

12

実践研究報告 No.1821

ネパールの石積み組積造住宅の 地震被害低減に向けて

実践研究テーマ：蛇籠を用いた耐震補強技術の開発研究

12

実践研究報告No.1821

蛇籠を用いた耐震補強技術の開発研究

—ノンエンジニアド住宅の耐震性向上(人的被害低減)方策—

ものづくり大学 教授/今井 弘

設楽 知弘、Teddy Boen、Hari Ram Parajuli

2015年のネパール地震では住宅の被害が甚大であった。被害の大半は山間部の石積み組積造住宅であり全体の8割を超えた。震災から4年が経過し、現地では耐震工法の復興住宅の再建事業が進んでいるものの課題も浮き彫りになってきた。山間部ではアクセスも悪くセメントなどの建設資材の搬入が困難な地域が多く、耐震性不適合の新築住宅や既存住宅が多く見られる。これらの住宅に対して耐震補強工法の技術開発が喫緊の課題である。

本研究では、現地で入手可能な材料によるローコストな耐震補強工法として蛇籠を用いたジャケッティング工法の開発研究、また構造解析手法の検討を行い、今後の普及に向けて耐震補強技術の構築を行った。



図3-6 振動台実験 実験結果

1. はじめに

本実践研究は、国立研究開発法人防災科学技術研究所、国立大学法人千葉大学、株式会社毛利建築設計事務所（後に学校法人ものつくり大学）との共同研究「ネパール（途上国）における石造組積造のノンエンジニアド住宅の耐震性向上（人的被害軽減）に向けた蛇籠を用いた耐震補強工法の開発研究」の一環として行われた。本実践研究の助成により主要部分である蛇籠を用いた耐震補強技術の開発研究および構造解析手法の考察の部分を行っている。その他、振動台実験のための泥モルタルのモックアップや試験体の制作、そして実験の運転は防災科学技術研究所の自己資金やクラウドファンディング、ワイヤーの引張要素実験は千葉大学の資金により実施された。



組積妻壁の被害



組積壁内部の剥離

図1-1 組積造の被害事例

1.1.ネパール地震の建物被害

2015年4月25日11時56分（現地時間）、ネパールゴルカ郡を震源域とするマグニチュード(Mw)7.8の地震が発生し、また5月12日にはシンドパルチョーク郡でMw7.3の最大余震により、ネパールでは広範囲におよぶ全71郡のうち31郡が甚大な被害を受けた。震災直後のネパール政府発表の構造別住宅被害状況を表1-1に示す。

表1-1 構造別住宅被害状況(戸数)2015年5月

被害状況	泥モルタル組積造	セメントモルタル組積造	RC造	計
全壊	474,025	18,214	6,613	498,852
半壊	173,867	65,859	16,971	256,697
計	647,892	84,073	23,584	755,549

被害が甚大になる一因として、無補強組積造の脆弱な構造体が挙げられる。表1-1に示すように、建設工法として組積部材に関わらずマッドモルタルを使用した建物の被害が顕著である。この工法は、都市部では築30年以上の建物、山間部では庶民住宅建設に現在も一般的に使用されている。これらの大半は、地域の職人あるいは住民自身によって建設された技術者が関与していないノンエンジニアド建築である。

1.2 被害事例の考察

今回の地震で甚大な被害を被った建物は、組積部材こそ、石、焼成レンガ、アドベ等さまざまであるが、目地に泥モルタルを使用しているものが大半である。

一般的な建物の破壊パターンである建物の低層部分がせん断破壊を起こすケースは稀で、図1-1に示すように多くの被害事例は壁上部の面外破壊、または組積壁が一体性を失うことによる崩壊である。原因として、泥モルタルが非常に低強度であり、特に付着強度が低いため、建物の振動時に部材間の付着がなくなり、脆性破壊を起こす起因になっていると考えられる。

現地での引張強度試験方法と結果を図1-2、表1-2に示す。これまで実施したセメントモルタルと焼成レンガの引張実験での結果の平均値0.65N/mm²と比較して、約12%の強度であった。



簡易引張試験機



試験体

図1-2 引張強度試験(泥モルタル-石材)

表1-2引張強度試験結果

試験体	最大強度(N)	面積(mm ²)	引張強度(N/mm ²)
1	238.00	2619.90	0.0908
2	252.00	3437.71	0.0733
Ave.			0.0821

1.3 政府の住宅再建支援

住宅再建補助金は、復興庁(NRA)より発行された「Distribution Guideline for Completely Destroyed Private Houses by Earthquake, 2072(2015)」に規定された。地震により住宅が被害を受けた世帯が住宅を再建（新築）するための支援として、一世帯当たりNPR300,000の補助金を支給する。補助金の内訳は、①再建合意書（Participation Agreement）署名後NPR50,000、②Plinth Band施工後NPR150,000、③壁工事完了後NPR100,000の3段階に分け支給される。また被災住宅を再建せず既存住宅の補強工事(Retrofitting)のみを実施する場合は、NRP100,000の支給となる。

1.3.1 安全な住宅再建に向けた技術支援

途上国での地震被害が甚大になる原因をよく表している言葉がある。「It is not earthquake that kills, it is not even the buildings that kill, it is the poorly constructed buildings that kill.(人々が犠牲になったのは、地震のためではなく、建物によるでもなく、建物の脆弱性によってである。)」ネパール地震の復興支援において、災害に強靱な社会の形成を目指し“Build Back Better”(BBB)の方針が掲げられている。この目標に向けて、ネパール建築基準法の耐震基準(NBC105)に準ずる耐震性能を構造計算等で確認することが義務付けされた。

1.3.2 復興住宅カタログ

2015年11月に復興住宅カタログ第1巻が公表された。

復興住宅カタログには、NBCに準拠した組積造（石、レンガ）+目地（セメント、泥）17タイプが掲載された。住民は、この住宅カタログから住宅タイプを選ぶことにより、耐震性を考慮した住宅設計を入手でき、建築許認可制度を簡易化することができる。

1.3.3 ミニマムリクワイヤメント (MR)

ミニマムリクワイヤメントは、住宅を自由設計する際の守るべき最低基準として

1. 敷地条件, 2. 建物形状, 3. 材料, 4. 基礎,
 5. 垂直 方向補強部材, 6. 1F床部分梁, 7. 壁,
 8. 開口部, 9. 水平方向補強部材, 10. 屋根
- の10項目から構成される。これら10項目の守るべき最低基準は、住民に建築基準をわかりやすく伝えることを目的として作成されている。

1.4 耐震補強の必要性

震災から4年が経過し、現地では耐震工法の復興住宅の再建事業が進んでいるものの課題も浮き彫りになってきた。表1-1に示す住宅被害総数755,549のうち、2016年1月から5月に実施された中央統計局による世帯・家屋被害調査によると、5段階の被害グレードの内、グレード3 (Substantial to Heavy Damage), グレード4 (Very Heavy Damage) 及びグレード5 (Destruction) の家屋が563,696戸となっている。グレード3の一部の被害がひどいものが全壊とみなし、全壊家屋は498,852戸、半壊家屋は256,697戸となる。

この未曾有の災害に対して、政府の住宅再建制度は、上記の約50万戸の全壊家屋の新築再建に焦点をおいて耐震基準の政策がおこなわれた。そのため既存住宅の耐震補強に対するガイドラインの施行は後手にまわった。半壊家屋は、被害状況がさまざまであり、また既存住宅そのものの耐震性能の把握が難しいこともあり大きな課題として残った。実際、半壊家屋の多くは、耐震補強が可能な場合でも、取り壊して新築に建てなおすケースが少なくなかった。また復興住宅の新築再建案件でも、山間部ではアクセスも悪く、セメント等の建設資材の搬入も困難である地域が多く、耐震性不適合のケースも多い。

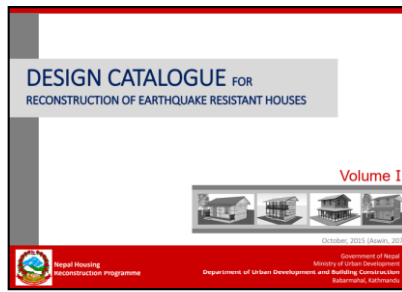
このような課題に対して、人的被害軽減を目的とした現地で入手可能な材料によるローコストな耐震補強工法が必要である。

2. 蛇籠を用いた耐震補強工法

石積み組積造の耐震補強技術として、セメントモルタルの仕上げを必要としない蛇籠状メッシュを用いたジャケッティング工法の提案である。通常の土木用蛇籠は名の通り、籠状（1m四方程度）の中に石を詰め込むものであり、斜面補強や道路脇のフェンスとしてネパール全土で普及している。（図2-1）

今回、石積み組積造住宅の耐震補強技術への転用として技術開発を実施した。既存住宅にも適応できるようメッシュ自体は後施工が可能であることが条件である。

蛇籠ジャケッティングで使用するワイヤー（2~3mm径の垂鉛メッキ針金）は、土木で使用されているものと同様のワイヤー径、垂鉛メッキ量の仕様であり、地方部の建材小売店で市販されている。このワイ



表紙



各住戸モデル

図1-3 復興住宅カタログ第1巻

ヤーは、ロール状で市販されているため、山間部への人力による搬入が可能である。そして建物近くでメッシュ形状への編み込み成型を行う。図2-2に示すように、ネパールでは土木工用蛇籠の成型が現場で行われることが多く、この技術はよく知られている。そしてこの成型技術は、特殊工具が必要ではなく技術的にも難しいものでないため、住民自ら数時間のトレーニングでメッシュ成型技術を習得することが可能であると考えられる。



蛇籠施工風景



蛇籠による斜面補強

図2-1 ネパールにおける蛇籠使用事例



図2-2 ネパールにおける蛇籠メッシュの成型

2.1 既往研究

2010年より、インドネシア等のレンガ組積造を対象としたジャケッティング工法の開発研究を実施してきた。図2-3にジャケッティング工法の概略を示す。レンガ等の組積壁をワイヤーメッシュ等で覆い、その上からセメントモルタルで仕上げをすることにより耐震性能を向上させるものである。この工法はインドネシアを中心として既に組積造の耐震工法として普及しており、2019年スラウェシ島地震やロンボク島地震での復興住宅として採用されている。

2.2 メッシュ編み込み形状

蛇籠に使用されるメッシュは、亀甲編みがよく使われている。亀甲編みの優れた点は、万が一どこかが破断しても、他に影響が出にくい。それはワイヤーの接点部分が多く、編目の一つ一つに独立した強度を備えた亀甲金網独自の特徴とされている。今回、メッシュ形状に関して、3種類の編み込みを検討した。

図2-5に亀甲メッシュのねじり回数のイラストを記す。

通常の亀甲メッシュは3回ねじりである。2回ねじりとの施工性を比較したところ、3回ねじりワイヤーの縦軸が通るため、横一段ずつの編み込みができるためテンションをかけ易い。2回ねじりは、ワイヤーが一段毎に斜めに移動していくため、テンションがかけづらく歪みやすい。また一回ねじりは、メッシュに張力がかかると菱形メッシュになる。この形状はテンションがかかっていない状態では形状維持ができないため、建物への施工が難しい。この検討により3回ねじりが妥当であると判断し、振動台実験に採用することとした。図2-6にネパールでの地組みと壁掛けフレーム組みのメッシュ編み込みと、日本での編み込み方の検討の様子を示す。

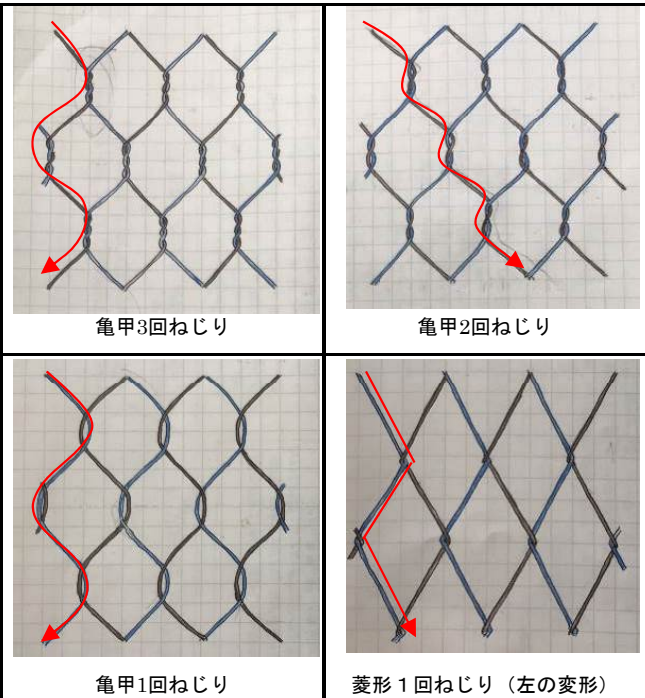


図2-5 メッシュ網み込み図

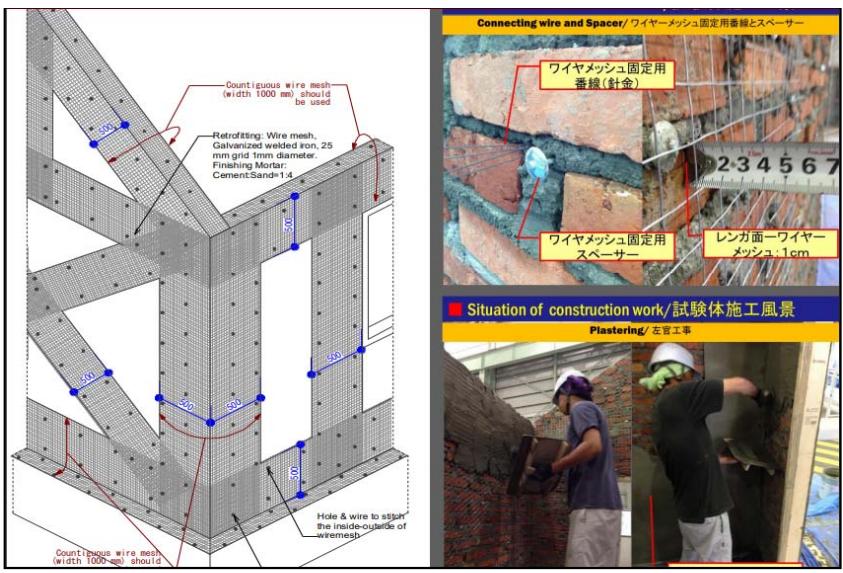


図2-3 インドネシア用耐震補強工法概要



図2-6 メッシュ編み込み風景

2.3 ワイヤー（亜鉛めっき針金）の要素引張実験

引張試験の目的は以下2点である。

①後述の実大振動台実験では、ネパール製のワイヤーを大量に入手することが困難であったため、日本製のものをを用いた。現地の材料での実用化のため、日本製とネパール製のワイヤーの引張強度の違いの把握を行う。

②メッシュは2本のワイヤーのねじり部とワイヤー一部により面を形成している。2本のワイヤーのねじり回数による強度を把握するため、下記の実験を実施した。

- ・比較実験①：日本製とネパール製の比較
- ・比較実験②：日本製φ0.9本数・ねじり有無での比較

比較実験①では、日本製（以下J製）、ネパール製（以下N製）、それぞれワイヤー径3タイプ(φ3.2mm, 2.6mm, 1.6mm)の各3本計18本の引張試験を行った。

比較実験②では、J製ワイヤーφ0.9mmを用いて行った。ねじることの効果を把握するために、ワイヤー1本とワイヤー2本の試験を行った。ねじりの粗さにより、5 cm間隔に約 20 回ねじったものと、11回ねじった試験体により、ワイヤー 1 本及び 2 本との比較を行った。それぞれ3本ずつ合計 12 本の試験を行った。

図2-7に引張試験①の荷重変形曲線を示す。最大引張強度をみると、φ3.2ではJ製に対してN製の方が引張最大強度が1割程度、φ2.6、1.6ではN製よりもJ製の方が低かった。またφ3.2、φ1.6のN製には強度が著しく低下するものも一部見られ、品質にばらつきがあることが考えられる。

2.4 ワイヤー（亜鉛めっき針金）の耐久性

ネパールで斜面補強や道路脇のフェンスで使用されている蛇籠は、古いもので20年ほど前から使用されているが、腐食はみられるが強度が著しく劣化しているものは少ない。理由として、通常蛇籠で私用されているワイヤー（亜鉛めっき針金）は、3mm径のものが多く、このような大径の針金は、必要十分な亜鉛メッキ量であることが考えられる。

ネパール製ワイヤーの品質特性を表2-1に示す。

表2-1ネパール製ワイヤーの品質特性

試料名	使用線材	機械的性質			めっき成分分析 Alの有無
		線径[mm]	引張強さ[N/mm ²]	めっき付着量[g/m ²]	
試料 A	SWRM 6	3.15	601	9	なし
試料 B	SWRM 6	3.18	446	269	なし

試料Aと試料Bのめっき付着量に大きな差があるが、日本のJIS規格（JIS G3547）のめっき付着量155g/m²を満たすものも流通していることがわかる。日本のメーカーが示しているめっき付着量と耐久性に関する計算式を以下に示す。

「めっき部分」の耐久性は、めっき付着量が消耗するまでの期間として、めっき付着量とめっき腐食度より、次式で表す。

$$\text{めっき鉄線の耐久性 (年)} = \frac{\text{めっき付着量 (g/m}^2\text{)}}{\text{めっき腐食度 (g/m}^2\text{/年)}} \times 0.9$$

*めっき腐食度(g/m²/年)は、使用環境によるが概ね5~20 g/m²/年

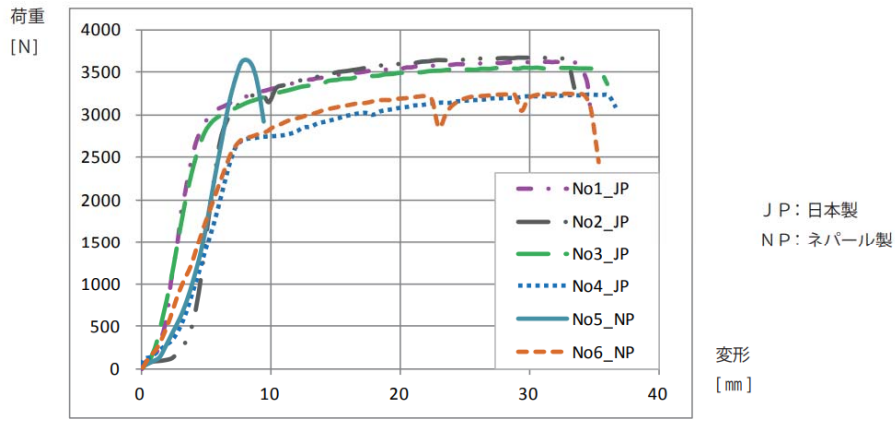
「鉄線部分」の耐久性は、引張強さ（断面積）が1/2腐食するまでの期間として鉄線腐食しりと鉄線腐食度より次式で表す。

$$\text{鉄線部分の耐久性 (年)} = \frac{\text{鉄線腐食しり (mm)}}{\text{鉄線腐食度 (mm/年)}}$$

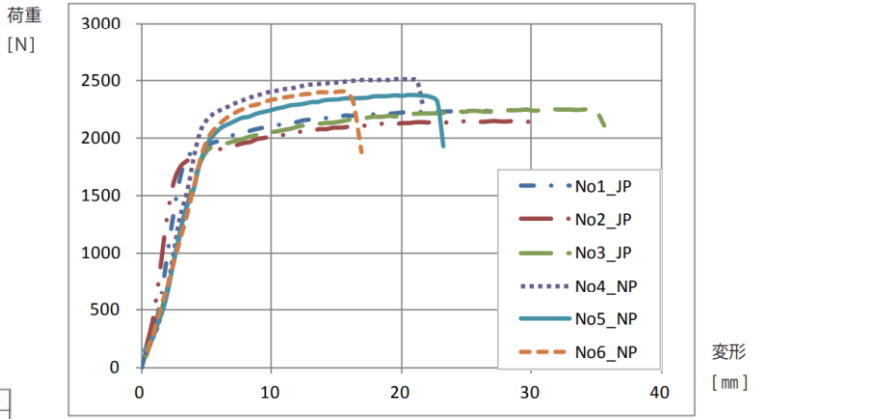
$$\text{鉄線腐食しり (mm)} = \frac{\text{線径 (mm)} \times \left(1 - \sqrt{\frac{1}{2}}\right)}{2}$$

上記、めっき部分の耐久性計算式を用いて、ネパール製ワイヤー試料Bの耐久年を計算する。

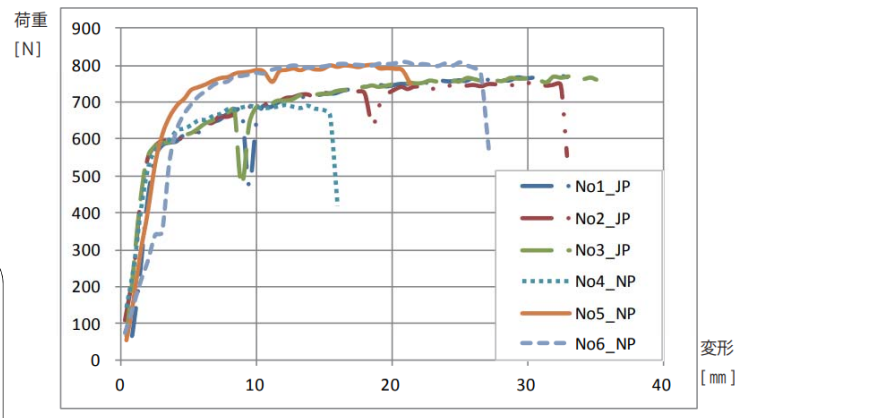
- 環境の悪い場合、
269 (g/m²) / 20 (g/m²/年) = 12.10年
 - 環境の良い場合、
269 (g/m²) / 5 (g/m²/年) × 0.9 = 48.42年
- となるため、ネパール国内で普及している亜鉛めっき針金でも特に粗悪品でなければ十分な耐久性を有すると考えられる。



日本-ネパール製3.2mm



日本-ネパール製2.6mm



日本-ネパール製1.6mm

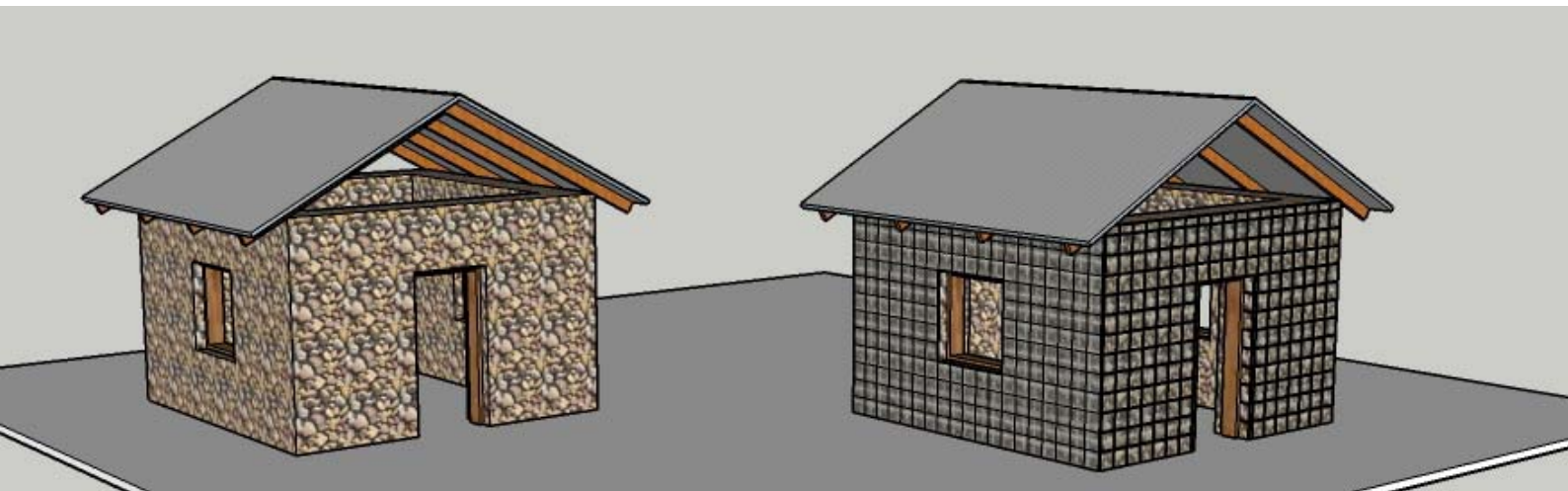
図2-7 日本-ネパール製ワイヤー引張試験(果汁変形曲線)

3. 耐震性能検証のための実大振動台実験

(図3-1)

加振実験は、防災科学技術研究所の大型耐震実験施設（つくば）を使用し、ネパールの山間部によく見られる整形片岩と泥モルタルの組積造を模したノンエンジニアド住宅モデルを 2棟製作し、1棟を蛇籠状のメッシュを用いて耐震補強を施した。この2棟のモデルにおいての比較倒壊実験を実施し、耐震性能と挙動特性の把握及び耐震補強工法の効果の検証を行った。

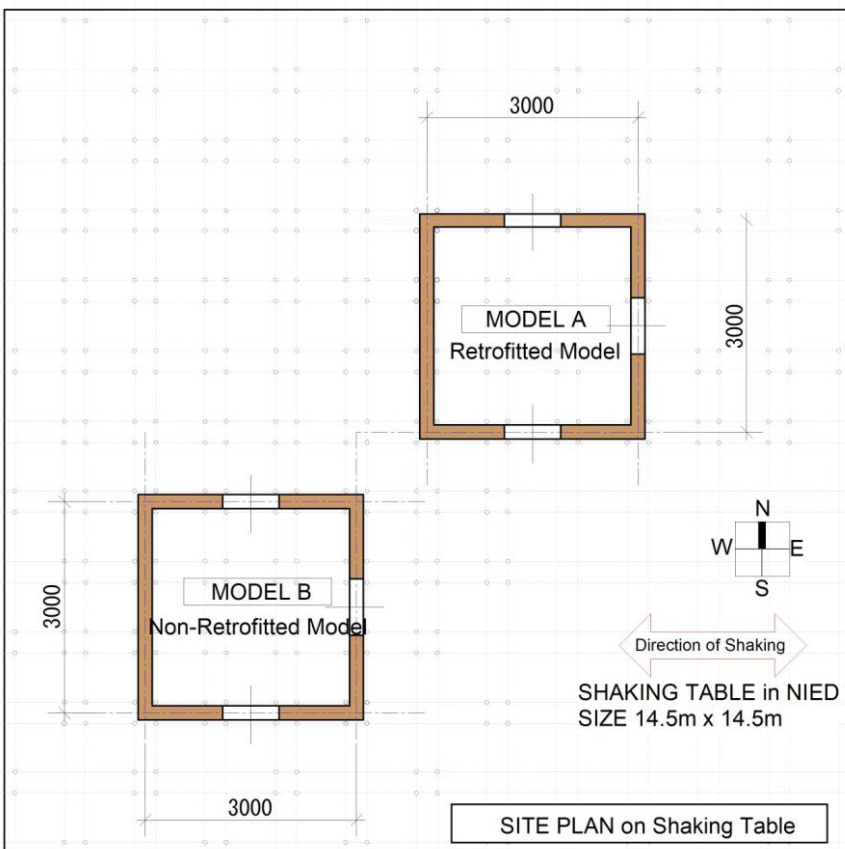
試験体は、図3-1に示すようにセメントレンガと泥モルタルを使用し、組積造の建物（3200mm x 3200mm x 2200mm）を2棟建設し、モデルAは壁の内外全面を亀甲メッシュで耐震補強を施し、モデルBは無補強になる。



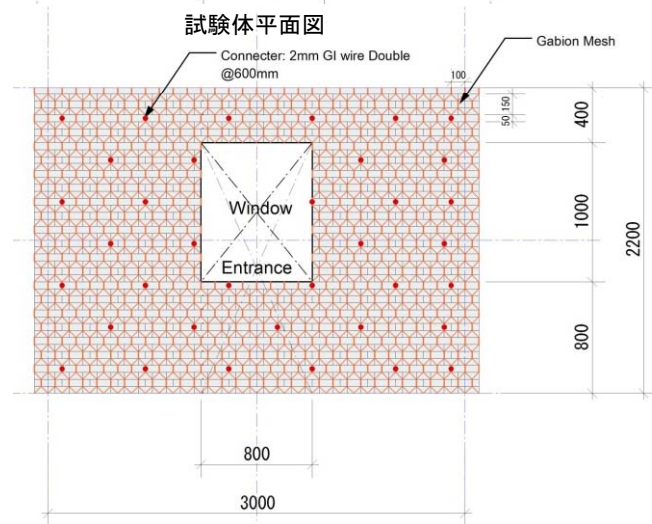
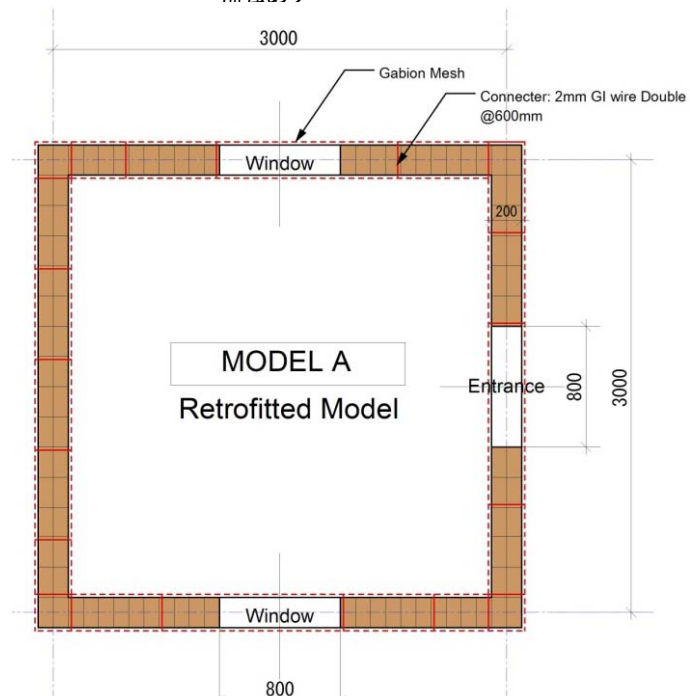
補強なし

振動台実験イメージ

補強あり



配置図



補強あり試験体立面図

図3-1 振動台実験試験体概要図

3.1 蛇籠状亀甲メッシュの作成 (図3-2)

ネパールで住民自ら作成することを想定し、蛇籠メッシュ/亀甲メッシュの編み込み作成方法について検討を行った。

今回の試験体は、セメントレンガ(長さ210mm×幅100mm×高さ60mm)を使用し、壁厚は210mmである。壁の自重と針金の引張強度の検討により2mm径の亜鉛めっき針金を使用した。

蛇籠状メッシュは、亀甲3回ねじりのメッシュとし、目の大きさは、組積体のセメントレンガ単体の崩落を防ぐため、縦150mm、横100mmとしている。

蛇籠状メッシュ作成行程を以下に示す。

蛇籠状メッシュ作成行程を以下に示す。

1. 木製フレーム1200mm x 2400mmを2x4材で作成
2. 木製フレームに編み込み用のガイドを取り付ける。
メッシュの目の大きさに合わせ、縦150mm，横100mm
間隔で、タッピングねじ50mmを打ち込む。
3. 編み込みをするために市販されている針金ロール
(径30cm程)から、径10cm程の小ロールを作成する。
針金長さは、完成メッシュ高さの1.5倍 x 2とする。
一枚分の縦の本数(11本)を用意する。
4. 3.にて作成した小ロールを中央でV型に折る
5. 木製フレームのガイドに合わせて編み込みを開始。
亀甲3回ねじりとしている。(ねじり回数が奇数の場
合、縦材は同じ縦ラインを通る。偶数の場合は、斜
め方向に針金が移動していく。)
6. 横方向の奇数段と偶数段のねじり方向を変えるこ
とによりメッシュ全体の捩じれを防ぐことができる。
7. 横方向の寸法は、斜め部分5cm，3回ねじり部分5
cm，斜め部分5cmとし、亀甲部分の縦長さを15cmと
なる。
8. 木フレームの下段まで編み込んだら、端部を本体
にねじり止め、フレームから脱型する。



木製フレーム(1200mmX2400mm)



市販ロールと小ロール



径100mmの小ロール制作



横100mmピッチのガイドを使用
メッシュ編み込みを開始

蛇籠状亀甲メッシュ(1100mm x 2400mm)一枚の制
作時間は、編み込み時間約4時間、また小ロール制作
30分ほどである。また今回の振動台実験用試験体
(3200mm x 3200mm x 2200mm)には、計23枚
を用意し、針金(2mm)の総使用量は、長さ約1920m、
重量96kg。作業日数20日間を要した。ネパールでの垂
鉛めっき針金の値段は、NRP200/kgであるため、今回
の一棟分の材料代は、約NRP20,000である。



亀甲メッシュ3回ねじり施工



横100mm、縦150mm



メッシュ編み込み全景



図3-2 メッシュ編み込み施工風景



編み込みの端部

3.2 振動台実験用試験体制作とメッシュ取り付け

3.2.1 組積体モックアップ作成 (図3-3)

ネパールの山間部によく見られる整形片岩と泥モルタルの組積造ノンエンジニアド住宅モデルを模した試験体制作に先立ち2018年11月より、組積体のモックアップ作成を行った。

ネパール同様の成型した石材は日本国内では非常に高価であり入手が困難なため、比較的安価で入手可能な割栗石とセメントレンガを組積部材として、また目地材には真砂土の泥モルタルで、組積体の制作が可能か、またメッシュ取り付け方法の検討をおこなった。

このモックアップ建設により、割栗石のみでは壁高さ1m以上の組積は難しく、泥モルタルの乾燥硬化にかなりの時間を要することがわかった。



組積方法



組積壁の施工

3.2.2 実大組積造住宅制作 (図3-4)

2019年2月6日よりつくば防災科学技術研究所大型耐震施設の振動台上で試験体の制作を開始した。モックアップによる施工の検討により、セメントレンガ(長さ210mm x 幅100mm x 高さ60mm, 重さ2.5kg)を使用し、泥モルタルにて組積を行うこととした。

壁の組積方法は、実際の石造の組積方法に近い、フランス積み一枚積みとした。壁厚はセメントレンガの長手長さ210mmになる。泥モルタルの目地厚は20mmとしている。また泥モルタルの乾燥状況を踏まえ、一日の最高組積高さは、600mmとした。泥モルタルは、つくば山近郊で採取した真砂土を使用し、平型のモルタルミキサーを用いた機械練りとした。

振動場にて、2棟の同様の組積造の建物を建設した。建物の平面形が3200mm x 3200mmの正方形であり、壁高さは2200mmである。壁面には、2面に腰窓、1面に出入口の開口部を設けている。屋根は木造骨組みの亜鉛メッキの波板により設置しているが、壁体とは固定されていないため、4面壁の平面合成には働いていない。

2棟のうち1棟を蛇籠メッシュで耐震補強を行った。



メッシュ取り付け用コネクター



メッシュ取り付け



コネクターによるメッシュ取付



壁頂部のメッシュ編込み

3.2.3 蛇籠状メッシュの取り付け

蛇籠メッシュの取り付けは、組積体の目地部分に壁を貫通する形で配した亜鉛めっき針金2mmのコネクターにより緊結される。このコネクターは長さとして約400mmを2本使用し、横600mmピッチ、縦300mmピッチの間隔で配している。

また蛇籠状の亀甲メッシュは、一枚2400mm x 1100mmであり、今回は縦使いとした。壁上部から垂れ下げる形で、上部よりコネクターによって壁内外のメッシュを緊結していく。仮止める際に番線を使用することにより作業性があがる。またメッシュ同士の接合は、重ねることせずに、お互いのメッシュ端部を同系の針金で編み込むことにより一体化させている。



モックアップ全景

メッシュ取り付け検討

図3-3 モックアップ制作



メッシュ隅角部収まり(外)



メッシュ隅角部収まり

図3-4 振動台実験試験体制作とメッシュ取り付け

3.3 振動台実験方法 (図3-5)

地震時の挙動を把握するため、JMA神戸波を使用し一軸加振を、弱入力から10%、20%、30%、50%、70%の最大加速度583ガルまで加振し2棟の比較を実施した。計測は、加速度計4箇所、ビデオカメラ撮影は室内外計27箇所を行った。

■カメラ配置図 (外周)

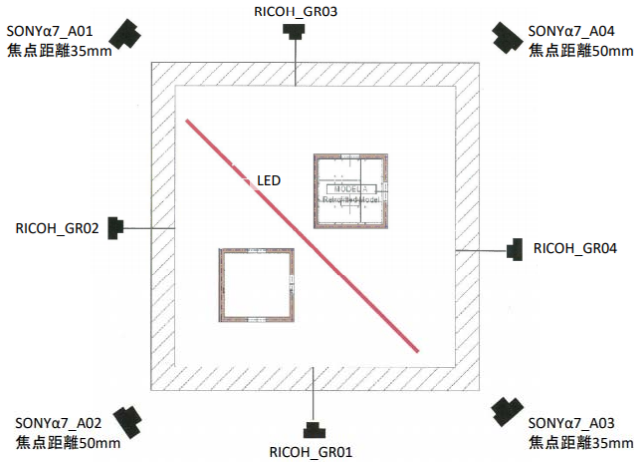


図3-5実験用ビデオカメラ配置図

3.4 実験結果 (図3-6)

■ 既存住宅モデル (補強なし)

- ・ JMA神戸30%にて東面、西面両壁に大きくクラック発生。
- ・ JMA神戸50%にて東面、西面両壁が面外方向に一部崩壊。東面壁の出入口木枠とその上部の組積部分が倒壊。
- ・ JMA神戸70%にて東面、西面両壁が面外崩壊拡大。面内壁 (北面、南面壁) に開口部よりせん断クラックが発生し、全壊に至る。

■ 蛇籠状メッシュ補強モデル

- ・ JMA神戸30%にて東面、西面両壁に大きくクラック発生。
- ・ JMA神戸50%にて面外方向の壁にクラックが拡大。
- ・ JMA神戸70%にて加振時の面外方向に大変形が起こるものの、レンガの崩落が発生しなかった。残留変形あり。

本実験を通して、蛇籠メッシュによる耐震性の効果を以下にあげる。

- 1) 組積造特有の脆性破壊を防ぎ、組積造の靱性化に貢献している。
- 2) 蛇籠状メッシュによる補強は倒壊防止に効果的である。大変形に追従している。
- 3) 組積体を覆うジャケットング効果として、上部からの組積体の落下を防ぐため人命被害を軽減する。



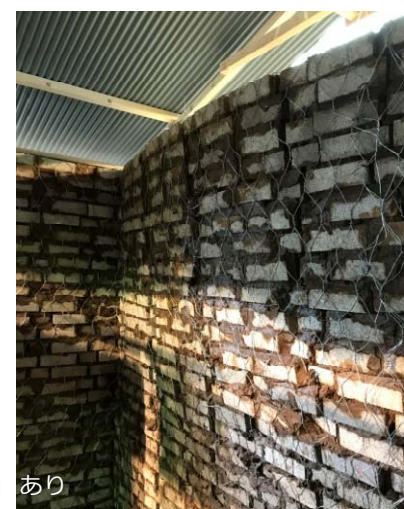
JMA神戸70%(最大加速度583ガル) 東西より



JMA神戸50%(最大加速度410ガル) 室内



JMA神戸70%加振後の試験体状態(補強なしモデル)



JMA神戸70%加振後の試験体状態(補強モデル)

図3-6 振動台実験 実験結果

4. 構造解析手法の考察

4.1 金網の強度

土木工事における蛇籠製品を構成する金網は、地盤沈下に対応するため、中詰め材の重量に対して十分な強度を有していなければならないとされる。

そして金網の強度Pは、網線の許容引張応力σに安全率を考慮したものと線径D、網線の本数nにより、次式により求められる。

$$P = \pi \times (D/2)^2 \times \sigma / \alpha \times n / 1000$$

P: 金網の強度(kN)
 D: 線径(mm)
 σ: 網線の許容引張応力(N/mm²)
 (引張応力の下限值/2)
 α: 安全率(1.5を標準とする)
 n: 網線の本数(本)

一方、中詰め材の重量Wは、中詰め材の単位体積重量γと容積Vにより次式により求められる。

$$W = \gamma \times V$$

W: 中詰め材の重量(kN)
 γ: 中詰め材の単位体積重量(kN/m³)
 V: 容積(m³)

かごの安定条件は、次の通りである。

$$\text{金網の強度} P > \text{中詰め材の重量}$$

上記の式をもとに、地震力として1Gの加重が蛇籠状メッシュにかかる際の必要耐力(鉄筋量)に関して計算を行う。

・組積体の重量

セメントレンガ(長さ210mm×幅100mm×高さ60mm、重さ2.5kg)と泥モルタルの組積体の単位体積重量。

単位体積重量: $1 / (0.21 \times 0.1 \times 0.06) \times 2.5 = 1984 \text{ kg} \approx 20 \text{ kN/m}^3$

・スパン1m, 高さ1m, 壁厚: 0.21mの場合の必要鉄筋量

重量: $(3.0 \times 1.0 \times 0.21) \times 20 \text{ kN} = 13.23 \text{ kN}$

地震力1G相当として、13.23 kNの面外の引張応力が必要となる。

・今回の亀甲メッシュ(150mm, 100mm)を縦横換算すると、縦方向@50mm, 横方向@100mmとなる。一本当たりの必要耐力を以下に表す。

$13.23 \text{ kN} / (1 \text{ mあたりの本数} 1000 \text{ mm} / 100 \text{ mm}) = 1.323 \text{ kN}$

・ワイヤー2mmの場合,

断面積: 3.14 mm^2 .

最大引張強度(実験より): 435 N/mm^2

$3.14 \times 435 = 1.365 \text{ kN} > 1.323 \text{ kN} \therefore \text{OK}$

4.2 構造解析方法

構造解析で使用了材料特性を以下に示す。

- Mud mortar stone masonry wall:
 - Modulus elasticity = 300MPa
 - Tensile strength = 0.056MPa
- Gabion wire mesh:
 - Modulus elasticity = 69,000 MPa
 - Tensile strength = 435MPa
- Gabion wall (stone and wire mesh):
 - Modulus elasticity = 1.47MPa [3]

SAP (FEM 解析プログラム) を使用した解析結果を以下に示す。(図4-1)

■ indicates the maximum tensile stress exceeded, meaning substantial cracks start to develop in walls.

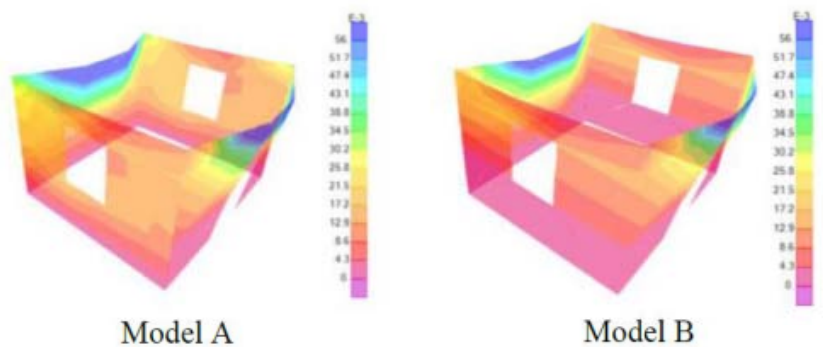


Fig. 14 Maximum tensile stress pattern in stone wall due to 50% JMA Kobe; the stresses at some part of walls were exceeded (in blue colors), walls can be damaged or collapsed.

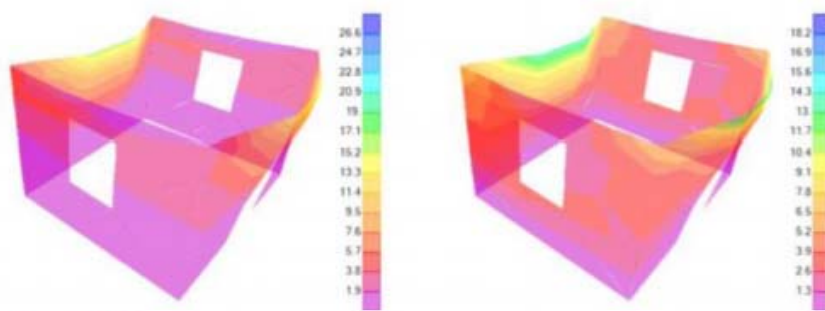


Fig. 15 Maximum tensile stress pattern in gabion wire mesh for Model B due to 50% JMA Kobe; maximum stress 27MPa is small than the allowable stress (435MPa).

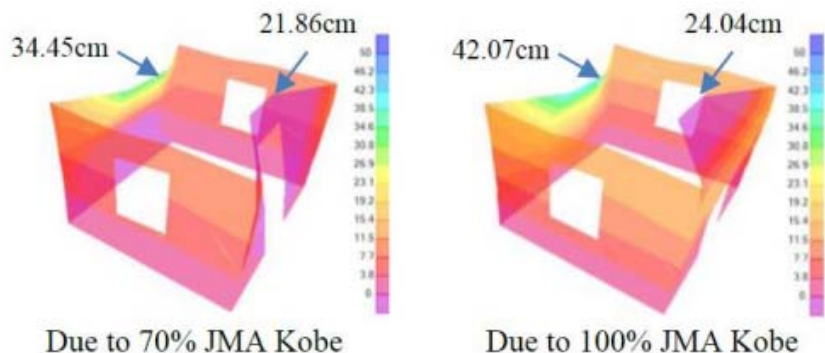


Fig. 16 Maximum deformation pattern of Model B.

左:モデルA(補強あり), 右:モデルB(補強なし)
 図4-1 SAP(FEM解析プログラムによる解析)

この解析では、地震結果と同様の大変形が解析できている。しかしながら、SAPは日本では普及していないため、別の解析ソフトでの解析を試みる。図4-2にNASTRAN (FEM 解析プログラム)での解析を示す。

実大振動台実験の2試験体に対して、1方向加力、静的解析を行った。解析モデルは補強ありと補強なし、支点条件はピン支点とし、水平方向の地震力1.0を作用させた。組積体は板要素にて、泥モルタルとセメントレンガを一体のものとしてモデル化した。振動台試験体では、縦横およそ30cmピッチで蛇籠

面と組積体をつなぐワイヤー（以下コネクター）を配したのに対し、解析モデルでは、組積体板要素と蛇籠の接触を評価するためコネクター要素はねじり部ごとに配した。

解析結果、組積体の大変形が追えず、補強ありの変形は0.68 cmだったのに対し、補強なしの変形は0.82 cm（補強ありの1.21倍）であった。

その後、解析入力値の検討により、せん断弾性係数（G）の値を変更した。コンクリート、鉄、木などの解析ではせん断弾性係数の値はポアソン比を入力しており、モデルは解析できていたが、今回の解析では、組積造では下記の式によりせん断弾性係数を求めている。

$$\text{組積造：} G = E/5 (1+V) \quad \text{もしくは} \\ G = E/6 (1+V)$$

G：せん断弾性係数，
E：ヤング係数，
V：ポアソン比

これにより、変形は以前の解析より大きくなったものの、まだ実験の挙動には至っていない。

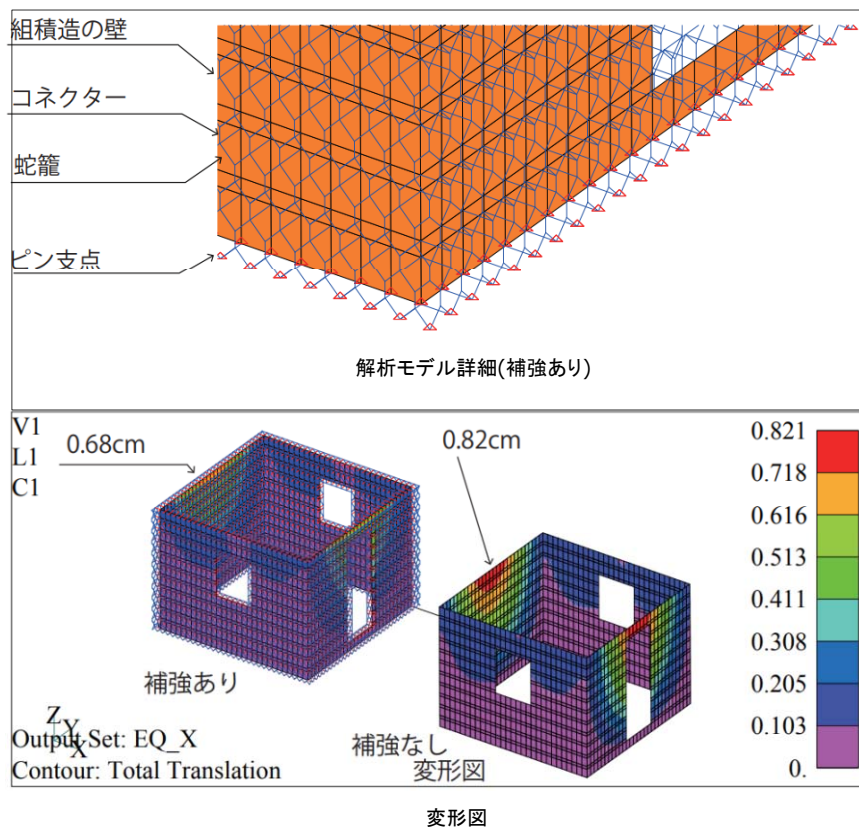


図4-2 NASTRAN(FEM解析プログラム)による解析

5. まとめ

今回の実験や試験体の施工を通して、蛇籠メッシュは現地で普及しうる耐震補強工法として、以下の点に関して、重要性を有していると考えられる。

1) 現地で入手可能な材料であり安価。

- ・このワイヤーは、ロール状で市販されているため、山間部への人力による搬入が可能である。
- ・今回の一棟分の材料代は、約NRP20,000（日本円で約2万円）であり、他の補強方法と比較しても安価である。

2) 専門的な技術を必要とせず、施工が容易。

- ・成型技術は特殊工具を特に必要ではなく、技術的にも難しいものでないため住民自ら数時間のトレーニングでメッシュ成型技術を習得することが可能である。

3) あらゆる建物形状や損傷具合に対応する柔軟性をする。

- ・振動台実験の結果、脆性破壊を防ぎ、倒壊防止に効果的である。また上部からの組積体の落下を防ぐため耐震補強として人命被害を軽減する。

今後、本実験結果と基に、終局強度ベースの解析手法の研究を継続する必要がある。そして建設工法も、より安価で簡易な方法の研究開発を進める。

この実験結果及び映像は、すでにネパールをはじめ途上国の被害軽減に向け防災意識向上ツールとして耐震補強普及に活用されている。

<研究主査>

- ・今井 弘 ものづくり大学 教授・博士（工学）

<研究委員>

- ・設楽 知弘
毛利建築設計事務所海外事業部 課長・博士(学術)
- ・Teddy Boen
World Seismic Safety Initiative(WSSI) Indonesia
Senior Advisor・博士（工学）
- ・Hari Ram Parajuli
National Reconstruction Authority(NRA)
Executive Committee member・博士（工学）

<活動協力者>

- ・小村井 貴世
千葉大学 博士後期課程
- ・鈴木 弘樹
千葉大学 教授・博士（工学）
- ・中澤 博志
防災科学技術研究所・博士（工学）
- ・Ramesh Gragain
NSET

* 当実践研究報告普及版は『住総研 研究論文集・実践研究報告集』No.46の抜粋版です。
参考文献は報告集本書をご覧ください。