崩れても部材が落下することは無くなる。ただし、各パーツを繋げる手間がかかる。そこで、天井下にネットなどを張り、天井が崩れても、ネットで受け止めるという手法がある。フェイルセーフと表 2-1 呼ばれるこの技術は、研究によりその効果が検証され⁶⁷、実用に至っている⁸⁹¹⁰。

この他に、内外装壁を軽量化させる手法もある。例えば、天井のボードを軽量化させることで、ボードが落下して人に衝突しても怪我をさせないという技術が実用に至っている¹¹¹²。

また、外壁やガラスであれば、直下の地面を庇で覆うことや植栽にして人が立ち入らないようにしておけば、落下物による人的被害は免れる可能性がある。

⁶ 川口健一. (2014). 人命保護と安全な天井設計 安全性評価 (安全な天井設計と天井脱落対策技術基準早わかり). 建築技術, 773, 80-81.

⁷ 川口健一. (2014). 人命保護と安全な天井設計 フェイルセーフ (安全な天井設計と天井脱落対策技術基準早わかり). 建築技術, 773, 82-83.

⁸ 白鳥勝彦, 藁科全興, 堀口泰, 齊藤健司. (2015). フラットバーとネットを用いたフェイルセーフ天井改修 アピオあおもり (天井設計の新しいチャレンジ). 建築技術, 785, 160-161.

⁹ 櫻庭記彦. (2015). グリッドサポート工法による高耐震化・落下防止対策 TEPIA 先端技術館 (天井設計の新しいチャレンジ). 建築技術, 785, 162-163.

¹⁰ 手塚純一. (2015). ワイヤーによる落下防止装置 (親ワイヤー+落下防止金物) 京王線東府中駅 (天井設計の新しいチャレンジ). 建築技術, 785, 164-165.

¹¹ 櫻庭記彦. (2015). 国内初の石こうボードに代わる軽量捨て貼り下地の採用例 建築会館ホール (天井設計の新しいチャレンジ). 建築技術, 785, 136-137.

¹² 白崎了悟, 金井貴浩. (2016). 軽量化天井 (見上げれば安全な天井設計). 建築技術, 798, 124-125.

付録3. 建物の地震による被害の全体像

付録 3 では、建物の地震による被害の全体造について説明する。

表 3-1 に、気象庁により報告された、過去の 10 年間の地震の規模と物的被害を示す。表 3-1 では、震度 6 強以上の大規模な地震をハイライトした。大規模な地震では、殆どの場合で半壊や全壊の建物がみられる。これに対して、中規模の地震では、殆どの場合で物的被害の数は少ない。ただし、2018 年の大阪北部地震のような例外もある。これは、人口密集地が震源であったためと考えられる。

このように、人口や建物の築年数、過去に大規模な地震を経験しているかといった要素にも左右されるが、大規模な地震に対しては、半壊や全壊といった深刻な被害が発生する傾向にある。

表 3-1 過去の地震の規模と物的被害の程度

発生日	震源地名・地震名	最大深度	津波	物的被害
令和3年(2021年)12月3日	紀伊水道	5弱		住家一部破損 2棟
令和3年(2021年)10月7日	千葉県北西部	5強		建物火災 1件など
令和3年(2021年)10月6日	岩手県沖	5強		住家一部破損 1棟
令和3年(2021年)5月1日	宮城県沖	5強		なし
令和3年(2021年)3月20日	宮城県沖	5強		住家一部破損 2棟など
令和3年(2021年)2月13日	福島県沖	6強		住家全壊 69棟 住家半壊 729棟 住家一部破損 19758棟など
令和2年(2020年)12月21日	青森県東方沖	5弱		なし
令和2年(2020年)9月12日	宮城県沖	4		なし
令和2年(2020年)9月4日	福井県嶺北	5弱		なし
令和2年(2020年)6月25日	千葉県東方沖	5弱		住家一部破損 5棟など
令和2年(2020年)3月13日	石川県能登地方	5強		なし
令和元年(2019年)8月4日	福島県沖	5弱		住家一部破損 1棟など
令和元年(2019年)6月18日	山形県沖	6強	11cm	住家半壊 28棟 住家一部破損 1580棟など
令和元年(2019年)5月25日	千葉県北東部	5弱		なし
令和元年(2019年)5月10日	日向灘	5弱		なし
平成31年(2019年)2月21日	胆振地方中東部	6弱		住家一部破損 19棟
平成31年(2019年)1月3日	熊本県熊本地方	6弱		住家一部破損 60棟
平成30年(2018年)9月6日	胆振地方中東部 平成30年北海道胆振東部地震	7		住家全壊 469棟 住家半壊 1,660棟 住家一部破損 13,849棟など
平成30年(2018年)6月18日	大阪府北部	6弱		住家全壊 21棟 住家半壊 483棟 住家一部破損 61,266棟など
平成30年(2018年)4月9日	島根県西部	5強		住家全壊 16棟 住家半壊 58棟 住家一部破損 556棟など
平成29年(2017年)10月6日	福島県沖	5弱		なし
平成29年(2017年)7月11日	鹿児島湾	5強		住家一部破損 3棟
平成29年(2017年)7月1日	胆振地方中東部	5弱		なし
平成29年(2017年)6月25日	長野県南部	5強		住家全壊 1棟 住家一部破損 30棟など
平成28年(2016年)12月28日	茨城県北部	6弱		住家半壊 1棟 住家一部破損 25棟
平成28年(2016年)11月22日	福島県沖	5弱	144cm	住家一部破損 9棟
平成28年(2016年)10月21日	鳥取県中部	6弱		住家全壊 18棟 住家半壊 312棟 住家一部破損 15,095棟など
平成28年(2016年)6月16日	内浦湾	6弱		住家一部破損 3棟
平成28年(2016年)5月16日	茨城県南部	5弱		住家一部破損 2棟
平成28年(2016年)4月14日～	熊本県熊本地方など 平成28年(2016年)熊本地震	7		住家全壊 8,667棟 住家半壊 34,719棟 住家一部破損 162,500棟 など

平成 28 年 (2016 年) 1 月 14 日	浦河沖	5 弱		非住家公共建物 1 棟
平成 27 年 (2015 年) 9 月 12 日	東京湾	5 弱		非住家公共建物 1 棟
平成 27 年 (2015 年) 7 月 13 日	大分県南部	5 強		住家一部破損 3 棟など
平成 27 年 (2015 年) 7 月 10 日	岩手県内陸北部	5 弱		なし
平成 27 年 (2015 年) 5 月 30 日	小笠原諸島西方沖	5 強		住家一部破損 2 棟など
平成 27 年 (2015 年) 5 月 25 日	埼玉県北部	5 弱		住家一部破損 2 棟など
平成 26 年 (2014 年) 11 月 22 日	長野県北部	6 弱		住家全壊 77 棟 住家半壊 137 棟 住家一部破損 1,626 棟など
平成 26 年 (2014 年) 9 月 16 日	茨城県南部	5 弱		住家一部破損 1,060 棟
平成 26 年 (2014 年) 7 月 12 日	福島県沖	4	17cm	なし
平成 26 年 (2014 年) 7 月 8 日	胆振地方中東部	5 弱		なし
平成 26 年 (2014 年) 7 月 5 日	岩手県沖	5 弱		なし
平成 26 年 (2014 年) 5 月 5 日	伊豆大島近海	5 弱		なし
平成 26 年 (2014 年) 3 月 14 日	伊予灘	5 強		住家一部破損 57 棟
平成 25 年 (2013 年) 10 月 26 日	福島県沖	4	36cm	なし
平成 25 年 (2013 年) 9 月 20 日	福島県浜通り	5 強		住家一部破損 2 棟
平成 25 年 (2013 年) 8 月 4 日	宮城県沖	5 強		なし
平成 25 年 (2013 年) 4 月 17 日	宮城県沖	5 弱		なし
平成 25 年 (2013 年) 4 月 17 日	三宅島近海	5 強		なし
平成 25 年 (2013 年) 4 月 13 日	淡路島付近	6 弱		住家全壊 8 棟 住家半壊 101 棟 住家一部破損 8,305 棟など
平成 25 年 (2013 年) 2 月 2 日	十勝地方南部	5 強		住家一部破損 1 棟
平成 24 年 (2012 年) 12 月 7 日	三陸沖	5 弱	98cm	住家一部破損 1 棟
平成 24 年 (2012 年) 8 月 30 日	宮城県沖	5 強		なし
平成 24 年 (2012 年) 7 月 10 日	長野県北部	5 弱		住家一部破損 9 棟など
平成 24 年 (2012 年) 3 月 27 日	岩手県沖	5 弱		なし
平成 24 年 (2012 年) 3 月 14 日	千葉県東方沖	5 強		住家一部損壊 3 棟など
平成 24 年 (2012 年) 3 月 1 日	茨城県沖	5 弱		なし
平成 24 年 (2012 年) 1 月 28 日	山梨県東部・富士五湖	5 弱		なし
平成 23 年 (2011 年) 12 月 14 日	岐阜県美濃東部	4		なし
平成 23 年 (2011 年) 11 月 21 日	広島県北部	5 弱		なし
平成 23 年 (2011 年) 11 月 20 日	茨城県北部	5 強		なし
平成 23 年 (2011 年) 8 月 19 日	福島県沖	5 弱		なし
平成 23 年 (2011 年) 8 月 1 日	駿河湾	5 弱		住家一部損壊 15 棟など
平成 23 年 (2011 年) 7 月 31 日	福島県沖	5 強		なし
平成 23 年 (2011 年) 6 月 30 日	長野県中部	5 強		住家半壊 24 棟 住家一部損壊 6,117 棟
平成 23 年 (2011 年) 4 月 16 日	茨城県南部	5 強		なし
平成 23 年 (2011 年) 4 月 12 日	福島県中通り	6 弱		
平成 23 年 (2011 年) 4 月 11 日	福島県浜通り	6 弱		
平成 23 年 (2011 年) 4 月 7 日	宮城県沖	6 強		
平成 23 年 (2011 年) 4 月 1 日	秋田県内陸北部	5 強		住家一部破損 1 棟
平成 23 年 (2011 年) 3 月 15 日	静岡県東部	6 強		住家半壊 18 棟 住家一部破損 3475 棟
平成 23 年 (2011 年) 3 月 12 日	長野県・新潟県県境付近	6 強		住家全壊 73 棟 住家半壊 427 棟など
平成 23 年 (2011 年) 3 月 11 日	三陸沖 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災)	7	9.3m 以上	住家全壊 121,996 棟 住家半壊 282,941 棟 住家一部破損 748,461 棟 など
平成 23 年 (2011 年) 3 月 9 日	三陸沖	5 弱	55cm	住家一部破損 1 棟など

付録4. 内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係に関する既往研究

付録 4 では、3.3.節で取り上げた、地震による内外装壁の損傷と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係に関する報告を含む既往研究について説明する。

LGS 間仕切り壁を対象とした既往研究

「軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験」(金子美香ら、2005)

2005 年の金子らによる研究「軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験」¹は、軽量鉄骨下地間仕切壁の層間変形角と損傷の関係や、荷重-変形関係を把握することを目的としたものであり、軽量鉄骨下地間仕切壁の試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、3 つの試験体が用いられており、寸法は高さ 2200mm、幅 2800mm である。試験体の種類は、石膏ボードを下地の両面に一枚ずつ張った「試験体 1」、二枚ずつ張った「試験体 2」、そして二枚ずつ張って中央に鋼製扉を付けた「試験体 3」である。

試験体 1 では、層間変形角を大きくすると、石膏ボードを止めているビスによりボードが削られてビス穴が大きくなり、ビスの頭が沈むことが観察されたことが報告されている。また、ボード端部が H 形鋼に押されてしわが起き始め、次第にボード目地部においてもしわが発生し、最終的にはビスが外れてボード端部が面外に大きくはらみだしや、ボード端部が破損する現象が観察されたことが方向されている。正負繰返加力を行った際には、層間変形角 1/300 の時にボード表面に微小なしわが起き始め、層間変形角 1/100 rad の時にはっきりしたしわが多数起き、ボード端部に面外方向のはらみが生じ、層間変形角 1/75 rad の時に一部のビスが抜けてボードのはらみ出しが大きくなることが報告されている。漸増加力を行った際には、層間変形角 1/150 rad の時にボード端部にしわが生じ、層間変形角 1/100 rad の時にしわが多数発生しボードの端部にはらみが生じ、層間変形角 1/50 rad の時にボードの端部が破損したことが報告されている。

ボードを二重張りした試験体 2 では、層間変形角 1/200 rad の時にボード表面に微小なしわが起き始め、層間変形角 1/100 rad の時にボード端部に面外方向のはらみが生じ、層間変形角 1/150 の時に一部のビスが抜けてボードのはらみ出しが大きくなり、層間変形角 1/40 rad の時にボードの端部が破損したことが報告されている。

ドアを取り付けた試験体 3 では、ボードの損傷は開口部周辺に集中し、層間変形角 1/150

¹ 金子美香, 神原浩, 塩原等, 寺田岳彦, 田村和夫. (2006). 軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験. 2005 年度日本建築学会 関東支部研究報告集, 76, 77-80.

rad の時に開口部隅にしわが発生し、層間変形角 1/100 rad の時に開口部隅のしわが大きくなることが報告されている。ドアの開閉実験も行われているが、これについてはドアの項で紹介する。

「軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証」(加登美喜子ら、2007)

2007 年の加登らによる研究「軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証」²は、軽量鉄骨下地間仕切り壁の層間変形角と損傷とその補修費用を定量化することを目的としたものであり、軽量鉄骨下地間仕切り壁の試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、3 つの試験体が用いられており、寸法は高さ 2800mm、幅 3950mm である。石膏ボードは厚さ 12.5mm のものを下地の両面に二枚ずつ張っている。試験体の種類は、平坦な壁を模した「一般壁試験体」、中央に鋼製扉を付けた「扉付き壁試験体」、そして平面的に L 字型とし、間仕切り壁のコーナー部を模した「L 字型壁試験体」である。

一般壁試験体では、層間変形角 1/400 rad の時に石膏ボードが上下ランナー内を滑り、層間変形角 1/200 の時に鉄骨柱と石膏ボードが接触し、層間変形角 1/67 rad の時に石膏ボードの四隅に延長方向に 15mm 程度の膨れがみられ、層間変形角 1/50 rad の時に膨れが 200~300mm に発展し、石膏ボードの縦目地にひび割れが発生し、層間変形角 1/25 rad の時に膨れが 400~900mm に発展し、縦目地のひび割れや石膏ボードの面外変形が発生し、層間変形角 1/17 rad の時に面外変形や鉛直方向のひび割れが発生し、層間変形角 1/13 rad の時にスタッドと石膏ボードが外れ、別の箇所の上張りボードが下張りボードから外れかけ、層間変形角 1/10 rad の時に上張りボードおよび下張りボードが脱落したことが報告されている。

扉付き壁試験体では、層間変形角 1/400 rad の時に石膏ボードが上下ランナー内を滑り、層間変形角 1/200 rad の時に扉開口上部から 45 度方向に長さ 40mm の膨れが発生し、層間変形角 1/100 rad では鉄骨柱と石膏ボードが接触し、扉開口上部の膨れが進展し、石膏ボード上部にも膨れが発生し、層間変形角 1/67 rad では扉上部と上部梁からのひび割れが貫通し、扉上部と石膏ボードと扉の蝶番がずれ始め、層間変形角 1/50 rad では石膏ボードの面外変形が顕著になり、層間変形角 1/25 rad では石膏ボードの縦目地にひび割れが発生し、扉下部および四隅下部の石膏ボードが圧壊し、扉枠が破断し、層間変形角 1/17 rad の時に石膏ボード上部が全体的に圧壊し、スタッドがランナーから外れ、扉の開口補強材と隣接するスタッドの接合金物が外れ、層間変形角 1/10 rad の時に石膏ボードが脱落し、扉上部で扉枠が破断し蝶番が完全に外れることが報告されている。

² 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛. (2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139

L字型試験体では、層間変形角 $1/400 \text{ rad}$ の時に直交壁が面外に変形し、層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ の時に石膏ボードの横目地にひび割れが発生し、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時に鉄骨柱と石膏ボードが接触しコーナー部に更なる膨れが生じ、層間変形角 $1/67 \text{ rad}$ の時に石膏ボード端部に鉛直方向に長さ 130 mm 程度の膨れがみられ、コーナー部上部の石膏ボードが面外に折れ、層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に石膏ボード端部で鉛直方向に長さ 240 mm 程度に膨れが進展し、コーナー部の南面の石膏ボードが面外に折れ、一部剥落し、層間変形角 $1/25 \text{ rad}$ の時に石膏ボードの圧壊と更なる剥落などが発生し、層間変形角 $1/17 \text{ rad}$ の時に石膏ボード端部からスタッドが飛び出し、コーナー部のスタッドにねじれが生じ、層間変形角 $1/13 \text{ rad}$ の時に石膏ボードの面外への変形と脱落が発生し、層間変形角 $1/10 \text{ rad}$ では石膏ボードの更なる脱落が報告されている。

なお、この研究では、一般壁試験体に対して面内方向の動的載荷試験も行っているが、上記の静的載荷試験の結果と比較すると、目地のひび割れなどの損傷は若干早めに進展するものの、損傷状況および全体挙動の傾向はほとんど変わらないと報告されている。

「地震により損傷を受けた乾式間仕切壁の耐火性能」(小野寺賢ら、2008)

2008年の小野寺らによる研究「地震により損傷を受けた乾式間仕切壁の耐火性能」³は、石膏ボードの取り付け方などを考慮した軽量鉄骨下地間仕切壁の層間変形角と損傷の関係や、耐火性能に与える影響を考察することを目的としたものであり、軽量鉄骨下地間仕切り壁の試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、6つの試験体が用いられており、寸法は高さ 2720 mm 、幅 2990 mm である。試験体の種類は、下地の片面に強化石膏ボードを二枚、通常の施工方法で張った「S-2」、下地の片面に強化石膏ボードを二枚、強化ステーブルとビスで張った「S-3」、下地の片面に強化石膏ボードを二枚、強化ステーブルで張った「S-4」、下地の両面に普通石膏ボードと硬質石膏ボードを二枚ずつ、横方向に張った「W-2」、下地の両面に普通石膏ボードと硬質石膏ボードを二枚ずつ、縦方向に張った「W-3」、他の試験多いと比較して剛性の高い下地の両面に普通石膏ボードと硬質石膏ボードを二枚ずつ、横方向に張った「W-4」である。

「S-2」では、層間変形角が $1/150 \text{ rad}$ の時に目地部のパテに亀裂が発し、層間変形角 $1/109$ の時に上張りボードのロックキング(ボード単体の面内方向の回転)が始まったことが報告されている。「S-3」では、層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時に目地部に隙間が確認され、ビス部

³ 小寺賢, 鈴木弘之, 大宮喜文, 鈴木淳一, 市原嵩紘, 村井亮介, 伊藤卓, 大熊晃一路.(2009). 地震により損傷を受けた乾式間仕切壁の耐火性能: その1: 実験概要、観察結果. 2008年度日本建築学会関東支部研究報告集, 79, 549-552.

を起点に亀裂が入り、層間変形角 $1/60 \text{ rad}$ を過ぎたあたりからロッキングの傾向がみられたことが報告されている。「S-4」では、終始ロッキングは発生せず、層間変形角 $1/60 \text{ rad}$ を過ぎたあたりから追加ステーブルを起点に亀裂が生じたことが報告されている。

「W-2」では、層間変形角 $1/120 \text{ rad}$ あたりの時に隅角部を中心にビス周りの下張りボードが崩れ、層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時に上張りボードが面外に押し出され始め、層間変形角 $1/60 \text{ rad}$ の時に目地部のパテに亀裂が発生し、層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ あたりの時に座屈が発生し、上張りボードと下張りボードが同時にビスから外れ、外に飛び出したことが報告されている。「W-3」では、層間変形角 $1/150 \text{ rad}$ あたりから目地部のパテに亀裂が入り、ロッキングの兆候が見られ、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時に中央の上張りボードの角に隙間がみられ、層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に中央の上張りボードにロッキングがみられることが報告されている。「W-4」では、ロッキングは終始起こらず、層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ あたりよりしわが観察されはじめたことが報告されている。なお、加熱実験では上張りボードが崩れ、下張りボードのビス周りに損傷が発生していたことが報告されている。

層間変形角を大きくすると、石膏ボードを止めているビスによりボードが削られてビス穴が大きくなり、ビスの頭が沈むことが観察されたことが報告されている。また、ボード端部が H 形鋼に押されてしわができ始め、次第にボード目地部でもしわが発生し、最終的にはビスが外れてボード端部が面外に大きくはらみだしや、ボード端部が破損する現象が観察されたことが方向されている。正負繰返加力を行った際には、層間変形角 $1/300 \text{ rad}$ の時にボード表面に微小なしわができ始め、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時にはっきりしたしわが多数でき、ボード端部に面外方向のはらみが生じ、層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時に一部のビスが抜けてボードのはらみだしが大きくなることが報告されている。漸増加力を行った際には、層間変形角 $1/150 \text{ rad}$ の時にボード端部にしわが生じ、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時にしわが多数発生しボードの端部にはらみが生じ、層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時にボードの端部が破損したことが報告されている。

「地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 その 9 間仕切り壁および扉の挙動」(隈澤文俊ら、2010)

2010 年の隈澤らによる研究「地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 その 9 間仕切り壁および扉の挙動」⁴⁾は、RC 骨組に設置された乾式間仕

⁴⁾ 隈澤文俊, 脇山善夫, 加藤博人, 向井智久, 田尻清太郎, 安達和男. (2010). 地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 : その 9 間仕切り壁および扉の挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 87-88.

切り壁と扉の挙動について把握することを目的としたものであり、軽量鉄骨下地間仕切り壁の試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、石膏ボードを張ったものとしては 2 つの試験体が用いられている。試験体の種類は、下地の両面に石膏ボード二枚を張り鋼製扉を付けた「壁 A」と、鋼製扉を付けていない「壁 D」である。

鋼製扉が付いた壁 A では、扉周辺に損傷が集中し、扉枠隅角部ではボードの破壊が発生したことが報告されている。鋼製扉が付いていない壁 D は損傷が殆ど発生しなかったことが報告されている。

「集合住宅における内装間仕切壁の面内加力実験」(三谷一房ら、2011)

2011 年の三谷らによる研究「集合住宅における内装間仕切り壁の面内加力実験」⁵⁶は、集合住宅内の間仕切り壁の地震時の損傷程度に関するデータを収集することを目的としたものであり、軽量鉄骨下地間仕切り壁の試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、石膏ボードを張ったものとしては 4 つの試験体があり、寸法は高さ 2520mm、幅 2700mm 程度である。石膏ボードは下地の両面に一枚ずつ張っている。試験体の種類は、平坦な壁の端部に袖壁を付けた「袖壁付直線型」、中央にコーナ部を付けた「クランク型」、中央に直交壁を付けた「直交型」、そして中央に直交壁と扉を付けた「開口付き直行型」である。

袖壁直交型では、袖壁部分のスタッドの損傷はあるものの、直線壁のボードにはビス周りの膨れは生じなかったことが報告されている。クランク型では、直行型では、層間変形角 $1/400 \text{ rad}$ の時から入隅部の上張りボードのビス周りに膨れが生じ始め、クランク部分に損傷が集中し、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ 前後で直線壁端部のスタッドの変形が報告されている。壁上端のボードが破断し、層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ の時にスタッドの変形がみられ、直交壁と直線壁の接合部分が損傷したと報告されている。開口部付直行型では、層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ の時に開口部上のクロスが破断し、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時に建具の蝶番が抜けたがボードのビス周りの膨れは殆ど確認されなかったことが報告されている。

その他の研究

次の二つの研究は、ボード材が石膏ボードではないが、軽量鉄骨下地にボードを張り付け

⁵ 三谷一房, 林徹, 河内武, 大内渉, 林幸輝. (2011). 集合住宅における内装間仕切壁の面内加力実験 : その 1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 751-752.

⁶ 林徹, 三谷一房, 河内武, 大内渉, 林幸輝. (2011). 集合住宅における内装間仕切壁の面内加力実験 : その 2 変形モードと損傷状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 753-754.

た間仕切り壁を有す試験体に対して面内方向の層間変位を与えた加力実験において、発生した損傷について報告のある研究の紹介である。

1977年の坂本功らによる研究「非耐力壁の層間変位追従性に関する研究（その2）」⁷は、非耐力壁の耐震安全性を調べることを目的としたものであり、軽量鉄骨下地にフレキシブルボードを張り付けた試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、層間変形角 $1/167 \text{ rad}$ の時に隅部のひび割れ、層間変形角 $1/125 \text{ rad}$ の時に胴縁チャンネルの開き、層間変形角 $1/42 \text{ rad}$ の時にボードのひび割れたことが報告されている。

1999年の古賀誠一らによる研究「乾式間仕切壁の動的層間変形能の調査」⁸は、慣性力と強制変形に対する安全性を確認することを目的としたものであり、軽量鉄骨下地に強化石膏ボードと繊維混入けい酸カルシウム版を張り付けた試験体に対して面内方向の慣性力と層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ の時に縦目地クロスにしわが発生し四周のクロスとシーリングが切れ、層間変形角 $1/150 \text{ rad}$ の時にしわが増加しビスが抜け（約 7mm ）、層間変形角 $1/120 \text{ rad}$ の時にクロスが縦・横共に切れビスがさらに抜け（約 9mm ）、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時にビスがさらに抜けた（約 14mm ）ことが報告されている。

また、2008年の松岡祐一らによる研究「軽量鉄骨下地間仕切壁とそれに囲まれた鋼製下地天井の耐震性能」⁹は、軽量鉄骨下地間仕切り壁の立体動的挙動と、壁体との相互作用を考慮した鋼製下地吊り天井の耐震性能を調べることを目的とし、振動台を用いた加力実験についての報告がある。文章で簡単にまとめられているだけであるが、間仕切り壁の層間変形角ごとの損傷についても報告されているので簡単に紹介する。層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ 付近の時にボードのロッキングによる扉上部のまぐさ部分の圧壊などが発生し、層間変形角 $1/66 \text{ rad}$ 付近の時に上張りボードと下張りボードの剥がれが確認され、層間変形角 $1/28 \text{ rad}$ 付近の時には脱落するボードも発生したことが報告されている。

2022年の吉敷らによる一連の研究「軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その1 研究背景と目的」¹⁰など、2012年以降、すなわち東北地方太平洋沖地震

⁷ 坂本巧, 伊藤弘, 山下武則. (1977). 非耐力壁の層間変位追従性に関する研究 その2: 構造系. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 52, 1253-1254.

⁸ 古賀誠一, 山崎之典, 西脇武, 石本貞夫, 品川肇. (1999). 乾式間仕切壁の動的層間変形能の調査. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999, 1121-1122.

⁹ 松岡祐一, マコーミックジェイソン, 吹田啓一郎, 中島正愛. (2008). 軽量鉄骨下地間仕切壁とそれに囲まれた鋼製下地天井の耐震性能. 日本建築学会構造系論文集, 632, 1857-1864. doi:10.3130/aijs.73.1857

¹⁰ 吉敷祥一, 清家剛, 元結正次郎, 輿石直幸. (2018). 軽量鉄骨下地乾式間仕切り壁の地震時損傷抑制に関する研究 その1 研究背景と目的. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1073-1074.

の後は、面外方向への加力に着目した実験が多く行われている。ただし、発生する損傷を確認することが目的ではなく、力学的性状を把握することが主な目的であるため、実建物を模した試験体に対する加力実験ではなく、一部の部材や、壁の一部分を取り出した試験体に対する加力実験が多い。そのため、本研究ではこれらの紹介は省略する。

ALC 外壁を対象とした既往研究

「ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究」(坂本功ら、1987)

1987年の坂本らによる研究「ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究」¹¹⁾¹²⁾¹³⁾は、ロッキング構法により取り付けられた ALC 外壁の層間変位への追従性について把握することを目的としたものであり、ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、6つの試験体が用いられている。試験体の種類は、一般部分を模した二層壁面の「No.1」、最下層の壁面を模した「No.2-A」と「No.2-B」(No.2-Aには厚さ6mmのライナー(クッション材)を入れてある)、開口部廻りの壁面を模した「No.3」、「No.4」(取り付け金物が異なる)、隅角部の壁面を模した「No.5」である。

試験体 No.1 では、層間変形角 $1/30$ rad の時に自重受け付近に剥離が観察されたことが報告されている。試験体 No.2-A では、層間変形角 $1/30$ rad の時に下端角にクラックが観察されたことが報告されている。試験体 No.2-B では、層間変形角 $1/60$ rad の時にクラックが発生し、層間変形角 $1/30$ rad の時に下端角にクラックが観察されたことが報告されている。試験体 No.3 では、層間変形角 $1/85$ rad の時に開口上部角にクラックが発生し、層間変形角 $1/30$ rad の時に自重受け金具付近に剥離が発生したことが報告されている。試験体 No.4 では、層間変形角 $1/60$ rad の時に自重受け金具付近に剥離が発生し、層間変形角 $1/30$ rad の時に開口縦材に当たりクラックが発生したことが報告されている。試験体 No.5 では、層間変形角 $1/30$ rad の時でも異常がなかったことが報告されている。

¹¹⁾ 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎. (1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究: その1. 構法及び実験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 201-202.

¹²⁾ 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎. (1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究: その2. 平面試験体の試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 203-204.

¹³⁾ 坂本功, 大橋好光, 山田誠, 渡辺拓文, 横木光一郎. (1987). ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究: その3. 立体試験体の試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 62, 205-206.

「ALC ロッキング構法実大変形成従性試験」(伊藤弘ら、1998)

1998年の伊藤らによる研究「ALC ロッキング構法実大変形成従性試験」¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾は、ロッキング構法により取り付けられた ALC 外壁の層間変位への追従性について把握することを目的としたものであり、ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、鉄骨 3 層の建物に ALC 外壁を設置され、静的加力が一度行われた後に、内装材等を取り付けて再度静的加力が行われた。また、ALC パネルと ALC パネルの間や ALC パネルと扉の間に充填されるシーリング材について複数の種類が試された。

内外装材を取り付ける前の加力実験では、層間変形角 $1/150 \text{ rad}$ の時にパネルの角部にひび割れが発生し、層間変形角 $1/120 \text{ rad}$ の時にひび割れが伸長し、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時にひび割れがパネル裏面に貫通したことが報告されている。

内外装材を取り付けた後の加力実験では、層間変形角 $1/300$ の時にパネルにひび割れが発生し、層間変形角 $1/150 \text{ rad}$ の時にパネルの新たなひび割れやひび割れの伸長が発生し、層間変形角 $1/120 \text{ rad}$ の時にパネルの欠けやひび割れの伸長が発生し、層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時にパネルの新たなかけやひび割れが発生し、層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時にアンカー付近のひび割れや新たなひび割れが 14 か所で発生したことが報告されている。ひび割れなどが観察された ALC パネルは、多くが開口部と隣り合う ALC パネルであった。

シーリング材についても、アクリル系シーリング材は層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ の時にしわが発生し層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ までは凝集破壊が殆ど発生しないこと、ポリウレタン系シーリング材は層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ までしわや凝集破壊が発生しないことが報告されている。

¹⁴⁾ 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 107-108.

¹⁵⁾ 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 高橋光雄, 富田和男廣波純二, 伊藤弘, 西田和生, .(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 2 単層加力試験の結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 109-110.

¹⁶⁾ 西田和生, 伊藤弘, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 3 ALC パネルの動き. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 111-112.

¹⁷⁾ 水谷吉克, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 4 パネルのひびわれ状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 113-114.

¹⁸⁾ 相子恒夫, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形成従性試験 : その 5 建具・シーリング材の状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 115-116.

「現場タイル張り ALC パネル縦壁ロックンク構法の層間変形追従性能に関する実験的研究 その 1 層間変形追従性能試験結果」(永井昌志ら、1998)

1998年の伊藤らによる研究「現場タイル張り ALC パネル縦壁ロックンク構法の層間変形追従性能に関する実験的研究 その 1 層間変形追従性能試験結果」¹⁹⁾は、ロックンク構法により取り付けられたタイル付きの ALC 外壁の層間変位への追従性について把握することを目的としたものであり、ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。

層間変形角 $1/100$ rad (静的加力) の時に窓下のパネル上部の隅角部の欠けが報告されているが、それ以外は静的加力と動的加力の双方に対して層間変形角 $1/50$ まで損傷の報告はされていない。

「現場タイル張り ALC パネルの層間変形追従性能に関する実験的研究 その 2 ロックンク構法へのタイル張り」(荻原達也ら、2002)

2002年の荻原らによる研究「現場タイル張り ALC パネルの層間変形追従性能に関する実験的研究 その 2 ロックンク構法へのタイル張り」²⁰⁾は、ロックンク構法により取り付けられたタイル付きの ALC 外壁について、タイル張り仕様を変化させたときの層間変位への追従性を把握することを目的としたものであり、ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、2つの試験体が用いられている。試験体の種類は、パネル間目地部をタイル伸縮目地にした「R-A」と、パネル間目地部をタイルがまたぐタイプにした「R-B」である。

試験体 R-A については、層間変形角 $1/60$ rad の時を含め ALC 外壁の損傷は報告されていない。試験体 R-B については、層間変形角 $1/200\sim 1/150$ rad の時に ALC パネルにひび割れが発生し、層間変形角 $1/100\sim 1/60$ rad の時に更に ALC パネルにひび割れが発生したことが報告されている。ひび割れなどが観察された ALC パネルは、多くが開口部と隣り合う ALC パネルであった。

¹⁹⁾ 永井昌志, 山崎健一, 河辺伸二. (1998). 現場タイル張り ALC 縦壁ロックンク構法の層間変形追従性能に関する実験的研究 : その 1. 層間変形追従性能試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 121-122.

²⁰⁾ 荻原達也, 細内正紀, 横家尚, 横木光一郎. (2002). 現場タイル張り ALC パネルの層間変形追従性能に関する実験的研究 : その 2 ロックンク構法へのタイル張り. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 355-356.

「内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形追従性」(高橋大祐ら、2002)

2002 年の高橋らによる研究「内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形追従性」²¹は、ロッキング構法により取り付けられた ALC 外壁について、動的に与えた層間変位への追従性を把握することを目的としたものであり、ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。

層間変形角 1/385 rad の時（ただし層間変形角 1/200 rad を経験後）（静的加力）に壁頂部での割れが発生したことが報告されている。これ以外に、静的加力と動的加力の両方で実験終了時（層間変形角 1/100 rad の時）まで損傷は報告されていない。

「ALC 帳壁部材の耐震安全性に関する基礎的研究（その 1. 実験概要および構法の違いによる影響）」(菊池雅史ら、2003)

2003 年の菊池らによる研究「ALC 帳壁部材の耐震安全性に関する基礎的研究(その 1. 実験概要および構法の違いによる影響)」²³は、ロッキング構法により取り付けられた ALC 外壁について、大地震時における耐震性および安全性を明確に表現することを目的としたものであり、ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。また、静的加力の実験において、層間変形角 1/200 rad の時には損傷が発生していないことが報告されている。

「高層建物の地震応答再現実験に組み込まれた ALC 外壁システムに関する概要高層建物の非構造部材・家具什器に関する E-ディフェンス振動実験 その 8」(鳥谷修平ら、2007)

2007 年の鳥谷らによる研究「高層建物の地震応答再現実験に組み込まれた ALC 外壁システムに関する概要」²⁴は、ALC 外壁などについて、高層建物の地震応答に対する挙動を把握することを目的としたものであり、ロッキング構法により取り付けられた ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。また、動的加力（最大層間変形角 1/67 rad）の際に、開口部廻りに軽微なひび割れが発生したことが報告されている。

²¹ 高橋大祐, 橋本敏男, 池田賢, 清家剛. (2002). 内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形能試験 : その 1 研究概要及び試験方法. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 359-360.

²² 清家剛, 池田賢, 高橋大祐, 橋本敏男. (2002). 内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形能試験 : その 2 試験結果及び考察. 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 361-362.

²³ 菊池雅史, 小山明男, 小宮岳枝, 小林正人, 中山政則, 横家尚. (2003). ALC 帳壁部材の耐震安全性に関する基礎的研究 : その 1. 実験概要および構法の違いによる影響. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003, 195-196.

²⁴ 鳥谷修平, 長江拓也, 福山國夫, 藤谷秀雄, 城戸史郎, 中谷成男, 梶原浩一, 中島正愛. (2007). 高層建物の地震応答再現実験に組み込まれた ALC 外壁システムに関する概要 : 高層建物の非構造部材・家具什器に関する E-ディフェンス振動実験-その 8. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2007, 565-566.

「実大 4 層鉄骨造建物の振動台実験における外装材の耐震性能評価」(松岡祐一ら、2009)

2009 年の松岡らによる研究「実大 4 層鉄骨造建物の振動台実験における外装材の耐震性能評価」²⁵は、ALC 外壁の変形追従性能を確認することを目的としたものであり、ロックン グ構法により取り付けられた ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験につ いての報告がある。この実験では、3つの試験体が用いられている。試験体の種類は、無開 口の ALC 外壁を模した「基本試験体」、開口部を有す ALC 外壁を模した「開口付き試験体」、 そして実大 4 層鉄骨骨組に ALC 外壁を設置した「実大振動台実験試験体」である。基本試 験体と開口付き試験体は静的な载荷が行われ、実大振動台実験試験体は動的な载荷が行わ れた。

基本試験体では、層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に ALC パネル下端角部にひび割れが発生し、 層間変形角 $1/25 \text{ rad}$ の時に ALC パネル下部取付金物廻りにひび割れが発生し、層間変形角 $1/13$ の時に ALC パネル上部取付金物周りにひび割れが発生し、層間変形角 $1/10 \text{ rad}$ の時に 剥落が多数発生し、アンカー鋼棒が露出したことが報告されている。

開口付き試験体では、層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時に開口部上部の ALC パネルにひび割れが 発生し、層間変形角 $1/67 \text{ rad}$ の時に開口部下部の ALC パネルにひび割れが発生し、層間変 形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に ALC パネル下端角部にひび割れが発生し、層間変形角 $1/25 \text{ rad}$ の時に ALC パネル下部取付金物周りにひび割れが発生し、水平開口補強材端部の溶接が破断し、 層間変形角 $1/67 \text{ rad}$ の時に鉛直開口補強鋼材の端部の溶接が破断し、層間変形角 $1/13 \text{ rad}$ の 時に ALC パネル上部の取付金物周りにひび割れが発生し、層間変形角 $1/10 \text{ rad}$ の時に剥落 が多数発生し、アンカー鋼棒が露出し、層間変形角 $1/6 \text{ rad}$ の時に開口部及び開口部下部の ALC パネルが開口補強材とともに面外へ脱落したことが報告されている。

実大振動台実験試験体では、60%加振（最大層間変形角が 1 層で約 $1/52 \text{ rad}$ 、2 層で約 $1/59 \text{ rad}$ ）の時に 100mm 程度のひび割れが 1 層のコーナー部や 2 層と 3 層の境界などの一部で発 生したことが報告されている。また、100%加振（最大層間変形角が 1 層で約 $1/5 \text{ rad}$ 、2 層 で約 $1/53 \text{ rad}$ ）の時に多くの ALC パネルが上下の固定部がともに破壊される脱落や、株の 固定部のみ破壊される宙づり状態になることが報告されている。

²⁵ 松岡祐一，吹田啓一郎，山田哲，島田侑子，赤澤資貴，松宮智央.(2009). 実大 4 層鉄骨造建物の震動台 実験における外装材の耐震性能評価 . 日本建築学会構造系論文集, 641, 1353-1361. doi:10.3130/aijs.74.1353

「超高層建物の地震応答を受ける ALC 版外壁の耐震性能 E-ディフェンス振動台実験」 (長江拓也ら、2009)

2009年の長江らによる研究「超高層建物の地震応答を受ける ALC 版外壁の耐震性能 E-ディフェンス振動台実験」²⁶⁾は、地震時の ALC 外壁の性能を確認することを目的としたものであり、ロッキング構法により取り付けられた ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では 2 層の鉄骨骨組に ALC 外壁を模した試験体に対して動的加力が行われた。

鷹取波応答再現後（最大層間変形角が約 1/50 rad）には、下端角部の軽微なひび割れや、開口部下の ALC パネルに開口補強の拘束によるひび割れが発生したことが報告されている。その後の超大変形をさせた実験（最大層間変形角が約 1/23 rad）の時には、1 層目の ALC パネルの下端角部に亀裂と剥離やボルト付近のひび割れの発生が報告されている。

「集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討」(法身裕治ら、2016)

2016年の法身らによる研究「集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討」^{27,28,29)}は、板状集合住宅の雨掛かり外壁部に乾式工法を採用する場合の留意点を抽出することを目的としたものであり、ロッキング構法により取り付けられた ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。静的加力と動的加力の両方が行われた。

この実験では、層間変形角 1/400 rad（静的加力）の時に開口補強鋼材と ALC パネル間のスペーサーにずれが発生し、層間変形角 1/200 rad（静的加力）の時にモルタルと開口補強鋼材の間に隙間が発生し、層間変形角 1/100 rad（静的加力）の時にモルタルにクラックが発生し、層間変形角 1/50 rad（静的加力）の時に ALC パネル間の縦目地のシールの破断が発生し、層間変形角 1/50 rad（動的加力）の時に一部のボルトの緩みやワッシャーのずれ、下部 ALC パネルにひび割れが発生したことが報告されている。

²⁶⁾ 長江拓也, 藤谷秀雄, 福山國夫, 梶原浩一, 城戸史郎. (2009). 超高層建物の地震応答を受ける ALC 版外壁の耐震性能 -E-ディフェンス振動台実験-. 日本建築学会技術報告集, 15(31), 667-672.
doi:10.3130/aijt.15.667

²⁷⁾ 法身裕治, 林徹, 太田匡信, 佐藤高行. (2016). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 1 試験の概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016, 889-890.

²⁸⁾ 林徹, 法身裕治, 太田匡信, 佐藤高行. (2016). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 2 試験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016, 891-892.

²⁹⁾ 林徹, 法身裕治, 太田匡信, 佐藤高行. (2017). 集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 3 開口部まわりの挙動について. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017, 1139-1140.

その他の研究

2014年の石原らによる研究「中間梁に支持された2段積みALC間仕切壁の地震時面外挙動に関する実験：その1 振動台実験の計画とALCパネルの強度」³⁰など、2012年以降、すなわち東北地方太平洋沖地震の後、ALC外壁では無く、ALC間仕切り壁の実験が多く行われている。

ドアを対象とした既往研究

「8階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験」(後藤哲郎ら、1981)

1981年の後藤らによる研究「8階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験」^{31,32}は、8階建壁式鉄筋コンクリート造集合住宅の躯体の耐震性を把握することを目的としたものであり、ドアを設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、在来型のドアの試験体(A1、A2、A3)と、主にクリアランスを拡大することで耐震性について改良したドアの試験体(B1、B2、B3)の計6体に対して、静的加力を行ったものである。

在来型の試験体A1~A3は、層間変形角1/400 radの時に蝶番が変形し、層間変形角1/200 radの時にA2のドアが座屈することが報告されている。改良型の試験体B1~B3は、層間変形角1/200の時に枠にゆがみが生じるが、層間変形角1/100 radの時でも丁番と枠の損傷にとどまったという報告がされている。また、開閉機能に関しては、在来型の試験体A1~A3は層間変形角1/400~1/200 radで、改良型の試験体B1~B3は層間変形角1/200~1/100 radで不具合が生じたという報告がされている。

「日米共同大型耐震実験研究 56 鉄骨造実大6層建物による非構造部材の耐震実験 その7 ドアの実験結果」(西田和生ら、1986)

1986年の西田らによる研究「日米共同大型耐震実験研究 56 鉄骨造実大6層建物による

³⁰ 石原直, 田口尚, 石田琢志, 渡辺貴樹, 渡壁守正, 鈴木正裕, 長谷川隆, 五十嵐規矩夫.(2014). 中間梁に支持された2段積みALC間仕切壁の地震時面外挙動に関する実験：その1 振動台実験の計画とALCパネルの強度. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014, 445-446.

³¹ 後藤哲郎, 広沢雅也, 山下一也, 石塚忠行.(1981). 8階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験：その9. ドア耐震性に関する実験概要及結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 56, 1695-1696.

³² 後藤哲郎, 広沢雅也, 山下一也.(1981). 8階建壁式鉄筋コンクリート造アパートの耐震性に関する実大破壊実験：その10. ドア耐震性に関する実験結果の検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 56, 1697-1698.

非構造部材の耐震実験「その 7 ドアの実験結果」³³は、6 階建ての鉄骨造建物に非構造部材を設置し耐震性を把握することを目的としたものであり、コンクリートブロック壁にドアを設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、通常タイプのドアと耐震タイプのドアに対して静的加力を行ったものである。

通常タイプのドアは、層間変形角 $1/1050 \text{ rad}$ の時に開閉に支障をきたすものがあり、層間変形角 $1/714 \text{ rad}$ の時に開閉不能となるものもあったことが報告されている。また、耐震タイプでは層間変形角 $1/486 \text{ rad}$ で開閉に支障をきたし、層間変形角 $1/351 \text{ rad}$ の時に開閉不能となるものがあったことが報告されている。層間変位をほぼ 0 に戻した状態の場合、両タイプとも層間変形角 $1/175 \text{ rad}$ の時まではやや支障があるものの開閉は可能であり、層間変形角 $1/125 \text{ rad}$ の時までには開閉不能となったことが報告されている。

この実験では、鉄骨フレーム内に LGS 間仕切り壁とドアを設置した試験体に対して静的加力が行われた。なお、この研究については、LGS 間仕切り壁の項でも紹介している。

層間変形角 $1/300 \text{ rad}$ の時に開閉困難となり、層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ の時に開閉不能となり、層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時にドア枠に残留変形が発生し、変形を 0 に戻しても開閉が困難となったことが報告されている。

「地震後に開放可能な RC・SRC 造建物用鋼製ドア その 2 RC 壁の損傷を想定した耐震性試験」(渡辺博司ら、1997)

1997 年の渡辺らによる研究「地震後に開放可能な RC・SRC 造建物用鋼製ドア その 2 RC 壁の損傷を想定した耐震性試験」³⁴は、RC 壁の損傷を想定したドアの耐震性能を把握することを目的としたものであり、ドアを設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、RC 壁内に 5 種類のドアを設置した試験体に対して局部変形試験ならびに静的加力による変形試験が行われた。5 種類のドアとしては、一般の玄関ドアを模した「No.1」、ドアを枠の感覚が大きい耐震ドアの「No.2」、枠が変形して接触圧を緩和させる耐震ドアの「No.3」、二重枠により変形を吸収する「No.4」、そしてドアが変形して変形を吸収する「No.5」である。なお、この実験では、ドアの開放力、サムターントルク、ハンドルトルクに基準値を設け（それぞれ 50kgf 、 $20\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 、 $20\text{kgf}\cdot$

³³ 西田和生, 伊藤弘, 坂本功, 山内泰之. (1986). 日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)56: 鉄骨造実大 6 層建物による非構造部材の耐震実験(その 7. ドアの実験結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 61, 311-312.

³⁴ 渡辺博司, 佐藤謙和, 坪内信朗. (1997). 震後に開放可能な RC・SRC 造建物用鋼製ドア : その 2 RC 壁の損傷を想定した耐震性試験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997, 941-942.

cm)、これとの比較で評価を行っている。

局部変形試験では、試験体 No.1 の開放力のみが基準値を超過したと報告されている。ドア枠変形試験は、試験体 No.2~5 のみが対象であり、試験体 No.2 は枠の変形角 1/200 rad の時に、試験体 No.3 は枠の変形角 1/200 rad（正方向）と枠の変形角 1/150 rad（負方向）の時に、試験体 No.5 は層間変形角 1/120 rad の時に開放力が基準値を超過したと報告されている。試験体 No.4 は実験終了時（枠の変形角 1/60 rad）まで基準値を超過することはなかったと報告されている。

「ALC ロッキング構法実大変形追従性試験」(伊藤弘ら、1998)

1998 年の伊藤らによる研究「ALC ロッキング構法実大変形追従性試験」³⁵³⁶³⁷³⁸³⁹は、ロッキング構法により取り付けられた ALC 外壁の層間変位への追従性について把握することを目的としたものであり、ドアを設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、鉄骨 3 層の建物に ALC 外壁とドアを設置し、静的加力が一度行われた後に、内装材等を取り付けて再度静的加力が行われた。なお、この研究については、ALC 外壁の項でも紹介している。

内外装材を取り付ける前の加力実験では、層間変形角 1/200 rad の時に開扉できなくなり、層間変形角 1/150 以降の時にはノブを回転させることが不能となったことが報告されている。

内外装材を取り付けた後の加力実験では、層間変形角 1/150 rad 以降の時に開扉できなくなったことが報告されている。

³⁵ 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その 1 実験概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 107-108.

³⁶ 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 高橋光雄, 富田和男, 廣波純二, 伊藤弘, 西田和生, .(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その 2 単層加力試験の結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 109-110.

³⁷ 西田和生, 伊藤弘, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その 3 ALC パネルの動き. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 111-112.

³⁸ 水谷吉克, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その 4 パネルのひびわれ状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 113-114.

³⁹ 相子恒夫, 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男.(1998). ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 : その 5 建具・シーリング材の状況. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, 115-116.

「軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験」(金子美香ら、2006)

2005年の金子らによる研究「軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験」⁴⁰は、軽量鉄骨下地間仕切壁の層間変形角と損傷の関係や、荷重-変形関係を把握することを目的としたものであり、ドアを設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、鉄骨フレーム内にLGS間仕切り壁とドアを設置した試験体に対して静的加力が行われた。なお、この研究については、LGS間仕切り壁の項でも紹介している。

層間変形角 1/300 の時に開閉困難となり、層間変形角 1/200 rad の時に開閉不能となり、層間変形角 1/50 の時にドア枠に残留変形が発生し、変形を 0 に戻しても開閉が困難となったことが報告されている。

「軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証」(加登美喜子ら、2007)

2007年の加登らによる研究「軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証」⁴¹は、軽量鉄骨下地間仕切壁の層間変形角と損傷とその補修費用を定量化することを目的としたものであり、ドアを設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、鉄骨フレーム内にLGS間仕切り壁とドアを設置した試験体に対して静的加力が行われた。なお、この研究については、LGS間仕切り壁の項でも紹介している。

層間変形角 1/400 rad の時にはノブの回転に異常はなく開閉は可能であり、層間変形角 1/200 rad になると負方向の載荷時にノブは回転するもののドアと扉枠が接触して開閉できない状態になり(除荷するとドアは開けた)、層間変形角 1/67 rad の時に扉枠の変形によって錠前部分のラッチボルトが扉枠の受け座と接触しラッチボルトが塑性変形した結果、ノブが回転できなくなり、層間変形角 1/50 rad を経験した後は鉄骨フレームをもとの位置に戻してもラッチボルトの残留塑性変形に伴うダボ作用によってノブは回転せずまたドアの開閉できなくなったことが報告されている。

「地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 その9 間仕切り壁および扉の挙動」(隈澤文俊ら、2010)

2010年の隈澤らによる研究「地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した

⁴⁰ 金子美香, 神原浩, 塩原等, 寺田岳彦, 田村和夫. (2006). 軽量鉄骨下地間仕切壁の耐震性能確認実験. 2005年度日本建築学会 関東支部研究報告集, 76, 77-80.

⁴¹ 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛. (2007). 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証. 日本建築学会構造系論文集, 614, 139-146. doi:10.3130/aijs.72.139

実大試験体実験 その9 「間仕切り壁および扉の挙動」⁴²⁾は、RC 骨組に設置された乾式間仕切り壁とドアの挙動について把握することを目的としたものであり、ドア（耐震型と非耐震型）を設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、鉄筋コンクリート造実大1層4本柱にLGS間仕切り壁とドアを設置した試験体に対して静的加力が行われた。なお、この研究については、LGS間仕切り壁の項でも紹介している。ただし、LGS間仕切り壁の項では、軽量鉄骨下地に石膏ボードを張った試験体Aと試験体Dに関する報告を紹介したが、ここでは軽量鉄骨下地に石膏ボードを張った壁に耐震型のドアを設置した試験体Aと、軽量鉄骨下地に繊維強化版を張った壁に非耐震型のドアを設置した試験体Bと、鋼製間仕切りパネルに耐震型のドアを設置した試験体Cに関する報告を紹介する。

試験体Aでは、層間変形角 $1/67$ radの時にドアの縦枠下部において局部座屈が発生し、ドアが開放不能となったことが報告されている。試験体Bでは、層間変形角 $1/120$ radの時にドアが開放不能となり、層間変形角 $1/67$ radの時に縦枠下部において局部座屈が発生したことが報告されている。試験体Cでは加力終了時（層間変形角 $1/33$ rad）の時でも変形は確認されなかったが、層間変形角 $1/33$ radの時にラッチボルトとストライクが接触しドアノブが回らなかったため開放できなかったことが報告されている。

「地震による建築物の損傷状況、機能維持に着目した実大試験体実験 その8 非構造RC外壁の計測概要と損傷状態」(北代尚稔ら、2010)

2010年の北代らによる研究「地震による建築物の損傷状況、機能維持に着目した実大試験体実験 その8 非構造RC外壁の計測概要と損傷状態」⁴³⁾は、非構造RC外壁の耐震性能を把握することを目的としたものであり、ドアを設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、RC壁内に2種類のドアを設置した試験体に対して静的加力が行われた。2種類のドアとしては、非耐震型と耐震型である。

非耐震型のドアは、層間変形角 $1/200$ radの時に開閉力が1000Nを超え、開閉が不可となった報告されている。除荷時に関しては層間変形角 $1/120$ rad経験後にドアが閉まらない状態となったと報告されている。また、施錠は層間変形角 $1/120$ radのピーク時に初めて不可

⁴²⁾ 限澤文俊, 脇山善夫, 加藤博人, 向井智久, 田尻清太郎, 安達和男. (2010). 地震によるRC造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 : その9間仕切り壁および扉の挙動. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 87-88.

⁴³⁾ 北代尚稔, 衣笠秀行, 向井智久, 加藤博人, 田尻清太郎, 脇山善夫, 限澤文俊, 瀧川公策. (2010). 地震による建築物の損傷状況,機能維持に着目した実大試験体実験 : その8非構造RC外壁の計測概要と損傷状態. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 85-86.

能となり、除荷時に関しては層間変形角 $1/100$ rad 経験後においても可能であった。その他の損傷としては、層間変形角 $1/400$ rad の時にデットボルトとストライクが接触し、層間変形角 $1/120$ rad の時にストライクとアーマープレートが接触し、扉枠下中央部のシーリングが面外に飛び出し、扉右下から丁番にかけてのシーリング材が切れ、層間変形角 $1/100$ rad の時には扉枠が 2.5mm 程度面外に飛び出たことが報告されている。

耐震型のドアは、層間変形角 $1/120$ rad の時に開放力が 400N 程度であり開閉は可能であり、層間変形角 $1/100$ rad の時には 800N 程度となり、除荷時はドアが閉まらなくなったことが報告されている。除荷時の開閉力は層間変形角 $1/120$ rad まで 25N 程度で同じ値だったことが報告されている。その他の損傷としては、層間変形角 $1/400$ rad の時にラッチボルトが閉まらなくなり、層間変形角 $1/120$ rad で扉枠下辺中央部のシーリング材が面外にはらみ出し、扉枠左下からストライクまでのシーリング材が切れ、層間変形角 $1/100$ rad では扉枠が面外に飛び出し、ストライクとアーマープレートが接触し、層間変形角 $1/67$ rad の時は丁番すべてに 6.5mm 程度の浮きがみられたことが報告されている。

窓を対象とした既往研究

「はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 その1 単層静加力実験」(大枝千秋ら、1972)

1972 年の大枝らによる研究「はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 その1 単層静加力実験」⁴⁴は、サッシの材種や、シーリング材の種類をパラメーターとして、窓の耐震性を把握することを目的としたものであり、窓に直接面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。

アルミ合金サッシの軟性のシーリング材を用いた試験体では、窓枠の変形量が $1/11$ rad の時にガラスにひび割れが発生し、中骨が外れたことや、同じ条件の別の試験体で窓枠の変形量が $1/18$ の時にガラスは破壊せず中骨が外れたことなどが報告されている。

「はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 その2 実建物にはめ込んで静的繰り返し変形を与えた場合」(大枝千秋ら、1972)

1972 年の大枝らによる研究「はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 その2 実

⁴⁴ 大枝千秋, 芹沢達, 大和久孝. (1972). はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 : その1. 単窓静加力実験 : 構造. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 47, 513-514.

建物にはめ込んで静的繰り返し変形を与えた場合」⁴⁵は、サッシの材種や、シーリング材の種類に加え、ガラスとサッシの間のクリアランスの量をパラメーターとして、窓の耐震性を把握することを目的としたものであり、窓を設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、4層の壁式鉄筋コンクリートに窓を設置した試験体に対して静的加力が行われた。

アルミ合金サッシの軟性のシーリング材を用いた窓は、層間変形角 $1/115 \text{ rad}$ の時に隅割れが発生したものや、 $1/54 \text{ rad}$ の時に隅割れが発生したものがあつたことが報告されている。

「RC 造実大 7 層試験体による窓ガラスの耐震安全性に関する実験」(西田和生ら、1982)

1982 年の西田らによる研究「RC 造実大 7 層試験体による窓ガラスの耐震安全性に関する実験」⁴⁶は、鉄筋コンクリート造実大 7 層試験体に各種非構造部材を取り付け、その破壊状況を把握することを目的としたものであり、FIX 窓を設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。

アルミサッシの弾性シーリング材を用いた FIX 窓は、層間変形角 $1/125 \sim 1/73 \text{ rad}$ 程度の時にひび割れが発生していることが報告されている。また、ひび割れが発生した後、飛散防止フィルムを張ったガラスや網入りガラスにはガラスの落下が無かつたことが報告されている。

「ALC ロッキング構法実大変形追従性試験」(伊藤弘ら、1998)

1998 年の伊藤らによる研究「ALC ロッキング構法実大変形追従性試験」は、ロッキング構法により取り付けられた ALC 外壁の層間変位への追従性について把握することを目的としたものであり、窓を設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、鉄骨 3 層の建物に ALC 外壁と引き違い窓を設置し、静的加力が一度行われた後に、内装材等を取り付けて再度静的加力が行われた。なお、この研究については、ALC 外壁とドアの項でも紹介している。

内外装材を取り付ける前の加力実験では、層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ の時に引き違い窓のクレセントを閉めることが不能となり、層間変形角 $1/120 \text{ rad}$ の時に障子を開けることが不能と

⁴⁵ 大枝千秋, 芹沢達, 和泉正哲, 室田達郎. (1972). はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 : その 2 実物建物にはめ込んで静的繰り返し変形を与えた場合 : 構造. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 47, 515-516.

⁴⁶ 西田和生, 伊藤弘, 坂本功. (1982). RC 造実大 7 層試験体による窓ガラスの耐震安全性に関する実験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 57, 501-502.

なったことが報告されている。内外装材を取り付けた後の加力実験では、層間変形角 $1/150$ rad の時にクレセントを閉めることが不能となり、層間変形角 $1/50$ rad の時にクレセントが変形したことが報告されている。なお、ガラスの破損は見られなかったことも報告されている。

「木造軸組構法住宅の窓ガラス入りサッシュ付き壁と階段の静加力実験」(篠澤朋宏ら、2009)

2009 年の篠澤らによる研究「木造軸組構法住宅の窓ガラス入りサッシュ付き壁と階段の静加力実験」⁴⁷は、サッシュや窓ガラス、階段の耐震性能を把握することを目的としたものであり、引き違い窓を設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、木造住宅の壁を模したものに引き違い窓を設置し、静的加力が行われた。なお、ガラスは複層ガラスが用いられた。

層間変形角 $1/60$ rad 以降において、サッシュ枠端部の破壊や、クレセントの破壊が確認されたことが報告されている。また、層間変形角 $1/30$ rad まで与えた実験終了後には、サッシュ枠が大きくゆがんで、外側にはらんでいたが、窓ガラスは特に変化は見られなかったこと、シーリング材には残留変形があったことが報告されている。

「実大 4 層鉄骨造建物の振動台実験における外装材の耐震性能評価」(松岡祐一ら、2009)

2009 年の松岡らによる研究「実大 4 層鉄骨造建物の振動台実験における外装材の耐震性能評価」⁴⁸は、ALC 外壁の変形追従性能を確認することを目的としたものであり、引き違い窓が設置された ALC 外壁に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。特に、動的な載荷が行われた実験での窓の損傷の報告がされている。なお、この研究については、ALC 外壁とドアの項でも紹介している。

実大振動台実験では、60%加振（最大層間変形角が 1 層で約 $1/52$ rad、2 層で約 $1/59$ rad）の時には、窓の損傷はなく、加振後は全て開閉が可能であったことが報告されている。100%加振（最大層間変形角が 1 層で約 $1/5$ rad、2 層で約 $1/53$ rad）の時には、1 層の損傷が大きく、ALC パネルと共に、窓が宙づり状態になったことが報告されている。その他にも窓ガラスの割れ、サッシュのせん断変形・サッシュの鉛直材と水平材の接合部破壊などが見られたことが報告されている。その一方で、2 層より上層の窓は全て開閉が可能で損傷は見られ

⁴⁷ 篠澤朋宏, 五十田博, 村瀬伸吾, 森拓郎, 清水秀丸, 小松幸平. (2009). 木造軸組構法住宅の窓ガラス入りサッシュ付き壁と階段の静加力実験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009, 337-338.

⁴⁸ 松岡祐一, 吹田啓一郎, 山田哲, 島田侑子, 赤澤資貴, 松宮智央. (2009). 実大 4 層鉄骨造建物の震動台実験における外装材の耐震性能評価. 日本建築学会構造系論文集, 641, 1353-1361.

doi:10.3130/aijs.74.1353

なったことが報告されている。

「地震による建築物の損傷状況、機能維持に着目した実大試験体実験 その8 非構造 RC 外壁の計測概要と損傷状態」(北代尚稔ら、2010)

2010年の北代らによる研究「地震による建築物の損傷状況、機能維持に着目した実大試験体実験 その8 非構造 RC 外壁の計測概要と損傷状態」⁴⁹は、非構造 RC 外壁の耐震性能を把握することを目的としたものであり、引き違い窓と FIX 窓を設置した試験体に対して面内方向の層間変位を与える加力実験についての報告がある。この実験では、窓を設置した試験体に対して静的加力が行われた。FIX 窓は大小の二種類設置された。

引き違い窓は、層間変形角 $1/120$ rad の時に障子の回転が確認され、層間変形角 $1/100$ rad の時にはその回転変形が卓越し、1枚の障子が窓枠内のレールから脱落し、層間変形角 $1/50$ rad の時は窓上部横枠が大きくゆがみ、建枠も RC 壁に押され弓なりに変形したことが報告されている。また、層間変形角 $1/100$ rad 以降では、窓枠外側のシーリング材にも切れなどの損傷が確認され、層間変形角 $1/120$ rad の除荷時に、1枚の障子が面外方向に変位し、施錠が困難となったことが報告されている。

FIX 窓は、大小の窓共に層間変形角 $1/100$ rad の時に窓枠隅角部とガラス間のシーリング材に切れが生じ、層間変形角 $1/67$ rad 以降は窓ガラスの回転によりこの損傷が拡大したことが報告されている。FIX 窓(小)は、層間変形角 $1/33$ rad の時にも窓枠の損傷は確認されず、FIX 窓(大)は、層間変形角 $1/33$ rad に 300mm 程度のひび割れが発生したが、載荷終了までに窓枠の損傷は確認されなかったことが報告されている。

その他の研究

1972年の大枝らの研究⁵⁰では、窓の破壊について 1.7.節でも示した Bouwkamp の研究⁵¹で提案された式との比較が行われている。この式は、ガラスの対角線の長さが、変形したサッシの対角線の短いほうの長さに等しくなるまではガラスは破壊しないという考えに基づく。この考え方においては、ガラスとサッシの間のクリアランスの量が大きければ大きいほど、損傷が発生しにくいということになる。

⁴⁹ 北代尚稔, 衣笠秀行, 向井智久, 加藤博人, 田尻清太郎, 脇山善夫, 隈澤文俊, 瀧川公策. (2010). 地震による建築物の損傷状況, 機能維持に着目した実大試験体実験 : その 8 非構造 RC 外壁の計測概要と損傷状態. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 85-86.

⁵⁰ 大枝千秋, 芹沢達, 大和久孝. (1972). はめ殺しガラス窓の耐震性状に関する実大実験 : その 1. 単窓静加力実験 : 構造. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 47, 513-514.

⁵¹ Boukamp J. (1961). BEHAVIOR OF WINDOW PANELS UNDER IN-PLANE FORCES. Bulletin of the Seismological Society of America, 51(1), 85-109. doi:10.1785/BSSA0510010085

大枝らの研究以降も、ブーカムの式と実験結果を照らし合わせ、ガラスとサッシの間の適切なクリアランスの量などを定めることなどを行った研究が多く行われている。例えば、上記でも紹介した 1982 年の西田らによる研究⁵²の他にも、寺内らの一連の研究「サッシとガラスの面内変形に対する安全性の検討」(1975)⁵³、「サッシの面内変形に対するガラス周囲のシール材の挙動について」(1977)⁵⁴、「層間変形に伴うサッシとガラスのクリアランスの採り方と設計法」(1989)⁵⁵、「層間変形に対するサッシとガラスの最適シーリング目地設計方法の研究」(1991)⁵⁶がある。

また、台形ガラスなど長方形ではないガラスの面内挙動を把握することを目的とした松尾らによる一連の研究(例えば「層間変位ムーブメントを受ける異形ガラスの面内挙動に関する研究」(2010)⁵⁷⁵⁸⁵⁹)や、体育館の窓の耐震性を把握することを目的とした脇山らの一連の研究(例えば「体育館におけるガラス窓の地震被害を模擬した実験的検討」(2011)⁶⁰)でも、窓が取り付けられた試験体の加力実験について報告されている。ただし、これらの研究では加力実験を行っているが、発生した損傷に関する詳しい報告はされていない。

⁵² 西田和生, 伊藤弘, 坂本功. (1982). RC 造実大 7 層試験体による窓ガラスの耐震安全性に関する実験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 57, 501-502.

⁵³ 寺内伸, 中山實. (1975). サッシとガラスの面内変形に対する安全性の検討: 材料・施工. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 50, 247-248.

⁵⁴ 寺内伸. (1977). サッシの面内変形に対するガラス周囲のシール材の挙動について. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 52, 259-260.

⁵⁵ 大森信次, 寺内伸, 阿知良充. (1989). 層間変形に伴うサッシとガラスのクリアランスの採り方と設計法. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1991, 619-620.

⁵⁶ 寺内伸, 大森信次. (1991). 層間変形に対するサッシとガラスの最適シーリング目地設計方法の研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1991, 251-252.

⁵⁷ 松尾隆士, 名知博司, 片山篤. (2010). 層間変位ムーブメントを受ける異形ガラスの面内挙動に関する研究: その 1 ガラス形状とロッキング率の関係. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 89-90.

⁵⁸ 名知博司, 松尾隆士, 片山篤. (2010). 層間変位ムーブメントを受ける異形ガラスの面内挙動に関する研究: その 2 シーリング材の拘束効果の影響. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010, 91-92.

⁵⁹ 松尾隆士, 名知博司. (2012). ロッキング率算定式の提案: その 3 層間変位ムーブメントを受ける異形ガラスの面内挙動に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012, 955-956.

⁶⁰ 脇山善夫, 渡壁守正, 稲井慎介, 石岡拓, 飯塚信一, 高井茂光, 森田高市, 石原直. (2011). 体育館におけるガラス窓の地震被害を模擬した実験的検討: その 1 研究の背景および実験検討のための解析. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011, 401-402.

付録5. 内外装壁の被害の評価に関連する先行事例の内容

付録 5 では、6.1.2.節で紹介した内外装壁の被害の評価に関連する先行事例の具体的な内容について説明する。

「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説及び耐震設計施工要領」(日本建築学会、2003)

「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説及び耐震設計施工要領」¹では、層間変位に対する検討の中で、損傷の程度を以下のルールで A～E の 5 つに分類している。

損傷程度の区分	被害の有無	補修の必要	部品交換の必要	脱落、重要な機能の低下 (ドアの開閉不能など)
A	なし	なし	なし	なし
B	あり	なし	なし	なし
C	あり	あり	なし	なし
D	あり	あり	あり	なし
E	あり	あり	あり	なし

「1995 年兵庫県南部地震の被害調査に基づく非構造部材の耐震性評価」(金子美香ら、2003)

2003 年の金子らの研究²では、非構造部材の耐震性能を大まかに把握することを目的としている。1995 年兵庫県南部地震での非構造部材の被害の大きさと、構造被害との関係を整理するために、乾式間仕切り壁や ALC 外壁等の損傷の被災度を、以下のルールで 3 つ (4 つ) に分類している。

被災度 1	簡単な補修で使用可能
被災度 2	部分的補修・取り換えで使用可能
被災度 3	大規模な修復・取り換えが必要

2002 年の金子らの研究³では上記の 3 つに加えて、下記のカテゴリーについても言及している。

被災度 0	補修の必要なし (ほぼ無被害)
-------	-----------------

¹ 日本建築学会. (2003). 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領. 東京都: 日本建築学会.

² 金子美香, 神原浩, 田村和夫. (2003). 1995 年兵庫県南部地震の被害調査に基づく非構造部材の耐震性評価. 日本建築学会技術報告集, 9(17), doi:10.3130/aijt.9.563

³ 金子美香, 神原浩, 田村和夫. (2002). 非構造部材の耐震性に関する一考察. 日本建築学会大会学術講演梗概, 2002, 79-80.

「ALC 間仕切り壁の地震被害と今後の対策 その1 東日本大震災における ALC 帳壁の地震被害と課題」(寺本隆幸他、2013)

2013 年の寺本らによる研究⁴では、東北地方太平洋沖地震及びその一連の地震により生じた ALC パネルの被害の概要を分析するために、以下のルールで 6 つに分類している。

A1	無傷のもの
A2	パネルの一部に軽微な欠けまたは亀裂が発生しているが、補修を行えば継続使用が可能なもの
B1	パネルの数か所に欠けまたは亀裂が発生しているが、補修を行えば継続使用が可能なもの
B2	パネルの一部が破損しているが、取り付け部の補強および補修を行えば継続使用が可能なもの
C1	パネルの取り付け部分が大破し、修理補修による取付強度の復旧が困難なもの、あるいはパネルの曲げ強度の復旧が困難なほど破損し、パネルの交換が必要なもの
C2	パネルが脱落したもの

「災害に係る住家の被害認定基準運用指針」(内閣府、2021)

「災害に係る住家の被害認定基準運用指針」に基づく被害認定調査⁵は、地震や風水害等の自然災害により被害のあった住宅について、内閣府の定める「災害の被害認定基準」等に基づき、全壊、半壊等の「被害の程度」を認定する調査である。

「災害に係る住家の被害認定基準運用指針」では、外壁と内壁を含む住家の部材の損傷の程度の区分の例示が以下のようにされている。

程度	損傷の例示	損傷程度
I	【モルタル塗り仕上等】開口隅角部廻りにわずかなひび割れが生じている 【ボード】目地部にわずかなずれが生じている	10%
II	【モルタル塗り仕上等】仕上の剥離が生じている 【ボード】仕上面の目地部にひび割れやずれが生じている	25%
III	【モルタル塗り仕上等】仕上材が脱落している 【ボード】目地部に著しいずれ、面材釘打部の部分的な浮き上がり、ボード隅角部の破損が生じている	50%
IV	【モルタル塗り仕上等】仕上材が脱落しており、下地材にひび割れが生じている 【ボード】釘の浮き上がり、ボードの脱落が見られる	75%
V	【塗り壁、ボード共通】全ての仕上材が脱落している（見切りは不要。壁1面を100%の損傷として算定する。）下地材に破損が生じている	100%

⁴ 寺本隆幸, 清家剛, 大迫勝彦, 渡壁守正, 鈴木正裕. (2013). ALC 間仕切り壁の地震被害と今後の対策 : その1 東日本大震災における ALC 帳壁の地震被害と課題. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013, 1421-1422.

⁵ 内閣府 (防災担当). (2021 年 3 月). 災害に係る住家の被害認定基準運用指針. 参照日: 2022 年 7 月 25 日, 参照先: https://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/r303shishin_all.pdf

程度	損傷の例示	損傷程度
I	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塗り壁隅角部にわずかなひび割れが生じている ・ 内壁合板にわずかなずれが生じている ・ ボードの目地部にわずかなずれが生じている 	10%
II	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内壁周辺部に隙間が生じている ・ 内壁合板にずれが生じている ・ タイルの目地に亀裂が生じている ・ ボードの目地部にひび割れやずれが生じている 	25%
III	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内壁合板に剥離、浮きが見られる ・ タイルが剥離を生じている ・ クロスが破れている ・ 柱、梁に割れが見られるため、内壁の一部の取り外しが必要である ・ ボードの目地部に著しいずれ、釘打部の部分的な浮き上がり、隅角部の破損が生じている 	50%
IV	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内壁合板に剥離、脱落が見られる ・ タイルが剥落している ・ ボードの釘の浮き上がりが見られ、脱落が生じている 	75%
V	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全ての仕上材が脱落している（見切りは不要。壁1面を100%の損傷として算定する。） ・ 下地材の損傷が生じている 	100%

「被災建築物応急危険度判定調査表」（被災建築物応急危険度判定研究会、1998）

被災建築物応急危険度判定⁶は、大地震により被災した建築物を調査し、その後に発生する余震などによる倒壊の危険性や外壁・窓ガラスの落下、付属設備の転倒などの危険性を判定することにより、人命にかかわる二次的災害を防止することを目的として行われる調査である。

応急危険度判定における「応急危険度判定調査表」では、落下危険物・転倒危険物に関する危険度の区分の中に外壁（乾式）も含まれ以下のルールで危険度を3つに分類している。

A ランク	目地の亀裂程度
B ランク	板に隙間が見られる
C ランク	顕著な目地ズレ、板破壊

「被災文教施設の応急危険度判定」（文部科学省大臣官房文教施設企画部、2014）

被災文教施設の応急危険度判定⁷は、地震などの大規模災害時に、地域住民等の避難所と

⁶ 被災建築物応急危険度判定研究会. (1998). 被災建築物応急危険度判定マニュアル. 東京都: 日本建築防災協会・全国被災建築物応急危険度判定協議会.

⁷ 文部科学省大臣官房文教施設企画部. (2014年7月). 被災文教施設応急危険度判定方法について. 参照日: 2022年7月25日, 参照先: http://web-honbu.jimu.nagoya-u.ac.jp/fmd/06other/shisetukanribu/image/link_sisaku/oukyuu_kikenndo_hannteihouhou.pdf

なるとともに、教育活動の再開が急務である学校をはじめとする文教施設において、地震直後に被災文教施設の設置者による応急危険度判定の実施が困難になった場合、設置者の要請に応じ、速やかに文教施設応急危険度判定士が派遣され行われる調査である。

「文教施設応急危険度判定調査表」では、落下危険物・転倒危険物に関する危険度の区分の中に外装材と内装材・間仕切り、窓ガラス・窓枠も含まれる。以下のルールで危険度を3つに分類している。

A ランク	殆ど無被害
B ランク	部分的なひび割れ、隙間
C ランク	顕著なひび割れ、剥離

A ランク	殆ど無被害
B ランク	目地ずれ、わずかな剥離、不陸
C ランク	顕著なひび割れ、剥離、顕著な田和付き、一部の陥没転倒

A ランク	殆ど無被害
B ランク	歪み、ひび割れ
C ランク	落下の危険性有り

「地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究 —乾式間仕切り壁と ALC 外壁を対象とした実大載荷実験を通して—」（八木尚太郎、2019）

八木の修士論文⁸では、加力実験で観察された損傷に対して、実際の地震での損傷と考えた時に、修復や周囲への立ち入り禁止措置などの対応を、どの程度の緊急性を以て行われるべきかという評価を行っている。

具体的には、避難所等でも補修や使用禁止にするなどの対応が必要な損傷を“対応の必要性が高”と評価し、避難所等で早急な対応の必要はないが、建物の性能を元に戻すためには補修などの対応が必要である損傷を“対応の必要性が中”と評価し、地震後に補修などの対応をしなくとも問題ないと考えられる損傷を“対応の必要性が低”と評価している。

対応の必要性が高	避難所など、利用の再開が急がれる施設であっても、補修や使用禁止にするなどの対応が早急に必要損傷
対応の必要性が中	難所等で早急な対応の必要はないが、建物の性能を元に戻すためには補修などの対応が必要である損傷
対応の必要性が低	地震後に補修などの対応をしなくとも問題ないと考えられる損傷

⁸ 八木尚太郎. (2018). 地震による非構造部材の損傷の評価に関する研究 —乾式間仕切り壁と ALC 外壁を対象とした実大載荷実験を通して—. 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会分環境学専攻.

付録6. 損傷が性能に与える影響の分析の過程

ここでは、6.3.節で行った、4つの実験で観察された損傷について、内外装壁の性能に与える影響を分析した過程を示す。

層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷の分析 (実験①)

無開口の平坦な壁(壁 A)損傷の分析

シーリング材の切れの分析 (表 5-1 中(1))

層間変形角 $1/400$ rad の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/100$ rad を経験する前までは、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/100$ rad を経験した後は、除荷時でもシーリング材の切れが残留することが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

ランナーの端部の変形 (表 5-1 中(2))

層間変形角 $1/400$ rad の時に観察された損傷である。層間変形角 $1/75$ rad を経験した後は、発生時と逆方向に加力した時にも残留することが観察された。この場合、この損傷は、スタッドの水平移動を阻害することが推測される。そして、スタッドの水平移動が阻害されると、層間変位に追従するため、スタッドがねじれることが推測される。そして、スタッドがねじれることで、ランナーの断面が開くような変形をし、スタッドがランナーから外れやすくなることが推測される。以上を踏まえ、層間変形角 $1/75$ rad を経験した後は、この損傷は、壁の耐震性を低下させる可能性があると考えられる。

下張りボードのひび割れ (表 5-1 中(3))

層間変形角 $1/400$ rad の時に観察された損傷である。ひび割れが下張りボードを貫通している可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

上張りボードのひび割れ (表 5-1 中(4))

層間変形角 $1/200$ rad の時に観察された損傷である。ひび割れが下張りボードを貫通している可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察され

なかった。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

スタッドの水平移動（ランナーの傷）（表 5-1 中(5)）

層間変形角 $1/200$ rad の時に観察された損傷である。この損傷は、除荷時には大体の位置に戻る。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

個々の上張りボードの面内方向の回転（表 5-1 中(6)）

層間変形角 $1/100$ rad の時に観察された損傷である。隣り合う上張りボードは、同じ下張りボードに接着されている。そのため、個々の上張りボードが面内方向に回転することは、上張りボードと下張りボードとの接着が低下していることを意味する。つまり、この損傷は、上張りボードの脱落に寄与する可能性があると考えられる。そのため、この損傷は、耐震性を低下させる可能性があると考えられる。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

上張りボードの斜め方向のしわ（表 5-1 中(7)）

層間変形角 $1/100$ rad の時に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

ランナーの端部の変形（表 5-1 中(8)）

層間変形角 $1/100$ rad の時に観察された損傷である。ただし、実験を通じて、スタッドの水平移動を拘束する程度の変形とは考えにくい範囲にとどまった。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

スペーサーの爪の外れ（表 5-1 中(9)）

層間変形角 $1/100$ rad の時に観察された損傷である。ただし、スペーサーは施工時の効率のために設置される部品であり、施工後は役割を持たない。この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

上張りボード間の隙間（表 5-1 中(10)）

層間変形角 $1/75$ rad の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

下張りボードのひび割れ（表 5-1 中(11)）

層間変形角 $1/75$ rad の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる

可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

スペーサーの爪の外れ (表 5-1 中(12))

層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-1 中(13))

層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、上張りボードと下張りボードとの接着が低下していることを意味する。つまり、この損傷は、上張りボードの脱落に寄与する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられ、部材が脱落する手前の状態に壁がなっていると考えられる。また、上張りボード間の隙間 (表 5-1 中(10)) 同じように、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。更に、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-1 中(14))

層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、ビスの保持力が低下していることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられる。また、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

上張りボードの脱落 (表 5-1 中(15))

層間変形角 $1/33 \text{ rad}$ の除荷時に観察された損傷である。この損傷は、このこと自体が人的被害に関わりうる。また、上張りボードが無くなるということであるため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があり、意匠性を低下させると考えられる。

下張りボードのひび割れ (表 5-1 中(16))

層間変形角 $1/33 \text{ rad}$ の除荷時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

直交壁 (壁 B) の損傷の分析

スタッドの変形 (表 5-2 中(17))

層間変形角 $1/400 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、実験を通じて、壁の脱落などに寄与するとは考えにくい程度にとどまった。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

上張りボードの目地の開き (表 5-2 中(18))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

開口部を有する壁 (壁 C) の損傷の分析

上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-3 中(19))

層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時に観察された損傷である。目地部にひび割れが発生するという事は、上張りボードが個々に面内方向の回転をしていることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させる可能性があると考えられる。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

上張りボードの開口部の角部からのひび割れ (表 5-3 中(20))

層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。また、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

下張りボードのひび割れ (表 5-3 中(21)) (表 5-3 中(22))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

ランナーの端部の変形 (表 5-3 中(23))

層間変形角 $1/100\text{ rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、実験を通じて、スタッドの水平移動を拘束する程度の変形とは考えにくい範囲にとどまった。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-3 中(24))

層間変形角 $1/75\text{ rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

下張りボードのひび割れ (表 5-3 中(25))

層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生

させることは観察されなかった。

下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-3 中(26))

層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、ビスの保持力が低下していることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられる。また、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

上張りボードの面外方向への傾斜/残留 (表 5-3 中(27)) (表 5-3 中(30))

層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、上張りボードと下張りボードとの接着が低下していることを意味する。つまり、この損傷は、上張りボードの脱落に寄与する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられ、部材が脱落する手前の状態に壁がなっていると考えられる。また、層間変形角 $1/33 \text{ rad}$ の時には、変位が除荷時でも残留することが観察された。そのため、この段階でこの損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。更に、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

上張りボードの開口部の角部からのひび割れ (表 5-3 中(28))

層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。また、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

下張りボードのひび割れ (表 5-3 中(29))

層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

梁から持ち出した壁 (壁 D, E, F) の損傷の分析

壁 E 周囲のシーリング材の切れ (表 5-4 中(31))

層間変形角 $1/400 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

壁 D と壁 C との間の隙間 (表 5-4 中(32))

層間変形角 $1/400 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ を経験する前までは、除荷時に閉じることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁

の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ を経験した後は、除荷時でも変位が残留し、隙間が残ることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の密閉性を無くすと考えられる。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

壁 D の下張りボードのひび割れ (表 5-4 中(33))

層間変形角 $1/400 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。ひび割れが下張りボードを貫通している可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

壁 E と壁 D 及び壁 F との間の隙間／残留 (表 5-4 中(34)(35)) (表 5-4 中(38)(39))

層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ を経験する前までは、除荷時に閉じることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ を経験した後は、除荷時でも変位が残留し、隙間が残ることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の密閉性を無くすと考えられる。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

壁 E のスタッドの水平移動 (表 5-4 中(36))

層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、除荷時には大体の位置に戻る。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

壁 E のランナーの端部の変形 (表 5-4 中(37))

層間変形角 $1/100 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、実験を通じて、スタッドの水平移動を拘束する程度の変形とは考えにくい範囲にとどまった。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

壁 D の上部のランナーの開き (表 5-4 中(40))

層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ を経験する前までは、除荷時に戻ることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ を経験した後は、除荷時でも変位が残留し、スタッドがランナーから外れたままになることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の耐震性を低下させると考えられる。

壁 D の下部のランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形 (表 5-4 中(41))

層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、スラブに対する壁の接合力が低下していることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられる。

壁 E の下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-4 中(42))

層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、ビスの保持力が低下していることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられる。また、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

壁 D の上張りボードの折れ (表 5-4 中(43))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

壁 D の下張りボードの破壊 (表 5-4 中(44))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

壁 D と壁 C のスタッド同士を固定するビスの変形 (表 5-4 中(45))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。壁同士を固定していたビスの破壊であるため、個々の壁の性能に影響を与えないと考えられる。

先付金物と先行ピースを接合するピンのせん断破壊 (表 5-4 中(46))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、鉄骨梁に対する持ち出した壁の接合力が低下していることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられる。

層間変位に対する ALC 外壁の損傷の分析 (実験②)

無開口の平坦な壁 (壁 A) の損傷の分析**ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-5 中(1)(2)(3))**

層間変形角 $1/200\text{rad}$ 、 $1/75\text{rad}$ 、 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。パネル底面の損傷であるため、意匠性や密閉性に影響は無く、接合部にも関係ないため、耐震性にも影響は無いと言える。以上より、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

開口部を有する壁 (壁 B) の損傷の分析**ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-6 中(4)(5)(9))**

層間変形角 $1/100\text{rad}$ 、 $1/75\text{rad}$ 、 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

ALC パネルの角部のひび割れ (表 5-6 中(6))

層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に観察された損傷である。室内側の損傷であるため意匠性に影響は無い。ALC パネルを貫通するひび割れでないため密閉性に影響は無い。そして、接合部にも関係ないため、耐震性にも影響は無いと言える。以上より、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(7))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。室外側の損傷であるため、壁の意匠性を低下させると考えられる。また、このひび割れは、ボルト部分から発生したと考察され、パネルが有すボルトを保持する力を低下させる可能性がある。そのため、壁の耐震性を低下させる可能性があると考えられる。更に、室内側において同じ箇所にひび割れ (表 5-6 中(10)) が発生しているため、ひび割れが ALC パネルを貫通している可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(8))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。室外側のひび割れであり、かつ、ALC パネルの目地に隣接したひび割れである。そのため、このひび割れを介して ALC パネルの目地内に水が入り込む可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(10))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。このひび割れは、ボルト部分から発生

したと考察され、パネルが有すボルトを保持する力を低下させる可能性があるため、壁の耐震性を低下させる可能性があると考えられる。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(11))

層間変形角 1/50rad の時に観察された損傷である。室内側の損傷であるため意匠性に影響は無い。ALC パネルを貫通するひび割れでないため密閉性に影響は無い。そして、接合部にも関係ないため、耐震性にも影響は無いと言える。以上より、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

シーリング材の切れ (表 5-6 中(12))

層間変形角 1/33rad の時に観察された損傷である。ただし、除荷時には閉じることが観察された。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(13))

層間変形角 1/33rad の時に観察された損傷である。室外側の損傷であるため、壁の意匠性を低下させると考えられる。また、このひび割れは、ボルト部分から発生したと考察され、パネルが有すボルトを保持する力を低下させる可能性がある。そのため、壁の耐震性を低下させる可能性があると考えられる。更に、室内側において同じ箇所にはひび割れ (表 5-6 中(10)) が発生しているため、ひび割れが ALC パネルを貫通している可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(14))

層間変形角 1/33rad の時に観察された損傷である。室外側のひび割れであり、かつ、ALC パネルの目地に隣接したひび割れである。そのため、このひび割れを介して ALC パネルの目地内に水が入り込む可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(15)(16))

層間変形角 1/33rad の時に観察された損傷である。室外側のひび割れであり、かつ、ALC パネルの目地に隣接したひび割れである。そのため、このひび割れを介して ALC パネルの目地内に水が入り込む可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。また、このひび割れは、ALC パネルの破片を発生させた。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられ、部材が脱落する手前の状態に壁がなっていると考えられる。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(17))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。室外側のひび割れであり、かつ、ALC パネルの目地に隣接したひび割れである。そのため、このひび割れを介して ALC パネルの目地内に水が入り込む可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(18))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。このひび割れは、ボルト部分から発生したと考察され、パネルが有すボルトを保持する力を低下させる可能性がある。そのため、壁の耐震性を低下させる可能性があると考えられる。

ALC パネルの角部のひび割れ (表 5-6 中(19))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。室内側の損傷であるため意匠性に影響は無い。ALC パネルを貫通するひび割れでないため密閉性に影響は無い。そして、接合部にも関係ないため、耐震性にも影響は無いと言える。以上より、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

層間変位に対するドアの損傷の分析（実験②）

シーリング材の切れ（表 5-7 中(1)）

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、除荷時には閉じることが観察された。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

モルタルのひび割れ（表 5-7 中(2)）

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。室内側の損傷であり、壁を貫通しない損傷であり、接合部に関係しない損傷である。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

三方枠の破断（表 5-7 中(3)）

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。室外側からも確認できる損傷であるため、壁の意匠性を低下させ、かつ、密閉性を低下させると考えられる。

開口補強鋼材の溶接の切れ（表 5-7 中(4)）

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。部分的ではあるものの、接合部の損傷であるため、開口補強鋼材の保持力を低下させる可能性がある。そのため、壁の耐震性を低下させる可能性があると考えられる。

開閉機能の低下

層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ を超える範囲では、「力を入れれば機能する」もしくは「機能しない」と評価される場合が多かった。ただし、層間変形角 $1/33\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時に開閉機能は戻ると評価された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/33\text{rad}$ を経験した後は、除荷時でも開閉機能が低下したと評価された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の耐震性を低下させ、避難経路の妨害となると考えられる。

層間変位に対する窓の損傷の分析（実験②）

モルタルのひび割れ（表 5-8 中(1)）

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。室内側の損傷であり、壁を貫通しない損傷であり、接合部に関係しない損傷である。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

ガラスのひび割れ（表 5-8 中(2)）

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。壁の意匠性を低下させ、かつ、密閉性

を低下させると考えられる。本実験で観察された程度のひび割れであれば、ガラスの破片の脱落に寄与することは考えにくい。ただし、不用意に触れると怪我をする可能性があるため、壁の安全性を低下させると考えられる。

開口補強鋼材の溶接の切れ (表 5-8 中(3))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。部分的ではあるものの、接合部の損傷であるため、開口補強鋼材の保持力を低下させる可能性がある。そのため、壁の耐震性を低下させる可能性があると考えられる。

シーリング材の切れ (表 5-8 中(4))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、除荷時には閉じることが観察された。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

ガラスのひび割れ (表 5-8 中(5))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。壁の意匠性を低下させ、かつ、密閉性を低下させると考えられる。本実験で観察された程度のひび割れであれば、ガラスの破片の脱落に寄与することは考えにくい。ただし、不用意に触れると怪我をする可能性があるため、壁の安全性を低下させると考えられる。

ガラスのシーリング材の切れ (表 5-8 中(6))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ材が施工されていたとしても確認できる損傷であるため、壁の意匠性を低下させ、かつ、密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

サッシの変形 (表 5-8 中(7))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ材が施工されていたとしても確認できる損傷であるため、壁の意匠性を低下させ、かつ、密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

開閉機能の低下

層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ を超える範囲では、「力を入れれば機能する」もしくは「機能しない」と評価される場合が多かった。ただし、層間変形角 $1/50\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時に開閉機能は戻ると評価された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/50\text{rad}$ を経験した後は、除荷時でも開閉機能が低下したと評価された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の耐震性を低下させ、避難経路の妨害となると考えられる。

異種の構造部材の層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷の分析 (実験③)

無開口の平坦な壁 (壁 A) の損傷の分析**角部のシーリング材の切れ (表 5-9 中(1))**

層間変形角 $1/1000\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/333\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/333\text{rad}$ を経験した後は、除荷時でもシーリング材の切れが残留することが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

上張りボードとスラブとの間の隙間 (表 5-9 中(2))

層間変形角 $1/1000\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時には閉じることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験した後は、除荷時でもシーリング材の切れが残留することが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

スタッドの水平移動 (表 5-9 中(3))

層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、除荷時には大体の位置に戻る。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-9 中(4))

層間変形角 $1/150\text{rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-9 中(5))

層間変形角 $1/150\text{rad}$ の時に観察された損傷である。目地部にひび割れが発生するという事は、上張りボードが個々に面内方向の回転をしていることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させる可能性があると考えられる。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

上張りボードのひび割れ (表 5-9 中(6))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ひび割れが下張りボードを貫通して

いる可能性がある。そのため、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

下張りボードの角部のひび割れ (表 5-9 中(7))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中(8))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、上張りボードと下張りボードとの接着が低下していることを意味する。つまり、この損傷は、上張りボードの脱落に寄与する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられ、特に層間変形角 $1/50\text{rad}$ の経験後は部材が脱落する手前の状態に壁がなっていると考えられる。また、上張りボード間の隙間 (表 5-1 中(10)) 同じように、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。更に、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

下張りボードのひび割れ (表 5-9 中(9))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

下張りボードのしわ (表 5-9 中(10))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-9 中(11))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、ビスの保持力が低下していることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられる。また、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

ランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け (表 5-9 中(12))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、LGS 間仕切り壁を固定する力が低下していることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えら

れる。

振れ止めの変形 (表 5-9 中(13))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、振れ止めは施工時の効率のために設置される部品であり、施工後は役割を持たない。この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

下張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中(14))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、上張りボードと下張りボードとの接着が低下していることを意味する。つまり、この損傷は、上張りボードの脱落に寄与する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられる。また、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

開口部を有する壁 (壁 B) の損傷の分析

上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-10 中(15))

層間変形角 $1/1000\text{rad}$ の時に観察された損傷である。目地部にひび割れが発生するという事は、上張りボードが個々に面内方向の回転をしていることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させる可能性があると考えられる。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

上張りボードの開口部の角部でのひび割れ (表 5-10 中(16))

層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。また、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

シーリング材の切れ (表 5-10 中(17))

層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/100\text{ rad}$ を経験する前までは、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/100\text{ rad}$ を経験した後は、除荷時でもシーリング材の切れが残留することが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

スタッドの水平移動 (表 5-10 中(18))

層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、除荷時には大体の位置に戻る。そのため、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

上張りボードとスラブとの間の隙間 (表 5-10 中(19))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時には閉じることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験した後は、除荷時でもシーリング材の切れが残留することが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

上張りボードと三方枠との間の隙間 (表 5-10 中(20))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時に閉じることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験した後は、除荷時でも残留することが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、下張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。また、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(21))

層間変形角 $1/150\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-10 中(22))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。層間変形角 $1/150\text{rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(23))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

下張りボードのしわ (表 5-10 中(24))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(25))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。ただし、上張りボードの存在のため、壁を貫通する隙間を発生させることは観察されなかった。

上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け (表 5-10 中(26))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、LGS 間仕切り壁を固定する力が低下していることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられる。

上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-10 中(27))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、上張りボードと下張りボードとの接着が低下していることを意味する。つまり、この損傷は、上張りボードの脱落に寄与する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられ、部材が脱落する手前の状態に壁がなっていると考えられる。また、上張りボード間の隙間 (表 5-1 中(10)) 同じように、この損傷は、壁の密閉性を低下させる可能性があると考えられる。更に、仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

振れ止めの変形 : (表 5-10 中(28))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、振れ止めは施工時の効率のために設置される部品であり、施工後は役割を持たない。この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。

異種の構造部材の層間変位に対するドアの損傷の分析 (実験③)

三方枠の持ち上がり (表 5-11 中(1))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時に閉じることが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験した後は、除荷時でも残留することが観察された。そのため、この段階では、この損傷は、ドアの密閉性を低下させると考えられる。また、仕上げ側からも確認できる損傷であるため、この損傷は、壁の意匠性を低下させると考えられる。

三方枠の変形 (表 5-11 中(2))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。仕上げ側からも確認できる損傷であるため、この損傷は、ドアの意匠性を低下させると考えられる。

ヒンジの隙間 (表 5-11 中(3))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。ただし、実験を通じて、ドアの脱落を発生させるとは考えにくい範囲にとどまった。そのため、この損傷は、ドアの性能に影響を与えないと考えられる。

開口補強鋼材の変形 (表 5-11 中(4))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、ビスのせん断破壊などを発生させる可能性がある。そのため、この損傷は、耐震性を低下させる可能性があると考えられる。

開口補強鋼材と上部のランナーとを接合するビスのせん断破壊 (表 5-11 中(5))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、ドアを固定する力が低下していることを意味する。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられる。

三方枠の接合部の破断 (表 5-11 中(6))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。室外側からも確認できる損傷であるため、壁の意匠性を低下させ、かつ、密閉性を低下させる可能性があると考えられる。

錠部分の変形 (表 5-11 中(7))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。この損傷は、施錠、解錠機能を低下させるため、壁の耐震性を低下させ、避難経路の妨害となると考えられる。

開閉機能の低下

層間変形角 $\pm 1/200\text{rad}$ を超える範囲では、「力を入れれば機能する」もしくは「機能しない」と評価される場合が多かった。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時に開閉機能は戻ると評価された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の性能に影響を与えないと考えられる。一方で、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験した後は、除荷時でも開閉機能が低下したと評価された。そのため、この段階では、この損傷は、壁の耐震性を低下させ、避難経路の妨害となると考えられる。

層間変位と慣性力に対する窓の損傷の分析（実験④）

3 階の窓の損傷の分析

モルタルのひび割れ（表 5-12 中(1)）

100%加振後に観察された損傷である。ただし、室内側の損傷であり、この段階では壁を貫通しない損傷であり、接合部に関係しない損傷である。そのため、この損傷は、窓の性能に影響を与えないと考えられる。ただし、160%加振後には、室外側のモルタルのひび割れ（表 5-12 中(2)）と繋がり、壁を貫通する隙間を発生させている箇所もあった。そのため、窓の密閉性を低下させると考えられる。

モルタルのひび割れ（表 5-12 中(2)）

150%（1 回目）加振後に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。ただし、この段階では壁を貫通しない損傷であり、接合部に関係しない損傷である。そのため、この損傷は、窓の性能に影響を与えないと考えられる。ただし、160%加振後には、室内側のモルタルのひび割れ（表 5-12 中(1)）と繋がり、壁を貫通する隙間を発生させている箇所もあった。そのため、窓の密閉性を低下させると考えられる。

縦枠の角部の変形（表 5-12 中(3)）

150%（1 回目）加振後に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。

押縁のずれ（表 5-12 中(4)）

150%（1 回目）加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(5))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

シーリング材の切れ (表 5-12 中(6))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

ガラスのひび割れ (表 5-12 中(7))

160%加振後に観察された損傷である。窓の意匠性を低下させ、かつ、密閉性を低下させると考えられる。本実験で観察された程度のひび割れであれば、ガラスの破片の脱落に寄与することは考えにくい。ただし、不用意に触れると怪我をする可能性があるため、壁の安全性を低下させると考えられる。

縦枠と上枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(8))

160%加振後に観察された損傷である。この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

シーリング材の切れ (表 5-12 中(9))

160%加振後に観察された損傷である。この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

ガラスのひび割れ (表 5-12 中(10))

160%加振後に観察された損傷である。窓の意匠性を低下させ、かつ、密閉性を低下させると考えられる。不用意に触れると怪我をする可能性があるため、壁の安全性を低下させると考えられる。また、対角線上にひび割れが発生していることから、この損傷により、ガラスは面外方向への耐力が低下していることが推測される。そのため、この損傷は、耐震性を低下させると考えられ、部材が脱落する手前の状態に壁がなっていると考えられる。

下枠の変形 (表 5-12 中(11))

160%加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

クレセント受けの脱落 (表 5-12 中(12))

160%加振後に観察された損傷である。施錠を不可能にする損傷であるため、窓の防犯性を低下させると考えられる。また、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。

障子枠の変形 (表 5-12 中(13))

160%加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。

縦枠の内部の変形 (表 5-12 中(14))

160%加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。

縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(15))

160%加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

2 階の窓の損傷の分析

モルタルのひび割れ (表 5-13 中(16))

100%加振後に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。ただし、この段階では壁を貫通しない損傷であり、接合部に関係しない損傷である。そのため、この損傷は、窓の性能に影響を与えないと考えられる。ただし、160%加振後には、室内側のモルタルのひび割れ (表 5-13 中(10)) と繋がり、壁を貫通する隙間を発生させている箇所もあった。そのため、窓の密閉性を低下させると考えられる。

縦枠の角部の変形 (表 5-13 中(17))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。仕上げ側の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。

押縁のずれ (表 5-13 中(18))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(19))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

シーリング材の切れ (表 5-13 中(20))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

モルタルのひび割れ (表 5-13 中(21))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。ただし、室内側の損傷であり、この段階では壁を貫通しない損傷であり、接合部に関係しない損傷である。そのため、この損傷は、窓の性能に影響を与えないと考えられる。ただし、160%加振後には、室外側のモルタルのひび割れ (表 5-13 中(16)) と繋がり、壁を貫通する隙間を発生させている箇所もあった。そのため、窓の密閉性を低下させると考えられる。

ガラスのひび割れ (表 5-13 中(22))

160%加振後に観察された損傷である。窓の意匠性を低下させ、かつ、密閉性を低下させると考えられる。本実験で観察された程度のひび割れであれば、ガラスの破片の脱落に寄与することは考えにくい。ただし、不用意に触れると怪我をする可能性があるため、壁の安全性を低下させると考えられる。

縦枠と上枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(23))

160%加振後に観察された損傷である。160%加振後に観察された損傷である。この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

シーリング材の切れ (表 5-13 中(24))

160%加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

ガラスのひび割れ (表 5-13 中(25))

160%加振後に観察された損傷である。窓の意匠性を低下させ、かつ、密閉性を低下させ

ると考えられる。本実験で観察された程度のひび割れであれば、ガラスの破片の脱落に寄与することは考えにくい。ただし、不用意に触れると怪我をする可能性があるため、壁の安全性を低下させると考えられる。

下枠の変形 (表 5-13 中(26))

160%加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

クレセント受けの変形 (表 5-13 中(27))

160%加振後に観察された損傷である。施錠を不可能にする損傷であるため、窓の防犯性を低下させると考えられる。また、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。

縦枠の内部の変形 (表 5-13 中(28))

160%加振後に観察された損傷である。160%加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。

縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(29))

160%加振後に観察された損傷である。実際の建物において仕上げ材に覆われない箇所の損傷であるため、この損傷は、窓の意匠性を低下させると考えられる。また、隙間を発生させているため、この損傷は、窓の密閉性を低下させると考えられる。

付録7. 内外装壁の被害と建物の応答との対応関係の整理

6.4.2.節では、6つの段階を用いて、地震による内外装壁の被害と壁の面外方向の層間変位を中心とした建物の応答との対応関係について説明した。その方法として、各実大実験の試験体について、建物の応答ごとに、その時の損傷の被害度の内、最も高い数値を表に対応させた。ここでは対応させた過程をまとめる。

LGS 間仕切り壁の被害と層間変位の対応関係（実験①）

無開口の平坦な壁（壁 A）の被害と層間変位の対応関係

表 7-1 に、壁 A の被害の発生状況を整理した結果を示す¹。層間変形角 1/100rad 経験後には、個々の上張りボードの面内方向の回転が観察され、耐震性が低下している可能性があると考えられるため、【レベル③】と整理された。その後、層間変形角 1/50rad 経験後には、上張りボードの面外方向への傾斜が観察され、部材が脱落する手前の状態になっていると考えられるため、【レベル④】と整理された。そして、層間変形角 1/30rad 経験後には、上張りボードが脱落したため、【レベル⑤】と整理された。

表 7-1 無開口の平坦な壁（壁 A）の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位										
	1/100	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
シーリング材		①		①		②	②		②		②
上張りボード		-		②		③	③		④		⑤
下張りボード		①		①		①	①		③		③
下地		-		①		①	③		③		③

¹ 表中の色は、表 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-エラー! メイン文書しかありません。に示した対応の必要性の区分に基づいて変えている。

直交壁（壁 B）の被害と層間変位の対応関係

表 7-2 に、壁 B の被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/200rad 経験後には、上張りボードの目地の開きが観察され、意匠性が低下していると考えられるため、【レベル②】と整理された。ただし、損傷は目立たない程度に収まった。ただし、損傷は微小な範囲にとどまった。より適切な被害度の評価や、被害の発生状況の整理のためには、損傷が壁の性能に与える影響の定量的な計測が必要であり、今後の課題として残る。

表 7-2 直交壁（壁 B）の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位										
	1/100	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
シーリング材	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
上張りボード	-	-	②	-	②	②	-	-	②	-	②
下張りボード	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
下地	①	-	①	-	①	①	-	-	①	-	①

開口部を有する壁（壁 C）の被害と層間変位の対応関係

表 7-3 に、壁 C の被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/400rad 経験後には、上張りボードの目地に沿ったひび割れ（すなわち個々の上張りボードの面内方向の回転）が観察され、耐震性が低下している可能性があると考えられるため、【レベル③】と整理された。ただし、層間変形角が 1/400rad や 1/200rad の経験後では、損傷は微小な範囲にとどまった。より適切な被害度の評価や、被害の発生状況の整理のためには、損傷が壁の性能に与える影響の定量的な計測が必要であり、今後の課題として残る。

その後、層間変形角 1/33rad 経験後には、上張りボードの面外方向への傾斜が観察され、部材が脱落する手前の状態になっていると考えられるため、【レベル④】と整理された。

表 7-3 開口部を有する壁（壁 C）の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位										
	1/100	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
シーリング材	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
上張りボード	-	③	-	③	-	③	③	-	③	-	④
下張りボード	-	-	-	-	-	①	③	-	③	-	③
下地	-	-	-	-	-	①	①	-	①	-	①

梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の被害と層間変位の対応関係

表 7-4 に、壁 D, E, F の被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/75rad 経験後には、ランナーの開きや、ランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形、ビス穴の拡大などが観察され、耐震性が低下していると考えられるため、【レベル③】と整理された。実験を通じて、部材が脱落する手前の状態までには至らなかった。

表 7-4 梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位										
	1/10 00	1/40 0	1/33 3	1/20 0	1/15 0	1/10 0	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
シーリング材		①		①		①	①		①		①
上張りボード		-		-		-	②		②		②
下張りボード		①		①		①	③		③		③
下地		-		-		①	③		③		③

ALC 外壁の被害と層間変位の対応関係 (実験②)

無開口の平坦な壁 (壁 A) の被害と層間変位の対応関係

表 7-5 に、壁 A の被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、壁の性能に影響を与えると考えられる損傷の発生は観察されなかった。

表 7-5 無開口の平坦な壁 (壁 A) の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位											
	1/10 00	1/40 0	1/33 3	1/20 0	1/15 0	1/10 0	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33	
シーリング材				-		-	-		-		-	
パネル仕上げ側				-		-			-		-	
パネル底面				①		①	①		①		①	
パネル下地側				-		-	-		-		-	

壁 B (開口部を有する壁) の被害と層間変位の対応関係

表 7-6 に、壁 B の被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/50rad 経験後には、ALC パネルを固定するボルト周囲に ALC パネル表面のひび割れが観察され、耐震性が低下している可能性があると考えられるため、【レベル③】と整理された。その後、層間変形角 1/33rad 経験後には、ALC パネルの破片の面外方向への傾斜が観察され、部材が脱落する手前の状態になっていると考えられるため、【レベル④】と整理された。

表 7-6 開口部を有する壁 (壁 B) の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位											
	1/10 00	1/40 0	1/33 3	1/20 0	1/15 0	1/10 0	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33	
シーリング材				-		-	-		-		①	
パネル仕上げ側				-		-			③		④	
パネル底面				-		①	①		①		①	
パネル下地側				-		-	-		③		③	

 ドアの被害と層間変位の対応関係（実験②）

表 7-7 に、ドアの被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/33rad 経験後には、除荷時も開閉機能が低下することが観察され、避難経路を妨害すると考えられるため、【レベル⑤】と整理された。

表 7-7 ドアの被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位											
	1/10 00	1/40 0	1/33 3	1/20 0	1/15 0	1/10 0	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33	
開閉機能				-		-	-		-		⑤	
シーリング材				①		①	①		①		①	
枠/扉				-		-	-		-		②	
開口補強鋼材/モルタル				①		①	①		①		③	

 窓の被害と層間変位の対応関係（実験②）

表 7-8 に、窓の被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/50rad 経験後には、除荷時も開閉機能が低下することが観察され、避難経路を妨害すると考えられるため、【レベル⑤】と整理された。

表 7-8 窓の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位											
	1/10 00	1/40 0	1/33 3	1/20 0	1/15 0	1/10 0	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33	
開閉機能				-		-	-		⑤		⑤	
シーリング材				-		-	-		-		①	
ガラス				-		-	-		③		③	
シーリング材（ガラス）				-		-	-		-		②	
サッシ				-		-	-		-		②	
開口補強鋼材/モルタル				①		①	①		③		③	

LGS 間仕切り壁の被害と異種の構造部材の層間変位の対応関係 (実験③)

無開口の平坦な壁 (壁 A) の被害と異種の構造部材の層間変位の対応関係

表 7-9 に、壁 A の被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/333rad 経験後には、除荷時もシーリング材の切れなどの残留が観察され、意匠性が低下していると考えられるため、【レベル②】と整理された。その後、層間変形角 1/150rad 経験後には、上張りボードの目地に沿ったひび割れ (すなわち個々の上張りボードの面内方向の回転) が観察され、耐震性が低下している可能性があると考えられるため、【レベル③】と整理された。そして、層間変形角 1/50rad 経験後には、上張りボードの面外方向への傾斜が観察され、部材が脱落する手前の状態になっていると考えられるため、【レベル④】と整理された。

表 7-9 無開口の平坦な壁 (壁 A) の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位										
	1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
シーリング材	-		②	②	②	②		②	②	②	②
上張りボード	-		-	-	③	③		③	④	④	④
下張りボード	-		-	-	-	①		③	③	③	③
下地	-		①	①	①	①		①	③	③	③

壁 B (開口部を有する壁) の被害と異種の構造部材の層間変位の対応関係

表 7-10 に、壁 B の被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/1000rad 経験後には、上張りボードの目地に沿ったひび割れ (すなわち個々の上張りボードの面内方向の回転) が観察され、耐震性が低下している可能性があると考えられるため、【レベル③】と整理された。ただし、層間変形角が 1/1000rad や 1/200rad の経験後では、損傷は微小な範囲にとどまった。より適切な被害度の評価や、被害の発生状況の整理のためには、損傷が壁の性能に与える影響の定量的な計測が必要であり、今後の課題として残る。

その後、層間変形角 1/40rad 経験後には、上張りボードの面外方向への傾斜が観察され、部材が脱落する手前の状態になっていると考えられるため、【レベル④】と整理された。

表 7-10 開口部を有する壁 (壁 B) の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位										
	1/1000	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
シーリング材	-		-	-	-	②		②	②	②	②
上張りボード	③		③	③	③	③		③	③	④	④
下張りボード	-		-	-	①	①		①	①	①	①
下地	-		-	-	-	-		-	③	③	③

ドアの被害と異種の構造部材の層間変位の対応関係（実験③）

表 7-11 に、ドアの被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/100 経験後には、三方枠の変形が観察され、意匠性を低下させると考えられるため、【レベル②】と整理された。その後、層間変形角 1/67rad 経験後には、開口補強鋼材の変形が観察され、耐震性を低下させる可能性があると考えられるため、【レベル③】と整理された。そして、層間変形角 1/67rad 経験後には、除荷時も開閉機能が低下することが観察され、避難経路を妨害すると考えられるため、【レベル⑤】と整理された。

表 7-11 ドアの被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位										
	1/100	1/400	1/330	1/200	1/150	1/100	1/75	1/67	1/50	1/40	1/33
開閉機能	-		-	-	-	-		⑤	⑤	⑤	⑤
シーリング材	-		-	-	-	-		②	②	②	②
枠／扉	-		-	-	-	②		②	②	②	②
開口補強鋼材	-		-	-	-	-		③	③	③	③

窓の被害と層間変位と慣性力の対応関係（実験④）

3階の窓の被害と層間変位と慣性力の対応関係

表 7-12 に、3階の窓の被害の発生状況を整理した結果を示す。150%（1回目）入力後（層間変形角 1/127～-1/139rad、床応答加速度 1.38g 経験後）には、押縁のずれや枠の接合部の隙間などが観察され、意匠性や密閉性が低下していると考えられるため、【レベル②】と整理された。その後、160%入力後（層間変形角 1/85～-1/58rad、床応答加速度 1.43g 経験後）には、ガラスの対角線上のひび割れなどが観察され、部材が脱落する手前の状態になっていると考えられるため、【レベル④】と整理された。

表 7-12 3階の窓の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位										
	1/1000 ※1	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100 ※2	1/75	1/67	1/50 ※3	1/40	1/33
開閉機能	-					-			③		
ガラス	-					-			④		
シーリング材（ガラス）	-					②			②		
サッシ	-					②			②		
モルタル仕上げ側	-					-			②		
モルタル下地側	-					-			①		

※1 正確には100%入力後であり、層間変形角 1/948～-1/867rad、床応答加速度 0.93g 経験後

※2 正確には150%（1回目）入力後であり、層間変形角 1/127～-1/139rad、床応答加速度 1.38g 経験後

※3 正確には160%入力後であり、層間変形角 1/85～-1/58rad、床応答加速度 1.43g 経験後

2階の窓の被害と層間変位と慣性力の対応関係

表 7-13 に、2階の窓の被害の発生状況を整理した結果を示す。150%（1回目）入力後（層間変形角 $1/127 \sim -1/139 \text{rad}$ 、床応答加速度 1.38g 経験後）には、押縁のずれや枠の接合部の隙間などが観察され、意匠性や密閉性が低下していると考えられるため、【レベル②】と整理された。その後、160%入力後（層間変形角 $1/85 \sim -1/58 \text{rad}$ 、床応答加速度 1.43g 経験後）には、クレセント受けの変形やガラスのひび割れなどが観察され、防犯性や安全性が低下していると考えられるため、【レベル③】と整理された。

表 7-12 3階の窓の被害の発生状況の整理

構成部材	壁の面内方向の層間変位										
	1/1000 ※1	1/400	1/333	1/200	1/150	1/100 ※2	1/75	1/67	1/50 ※3	1/40	1/33
開閉機能	-						-				③
ガラス	-						-				③
シーリング材（ガラス）	-						②				②
サッシ	-						②				②
モルタル仕上げ側	②						②				②
モルタル下地側	-						-				①

※1 正確には100%入力後であり、層間変形角 $1/443 \sim -1/329 \text{rad}$ 、床応答加速度 0.69g 経験後

※2 正確には150%（1回目）入力後であり、層間変形角 $1/74 \sim -1/69 \text{rad}$ 、床応答加速度 1.07g 経験後

※3 正確には160%入力後であり、層間変形角 $1/71 \sim -1/29 \text{rad}$ 、床応答加速度 1.22g 経験後

付録8. 地震後に行われる内外装壁の損傷の診断の目的

付録 8 では、地震後に行われる損傷の診断¹の目的について説明する。

目的として次の 3 つが考えられる。それぞれについて説明する。

- ①地震後に内外装壁の性能を元に戻すため
- ②地震直後に建物を応急的に利用するため
- ③地震直後に建物に立入可能か判断するため

①地震後に内外装壁の性能を元に戻すため

6 章で行った内外装壁の被害の評価では、耐震性や密閉性を低下させ、人的被害を発生させたりや居住性を損ねたりすると評価される損傷が存在した。1 章でも述べた通り、地震後に建物の性能を元に戻すためには、損傷の診断により、これらに該当する損傷について把握し修復する必要がある²。特に、耐震性を低下させる損傷が見過ごされ、放置されると、次の地震の際などに部材の落下などによる深刻な人的被害をもたらさう。

②地震直後に建物を応急的に利用するための診断

脱落寸前といった耐震性が著しく低下した状態にあり、別の外力によって人的被害を発生させようと評価された損傷は、迅速な対応が必要、もしくは推奨されると考えられた。つまり、利用再開が急がれる建物であっても、損傷箇所の周囲を立ち入り禁止にするといった応急的な対応が行われるべきである。この応急的な対応を行うためにも診断が欠かせない。

③建物に立入可能か判断するための診断

地震直後は一度屋外に避難するが、その後には、構造部材の被害が甚大でない限り①や③を目的とした診断のために建物に入る必要がある。この際に、調査員の安全性を確保することを目的とした、外観や遠隔からの診断が行われる必要がある。

¹ 損傷を検出し、その程度を把握すること。

² ただし、人的被害に直結しないと評価される損傷は、迅速な対応は求められないと考えられた。これに該当する損傷は、利用再開が急がれる建物（避難所として利用される建物など）においては、修復などの対応は後回しにできるため、診断も急がれない。

付録9. 損傷の発生位置の分析の過程

ここでは、7.2節で行った、4つの実験で観察された損傷について、発生位置を分析した過程を示す。

層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷の分析 (実験①)

無開口の平坦な壁 (壁 A) の損傷の分析

シーリング材の切れの分析 (表 5-1 中(1))

層間変形角 $1/400$ rad の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/100$ rad を経験する前までは、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。

ランナーの端部の変形 (表 5-1 中(2))

層間変形角 $1/400$ rad の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-1 中(3))

層間変形角 $1/400$ rad の時に観察された損傷である。これは下地側の損傷である。

上張りボードのひび割れ (表 5-1 中(4))

層間変形角 $1/200$ rad の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

スタッドの水平移動 (ランナーの傷) (表 5-1 中(5))

層間変形角 $1/200$ rad の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

個々の上張りボードの面内方向の回転 (表 5-1 中(6))

層間変形角 $1/100$ rad の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-1 中(7))

層間変形角 $1/100$ rad の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ランナーの端部の変形 (表 5-1 中(8))

層間変形角 $1/100$ rad の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

スペーサーの爪の外れ (表 5-1 中(9))

層間変形角 $1/100$ rad の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボード間の隙間 (表 5-1 中(10))

層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-1 中(11))

層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

スペーサーの爪の外れ (表 5-1 中(12))

層間変形角 $1/75 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-1 中(13))

層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-1 中(14))

層間変形角 $1/50 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの脱落 (表 5-1 中(15))

層間変形角 $1/33 \text{ rad}$ の除荷時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-1 中(16))

層間変形角 $1/33 \text{ rad}$ の除荷時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

直交壁 (壁 B) の損傷の分析

スタッドの変形 (表 5-2 中(17))

層間変形角 $1/400 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの目地の開き (表 5-2 中(18))

層間変形角 $1/200 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

開口部を有する壁 (壁 C) の損傷の分析

上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-3 中(19))

層間変形角 $1/400 \text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

上張りボードの開口部の角部からのひび割れ (表 5-3 中(20))

層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-3 中(21)) (表 5-3 中(22))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

ランナーの端部の変形 (表 5-3 中(23))

層間変形角 $1/100\text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-3 中(24))

層間変形角 $1/75\text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-3 中(25))

層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-3 中(26))

層間変形角 $1/75\text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの面外方向への傾斜/残留 (表 5-3 中(27)) (表 5-3 中(30))

層間変形角 $1/50\text{ rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

上張りボードの開口部の角部からのひび割れ (表 5-3 中(28))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-3 中(29))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは下地側の損傷である。

梁から持ち出した壁 (壁 D, E, F) の損傷の分析**壁 E 周囲のシーリング材の切れ (表 5-4 中(31))**

層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。

壁 D と壁 C との間の隙間 (表 5-4 中(32))

層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/75\text{ rad}$ を経験する前までは、除荷時に閉じることが観察された。

壁 D の下張りボードのひび割れ (表 5-4 中(33))

層間変形角 $1/400\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

壁 E と壁 D 及び壁 F との間の隙間/残留 (表 5-4 中(34)(35)) (表 5-4 中(38)(39))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。
($1/100\text{rad}$ までは除荷時に閉じていた)

壁 E のスタッドの水平移動 (表 5-4 中(36))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

壁 E のランナーの端部の変形 (表 5-4 中(37))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

壁 D の上部のランナーの開き (表 5-4 中(40))

層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

壁 D の下部のランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形 (表 5-4 中(41))

層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

壁 E の下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-4 中(42))

層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

壁 D の上張りボードの折れ (表 5-4 中(43))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

壁 D の下張りボードの破壊 (表 5-4 中(44))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

壁 D と壁 C のスタッド同士を固定するビスの変形 (表 5-4 中(45))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

先付金物と先行ピースを接合するピンのせん断破壊 (表 5-4 中(46))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

層間変位に対する ALC 外壁の損傷の分析 (実験②)

無開口の平坦な壁 (壁 A) の損傷の分析**ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-5 中(1)(2)(3))**

層間変形角 $1/200\text{rad}$ 、 $1/75\text{rad}$ 、 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷ではあるが、実際の建物では他の ALC パネルに隠される位置である。

開口部を有する壁 (壁 B) の損傷の分析**ALC パネルの底面のひび割れ (表 5-6 中(4)(5)(9))**

層間変形角 $1/100\text{rad}$ 、 $1/75\text{rad}$ 、 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷ではあるが、実際の建物では他の ALC パネルに隠される位置である。

ALC パネルの角部のひび割れ (表 5-6 中(6))

層間変形角 $1/75\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは下地側の損傷である。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(7))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(8))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(10))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(11))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

シーリング材の切れ (表 5-6 中(12))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、除荷時には閉じることが観察された。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(13))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(14))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(15)(16))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(17))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ALC パネルの表面のひび割れ (表 5-6 中(18))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

ALC パネルの角部のひび割れ (表 5-6 中(19))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

層間変位に対するドアの損傷の分析 (実験②)

シーリング材の切れ (表 5-7 中(1))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

モルタルのひび割れ (表 5-7 中(2))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

三方枠の破断 (表 5-7 中(3))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

開口補強鋼材の溶接の切れ (表 5-7 中(4))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

開閉機能の低下

(7.3.節で説明する)

層間変位に対する窓の損傷の分析 (実験②)

モルタルのひび割れ (表 5-8 中(1))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

ガラスのひび割れ (表 5-8 中(2))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

開口補強鋼材の溶接の切れ (表 5-8 中(3))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

シーリング材の切れ (表 5-8 中(4))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ガラスのひび割れ (表 5-8 中(5))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ガラスのシーリング材の切れ (表 5-8 中(6))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

サッシの変形 (表 5-8 中(7))

層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

開閉機能の低下

(7.3.節で説明する)

異種の構造部材の層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷の分析 (実験③)

無開口の平坦な壁 (壁 A) の損傷の分析**角部のシーリング材の切れ (表 5-9 中(1))**

層間変形角 $1/1000\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/333\text{ rad}$ を経験する前までは、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。

上張りボードとスラブとの間の隙間 (表 5-9 中(2))

層間変形角 $1/1000\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。

スタッドの水平移動 (表 5-9 中(3))

層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-9 中(4))

層間変形角 $1/150\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-9 中(5))

層間変形角 $1/150\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

上張りボードのひび割れ (表 5-9 中(6))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードの角部のひび割れ (表 5-9 中(7))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中(8))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-9 中(9))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードのしわ (表 5-9 中(10))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-9 中(11))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

ランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け (表 5-9 中(12))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

振れ止めの変形 (表 5-9 中(13))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中(14))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

角部のシーリング材の切れ (表 5-9 中(1))

層間変形角 $1/1000\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/333\text{ rad}$ を経験する前までは、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。

上張りボードとスラブとの間の隙間 (表 5-9 中(2))

層間変形角 $1/1000\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。

スタッドの水平移動 (表 5-9 中(3))

層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-9 中(4))

層間変形角 $1/150\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-9 中(5))

層間変形角 $1/150\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

上張りボードのひび割れ (表 5-9 中(6))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードの角部のひび割れ (表 5-9 中(7))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中(8))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-9 中(9))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードのしわ (表 5-9 中(10))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードのビス穴の拡大 (表 5-9 中(11))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

ランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け (表 5-9 中(12))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

振れ止めの変形 (表 5-9 中(13))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-9 中(14))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

開口部を有する壁 (壁 B) の損傷の分析

上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ (表 5-10 中(15))

層間変形角 $1/1000\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

上張りボードの開口部の角部でのひび割れ (表 5-10 中(16))

層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

シーリング材の切れ (表 5-10 中(17))

層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/100\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時にシーリング材の切れは閉じることが観察された。

スタッドの水平移動 (表 5-10 中(18))

層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードとスラブとの間の隙間 (表 5-10 中(19))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時には閉じることが観察された。

上張りボードと三方枠との間の隙間 (表 5-10 中(20))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時には閉じることが観察された。

下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(21))

層間変形角 $1/150\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上張りボードの斜め方向のしわ (表 5-10 中(22))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(23))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードのしわ (表 5-10 中(24))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

下張りボードのひび割れ (表 5-10 中(25))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

上部のランナーと RC 梁とを接合する打ち込みピンの抜け (表 5-10 中(26))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

上張りボードの面外方向への傾斜 (表 5-10 中(27))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

振れ止めの変形 : (表 5-10 中(28))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

異種の構造部材の層間変位に対するドアの損傷の分析 (実験③)

三方枠の持ち上がり (表 5-11 中(1))

層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。ただし、層間変形角 $1/67\text{rad}$ を経験する前までは、除荷時に閉じることが観察された。

三方枠の変形 (表 5-11 中(2))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ヒンジの隙間 (表 5-11 中(3))

層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

開口補強鋼材の変形 (表 5-11 中(4))

層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

開口補強鋼材と上部のランナーとを接合するビスのせん断破壊 (表 5-11 中(5))

層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

三方枠の接合部の破断 (表 5-11 中(6))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

錠部分の変形 (表 5-11 中(7))

層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

開閉機能の低下

(7.3.節で説明する)

層間変位と慣性力に対する窓の損傷の分析（実験④）

3 階の窓の損傷の分析**モルタルのひび割れ（表 5-12 中(1)）**

100%加振後に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

モルタルのひび割れ（表 5-12 中(2)）

150%（1回目）加振後に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

縦枠の角部の変形（表 5-12 中(3)）

150%（1回目）加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

押縁のずれ（表 5-12 中(4)）

150%（1回目）加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

縦枠と下枠との接合部の隙間（表 5-12 中(5)）

150%（1回目）加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

シーリング材の切れ（表 5-12 中(6)）

150%（1回目）加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ガラスのひび割れ（表 5-12 中(7)）

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

縦枠と上枠との接合部の隙間（表 5-12 中(8)）

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

シーリング材の切れ（表 5-12 中(9)）

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ガラスのひび割れ（表 5-12 中(10)）

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下枠の変形（表 5-12 中(11)）

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

クレセント受けの脱落 (表 5-12 中(12))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

障子枠の変形 (表 5-12 中(13))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

縦枠の内部の変形 (表 5-12 中(14))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-12 中(15))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

2 階の窓の損傷の分析

モルタルのひび割れ (表 5-13 中(16))

100%加振後に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

縦枠の角部の変形 (表 5-13 中(17))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

押縁のずれ (表 5-13 中(18))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(19))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

シーリング材の切れ (表 5-13 中(20))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

モルタルのひび割れ (表 5-13 中(21))

150% (1 回目) 加振後に観察された損傷である。これは、下地側の損傷である。

ガラスのひび割れ (表 5-13 中(22))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

縦枠と上枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(23))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

シーリング材の切れ (表 5-13 中(24))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

ガラスのひび割れ (表 5-13 中(25))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

下枠の変形 (表 5-13 中(26))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

クレセント受けの変形 (表 5-13 中(27))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

縦枠の内部の変形 (表 5-13 中(28))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

縦枠と下枠との接合部の隙間 (表 5-13 中(29))

160%加振後に観察された損傷である。これは、仕上げ側の損傷である。

付録10.内外装壁の損傷と建物の応答との対応関係の診断の観点を含む整理

7.3.2.節では、4つの段階を用いて、地震による内外装壁の損傷と壁の面外方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係について説明した。ここでは整理した過程をまとめる。

診断の観点を含む LGS 間仕切り壁の損傷と層間変位の対応関係（実験①）

無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷と層間変位の対応関係

表 10-1 に、壁 A の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/400rad 経験後に、下地側の損傷（ランナー端部の変形など）が観察されたため、【レベル C】と整理された。その後、層間変形角 1/200rad 経験後には、仕上げ側の損傷（上張りボードのひび割れ）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。つまり、これが実際の地震だと考えると、最大層間変形角が 1/400rad 以下の範囲では、ランナーの変形が見過ごされる可能性が非常に高いということになる。ただし、この損傷は、被害度の評価で、層間変形角 1/400rad 以下では内外装壁の性能に影響を与えないと評価された。

表 10-1 無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/400rad 経験後	【C】
層間変形角 1/200rad 経験後	【B】
層間変形角 1/100rad 経験後	【B】
層間変形角 1/75rad 経験後	【B】
層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

直交壁（壁 B）の損傷と層間変位の対応関係

表 10-2 に、壁 B の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/400rad 経験後に、下地側の損傷（スタッドの変形）が観察されたため、【レベル C】と整理された。その後、層間変形角 1/200rad 経験後には、仕上げ側の損傷（上張りボードの目地の開き）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。つまり、これが実際の地震だと考えると、最大層間変形角が 1/400rad 以下の範囲では、スタッドの変形が見過ごされる可能性が非常に高いということになる。ただし、この損傷は、被害度の評価で、内外装壁の性能に影響を与えないと評価された。

表 10-2 直交壁（壁 B）の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/400rad 経験後	【C】
層間変形角 1/200rad 経験後	【B】
層間変形角 1/100rad 経験後	【B】
層間変形角 1/75rad 経験後	【B】
層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

開口部を有する壁（壁 C）の損傷と層間変位の対応関係

表 10-3 に、壁 C の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/400rad 経験後から、仕上げ側の損傷（上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ）が観察されたため、【レベル A】と整理された。その後、層間変形角 1/100rad 経験後に、下地側の損傷（下張りボードのひび割れ）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。

表 10-3 開口部を有する壁（壁 C）の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/400rad 経験後	【A】
層間変形角 1/200rad 経験後	【A】
層間変形角 1/100rad 経験後	【B】
層間変形角 1/75rad 経験後	【B】
層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の損傷と層間変位の対応関係

表 10-4 に、壁 D, E, F の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/400rad 経験後に、下地側の損傷（壁 D の下張りボードのひび割れなど）が観察されたため、【レベル C】と整理された。その後、層間変形角 1/75rad 経験後には、仕上げ側の損傷（壁 E 周囲のシーリング材の切れの残留など）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。つまり、これが実際の地震だと考えると、最大層間変形角が 1/75rad 以下の範囲では、下張りボードのひび割れなどが見過ごされる可能性が非常に高いということになる。なお、この損傷は、被害度の評価で、内外装壁の密閉性を低下させる可能性があると評価された。

表 10-4 梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/400rad 経験後	【C】
層間変形角 1/200rad 経験後	【C】
層間変形角 1/100rad 経験後	【C】
層間変形角 1/75rad 経験後	【B】
層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

診断の観点を含む ALC 外壁の損傷と層間変位の対応関係 (実験②)

無開口の平坦な壁 (壁 A) の被害と層間変位の対応関係

表 10-5 に、壁 A の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/200rad 経験後に、他部材に隠される位置の損傷 (ALC パネルの底面のひび割れ) が観察されたため、実験を通じて【レベル C】と整理された。つまり、これが実際の地震だと考えると、ALC パネルの底面のひび割れは見過ごされる可能性が非常に高い。ただし、この損傷は、被害度の評価で、内外装壁の性能に影響を与えないと評価された。

表 10-5 無開口の平坦な壁 (壁 A) の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/200rad 経験後	【C】
層間変形角 1/100rad 経験後	【C】
層間変形角 1/75rad 経験後	【C】
層間変形角 1/50rad 経験後	【C】
層間変形角 1/33rad 経験後	【C】

開口部を有する壁 (壁 B) の被害と層間変位の対応関係

表 10-6 に、壁 B の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/100rad 経験後に、他部材に隠される位置の損傷 (ALC パネルの底面のひび割れ) が観察されたため、【レベル C】と整理された。その後、層間変形角 1/50rad 経験後には、仕上げ側の損傷 (ALC パネルの表面のひび割れ) が観察されたため、実験を通じて【中】と整理された。つまり、これが実際の地震だと考えると、最大層間変形角が 1/75rad 以下の範囲では、ALC パネルの底面のひび割れが見過ごされる可能性が非常に高い。ただし、この損傷は、被害度の評価で、内外装壁の性能に影響を与えないと評価された。

表 10-6 開口部を有する壁 (壁 B) の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/200rad 経験後	【C】
層間変形角 1/100rad 経験後	【C】
層間変形角 1/75rad 経験後	【C】
層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

 診断の観点を含むドアの損傷と層間変位の対応関係（実験②）

表 10-7 に、ドアの診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/200rad 経験後から、仕上げ側の損傷（シーリング材の切れ）と下地側の損傷（モルタルのひび割れ）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。

表 10-7 ドアの損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/200rad 経験後	【B】
層間変形角 1/100rad 経験後	【B】
層間変形角 1/75rad 経験後	【B】
層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

 診断の観点を含む窓の損傷と層間変位の対応関係（実験②）

表 10-8 に、ドアの診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/200rad 経験後に、下地側の損傷（モルタルのひび割れ）が観察されたため、【レベル C】と整理された。その後、層間変形角 1/50rad 経験後には、仕上げ側の損傷（ガラスのひび割れ）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。つまり、これが実際の地震だと考えると、最大層間変形角が 1/75rad 以下の範囲では、モルタルのひび割れが見過ごされる可能性が非常に高い。ただし、この損傷は、被害度の評価で、内外装壁の性能に影響を与えないと評価された。

表 10-8 窓の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/200rad 経験後	【C】
層間変形角 1/100rad 経験後	【C】
層間変形角 1/75rad 経験後	【C】
層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

診断の観点を含む LGS 間仕切り壁の損傷と異種の構造部材の層間変位の対応関係(実験③)

無開口の平坦な壁（壁 A）の被害の発生状況の整理

表 10-9 に、壁 A の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/333rad 経験後から、仕上げ側の損傷（シーリング材の残留）と下地側の損傷（スタッドの水平移動）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。

表 10-9 無開口の平坦な壁（壁 A）の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/1000rad 経験後	—
層間変形角 1/333rad 経験後	【B】
層間変形角 1/200rad 経験後	【B】
層間変形角 1/150rad 経験後	【B】
層間変形角 1/100rad 経験後	【B】
層間変形角 1/67rad 経験後	【B】
¥層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/40rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

開口部を有する壁（壁 B）の損傷と異種の構造部材の層間変位の対応関係

表 10-10 に、壁 B の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/1000rad 経験後から、仕上げ側の損傷（上張りボードの目地部に沿った塗装などのひび割れ）が観察されたため、【レベル A】と整理された。その後、層間変形角 1/333rad 経験後に、下地側の損傷（スタッドの水平移動）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。

表 10-10 開口部を有する壁（壁 B）の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/1000rad 経験後	【A】
層間変形角 1/333rad 経験後	【B】
層間変形角 1/200rad 経験後	【B】
層間変形角 1/150rad 経験後	【B】
層間変形角 1/100rad 経験後	【B】
層間変形角 1/67rad 経験後	【B】
層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/40rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

 診断の観点を含むドアの被害と損傷の異種の構造部材の層間変位の対応関係（実験③）

表 10-11 に、ドアの診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/100rad 経験後から、仕上げ側の損傷（三方枠の変形など）が観察されたため、【レベル A】と整理された。その後、層間変形角 1/67rad 経験後に、下地側の損傷（開口補強鋼材と上部のランナーとを接合するビスのせん断破壊）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。

表 10-11 ドアの損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
層間変形角 1/1000rad 経験後	—
層間変形角 1/333rad 経験後	—
層間変形角 1/200rad 経験後	—
層間変形角 1/150rad 経験後	—
層間変形角 1/100rad 経験後	【A】
層間変形角 1/67rad 経験後	【B】
層間変形角 1/50rad 経験後	【B】
層間変形角 1/40rad 経験後	【B】
層間変形角 1/33rad 経験後	【B】

診断の観点を含む窓の損傷と層間変位と慣性力の対応関係（実験④）

3 階の窓の損傷と層間変位と慣性力の対応関係

表 10-12 に、3 階の窓の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。150%（1 回目）入力後（層間変形角 $1/127 \sim -1/139$ rad、床応答加速度 1.38g 経験後）には、仕上げ側の損傷（縦枠の角部の変形など）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。つまり、これが実際の地震だと考えると、外力が 100%入力時の範囲では、モルタルのひび割れが見過ごされる可能性が非常に高い。ただし、この損傷は、被害度の評価で、内外装壁の性能に影響を与えないと評価された。

表 10-12 3 階の窓の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
100%入力後 (層間変形角 $1/948 \sim -1/867$ rad、床応答加速度 0.93g 経験後)	—
150%（1 回目）入力後 (層間変形角 $1/127 \sim -1/139$ rad、床応答加速度 1.38g 経験後)	【B】
160%入力後 (層間変形角 $1/85 \sim -1/58$ rad、床応答加速度 1.43g 経験後)	【B】

2 階の窓の損傷と層間変位と慣性力の対応関係

表 10-13 に、2 階の窓の診断の観点を含む損傷の発生状況を整理した結果を示す。100%入力後（層間変形角 $1/443 \sim -1/329$ rad、床応答加速度 0.69g 経験後）に、仕上げ側の損傷（モルタルのひび割れ）が観察されたため、【レベル A】と整理された。その後、150%（1 回目）入力後（層間変形角 $1/74 \sim -1/69$ rad、床応答加速度 1.07g 経験後）には、仕上げ側の損傷（縦枠の角部の変形など）が観察されたため、実験を通じて【レベル B】と整理された。つまり、これが実際の地震だと考えると、外力が 100%入力時の範囲では、モルタルのひび割れが見過ごされる可能性が非常に高い。ただし、この損傷は、被害度の評価で、内外装壁の性能に影響を与えないと評価された。

表 10-13 2 階の窓の損傷の発生状況の整理

外力の程度	損傷の発生状況
100%入力後 (層間変形角 $1/443 \sim -1/329$ rad、床応答加速度 0.69g 経験後)	—
150%（1 回目）入力後 (層間変形角 $1/74 \sim -1/69$ rad、床応答加速度 1.07g 経験後)	【B】
160%入力後 (層間変形角 $1/71 \sim -1/29$ rad、床応答加速度 1.22g 経験後)	【B】

付録11.内外装壁の被害と建物の応答との対応関係の診断の観点を含む整理

7.5.2.節では、地震による内外装壁の被害と壁の面内方向の層間変位を中心とした建物の応答との診断の観点を含む対応関係について説明した。ここでは整理した過程をまとめる。

診断の観点を含む LGS 間仕切り壁の被害と層間変位の対応関係（実験①）

無開口の平坦な壁（壁 A）の被害と層間変位の対応関係

表 11-1 に、壁 A の被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/400rad 経験後には、容易に確認できる範囲には性能を低下させる損傷が発生していないのに対して、容易に確認できない下地側に密閉性を低下させる可能性がある下張りボードのひび割れが発生した。このため、①-①と整理された。その後は、実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいと整理された。

表 11-1 無開口の平坦な壁（壁 A）の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/400rad 経験後	①-①
層間変形角 1/200rad 経験後	②-①
層間変形角 1/100rad 経験後	③-①
層間変形角 1/75rad 経験後	③-③
層間変形角 1/50rad 経験後	④-②
層間変形角 1/33rad 経験後	⑤-③

直交壁（壁 B）の被害と層間変位の対応関係

表 11-2 に、壁 B の被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいと整理された。

表 11-2 直交壁（壁 B）の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/400rad 経験後	①-①
層間変形角 1/200rad 経験後	②-①
層間変形角 1/100rad 経験後	②-①
層間変形角 1/75rad 経験後	②-①
層間変形角 1/50rad 経験後	②-①
層間変形角 1/33rad 経験後	②-①

開口部を有する壁（壁 C）の被害と層間変位の対応関係

表 11-3 に、壁 C の被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいと整理された。

表 11-3 開口部を有する壁（壁 C）の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/400rad 経験後	③-①
層間変形角 1/200rad 経験後	③-①
層間変形角 1/100rad 経験後	③-①
層間変形角 1/75rad 経験後	③-③
層間変形角 1/50rad 経験後	③-②
層間変形角 1/33rad 経験後	④-③

梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の被害と層間変位の対応関係

表 11-4 に、壁 D, E, F の被害の発生状況を整理した結果を示す。層間変形角 1/400rad 経験後には、容易に確認できる範囲には性能を低下させる損傷が発生していないのに対して、容易に確認できない下地側に密閉性を低下させる可能性がある下張りボードのひび割れが発生した。このため、①-①と整理された。その後、層間変形角 1/75rad 経験後には、容易に確認できる範囲に壁と壁の間の隙間の残留など密閉性を低下させる性能を低下させる損傷が発生したのに対して、容易に確認できない下地側に耐震性を低下させるランナーの開きが発生した。そのため、実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいと整理された。

表 11-4 梁から持ち出した壁（壁 D, E, F）の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/400rad 経験後	①-①
層間変形角 1/200rad 経験後	①-①
層間変形角 1/100rad 経験後	①-①
層間変形角 1/75rad 経験後	②-③
層間変形角 1/50rad 経験後	②-③
層間変形角 1/33rad 経験後	②-③

 診断の観点を含む ALC 外壁の被害と層間変位の対応関係 (実験②)

無開口の平坦な壁 (壁 A) の被害と層間変位の対応関係

表 11-5 に、壁 A の被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、壁の性能に影響を与えると考えられる損傷の発生は観察されなかった。

表 11-5 無開口の平坦な壁 (壁 A) の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/200rad 経験後	①-①
層間変形角 1/100rad 経験後	①-①
層間変形角 1/75rad 経験後	①-①
層間変形角 1/50rad 経験後	①-①
層間変形角 1/33rad 経験後	①-①

開口部を有する壁 (壁 B) の被害と層間変位の対応関係

表 11-6 に、壁 B の被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいのか、同程度と整理された。

表 11-6 壁 B (開口部を有する壁) の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/200rad 経験後	①-①
層間変形角 1/100rad 経験後	①-①
層間変形角 1/75rad 経験後	①-①
層間変形角 1/50rad 経験後	③-③
層間変形角 1/33rad 経験後	④-③

 診断の観点を含むドアの被害と層間変位の対応関係（実験②）

表 11-7 に、ドアの被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいと整理された。

表 11-7 ドアの被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/200rad 経験後	①-①
層間変形角 1/100rad 経験後	①-①
層間変形角 1/75rad 経験後	①-①
層間変形角 1/50rad 経験後	①-①
層間変形角 1/33rad 経験後	⑤-③

 診断の観点を含む窓の被害と層間変位の対応関係（実験②）

表 11-8 に、ドアの被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいと整理された。

表 11-8 窓の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/200rad 経験後	①-①
層間変形角 1/100rad 経験後	①-①
層間変形角 1/75rad 経験後	①-①
層間変形角 1/50rad 経験後	⑤-③
層間変形角 1/33rad 経験後	⑤-③

診断の観点を含む LGS 間仕切り壁の被害と異種の構造部材の層間変位の対応関係(実験③)

無開口の平坦な壁（壁 A）の被害の発生状況の整理

表 11-9 に、壁 A の被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいのか、同程度と整理された。

表 11-9 無開口の平坦な壁（壁 A）の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/1000rad 経験後	①-①
層間変形角 1/333rad 経験後	②-①
層間変形角 1/200rad 経験後	②-①
層間変形角 1/150rad 経験後	③-①
層間変形角 1/100rad 経験後	③-①
層間変形角 1/67rad 経験後	③-③
層間変形角 1/50rad 経験後	④-③
層間変形角 1/40rad 経験後	④-③
層間変形角 1/33rad 経験後	④-③

壁 B（開口部を有する壁）の被害と異種の構造部材の層間変位の対応関係

表 11-10 に、壁 B の被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいのか、同程度と整理された。

表 11-10 開口部を有する壁（壁 B）の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/1000rad 経験後	③-①
層間変形角 1/333rad 経験後	③-①
層間変形角 1/200rad 経験後	③-①
層間変形角 1/150rad 経験後	③-①
層間変形角 1/100rad 経験後	③-①
層間変形角 1/67rad 経験後	③-①
層間変形角 1/50rad 経験後	③-③
層間変形角 1/40rad 経験後	④-③
層間変形角 1/33rad 経験後	④-③

診断の観点を含むドアの被害の異種の構造部材の層間変位の対応関係（実験③）

表 11-11 に、ドアの被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいと整理された。

表 11-11 ドアの被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
層間変形角 1/1000rad 経験後	①-①
層間変形角 1/333rad 経験後	①-①
層間変形角 1/200rad 経験後	①-①
層間変形角 1/150rad 経験後	①-①
層間変形角 1/100rad 経験後	①-②
層間変形角 1/67rad 経験後	⑤-③
層間変形角 1/50rad 経験後	⑤-③
層間変形角 1/40rad 経験後	⑤-③
層間変形角 1/33rad 経験後	⑤-③

 診断の観点を含む窓の被害と層間変位と慣性力の対応関係（実験④）

3 階の窓の被害と層間変位と慣性力の対応関係

表 11-12 に、3 階の窓の被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいと整理された。

表 11-12 3 階の窓の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
100%入力後 (層間変形角 1/948~-1/867rad、 床応答加速度 0.93g 経験後)	①-①
150% (1 回目) 入力後 (層間変形角 1/127~-1/139rad、 床応答加速度 1.38g 経験後)	②-①
160%入力後 (層間変形角 1/85~-1/58rad、 床応答加速度 1.43g 経験後)	④-①

2 階の窓の被害と層間変位と慣性力の対応関係

表 11-13 に、2 階の窓の被害の発生状況を整理した結果を示す。実験を通じて、容易に確認できる範囲の被害度の方が大きいと整理された。

表 11-13 2 階の窓の損傷の被害の発生状況の整理

外力の程度	被害の発生状況
100%入力後 (層間変形角 1/443~-1/329rad、 床応答加速度 0.69g 経験後)	②-①
150% (1 回目) 入力後 (層間変形角 1/74~-1/69rad、床 応答加速度 1.07g 経験後)	②-①
160%入力後 (層間変形角 1/71~-1/29rad、 床応答加速度 1.22g 経験後)	③-①

付録12. 加速度センサを用いた診断方法のケーススタディー

8章では、内外装壁の損傷の診断方法について、迅速性、利便性、遠隔性の条件に対する性能を上げるためには、損傷と計測結果の対応関係を明らかにすることが必要であることを論じた。

ここで、本研究で実施した4つの実大実験では、内外装壁の加速度センサによる計測を行っていた。そこで付録12では、損傷と加速度計の計測結果の対応関係について検討し、加速度センサを用いた診断方法の有用性について考察した結果を示す。

検討した加速度センサの概要

加速度センサの概要

本研究では、加速度センサの中でも、小型・安価で建物への設置が現実的な MEMS (Micro Electro Mechanical System) 加速度センサを検討の対象とする。ただし本研究においては、MEMS 加速度センサのことを単に加速度センサと称す。

その中でも、本研究では、アナログデバイゼス社製の ADXL355 という加速度センサを検討の対象とした。この加速度センサはサンプリング周波数が最大 4000Hz、計測レンジが±2G、A/D 分解能が 20bit である¹。加速度センサは 15cm×15cm、厚み 2cm 程度であり、実際の建物において LGS 間仕切り壁の内部や、ALC 外壁と内装材の間の空間に十分納まる大きさとなっている。写真 12-1 に、加速度センサの外観を示す。



写真 12-1 加速度計の概要

(a) 実験①②における外観; (b) 実験③⑤における外観²

¹ DEVICESANALOG. ADXL355 Overview. 参照日: 2022 年 07 月 25 日, 参照先: <https://www.analog.com/jp/products/adxl355.html>

² 実験①②と実験③⑤で検討した加速度センサでは、データ処理部分の部品を変えたため、外観が異なっているが、センサ部分は同じ製品を用いている。

センサユニットに搭載されている MEMS 加速度センサチップには XYZ の 3 軸が定義されており、3 方向の加速度が 1 台で計測できる。図 12-1 に、3 軸のイメージを示す。

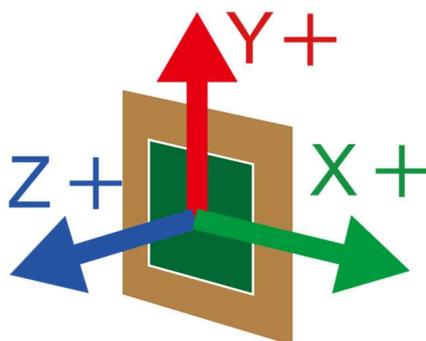


図 12-1 加速度計の 3 軸のイメージ

また、加速度センサには無線ユニットが内蔵されており、データは無線で PC に保存される。また、バッテリー駆動と外部電源による駆動の両方が可能である。

想定する加速度センサの運用方法

なお、本研究では、建物の施工段階において、内外装材の各部材に加速度センサが設置されている状況を想定し、地震の際に加速度センサ得られた計測値から損傷を診断する方法の有用性を検討する。

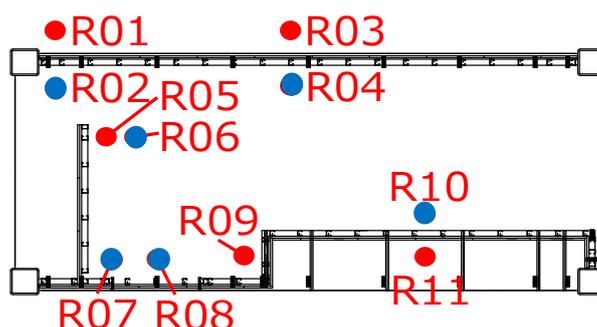
設置方法としては、壁に対して Y 方向が鉛直方向に、Z 方向が貼付面手前方向になるように設置することを考える。そして、計測された重力加速度の向きにより各方向の傾斜角を計測し、Z 方向の加速度により面外振動性状を計測する。なお、傾斜角に関しては、特に Z 軸周りの傾斜角を面内回転角、X 軸回りの傾斜角を面外回転角と定義する。

有用性の検討を目的とした加力実験の計画

本研究では、面内方向の層間変位を始めとした外力に対する内外装材の損傷を整理することを目的とし、5つの実建物を模した試験体の加力実験を実施した。これら5つの加力実験のうち、実験①のLGS間仕切り壁、実験②のALC外壁、実験③のLGS間仕切り壁とドア、実験⑤に加速度センサを設置した。

実験①における加速度センサの設置状況

図 12-2 に、加速度センサの設置箇所を示す。壁 A の上張りボードとスタッド（端部と中央の2箇所ずつ）、壁 B の下張りボードとスタッド、壁 C のスタッドと開口補強材、壁 D の下張りボード、壁 E の上張りボードと下張りボードに計 11 台設置した。図中の赤丸はボードに、青丸はスタッドや開口補強材に貼付していることを表す。また、壁 C の R07、R08 は開口部の上に設置したが、他の加速度センサは壁の高さ方向中央に設置した。



赤丸：ボード材に設置した加速度センサ 青丸：下地材に設置した加速度センサ

図 12-2 実験①の加速度センサの設置箇所

実験②における加速度センサの設置状況

図 12-3 に、加速度センサの設置箇所を示す。壁 A の ALC パネル（中央の ALC パネルと端部の ALC パネルの 2 箇所）、壁 B の ALC パネル（端部の ALC パネルと窓の上下の ALC パネルと窓とドアに挟まれた ALC パネルの 5 箇所）に計 7 台設置した。また、鉄骨梁と鉄骨柱にも加速度センサを設置していた。

なお、実験②では、変位計による ALC パネルの挙動も計測しており、加速度センサの精度を検証するため、変位計と加速度センサの計測結果の比較も行った。そのため、図 12-3 では変位計の設置箇所も示している。

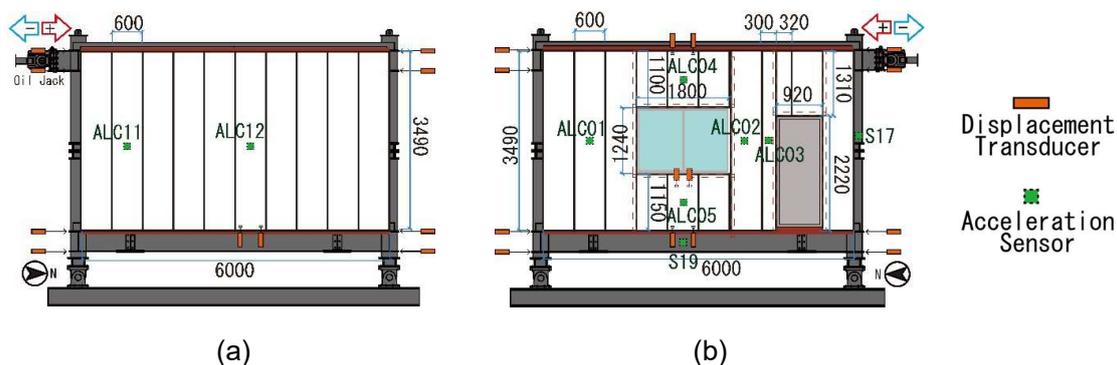


図 12-3 実験②の加速度センサの設置箇所; (a) 壁 A, (b) 壁 B

実験③における加速度センサの設置状況

図 12-4 に、加速度センサの設置箇所を示す。壁 A の上張りボード (S25, S26, S30, S31)、下張りボード (S27, S28)、スタッド (S29) と、壁 B の上張りボード (S23, S24)、ドア (S22)、RC 梁 (S20) に設置した。なお、壁 A に関しては、上張りボードと下張りボードで加速度センサを設置した位置が概ね同じになるように設置した。また加速度センサを設置したスタッドは、加速度センサを設置した下張りボードに接合されるスタッドである。

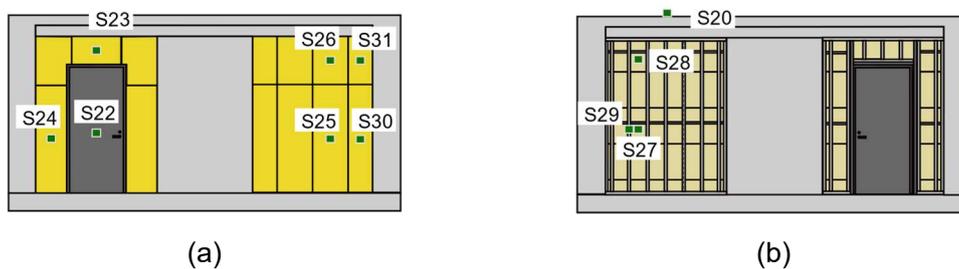


図 12-4 実験③の加速度センサの設置箇所; (a) 壁 A, (b) 壁 B

LGS 間仕切り壁の損傷に対する加速度センサを用いた診断方法の有用性の検討

精度の検証

実験①での計測結果を用いて、加速度センサの精度を検証する。

図 12-5 に、加速度センサにより計測された傾斜角のピーク変形時の値の例を棒グラフとして示す。この記録はセット 1 ($\theta_{\max}=1/400\text{rad}$) の前半のもので、図 12-5 の縦軸は傾斜角（回転角）あるいは層間変形角を示す。赤色が R01、青色が R05 の加速度変化から計算した傾斜角を示す。R01 では壁 A（無開口の平坦な壁）の面内傾斜角（以後、面内回転角）を、R05 では壁 B（直交壁）の面外傾斜角を示す。黒色の点線は鉄骨骨組の層間変形角を示す。

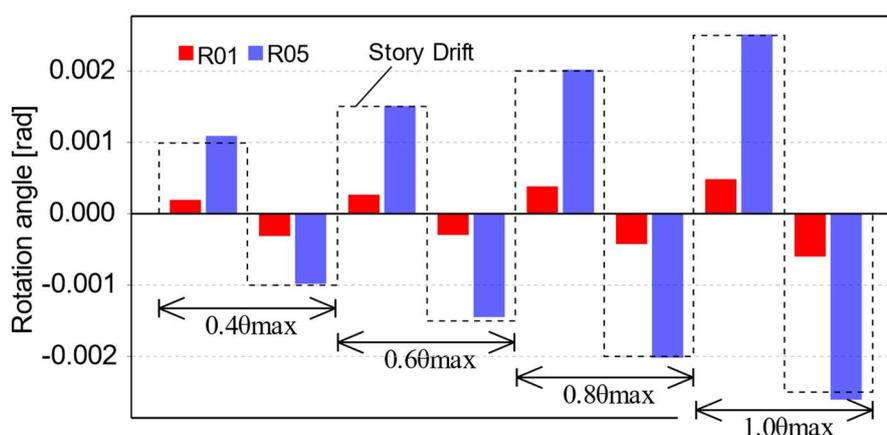


図 12-5 加速度センサにより計測された傾斜角のピーク変形時の値の例（セット 1 ($\theta_{\max}=1/400\text{rad}$) の前半）

図 12-5 から鉄骨骨組の層間変形角が小さい段階から R01（壁 A、無開口の平坦な壁）の面内回転の発生が観測されていることがわかる。また、面内回転角は鉄骨骨組の層間変形角に対して 20%程度とかなり小さいことがわかる。ボードの面内回転角が鉄骨骨組の層間変形角に比べて小さいことは変位計による計測でも確認されており、鉄骨骨組とボード間に充填されているシーリング材の変形で吸収される影響であると考えられる。一方、R05(壁 B、直交壁)の面外傾斜角は鉄骨骨組の層間変形角とほぼ対応している。これは、5.1.1.節で述べた、壁 B（直交壁）が鉄骨骨組に追従して挙動できることと整合している。

図 12-6 に、実験全体を通じた傾斜角の推移を示す。図 12-6 では、数日間の実験を総覧するため、Fig. 10 に白丸で示した観察ステップにおける計測結果のみ示している。図 12-6 中では、○のプロットが R01、△のプロットが R05 の記録を、実線が鉄骨骨組の層間変形角を示す。一部プロットの欠落は、計測装置の不調によりデータが記録できなかったことによ

る。Fig. 15 と同様、R01 および R05 のプロットは鉄骨骨組の層間変形角の変化に追従して変化している。R01（壁 A、無開口の平坦な壁）には、実験の後半では、層間変形角の最大 85% 程度の傾斜角が生じており、シーリング材で吸収可能な量を超えた大きな変形により壁と鉄骨骨組が接触し、壁に大きな傾斜角を生じさせていたことを読み取ることができる。

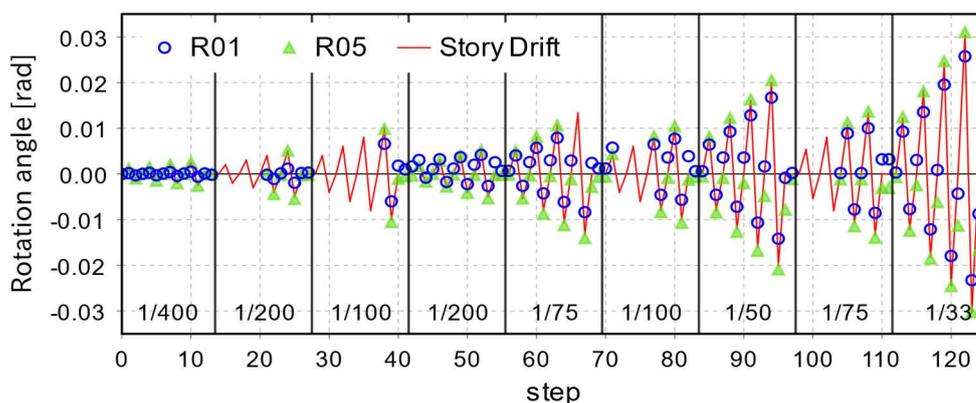


図 12-6 R01 と R05 の傾斜角の推移

以上より、加速度センサで非常に小さい傾斜角から精度よく傾きを計測できることがわかった。実験では加速度センサの数が限られていたが、加速度センサにより要素ごとの傾斜角を計測することで、それらの値に基づき非構造部材の損傷を検知できると考えられる。

回転角の計測による診断の有用性の検討

個々の上張りボードの面内方向の回転の検出の可能性の検討（実験①での検討）

実験①では、セット3の層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に、壁Aにおいて、個々の上張りボードが面内方向に回転していること（表5-1中(6)）が観察された。個々の上張りボードの面内方向の回転は、人的被害に関わりうる上張りボードの脱落に繋がる損傷と考えられる。そのため、遠隔から損傷を検出できる診断方法の確立が求められている。

そこで、ここでは壁Aの上張りボードに設置したR01とR03、スタッドに設置したR02とR04の面内回転角を比較することでこれらの挙動を検出することについて検討する。

図12-7に、図12-6のように整理した各センサの傾斜角履歴から、各セットで鉄骨骨組の層間変形角が θ_{\max} （負側）に達した直後の除荷時の面内回転角のみを抽出したものを棒グラフとして示す。R01～R04の値の大小を観察すると、セット3以降は概ね「R01（端部の上張りボード）>R03（中央部の上張りボード）」となっていることがわかる。また、R02とR04（スタッド）の傾斜角は概ね同じ値であり、かつボードの回転角とは異なる値であることから、スタッドはほぼ平行にボードと異なる角度で傾斜していることがわかる。この関係は、少なくとも端部の上張りボードと中央の上張りボードは一体ではなく、分離して回転していることを示しており、実験観察においてもセット3の層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時から上張りボードの個別の回転が確認されたことと整合している。そして、図12-7によれば、その後のセットでもR01とR03の傾斜角の差分は徐々に大きくなっており、個々の上張りボードの面内方向の回転によるずれは大きくなることを示しているが、これも5.1.1節で述べた観察結果と整合している。本実験では下張りボードの挙動は計測していないが、上張りボードが個別に回転していることやスタッドとも別の回転角を示していることを考えると、この時点から上張りボードと下張りボードの接着が剥がれ始めているものと推測される。

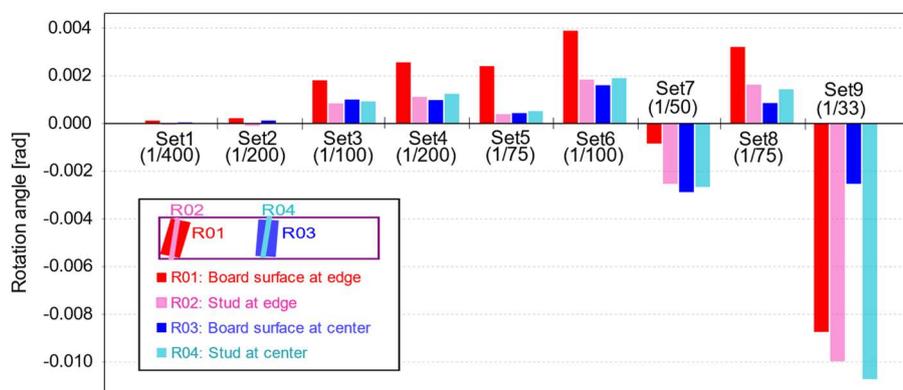


図 12-7 R01 と R03、R02 と R04 の除荷時の面内方向の回転角

以上のように、加速度センサにより上張りボードの面内回転角やスタッドの面内傾斜角を計測することで、変形の違いを把握することができ個々の上張りボードが面内方向の回転を検出することが可能である。

上張りボードの面外傾斜の検出の可能性の検討（実験②での検討）

実験②では、セット 6 の層間変形角 $1/67\text{rad}$ の時に、壁 A において、上張りボードの面外方向への傾斜（表 5-9 中(8)）が観察された。上張りボードの面外方向への傾斜は、人的被害に関わりうる上張りボードの脱落に繋がる損傷と考えられる。そのため、遠隔から損傷を検出できる診断方法の確立が求められている。

ここでは壁 A の上張りボードに設置した S25 と、下張りボードに設置した S27 の面外傾斜角を比較することで、これらの挙動を検出することについて検討する。

図 12-8 に、傾斜が観察された上張りボードに設置した S25 と、下張りボードに設置した S27 から得られた面外傾斜角の計測結果を示す。赤色の△が S25（上張りボード）の、黒色の▽が S27（下張りボード）の面外傾斜角の計測結果を示す。なお、S25 と S27 は概ね同じ位置に取り付けられている。図 12-8 より、層間変形角 $1/67$ のセットの 4step 目（負荷荷時）から、2つの面外傾斜角の計測結果に差が生じていることが読み取れる。また、目視確認される前のセット 5 の層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に、既に 2つの面外傾斜角の計測結果には差が生じていることが読み取れる。

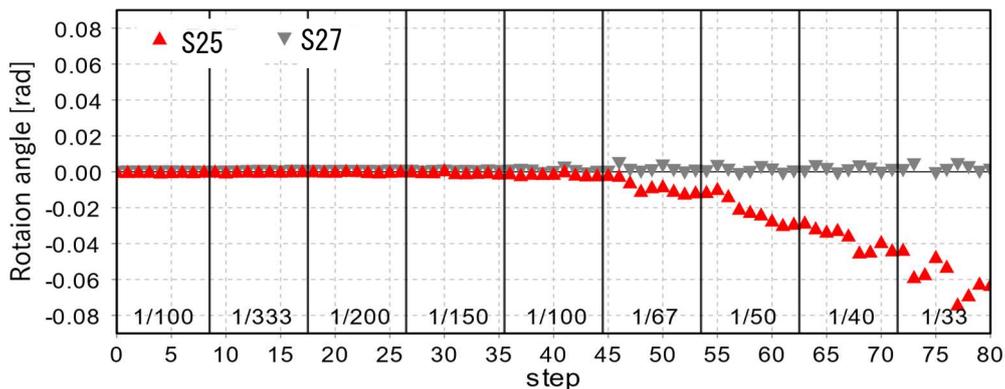


図 12-8 S25 と S27 の面外方向の傾斜角

この上張りボードの傾斜は、上張りボードと下張りボードが異なる挙動をしたことによりボード間の接着力が低下した状態で、壁の対角線方向に加わる斜め圧縮力を受けたこと

が原因の一つとして考えられた。そこで、**図 12-9** に、S25（上張りボード）と S27（下張りボード）から得られた面内傾斜角の計測結果を示す。赤色の△が S25（上張りボード）の、黒色の▽が S27（下張りボード）の面内傾斜角の計測結果を示し、赤実線が構造躯体の層間変形角を示す。**図 12-9** より、層間変形角 $1/150\text{rad}$ まではどちらも同様の挙動をしているが、層間変形角 $1/100\text{rad}$ からは下張りボードの面内回転角が上張りボードと比較して小さくなり、層間変形角 $1/67\text{rad}$ 以降では下張りボードは殆ど回転しなくなることが読み取れる。上張りボードも層間変形角 $1/50\text{rad}$ 以降は挙動しなくなるが、下張りボードとの回転角とは異なっている。

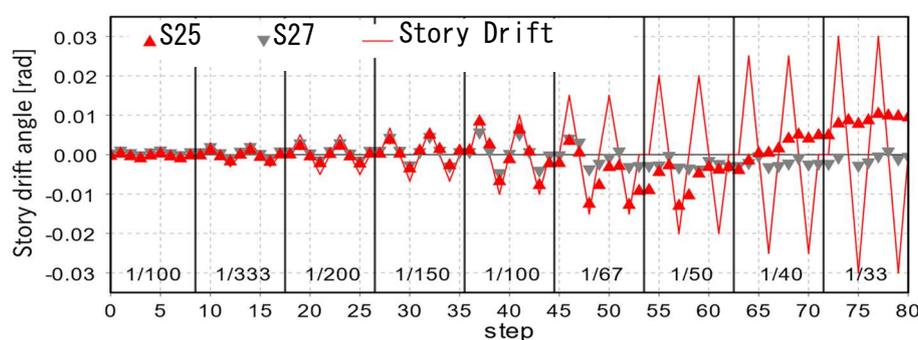


図 12-9 S25 と S27 の面内方向の回転角

以上のように、加速度センサにより上張りボードと下張りボードの面外回転角や面内回転角を計測することで、上張りボードの面外傾斜を検出することが可能である。更に、加速度センサでは、目視よりも先に損傷の発生を検出できることが示唆された。

ボードとスタッドの接合部分の損傷の検出の可能性の検討（実験①での検討）

実験①では、セット 7 の層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に、壁 A において、上張りボードの面外方向への傾斜（表 5-1 中(13)）が観察された。また、下張りボードの目地周辺でビス穴の拡大（表 5-1 中(14)）が観察された。特に、ボードとスタッドの接合部分の損傷は、通常の日視調査で容易に確認できない範囲の損傷である。そのため、目視調査に代わる診断方法の確立が求められている。

そこで、ここでは壁 A の上張りボードに設置した R01 と R03、スタッドに設置した R02 と R04 の面外傾斜角を比較することで、これらの挙動を検出することについて検討する。

図 12-10 に、**図 12-8** のように整理した各センサの傾斜角履歴から、各セット中で鉄骨骨

組の層間変形角が θ_{\max} （負側）に達した直後の除荷時の面外傾斜角のみを抽出したものを棒グラフとして示す。なお、セット 9（ $\theta_{\max}=1/33\text{rad}$ ）においては R03 が貼付された上張りボードが脱落しているため R03 の値は示していない。载荷の進行とともに、面外傾斜角が大きくなる傾向が明瞭に捉えられており、端部の R01、R02 と比較して、中央部の R03、R04 は面外傾斜が顕著であることがわかる。これは壁の対角線方向に加わる圧縮力により壁の中央部分が押し出されるためであると考えられる。特に R03（上張りボード）の面外傾斜角は载荷の進行とともに徐々に大きくなる。目視観察ではセット 7 の層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時から面外傾斜が確認されているが、この計測結果によればそれ以前のセットから面外傾斜は生じており、特に層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時から面外傾斜が生じたわけではないことを示している。上張りボードの面外傾斜角は、ボードが脱落する前のセット 8（ $\theta_{\max}=1/75\text{rad}$ ）で $1/200\text{rad}$ 程度でありそれほど大きな値ではない。ボードの面外傾斜角のみの計測では、脱落直前の検出は可能であると思われるが、損傷が累積する段階ではそれほど大きな値を示しておらず、損傷程度を評価することは困難であると思われる。

一方、R04（スタッド）の面外傾斜角は セット 3 の層間変形角 $1/100\text{rad}$ 以後それほど大きな変化を示さず、R03 と R04 の面外傾斜角の差はセット 8（ $\theta_{\max}=1/75\text{rad}$ ）まで徐々に広がっている。これはボードとスタッドの接合部分が徐々に分離していることを示している。その差はセット 8（ $\theta_{\max}=1/75$ ）でも $1/333\text{rad}$ 程度と大きな値ではないが、施工直後は密着されているべきものであり、実験開始直後の差分が $1/1000\text{rad}$ 以下である。

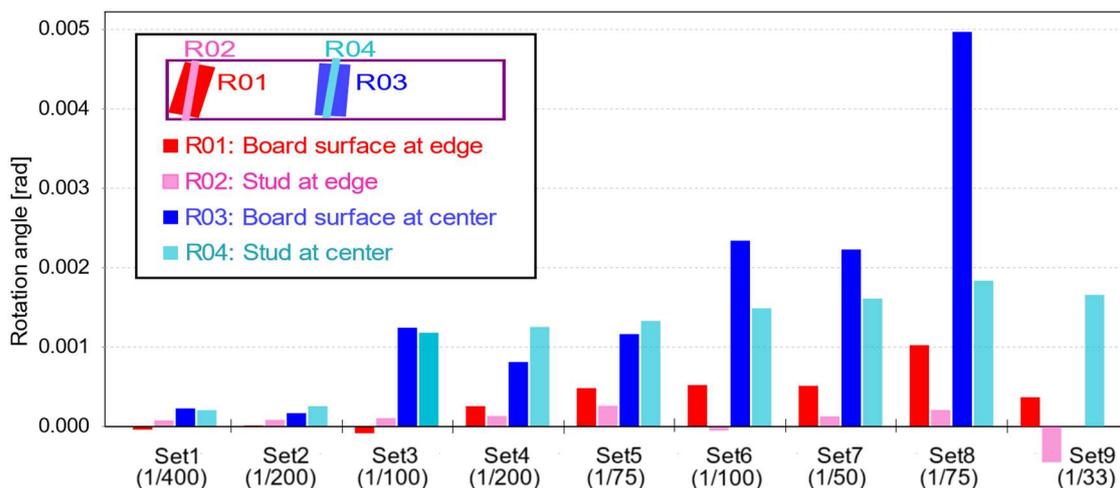


図 12-10 R01 と R03、R02 と R04 の除荷時の面外方向の回転角

以上のように、加速度センサにより上張りボードの面外回転角やスタッドの面外傾斜角を計測することで、ボードとスタッドの接合部分の損傷を検出することが可能である。

開口部の角部の上張りボードのひび割れの検出の可能性の検討（実験②での検討）

実験②では、セット2の層間変形角 $1/333\text{rad}$ の時に、壁 B において、開口部の左角部で上張りボードのひび割れ（表 5-10 中(16)）が観察された。5.2.1節で考察したように、開口部の角部の上張りボードのひび割れは、ドアの上と横にある上張りボードが異なる挙動をしたことが原因の一つとして考えられる。

そこで、ここでは壁 B のドアの上の上張りボードに設置した S23 と、ドアの横の上張りボードの設置した S24 の面内回転角を比較することで、これらの挙動を検出することについて検討する。

図 12-11 に、ドアの上にある上張りボードに設置した S23 とドアの横にある上張りボードに設置した S24 から得られた面内傾斜角の計測結果を示す。赤色の△が S23（ドア上）の、黒色の▽が S24（ドア横）の面内傾斜角の計測結果を示し、赤実線が構造躯体の層間変形角を示す。図 12-11 より、層間変形角 $1/1000\text{rad}$ のセットから2つの面内傾斜角の計測結果に差が生じており、鋼製ドアの上にある上張りボードは、層間変形角 $1/33\text{rad}$ の時点でも面内傾斜角 $1/100\text{rad}$ 以下となっていることが読み取れる。

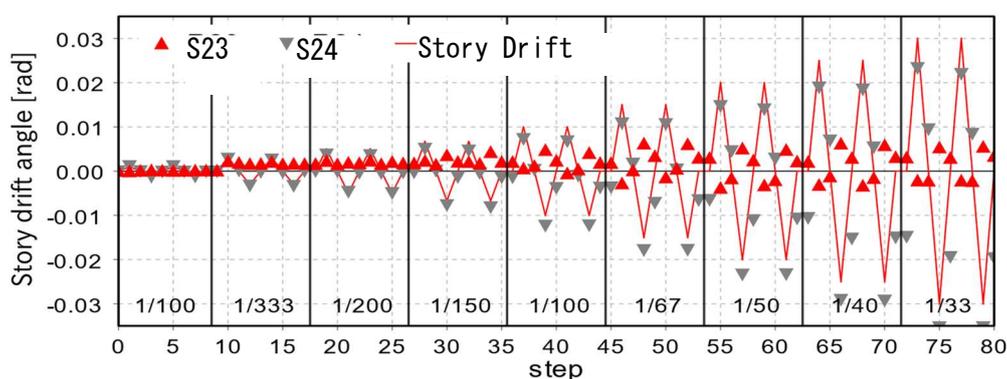


図 12-11 S23（鋼製ドアの上にある上張りボード）と S24（鋼製ドアの横にある上張りボード）の面内回転角

以上のように、加速度センサによりドアの上と横の上張りボードの面内回転角を計測することで、上張りボードの挙動の違いを検出することが可能である。そして、この挙動の違いから、開口部の角部の上張りボードのひび割れを推測することが可能であると考えられる。

壁の回転に伴う損傷の検出の可能性の検討（実験①での検討）

実験①では、セット 1 の層間変形角 1/400 の時に、壁 D の下張りボードのひび割れ（表 5-4 中(33)）や、壁 D と壁 C の間に隙間（表 5-4 中(32)）が観察された。また、セット 5 の層間変形角 1/75 の時に、壁 D の上部のランナーの開き（表 5-4 中(40)）や、壁 D の下部のランナーとスラブを固定する打ち込みピンの変形（表 5-4 中(41)）が観察された。更に、セット 7 の層間変形角 1/50 の時に、壁 D と壁 C のスタッド同士を固定するビスの変形（表 5-4 中(45)）が観察された。5.1.1.節で考察したように、これらの損傷は、壁 B の鉛直軸回りの回転に伴う損傷だと考えられる。ランナーの開きや、打ち込みピンの変形などの損傷は、耐震性を低下させる損傷であると同時に、通常の見視調査で容易に確認できない範囲の損傷である。そのため、見視調査に代わる診断方法の確立が必要である。

そこで、ここでは壁 D に設置した R09 と、壁 E に設置した R11 の各種計測値を比較することで、これらの挙動を検出することについて検討する。

図 12-12 に、R09 と R11 の X、Y、Z 軸の方向と共に、5.1.1.節の図 5-2 や、図 5-3 に示した観察結果に基づく正載荷前後の壁 D の挙動を、壁 E との関係で示す。また、図 12-13 に、R09 と R11 の X 軸の回転角 (RX) と Z 軸の回転角 (RZ) の計測値を示す。これらは次式で定義される。

$$R_X = \arcsin(a_X/g)$$

$$R_Z = \arcsin(a_Z/g)$$

ここで、 a_X および a_Z はセンサの X 軸方向および Z 軸方向に検出された加速度、 g は重力加速度である。

壁 D が図 12-12 に示したように鉛直軸回りに φ 回転した状態で面外方向（載荷方向）に θ 傾斜すると、R09 の R_X は $\arcsin(-\sin\varphi\sin\theta)$ に相当する。壁 D が鉛直軸回りに回転しない場合 ($\varphi = 0$ の場合)、R09 の R_X は θ に関わらず常に 0 であるが、壁 D が鉛直軸回りに回転する場合 ($\varphi \neq 0$ の場合)、 R_X が値を持つ。つまり R09 の R_X の値に着目することで鉛直軸回りの回転の発生を検出できる。

図 12-13 には、セット 7 の層間変形角 1/50rad の時、セット 9 の層間変形角 1/33 時、及びそれぞれの直後の除荷時における R_X と R_Z の計測値をプロットした。Fig.20 中の矢印は除荷時の計測値のプロット位置を示す。R09（壁 D）のプロットをみると、載荷の進展とともに、左上-右下方向に軌跡が傾斜している ($\theta > 0$ のとき $R_X < 0$ 、 $\theta < 0$ のとき $R_X > 0$)。これは正負載荷の両方で、壁 D が面外方向（載荷方向）に傾斜したうえで、鉛直軸回りに上からみて

反時計回りに回転したこと ($\varphi > 0$ であること) を示しており、観察結果と整合する。

また、セット 3 の層間変形角 $1/100\text{rad}$ の時に、壁 D と壁 E の間に隙間 (表 5-4 中(34)(38)) が観察された。そこで、図 12-13 の R11 (壁 E) のプロットをみると、 R_x の計測値は荷重に応じて変化するのに対して、 R_z の計測値はほぼ一定である。これは壁 E が面内方向 (荷重方向) のみに回転していることを示しており、観察結果と整合する。更に、R11 の R_x の計測値は、R09 の R_z の計測値と比較してかなり小さい値となっている。このことから壁 D と壁 E の間には、隙間が生じていることが示唆される。このように隣り合う 2 つの壁面が全く異なる挙動をしていることを考えると、その接続部分には損傷が生じていることは容易に想像される。ただし、今回の計測からどのような損傷がどの程度生じているか直接把握することは難しい。なお、R11 の R_x の計測値は、正荷重時に比べて負荷重時の方が絶対値が大きく、これは Fig. 13 で示した、壁 E に正荷重時には水平移動が生じ、負荷重時には面内回転が生じるという観察結果と整合している。

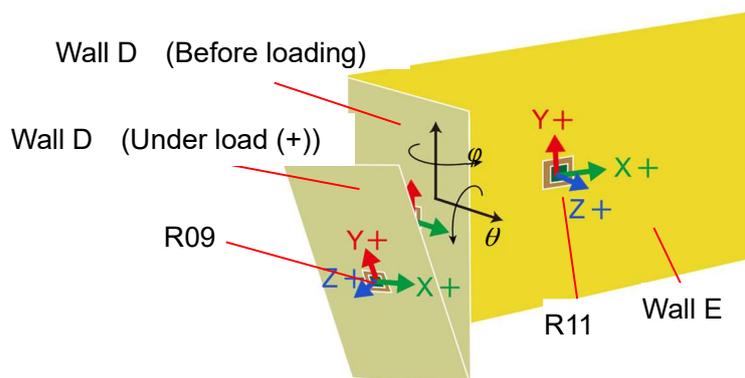


図 12-12 壁 D の挙動と R09 と R11 の 3 軸の方向

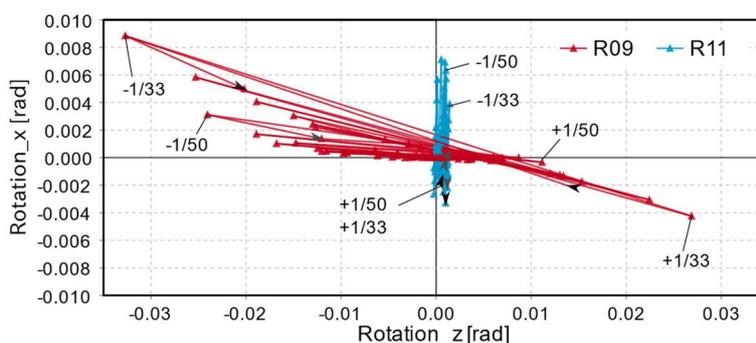


図 12-13 R09 と R11 の X 軸の回転角 (RX) と Z 軸の回転角 (RZ) の計測値

以上のように、加速度センサにより、隣り合う壁の面内回転角と面外傾斜角を計測することで、壁の鉛直軸回りの回転を検出することが可能である。そして、この挙動から、回転に伴う損傷の発生を推測することが可能であると考えられる。また、載荷時の値ではなく除荷時の値からも同じ考察ができる。ただし、現象を直接計測しているわけではなく、計測データも蓄積されていないため、どの程度どのような損傷が発生したかを特定することは現時点では困難である。

面外振動性状の計測による診断の有用性の検討

フーリエ振幅スペクトルの推移から損傷を検出する可能性の検討（実験①での検討）

層間変形角の増大に伴い、上張りボードのひび割れや下張りボードのビス周辺の変形などの損傷が徐々に増大し、個々の上張りボードの面内方向の回転などが徐々に大きくなるのが観察された。このことから、層間変形角の増大に伴い、上張りボードと下張りボードや下張りボードとスタッドの接合部など、各所接合部の剛性が低くなっていることが予想される。更にこのことから、層間変形角の増大と損傷の進展に伴い、LGS 間仕切り壁の振動性状が変化していくことが予想される。そこで、ここでは壁 A の上張りボードに設置した R03 の Z 方向の微動計測の結果から算出される面外振動性状を、層間変形角の増大と比較することで、損傷を検出することについて検討する。

図 12-14 に、壁 A の上張りボード(R03) の面外方向振動のフーリエ振幅スペクトルの推移を示す。これは新たな θ_{max} に至るセット（セット 2、3、5、7）後の静止状態における面外方向の加速度振動記録（4096/125=33 秒間）から計算したフーリエ振幅スペクトルの推移を示している。

表れたピークのうち最も低周波(長周期)であるのは 8.2Hz 程度のもの（Fig. 21 中に灰色で表示）であるが、これは鉄骨骨組上の加速度計も含め、すべての加速度計で観測されたピークであり、鉄骨骨組を含む試験体全体が構面外方向にこの周波数で振動していることを示している。載荷が進展すると、ピークは 7.5Hz 程度に移動しており、若干の低周波数化（長周期化）が見られる。一方、載荷開始前のスペクトルで 13Hz 程度に表れているピーク（Fig. 21 中に薄赤で表示）は、壁 A（R03 および R04）の面外変形方向の計測結果のみに表れており、壁 A 特有の振動性状を表すものと考えられる。このピークは載荷の進展とともに低周波数側に移行し、セット 3（ $\theta_{max}=1/100$ ）の終了時点では 10Hz 程度となる。これは、灰色で示したピークの移動と比べるとかなり大きな変化である。これらより、載荷の進展に伴ってスタッドも含めた壁全体として低周波数化（長周期化）が進行していることがわかる。

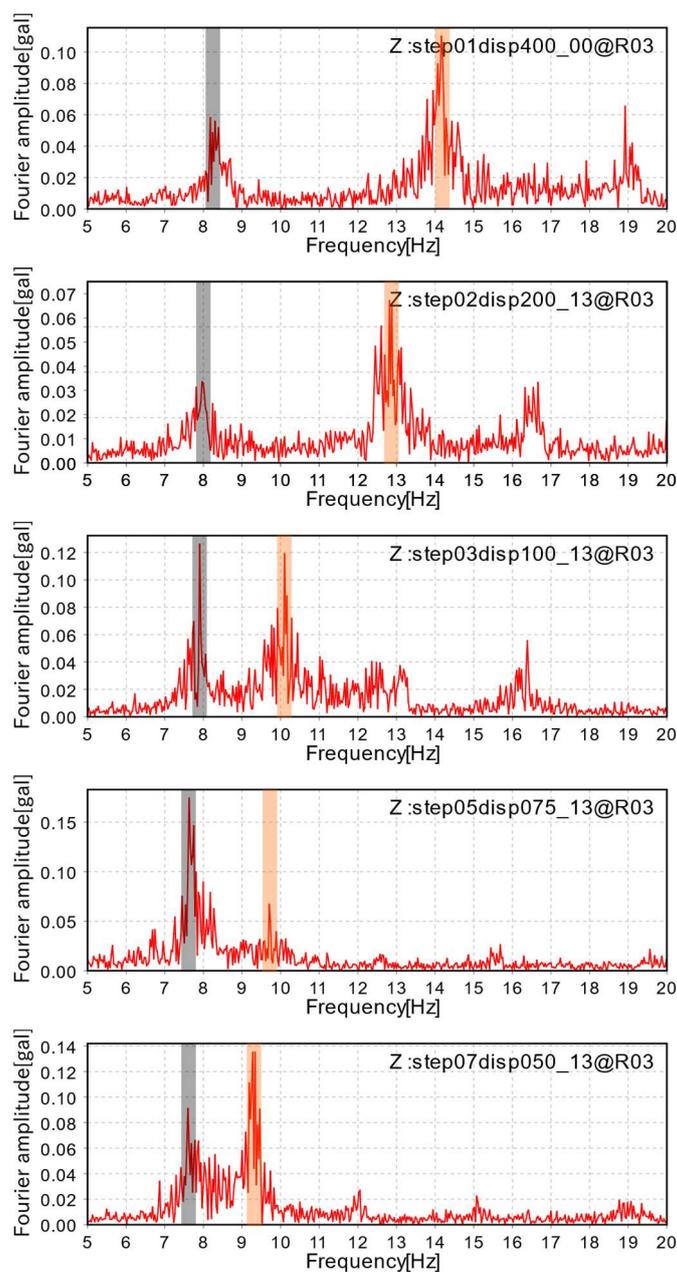


図 12-14 壁 A の上張りボード(R03) の面外方向振動のフーリエ振幅スペクトルの推移

以上のように、面外方向振動の卓越周波数の変化をモニタリングすることで、壁の損傷を検出できる可能性がある。ただし、現象を直接計測しているわけではなく、計測データも蓄積されていないため、どの程度どのような損傷が発生したかを特定することは現時点では困難である。

フーリエ振幅スペクトルの推移から損傷を検出する可能性の検討（実験②での検討）

実験②においても、同じ様に、Z 方向の微動計測の結果から算出される面外振動性状を、層間変形角の増大と比較することで、損傷を検出することについて検討する。

図 12-15 に、上張りボードに設置した S26 と RC 梁に設置した S20 から得られた面外方向のフーリエ振幅スペクトルの推移を示す。S26（上張りボード）は、実験開始時は 20Hz 周辺にピークがあるが、層間変形角 1/100 のセット後にはピークが 18Hz 周辺に推移し、その後も低周波数化する方向に推移する。下張りボードに設置した S27 やスタッドに設置した S29 からも同様の傾向が読み取れた。その一方で、S20（RC 梁）からは明確なピークを読みとることができない。そのため、S26（上張りボード）に見られたピークとその推移は、LGS 間仕切り壁に固有のものだと考えられる。なお、S26（上張りボード）に見られたピークとその推移は、下張りボードに設置した S27 と、スタッドに設置した S29 にも見られた。

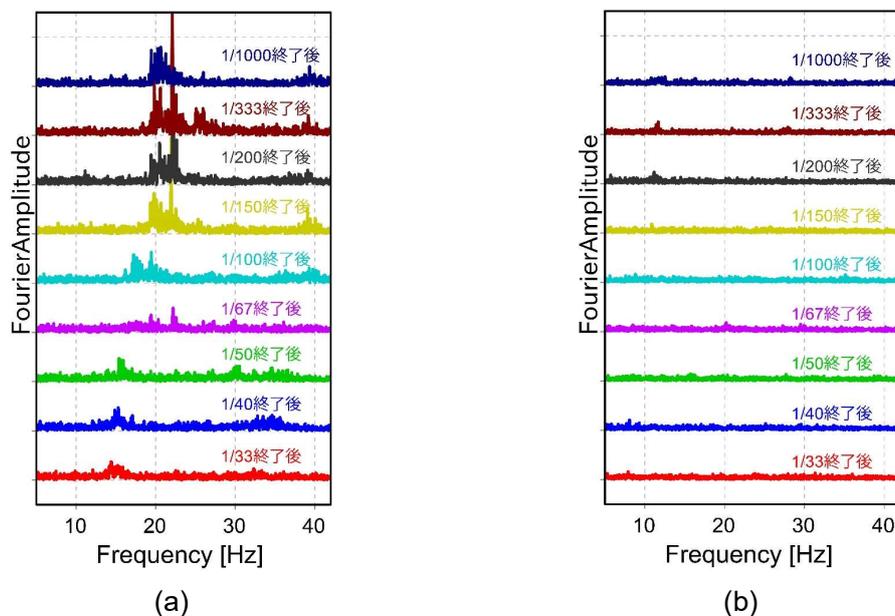


図 12-15 面外方向のフーリエ振幅スペクトルの推移; (a) S26（上張りボード）, (b) S20（RC 梁）

ALC 外壁の損傷に対する加速度センサを用いた診断方法の有用性の検討

精度の検証

実験②での計測結果を用いて、加速度センサの精度を検証する。

そもそも、加速度センサにより計測される回転角は、絶対的な回転角であるのに対して、変位計により計測される回転角は鉄骨梁との相対的な回転角である。ここで、損傷を検出する上で重要となるのは、鉄骨梁との相対的な挙動である。そのため、加速度センサの計測で議論をする際には、鉄骨梁の変形を考慮に入れる必要がある。図 12-16 に、層間変位を受けた鉄骨梁の変形のイメージを示す。図 12-16 には、加速度センサの位置と、変位計の位置も併せて示す。

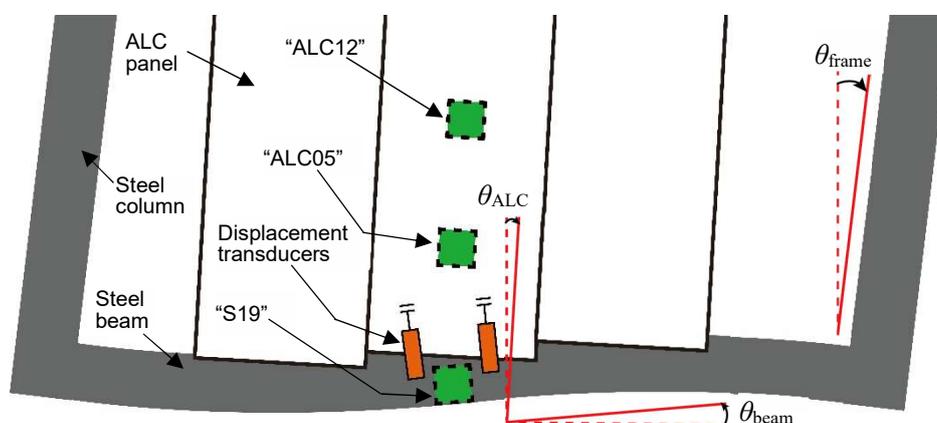


図 12-16 層間変位を受けた鉄骨梁の変形のイメージ

鉄骨梁の変形を考慮に入れるためには、変位計が設置された位置における、鉄骨梁の面内方向の回転角が分かっている必要がある。そこで、鉄骨梁に設置した加速度センサ (S19) の計測値を用いることにした。図 12-17 に、S19 により計測された、鉄骨梁の絶対的な面内方向の回転角を示す。鉄骨梁の面内方向の回転は、層間変位とは逆方向となっており、図 12-16 で示したイメージを整合している。

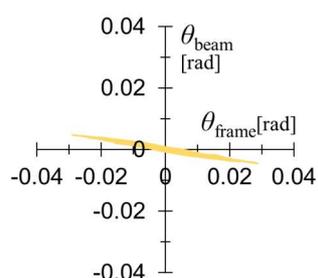


図 12-17 S19 により計測された鉄骨梁の絶対的な面内方向の回転角

壁 A に設置した ALC12 と鉄骨梁に設置した S19 の計測値を用いて、ALC パネルの鉄骨梁との相対的な回転角を算出した。図 12-18 に、算出した結果を示す。加速度センサで得られた結果と併せて、変位計により得られた結果も示している。縦軸は ALC パネルの面内方向の回転角の量 (θ_{ALC}) を、横軸は層間変形角 (θ_{frame}) を表す。緑色の実践が加速度センサにより得られた結果を、橙色の点線が変位計により得られた結果を表す。二つの結果は、概ね一致しており、加速度センサにより、ALC パネルの鉄骨梁との相対的な回転角を算出できることがわかった。

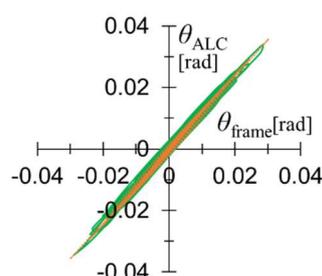


図 12-18 ALC パネルの鉄骨梁との相対的な回転角を算出した結果

図 12-19 には、壁 B に設置した ALC05 と鉄骨梁に設置した S19 の計測値を用いて、ALC パネルの鉄骨梁との相対的な回転角を算出した結果を示す。こちらも、二つの結果が概ね一致している。なお、ALC05 は、窓の下に位置する ALC パネルに設置した加速度センサである。窓の下に位置する ALC パネルは、鉄骨梁からだけではなく、開口補強鋼材からも変位計により回転角を計測していた。そこで、参考として、図 12-19 には、水色の点線で、開口補強鋼材に設置した変位計により得られた結果も示す。加速度センサや、鉄骨梁に設置した変位計により得られた結果と比較して、開口補強鋼材に設置した変位計により得られた結果は、より大きい値となった。この原因は、層間変位により、図 12-16 に示した鉄骨梁のように、開口補強鋼材も変形するが、鉄骨梁と比較して開口補強鋼材は短いため、その変形量がより大きくなるためだと考えられる。

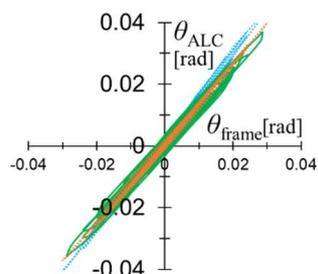


図 12-19 窓の下に位置する ALC パネルの鉄骨梁との相対的な回転角を算出した結果

回転角の計測による診断の有用性の検討

面内方向の回転角の計測から損傷を検出する可能性の検討

実験②では、セット3の層間変形角 $1/50\text{rad}$ の時に、壁Bにおいて、ALCパネルのひび割れ（表5-6中(7)など）が観察された。ALCパネルのひび割れは、耐震性を低下させる損傷であると同時に、通常の見視調査で容易に確認できない範囲にも発生した損傷である。そのため、見視調査に代わる診断方法の確立が求められている。

ALCパネルのひび割れの原因は、ALCパネルと開口補強鋼材の接触による面内方向の回転の拘束や、隣り合うALCパネルの回転の程度が異なったことだと考察された。そこで、ここでは壁Aと壁BのALCパネル（ALC01、ALC03、ALC04、ALC05、ALC11、ALC12）と、鉄骨柱（S17）の面内方向の回転角を比較することで、損傷を検出することについて検討する。

図12-20に、各センサの傾斜角履歴から得られた、面内方向の回転角について、各加力セットの終了時に残留した回転角（以降、面内方向の残留回転角）をプロットして示す³。図12-20では、ALCパネルの面内方向の残留回転角の最大値と最小値の差分を灰色で塗って示している。

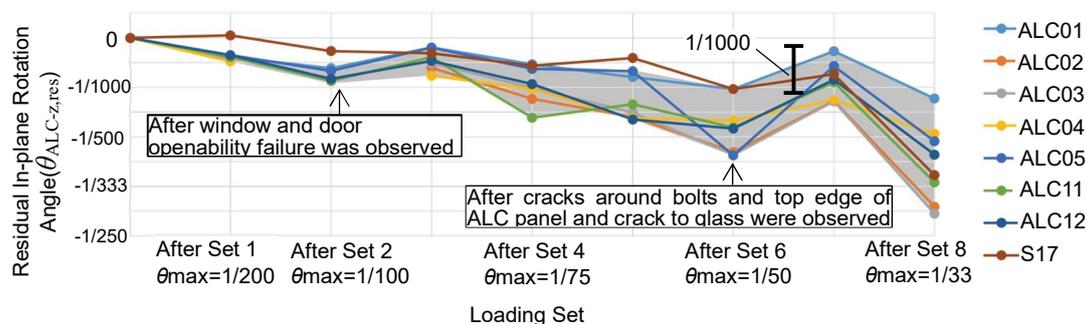


図 12-20 面内方向の残留回転角の推移

図12-20より、経験した層間変形角の増減に伴って、ALCパネルの面内方向の残留回転角と鉄骨骨組の残留変形角も増減することが読み取れる。すなわち、ALCパネルの面内方向の残留回転角の値は、最後に経験した層間変形角の値を反映していると言える。例えば、セット6後と比較して、セット7後の面内方向の残留回転角の値の小さく、この原因は、セット6の θ_{max} が $1/50\text{rad}$ なのに対して、セット7の θ_{max} が $1/75\text{rad}$ と小さいことだと推測される。

³ いくつかのプロットが抜けているが、これはセンサの誤作動により計測できなかった箇所である。

ただし、ALC パネルの面内方向の残留回転角の最大値と最小値の差分は、セット 6 とセット 7 で、大きくは変わらなかった。そして、実験②では、ALC パネルの面内方向の残留回転角の最大値と最小値の差分が $1/1000\text{rad}$ を超えたタイミングで、ALC パネルのひび割れなどの損傷が発生した結果となった。

図 12-21 に、セット 9 ($\theta_{\max}=1/33\text{rad}$) 後の ALC パネルの面内方向の残留回転角の程度を概略的に示す。この様子から、異なる挙動を示した ALC パネルや、ALC パネルと窓が干渉する位置で損傷が発生していることが読み取れる。

以上のように、複数の ALC パネルの面内方向の残留回転角を計測し、その最大値と最小値の差分の程度から、ALC パネルのひび割れなどの損傷を検出できる可能性がある。ただし、現象を直接計測しているわけではなく、計測データも蓄積されていないため、どの程度どのような損傷が発生したかを特定することは現時点では困難である。

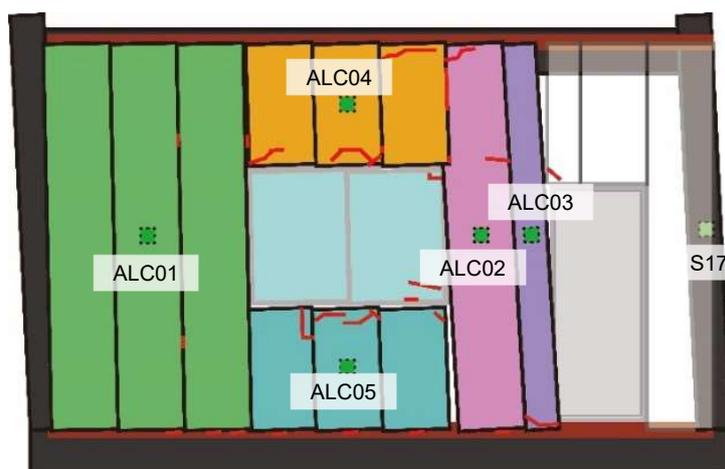


図 12-21 セット 9 ($\theta_{\max}=1/33\text{rad}$) 後の ALC パネルの面内方向の残留回転角の概略

面外方向の回転角の計測から損傷を検出する可能性の検討

ここでは、壁 A と壁 B の ALC パネル (ALC01、ALC03、ALC04、ALC05、ALC11、ALC12) の面外方向の回転角を比較することで、損傷を検出することについて検討する。

図 12-22 に、各センサの傾斜角履歴から得られた、面外方向の回転角について、各加力セットの終了時に残留した回転角（以降、面外方向の残留回転角）をプロットして示す⁴。図 12-22 では、ALC パネルの面外方向の残留回転角の最大値と最小値の差分を灰色で塗って示している。

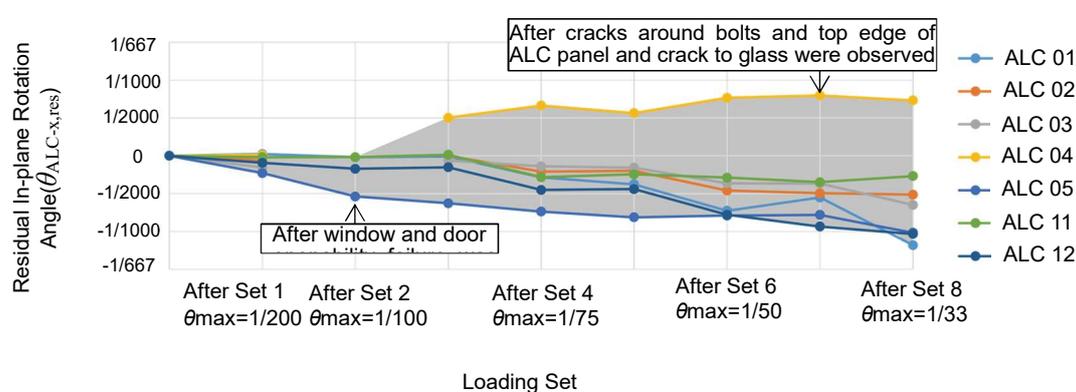


図 12-22 面外方向の残留回転角の推移

⁴ いくつかのプロットが抜けているが、これはセンサの誤作動により計測できなかった箇所である。

図 12-22 から、経験した層間変形角の増加に伴って、ALC パネルの面外方向の残留回転角も増加することが読み取れる。すなわち、ALC パネルの面外方向の残留回転角の値は、経験した最大の層間変形角の値を反映していると言える。ただし、ここ着目すべきは、ALC04 と ALC05 で計測された値が、正負が逆で、絶対値が他と比較して大きいことである。図 12-3 で示した通り、ALC04 は窓の上の ALC パネルに設置された加速度センサであり、ALC05 は窓の下の ALC パネルに設置された加速度センサである。すなわち、この結果は、窓が面外方向に押し出されるように変位していたことを示している。

実験②で行った目視観察では、この変位やこの変位に起因すると考えられる損傷は観察されなかった。ただし、実際の地震では、窓が脱落する損傷が観察されており [72]⁵、この窓の面外方向への傾斜は、その前兆と考えられる。そして、この微小な変化を加速度センサにより検出できることを示せた。

以上のように、窓の上下の ALC パネルの面外方向の残留回転角を計測することで、窓の落下の予兆を検出できる可能性がある。

⁵ 日本建築学会. (2018). 2016 熊本地震災害調査報告. 東京都: 日本建築学会.

面外振動性状の計測による診断の有用性の検討

層間変形角の増大に伴い、ALC パネルのひび割れなどの損傷が徐々に増大することが観察された。このことから、層間変形角の増大に伴い、ALC パネルと鉄骨骨組の接合部の剛性が低くなっていることが予想される。更にこのことから、層間変形角の増大と損傷の進展に伴い、ALC 外壁の振動性状が変化していくことが予想される。

そこで、ここではひび割れが観察された壁 B の ALC パネル (ALC04)、ひび割れが観察されなかった壁 A の ALC パネル (ALC11) と、鉄骨柱 (S17) の Z 方向の微動計測の結果から算出される面外振動性状を、層間変形角の増大と比較することで、損傷を検出することについて検討する。

図 12-23 に、壁 B の ALC パネル (ALC04)、ひび割れが観察されなかった壁 A の ALC パネル (ALC11) と、鉄骨柱 (S17) の面外方向振動のフーリエ振幅スペクトルの推移を示す。これは、セット 1、3、4、5、6、7、8 後の静止状態における面外方向の加速度振動記録 (4096/125=33 秒間) から計算したフーリエ振幅スペクトルの推移を示している。

表れたピークのうち最も低周波(長周期)であるのは 7.0Hz 程度のものであるが、これは鉄骨骨組上の加速度計も含め、すべての加速度計で観測されたピークであり、鉄骨骨組を含む試験体全体が構面外方向にこの周波数で振動していることを示している。一方、載荷開始前のスペクトルで 9Hz と 11Hz 程度に表れているピークは、壁 B と壁 A (R04 および R11) の面外変形方向の計測結果のみに表れており、ALC 外壁特有の振動性状を表すものであると考えられる。しかし、このピークは、損傷の観察の有無に関わらず現れており、載荷の進展とともに低周波数側に移行していない。

以上より、ALC 外壁では、層間変形角の増大と損傷の進展に伴い、振動性状に変化が見られなかったという結果となった。この結果は、LGS 間仕切り壁では層間変形角の増大と損傷の進展に伴い、振動性状に変化が見られたことと異なる。

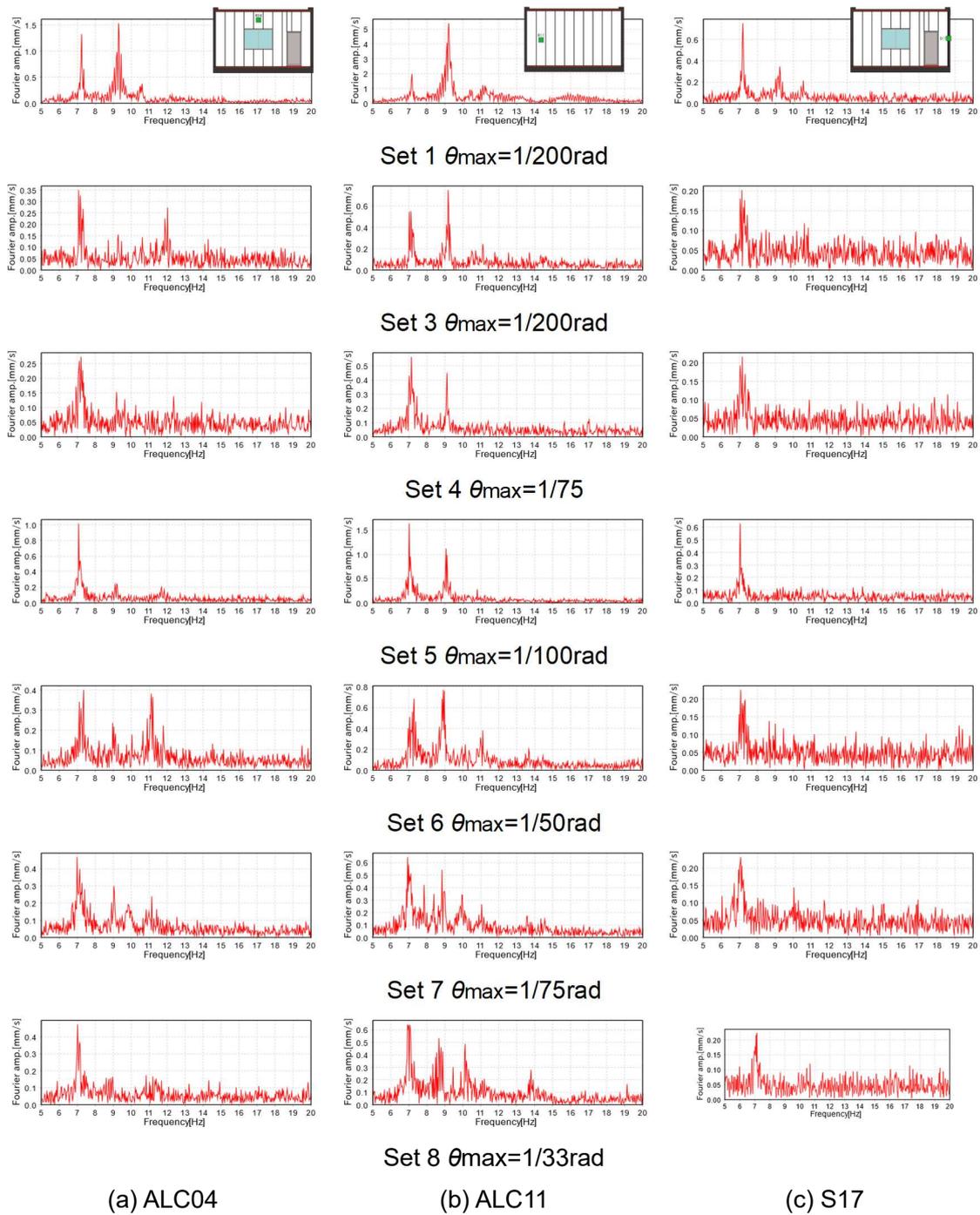


図 12-23 面外方向のフーリエ振幅スペクトルの推移; (a) ALC04 (壁 B), (b) ALC11 (壁) A, (c) S17 (鉄骨骨組)

 ドアの損傷に対する加速度センサを用いた診断方法の有用性の検討

回転角の計測による診断の有用性の検討

実験③では、層間変形角 $1/200\text{rad}$ の時に開閉機能の低下が確認された。そして、除荷時に関しては、層間変形角 $1/50\text{rad}$ を経験後に開閉機能の低下が確認された。開閉機能の低下は、人的被害に関わりうる上張りボードの脱落に繋がる損傷と考えられる。そのため、遠隔から損傷を検出できる診断方法の確立が求められている。

開閉機能の低下の原因は、層間変位に応じた扉の面内方向の回転に伴う、デッドボルトとストライクの干渉や、扉と三方枠や地面との接触と考察された。図 12-24 に、ドアの開閉機能の低下の原因をイメージ化したものを示す。図 12-24 に示したように、载荷方向によって、原因が異なると考えられる。そこで、ここでは扉 (S22) の面内方向の回転角と層間変形角とを比較することで、損傷を検出することについて検討する。

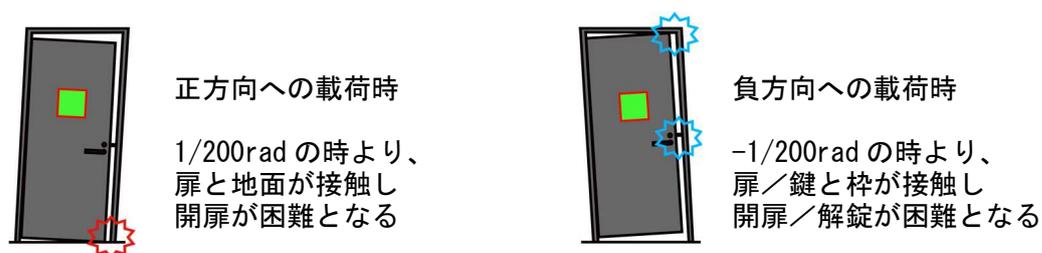


図 12-24 ドアの開閉機能の低下の原因のイメージ

図 12-25 に、扉の面内方向の回転角と層間変形角を示す。正方向と正方向共に、載荷時には、扉の面内方向の回転角が、層間変形角より小さくなる傾向が読み取れる。つまり、扉が層間変位に追従していないことが読み取れる。すなわち、加速度センサにより、デッドボルトとストライクの干渉や、扉と三方枠や地面との接触を検出できることが示唆される。

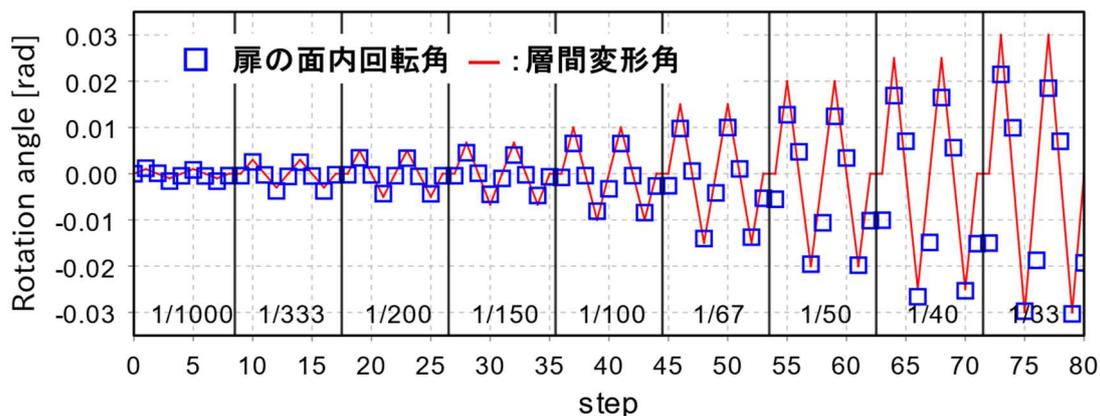


図 12-25 扉の面内方向の回転角と層間変形角

なお、負方向に層間変形角 $1/40\text{rad}$ を与えた 2 回目の際には、扉の面内方向の回転角が、層間変形角と同じ程度になる傾向が読み取れる。その後、負方向に層間変形角 $1/33\text{rad}$ を与えた際も、同じことが読み取れる。つまり、負方向に層間変形角 $1/40\text{rad}$ を与えた 2 回目以降は、扉が層間変位に追従していることが読み取れる。すなわち、デッドボルトとストライクの干渉や、扉と三方枠の干渉の影響が小さくなったことが示唆される。この原因としては、層間変形角 $1/40\text{rad}$ の時に観察された、三方枠の接合部の破断 (表 5-11 中(6)など) や錠部分の変形 (表 5-11 中(7)など) だと考えられる。

以上のように、扉の面内方向の回転角と層間変形角を計測することで、開閉機能の低下や、ドアの部材の損傷を検出できる可能性がある。

付録13. 追加で実施した実大実験の概要

実験①②③の結果を踏まえ、新たに実験⑤を実施した。

実験の名称

実験⑤ LGS 間仕切り壁とドアの層間変位と慣性力に対する損傷確認実験

実験の目的

実験⑤では、鉄骨骨組に LGS 間仕切り壁とドアを設置した試験体に、静的及び動的¹⁾に加力することで、損傷と層間変位と慣性力の対応関係を明らかにすることを目的とする。

実験①と③との関係性

内外装壁の接合形態と、損傷に影響を及ぼす外力の種類との関係に関する考え方を 3.1.1. 節で紹介した。この考え方によると、LGS 間仕切り壁の損傷は、面内方向の層間変位と面外方向の慣性力に大きく影響される。そこで、実験①や実験③では、面内方向の層間変位に対する LGS 間仕切り壁の損傷を整理することを目的とした。

その結果、5 章で説明した通り、実験①や実験③では、上張りボードと下張りボードの接着が一部剥がれ、上張りボードが面外方向に倒れこむように変位する損傷が観察された。図 13-1 に、この損傷のイメージを示す。本来、上張りボードは面的に下張りボードに接合される形態であったのに対して、面外方向に変位した上張りボードは、ほぼ 1 点で下張りボードに接合される形態に変わったと捉えることができる。つまり、影響を及ぼす外力の種類も、面内方向の層間変位から、面内方向／面外方向の慣性力になると考えられる。

そこで、実験⑤では、損傷が発生した状態（特に上張りボードが面外方向に変位した状態）の LGS 間仕切り壁の損傷の発生と進展に、慣性力が与える影響について把握することに特に着目する。

¹⁾ 実験⑤では、オイルジャッキとワイヤーにより静的な加力を行うことで変形させた試験体に対して、外力を瞬間的に無くすことで構造部材を自由振動させ、これにより内外装材に慣性力を与える。

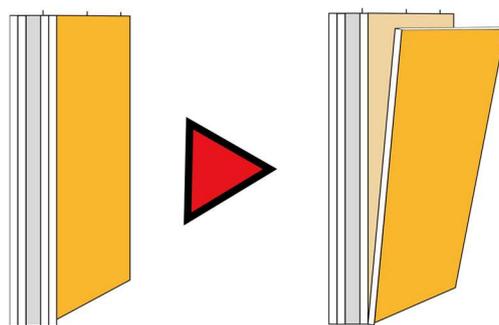


図 4-21 上張りボードの面外方向への傾斜のイメージ

試験体

3章の議論を踏まえ、LGS 間仕切り壁の形状は、無開口の平坦な壁と開口部を有する壁とする。これらの形状を取る LGS 間仕切り壁を鉄骨骨組に設置し、試験体とした。開口部を有する壁にはドアを設置した。以下では LGS 間仕切り壁とドアの部分を中心に概要を説明する。

鉄骨骨組は、階高の高い鉄骨造建物の一部分をイメージして設計されている。階高 4100mm、長辺 63500mm、短辺 4350mm のラーメン骨組であり、上下の梁にはいずれもコンクリートスラブが設置されている。

この鉄骨骨組に計 2 面（それぞれ壁 A、壁 B と称す）の LGS 間仕切り壁を設けた。鉄骨骨組の北側構面には全面無開口の平坦な壁（壁 A）を、南側構面には開口部を有する壁（壁 B）を配置した。また、いずれの壁も、その両端はコーナー部による収まりとなっている。また、いずれの壁も試験体内側が LGS 間仕切り壁の仕上げ側、試験体外側が下地側となるように配置した。図 13-2 に平面図を、図 13-3 に北側の立面図（仕上げ側）を、図 13-4 に来た側の立面図（下地側）を、図 13-5 に東側の立面図（仕上げ側）を、図 13-6 に東側の立面図（下地側）を示す。そして、写真 13-1 に、南西方向からの試験体外観を示し、写真 13-2 に、試験体内観を示す。

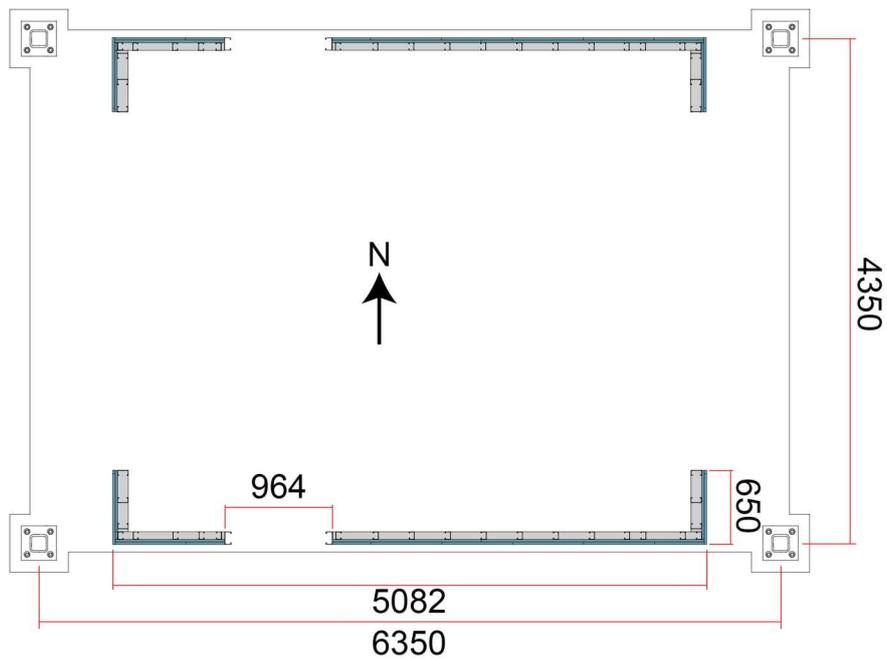


図 13-2 平面図 (単位 : mm)

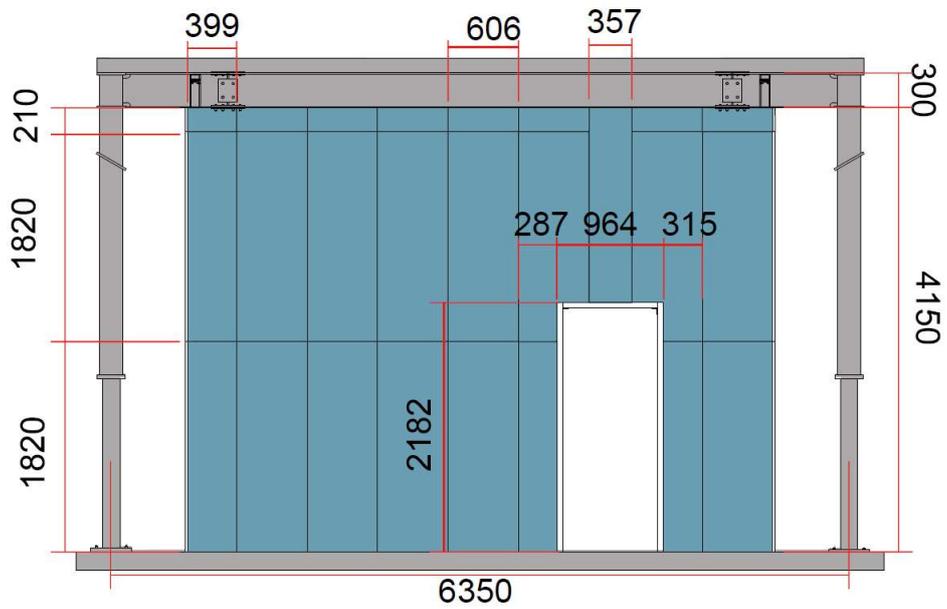


図 13-3 北側の立面図 (仕上げ側)

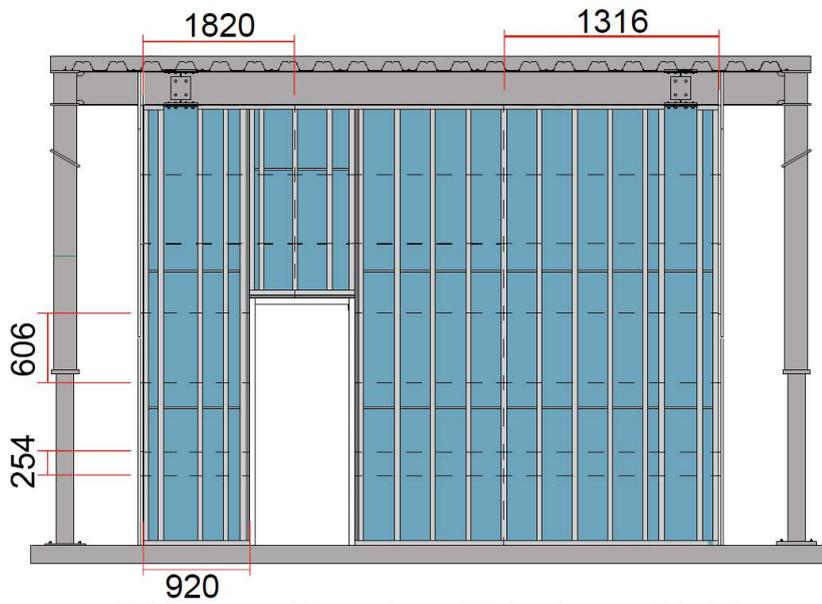


図 13-4 北側の立面図（下地側）

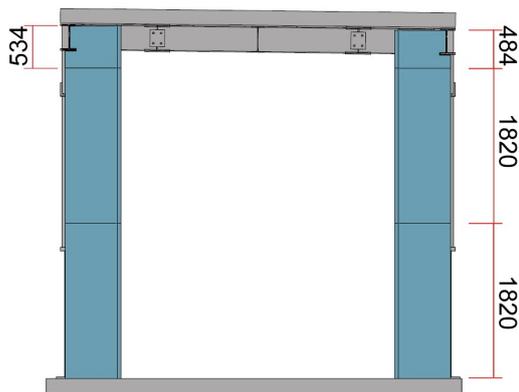


図 13-5 東側の立面図（仕上げ側）

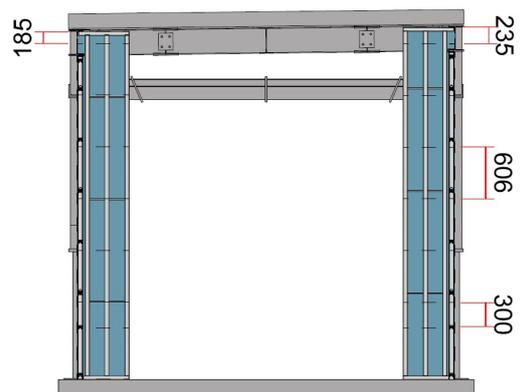


図 13-6 東側の立面図（下地側）



写真 13-1 北西方向からの試験体外観



写真 13-2 試験体内観

試験体の仕様について

LGS 間仕切り壁の仕様は、一般的に実建物に用いられるものに準じている。上下のランナーの間にはスタッドを 303mm 間隔で配置し、この下地の外部の面に厚さ 21mm の強化石膏ボードを片面 2 枚張り（下張りは横張、上張りは縦張とした）²、耐火仕様としている。梁や下側のスラブなど上張りボードの周囲の取り合い部分にシーリング材を充填し、特に鉄骨骨組との間には 5mm の隙間を設け充填した。上張りボードは全て、ファイバーテープとパテによる目地処理を行い、全体を塗装している。

ドア（鋼製、高さ 2100mm×幅 900mm）は、LGS 間仕切り壁の下地であるランナーに固定された開口補強鋼材に三方枠を取り付け、三方枠にヒンジとドアクローザーを介して取り付ける。また、ドアにはサムターンによる鍵とハンドルを設置する。

² 3 章の議論を踏まえ、下地側の損傷を観察できるように石膏ボードは片面張りとした。

加力方法

骨組の内部には加力用の小梁が設置されている。地面からこの小梁をオイルジャッキとワイヤーで引っ張ることで、東西方向に静的に加力する。図 13-7 に、加力方法のイメージを示す。動的な加力を行う場合は、ワイヤーを引っ張った状態で、ワイヤーを切ることで瞬間的に外力を無くすことで構造部材を自由振動させる。

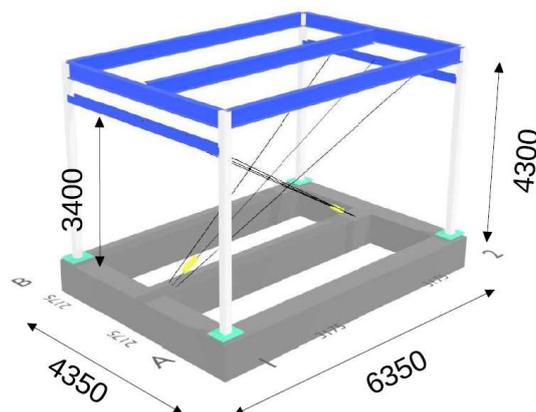


図 13-6 加力方法のイメージ

実験⑤では、静的な加力と動的な加力を組み合わせた加力の計画とした。表 13-1 に加力の計画を示す。設定した θ_{\max} に対して正負方向に加力時、除荷するまでを 1 セットと定義する。各セットの θ_{\max} は層間変形角 1/1000、1/400、1/200、1/100、1/50、1/33rad とし、1/200rad のセット以降はそれぞれ 3 回ずつ行う。1 回目と 2 回目のセットでは静的な加力のみを行い、3 回目のセットでは動的な加力とする。なお、上部のスラブが西側に移動する方向を正、東側に移動する方向を負とした。

表 13-1 加力計画

セット	各セットの θ max
1	1/1000
2	1/400
3	1/200 1 回目
4	1/200 2 回目
5	1/200 3 回目 (動的な加力)
6	1/100 1 回目
7	1/100 2 回目
8	1/100 3 回目 (動的な加力)
9	1/75 1 回目
10	1/75 2 回目
11	1/75 3 回目 (動的な加力)
12	1/50 1 回目
13	1/50 2 回目
14	1/50 3 回目 (動的な加力)
15	1/33 1 回目
16	1/33 2 回目
17	1/33 3 回目 (動的加力)

観察計画

目視観察を各加力セット当たり 4 回行い、損傷のスケッチと写真撮影を行った。各加力セット内における観察のタイミングはピーク変形時と、負側のピーク変形時から除荷して水平荷重がゼロとなった時点 (以後、除荷時) とした。また、目視観察のタイミングでドアの開閉機能を把握するための確認も行った。確認の手順は実験③と同じであるため、ここでの説明は省略する。

実施状況

実験⑤は東京大学柏キャンパス (千葉県柏市柏の葉 5-1-5) の屋外フィールドにて、2022 年の 9 月 26 日から 12 月 2 日にかけて行われた (試験体の施工は 2022 年の 1 月 17 日から 11 月 22 日にかけて行われた)。実験⑤は、東京大学の伊山潤研究室、山田哲研究室 (鉄骨骨組の挙動計測が主な目的) らとの合同で行われた実験である。

付録14. 実大実験の詳細図面

実験①②③④の試験体の詳細な図面を掲載する。

実験①について

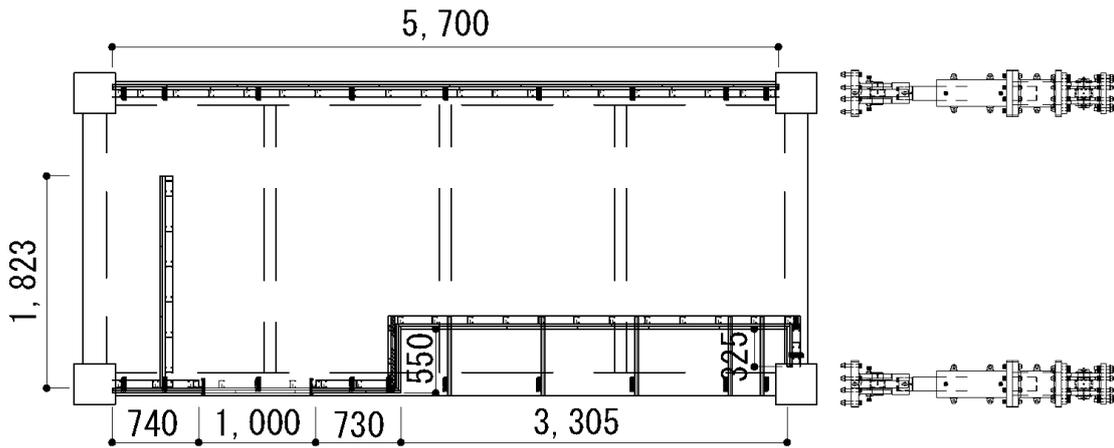


図 14-1 実験①試験体 平面図

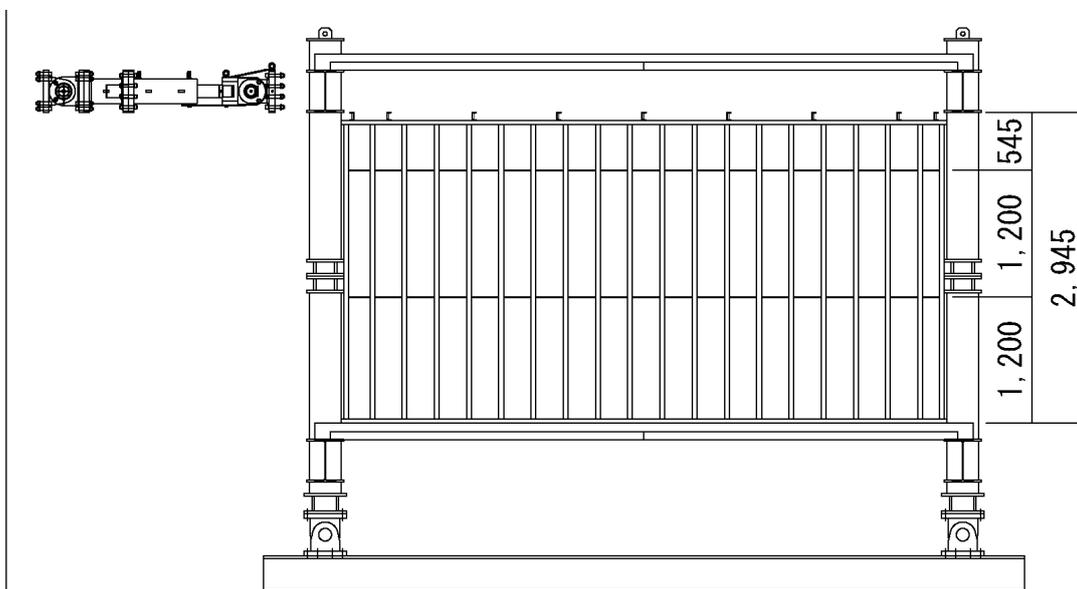


図 14-2 実験①試験体 無開口の平坦壁 立面図

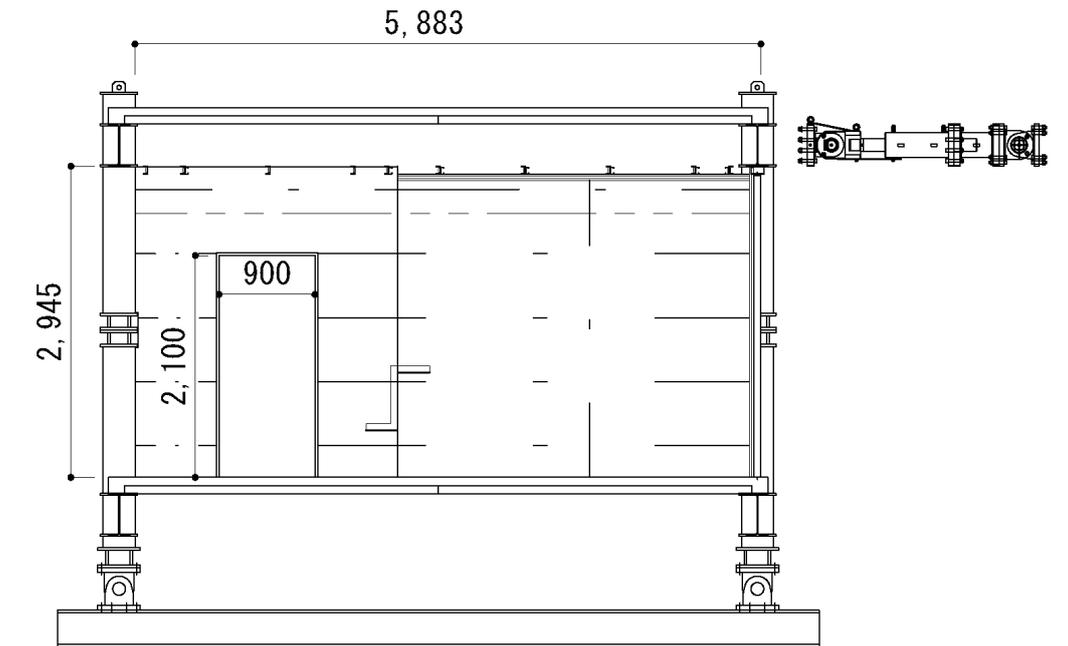


図 14-3 実験①試験体 開口部を有する壁と梁から持ち出した壁 立面図

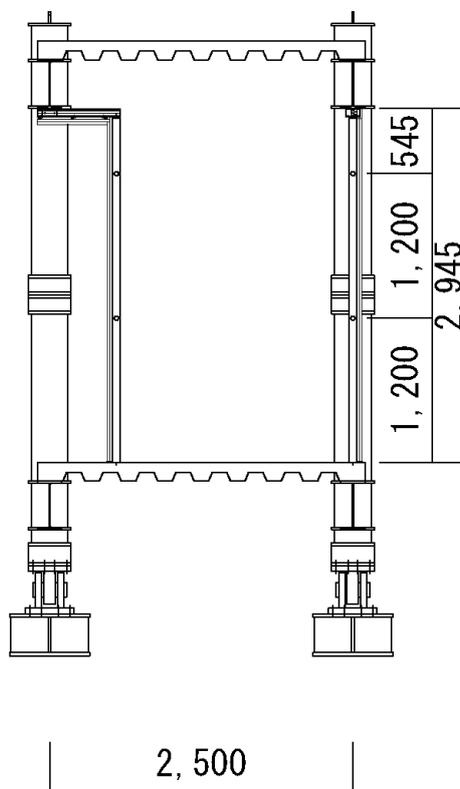


図 14-4 実験①試験体 短辺側 立面図

実験②について

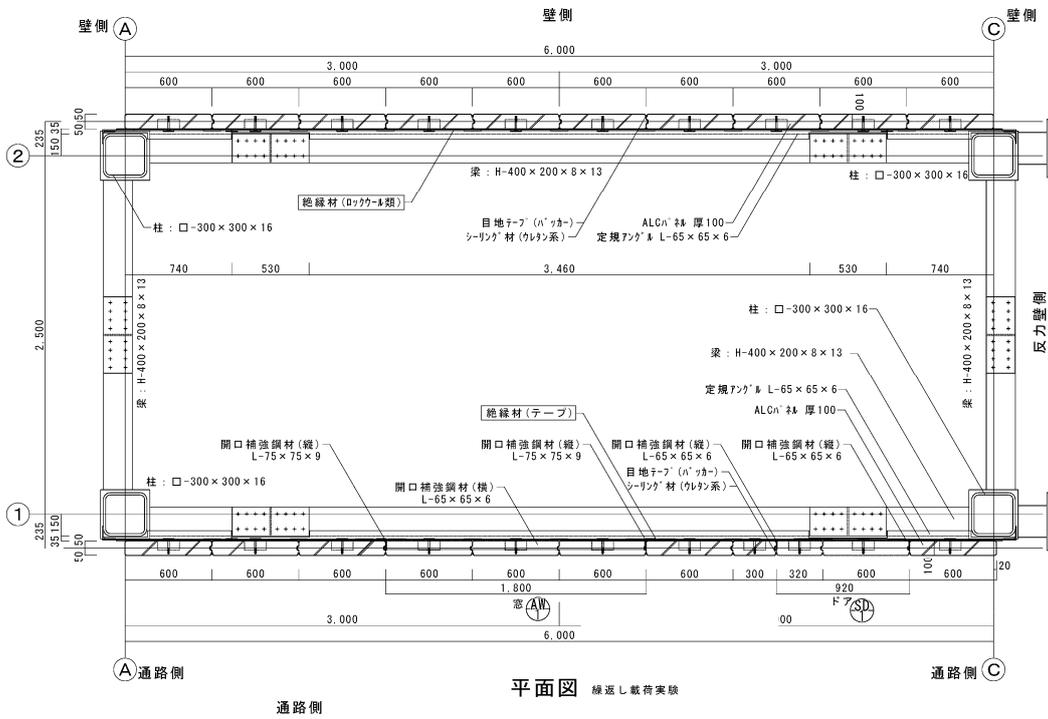


図 14-5 実験②試験体 平面図

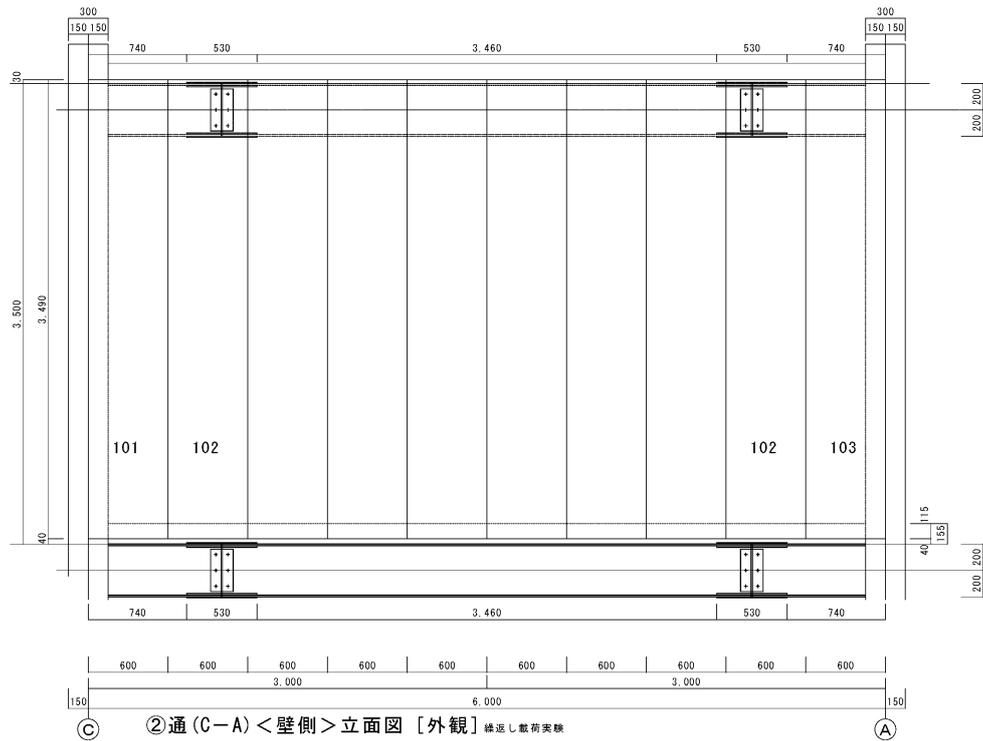


図 14-6 実験②試験体 無開口の平坦壁 立面図

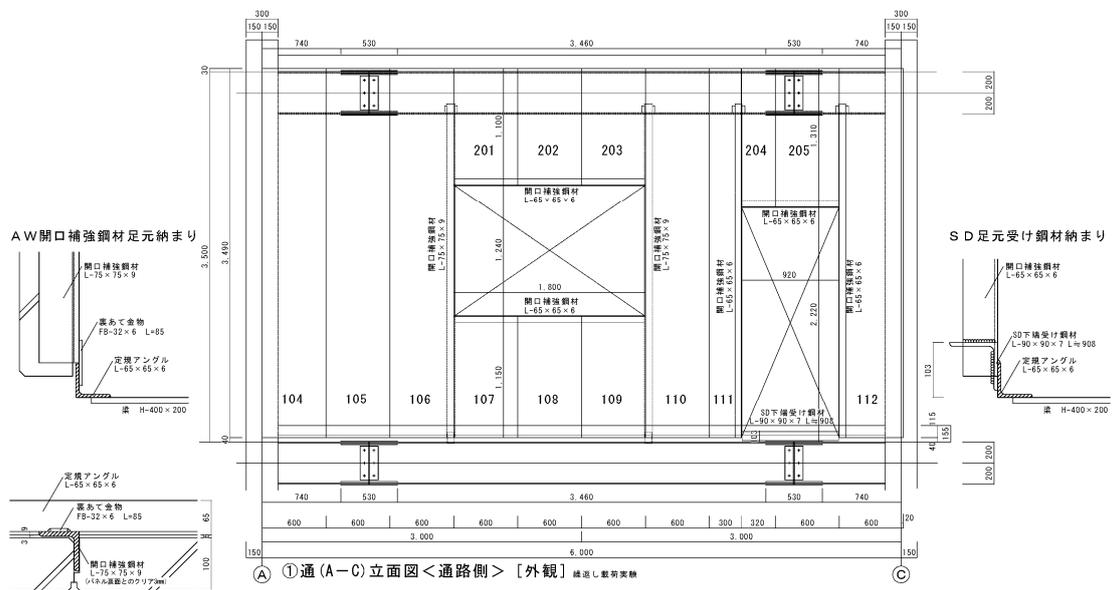
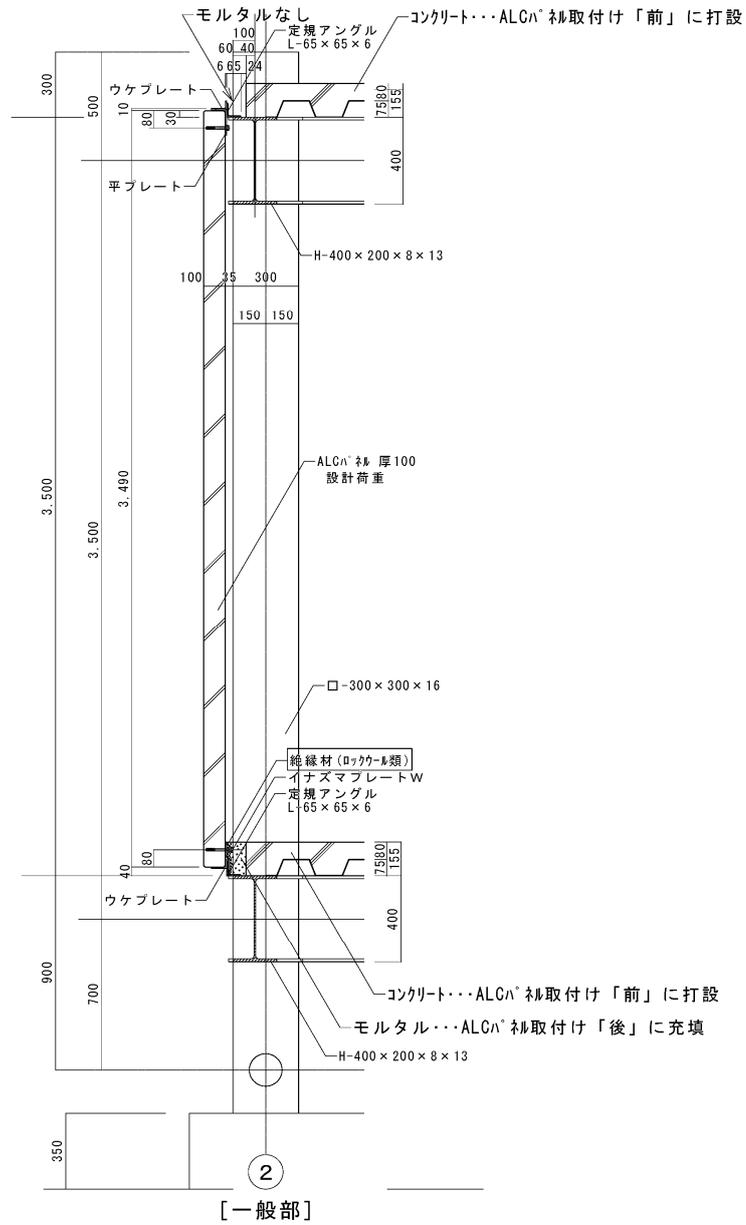
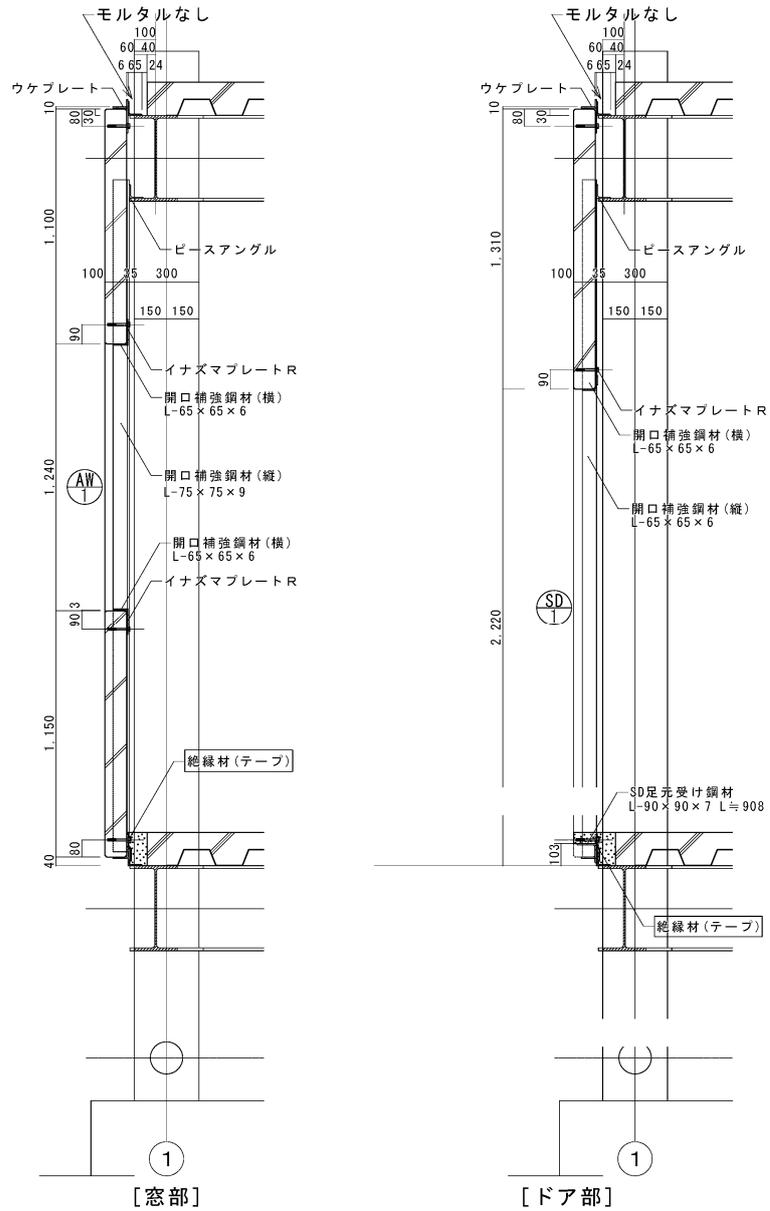


図 14-7 実験②試験体 開口部を有する壁 立面図



断面図 繰返し載荷実験

図 14-8 実験②試験体 一般部 断面図



断面図 繰返し載荷実験

図 14-9 実験②試験体 開口部 断面図

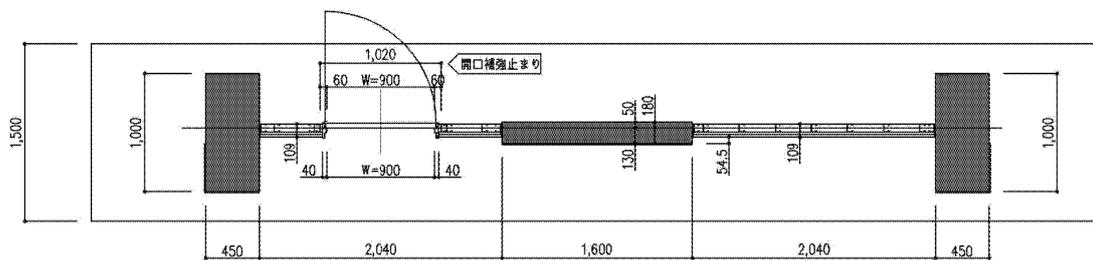


図 14-12 実験③試験体 断面図

謝辞

本論文を執筆するにあたって、多くの方の助けをお借りしました。
この場を借りて感謝申し上げます。

指導教員の清家剛先生には、学部生の頃から面倒を見ていただき、研究について悩んでいる私に、様々なアドバイスをしてくださいました。清家先生の一言によって道筋が見えることが沢山ありました。卒論提出間際に骨折するなど研究室に迷惑をかけてばかりいた私に、先生はいつも冷静かつ的確な指示を出して頂き、数えきれないほど助けていただきました。

そして、博士論文に限らず、研究者としての在り方についても清家先生から多くのことを学ばせていただきました。

ご期待に沿えるようこれからも邁進いたします。これまでおかけしたご迷惑そしてこれからおかけするご迷惑の合計以上の恩返しができるよう、精進いたします。

本当にありがとうございました。

元清家研究室研究員の金容善先生には、私が学部生の頃から多岐にわたってサポートしていただき、私のために多くの時間を割いていただきました。

構法系研究室の松村秀一先生、藤田香織先生、佐藤淳先生、権藤智之先生、福島佳浩先生（当時）には、合同ミーティングで多くのアドバイスを頂きました。

鋼構造研究室の山田哲先生、伊山潤先生には、実験の遂行や査読付論文の作成の中で、構造分野からの視点から様々なことを教えていただきました。

東京工業大学の吉敷祥一先生、西村康史郎先生、石田孝徳先生（当時）、巽信彦先生（当時）、上瀧敬太さん（当時）、櫻田頌吾さん（当時）、磯田充樹さん（当時）、東京大学の楠浩一先生、Trevor Yeow さん、福田知広さん（当時）、宮崎祥太さん（当時）、渡瀬慎之輔さん、欧治均さん、原甲己さん（当時）、広島大学の大久保孝昭先生、寺本篤史先生、東京都市大学の中村いずみ先生、東北大学の前田匡樹先生、Alex Shegay さん（当時）には、実験の遂行や査読付論文の作成などに際して大変お世話になりました。

環境システム学専攻の大島義人先生には、WINGS-PES の副指導をお引き受けいただき、私の研究の可能性について多くの助言をしてくださいました。

社会文化環境学専攻の先生方には、中間発表などで新しい視点からのご指摘や、おやつの差し入れをいただきました。5年間お世話になりました。

武蔵野大学の磯部孝之先生には、私のことをいつも気にしてくださり、研究者、研究室、そして高校の先輩として、多くのことを学ばせていただきました。

間仕切り研究会の荻原健二様、大内渉様、本田信一様、板ガラス協会の久田隆司様、窓メーカーの小林健二様、ALC 協会の宮内享様、三浦謙二様、ドアメーカーの佐藤高行様をはじめとした企業の方々には、業務の合間を縫って、実験の実施に際して多大なるご協力を頂ただ来ました。また、知識不足の私に天井、間仕切り壁、ALC 外壁、窓、ドアについて一から丁寧に説明していただきました。

研究室の先輩の竹村由紀さん、志村真人さん、関野夏菜さん、河合竜希さん、川崎光亮さん、藤村悠平さん、魚見佑香さん、陳義龍さん、趙雨さん、馬凌翔さん、保坂勇介さん、平山雄太さん、同期の都築滯さん、網中聡子さん、本田圭さん、高柳佳織さん、廖沁凌さん、市川晃子さん、和田亮佑さん、後輩の水野貴斗さん、熊野圭吾さん、渡邊千加さん、芝村朋宏さん、中川椋太郎さん、吉田早希さん、武卿さん、松井大岳さん、小幡嶺介さん、小川由希子さん、梅國真さん、岸名遼平さん、高野改さん、于沐さん、中馬百合子さん、寺田響さん、俵健太郎さん、劉倩君さん、高田大斗さん、原田惇史さん、長留晶さんには、意見交換を通じて色々学ばせていただきました。皆様のおかげで、実りある楽しい学生生活を過ごすことができました。

構法系研究室同期の宮本健太さん、佐伯渉さんには、熱い中寒い中実験を手伝ってもらいました。構法系研究室同期の皆様のおかげで大変楽しい研究生活を送ることができました。

博士課程仲間の谷繁玲央さん、安宅康徳さん、両川厚樹さんには、楽しいときは分かち合い、辛いときは励まし合ってきました。皆様のおかげでめげずにここまで頑張れました。

WINGS-PES には、研究生活を送るにあたり様々な面でサポートいただきました。教員の先生方、事務局の皆様のおかげで実りある研究になりました。

WINGS-PES 同期の Calvin Duong さん、森崎汰雄さん、須藤竜大朗さん、安澤葉介には、1期生として時には協力し合い、顔が見えない時も互いを意思することで励めました。

WINGS-PES センシング勉強会コアメンバーの村松駿さん、三上航平さん、伊東眞琴さん、田嶋智さん、峯松涼さんには、私のわがままに長年付き合ってもらいました。皆さんのおかげで楽しみながら他分野について学ぶことができました。

最後に、学生生活を支えてくれた家族に感謝します。

無事、博士課程での研究を形にすることができました。本当にありがとうございました

令和5年2月1日

八木尚太郎

