

組積造壁の部分模型の 静的荷重における耐震補強に関する研究

A study on seismic retrofitting under static loading on shear strength of masonry walls.

山口和輝¹・Reza Amiraslanzadeh²・池本敏和³・深田幸史⁴・宮島昌克⁵

Kazuki Yamaguchi, Reza Amiraslanzadeh, Toshikazu Ikemoto,
Saiji Fukada and Masakatsu Miyajima

¹金沢大学 修士課程学生 大学院自然科学研究科 地震工学研究室 (〒920-1192 金沢市角間町)

Master Course Student, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

²金沢大学 博士課程学生 大学院自然科学研究科 地震工学研究室 (〒920-1192 金沢市角間町)

Doctor Course Student, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

³金沢大学 講師 理工研究域環境デザイン学系 地震工学研究室 (〒920-1192 金沢市角間町)

Associate Professor, School of Environmental Design, Kanazawa University

⁴金沢大学 准教授 理工研究域環境デザイン学系 構造研究室 (〒920-1192 金沢市角間町)

Associate Professor, School of Environmental Design, Kanazawa University

⁵金沢大学 教授 理工研究域環境デザイン学系 地震工学研究室 (〒920-1192 金沢市角間町)

Professor, School of Environmental Design, Kanazawa University

As we know large numbers of URM structures around the world have not been designed for seismic loads and structural walls of these buildings were primarily designed to resist gravity loads. Therefore moderate to strong earthquakes can devastate entire cities or villages resulting in massive death toll and cause extensive losses. Hence retrofitting of these structures and improving their strength is significant and vital. There are different types of retrofitting methods for rehabilitation of brick walls. In this paper among these several types of retrofitting techniques, we tried to model center core method to see how efficient it could be on reinforcing brick walls against shear forces. For this reason experimental tests carried out on triplets in order to specify mechanical parameters of brick-mortar interface, and diagonal tensile test in order to define shear strength of masonry panels. Also in order to define mechanical properties of masonry components (brick, mortar and fiber concrete), tests were performed in line with the criteria of America.

Keywords : *Shear stress, Diagonal test, Triplet test, Retrofit*

1. はじめに

組積造構造物は、用いる組積材料の差や構造形式の違いから様々なタイプのものがあるが、現在でも世界の人口の約6割の人々が組積造構造物に居住している。しかしながら、組積造構造物の分布と地震の多発地帯の分布が重なるため、地震のたびに多くの組積造構造物が倒壊し、多くの人が犠牲となっている¹⁾。また、組積造構造物は近年、その希少性や意匠性が評価され、歴史建造物として注目されている。

日本をはじめ、先進国では組積造構造物は鉄骨や鉄筋コンクリートなどで補強されているため、地震に対しての抵抗力がある。しかしながら、途上国での組積造構造物はノンエンジニアドと呼ばれ、耐震設計をあまり考慮せずに造られ、品質管理もあまりなされていないため、地震に対して脆弱であり、一度倒壊すると

復元が難しい。さらに、2011年のニュージーランドカンタベリー地震、2012年のイタリア北部地震、イラン北西部地震、中国南西部地震により多くの組積造構造物が被害を受けている。

今後、組積造構造物の耐震性を向上させない限り、地震のたびに繰り返される組積造構造物の崩壊被害を減少させることは困難である。先進国で提案されている対策が途上国にも適用できるが、主要な建材や建築技術が国によって大きく違うことを考慮する必要がある。また途上国では財政資源が乏しいため、経済的に実行可能な技術での補強対策の開発が必要である。

本研究の目的は、特に現在途上国で建造されている組積造構造物の地震時の破壊の解明、さらには経済的に豊かではない途上国でも入手できるような素材で安価に補強する補強法の開発を目標とする。なお、今回の補強法の材料や施工技術はイランを基準としている。また歴史的建造物のほとんどは組積造構造物であることから、いかに外観を保護しつつ地震に対しての耐震性を向上させるかが本研究の重大な課題である。

2. 要素試験による力学的特性の解明

本研究では途上国の組積造構造物を対象とし、現地での配合及び煉瓦を用いて組積造部材を作成した上で各種の要素試験を行う。また実施した要素試験の種類及び試験個体数を表1に示す。

補強コンクリートの曲げ強度試験と斜め圧縮試験の概要と結果は4章で述べる。

表1 本研究で行った要素試験の種類と試験体個数

試験名				試験個体数	
斜め圧縮試験				無補強	2
				補強	2
3段積み煉瓦のせん断試験	日本煉瓦	圧縮応力(N/mm ²)	中国煉瓦	圧縮応力(N/mm ²)	
		0.00		0.00	3
		0.24		0.04	3
		0.48		0.11	3
		0.95		0.18	3
		2.38		0.36	3
		0.54	3		
		0.72	3		
		0.91	3		
		1.09	3		
		1.45	3		
目地モルタルの圧縮試験				3	
補強コンクリートの曲げ強度試験				3	

(1) 目地モルタルの圧縮試験

表2の配合は対象とする途上国で新規に建物を建造する際に用いられる配合で、これによって、大きさ60mm×60mm×60mmの供試体を作製し、圧縮試験を行った。目地モルタルの圧縮強度は平均10.0N/mm²であり、途上国のモルタルは内部破壊を起こし、徐々に表面に亀裂が生じていくことを確認することができた。一般的なモルタルの強度としては30.0N/mm²といわれているので脆弱な目地であることが分かった。

表2 目地モルタルの配合表

配合		
砂	質量(g)	6626
石灰		1335
セメント		1042
水		1723
密度(g/cm ³)		2.14

(2) 3段積み煉瓦のせん断試験

組積造が地震による被害を受けた場合、水平方向の外力によって破壊が進行すると考えられ、試験は組積造壁体が目地間で破壊される場合を想定したものである。供試体は最大耐力に近づくとつれ、載荷面と反力との境である目地でずれが生じ始め、破壊音と同時に耐力が低下した。破壊形状は写真1、2に示すように2パターンあり、煉瓦と目地境界で破断するものと、境界で破壊しさらに煉瓦や目地に亀裂が生じるものであ

る。今回のせん断試験から、せん断応力は垂直方向の応力に依存しており、圧縮応力が大きいほど、せん断応力も大きくなるのが分かり、煉瓦や目地に亀裂が入りやすくなった。これより、組積造に水平方向の外力が加わりせん断破壊を起こすとき、上層部では煉瓦と目地が剥がれ、下層部では目地内部や煉瓦に亀裂が入り破壊に至ると考えられる。また図1は日本の煉瓦を用いたせん断試験の結果と中国の煉瓦の試験結果を示したものである。この図から、日本の煉瓦に比べ中国の3段積み煉瓦はせん断応力が大きいことが分かった。これは、中国の煉瓦の表面の空隙の多さが関係しており、目地部でのモルタルが日本の煉瓦に比べ浸透しやすく、表面の摩擦係数が大きくなったためと考えられる。

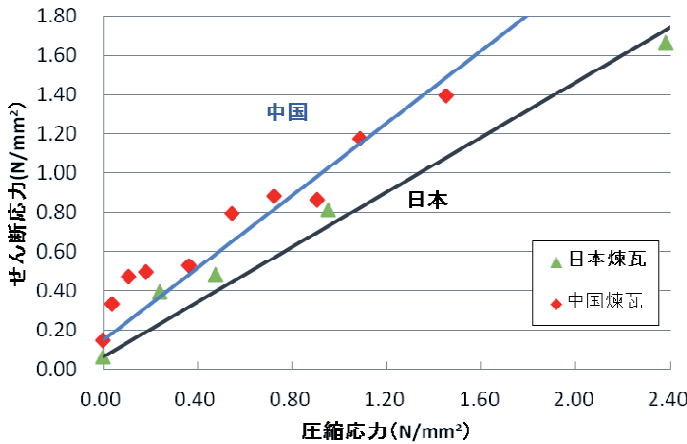


図1 圧縮応力ーせん断応力の関係（日本と中国の煉瓦の比較）



写真1 煉瓦と目地境界で破断（圧縮応力 0.11N/mm²）



写真2 煉瓦や目地に亀裂（圧縮応力 1.45N/mm²）

3. 組積造の地震時被害軽減のための補強

引張力の弱い組積造構造物を補強するには、当然のことながら引張力を向上させる補強材を用いる必要がある。そして途上国でも入手可能でかつ安価である必要がある。本研究ではイランでの高強度コンクリートとほぼ同等の強度を持つ日本の普通コンクリートを補強材に用いることにした。使用したコンクリートの配合表を表3に示す。

また、引張強度を向上させるため、コンクリートに図2の長さ35mm、直径0.6mm、引張強度600MPa以上の鋼繊維ファイバー（Hタイプ）²⁾をセメント重量の30%混入し、繊維補強コンクリートとした。なお鋼繊維ファイバーの引張強度の詳細は表3に示す。

表3 使用したコンクリートの配合表

配合表 kg/m ³				
セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
270	177	935	900	2.70
水セメント比		65.6(%)	粗骨材率	51.5(%)



図2 鋼繊維ファイバーのタイプ²⁾

表4 鋼繊維ファイバーの引張強度²⁾

		土木学会基準	Sタイプ	Hタイプ
引張強度	最大値	—	≥800N/mm ²	≥900N/mm ²
	破断値	≥600N/mm ²	≥600N/mm ²	≥600N/mm ²
公差	長さ	±2mm	±2mm	±2mm
	重量	±15%	±15%	±15%

煉瓦組積造の壁体供試体における、煉瓦とモルタルの部材は交互に積み重なっている状態であり、このような一体性に欠ける構造物は異なる部材と接している面が弱くなり、煉瓦とモルタルの間の接着強度が、煉瓦とモルタル個々の強度より小さくなり、結果的に各々の部材が持つ強度以下の力によって破壊に至る。

本研究では煉瓦積みの手法に着目した。煉瓦積みの手法は大別すると数種類存在し、本研究で採用する手法はイランで一般的な手法である、一段に煉瓦の長手方向と小口方向を交互に積み上げるフランドル積みの一種とした³⁾。また、内部に空洞を設けることにより、煉瓦の個数削減と煉瓦壁体の総重量を軽くする効果があるが、その反面強度が低下する。本研究は途上国の組積造構造物を対象としているため、煉瓦壁は中国の煉瓦で作製し、写真3で示すように、縦方向に空洞があり、この空洞に繊維補強コンクリートを打設し煉瓦壁の一体化を図り、耐震性を向上させるものである。イランなどの途上国で煉瓦壁に工具等で穴を設けるのは可能であり、空洞が設けられていない既存の建物にもこの補強方法は適用できる。



写真3 モデルを参考に作製した供試体

4. 組積造構造物壁の要素試験による対策効果

(1) 補強コンクリートの曲げ強度試験

本研究では、補強材である繊維補強コンクリートの曲げ強度試験を実施する。この曲げ強度試験はアメリカの国際基準ASTM C78 (米国材料試験協会規格)⁴⁾を使用し、繊維補強コンクリートの曲げ強度 $R(N/mm^2)$ を測定する。煉瓦壁の一体化を図るために打設した繊維補強コンクリートの曲げ強度試験から得られた力学的特性について述べる。

本試験は大きさ $100mm \times 100mm \times 400mm$ の補強コンクリート供試体を作製し、試験機に設置する。設置方法としては、三角形上の支点を敷き、鉄製の円柱を支点から支点までの距離の3分の1となるように供試体の上部に設置する。その上に厚さ $10mm$ 程の鉄製のプレートを置きその上から圧縮試験機を用いて荷重を作用させ破壊荷重 P を求めASTMの式(1)に代入して曲げ強度 R を求める。曲げ強度の試験結果を表5、変位と曲げ強度の関係を図3に示す。補強コンクリートの供試体の曲げ強度 R は $5.8N/mm^2$ となった。コンクリートの曲げ強度は $4.5N/mm^2$ であるので鋼繊維ファイバーによって曲げ強度が向上したことが分かる。写真4、写真5からコンクリートが降伏してからもファイバーによって供試体が破断しなかった。

表5 曲げ強度試験結果

	曲げ強度 $R(N/mm^2)$
供試体1	6.2
供試体2	6.1
供試体3	5.2
平均値	5.8

計算式

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)^4$$

P :破壊荷重(N)
 L :供試体の長さ(mm)
 b :供試体の奥行き(mm)
 d :供試体の幅(mm)

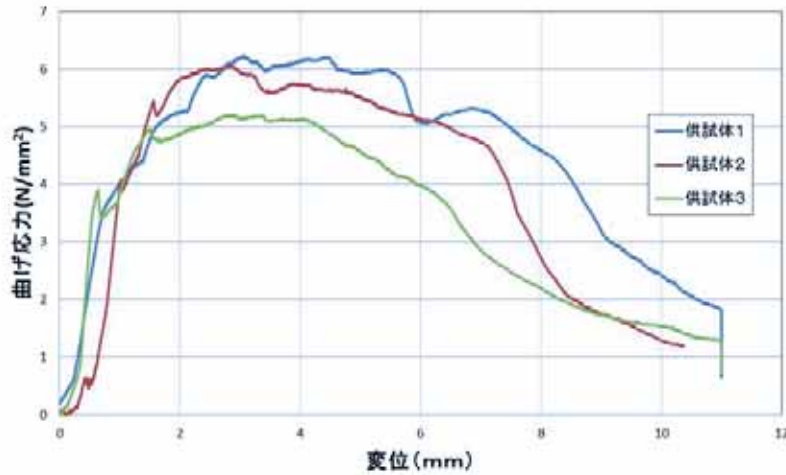


図3 変位と曲げ強度の関係



写真4 コンクリートの降伏時の状況



写真5 コンクリート降伏後の状況

(2) 斜め圧縮試験

斜め圧縮試験では、煉瓦組積造の要素において、圧縮試験機からの垂直圧縮応力を左右均等に45°方向に変換することができ、その力を煉瓦壁体の4辺に作用させることにより純せん断力を付与することができる。純せん断力とは、物体を切断したとき、その切断面にせん断力のみが作用している場合の力である。この純せん断力を煉瓦壁体に与えることにより、煉瓦壁体内部に引張応力が発生し煉瓦組積造の要素内に作用できる。そのことで、破壊荷重 P 、最大せん断応力 S_{max} 、最大せん断ひずみ γ_{max} 、せん断弾性係数 G 、引張り応力 σ_t を求めることができる。供試体寸法は1260mm×1260mm×370mmとし写真6、7に示すように供試体を上下挟み、ひび割れ時の垂直荷重と垂直変位、水平変位、縦ひずみ、横ひずみを測定する。ひずみ計を取り付けるために供試体中央に石灰を薄く貼付した。圧縮力が煉瓦目地を斜めに横切るように対角線載荷とし、一方向の載荷とした。また、供試体の上下に治具を挟むことにより、鉛直方向圧縮力を載荷することができる。

補強供試体、無補強供試体、共に2体ずつで試験を行った。

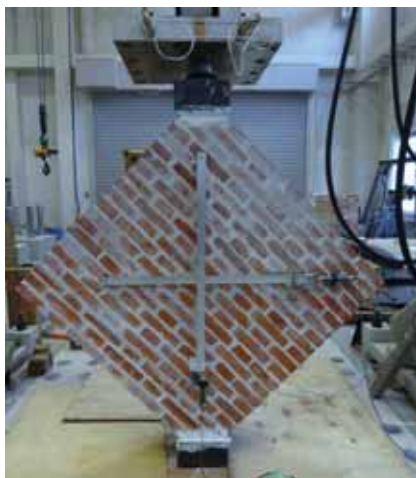


写真6 斜め圧縮試験供試体 (変位計面)



写真7 斜め圧縮試験供試体 (ひずみ計面)

破壊パターンは、無補強と補強では異なる破壊挙動を示した。無補強の供試体では写真8、写真9に示すように、煉瓦と横目地で剥離が見られた。これは横目地方向に生じたせん断力と主応力となる引張成分が破壊に大きく影響したと考えられる。また補強した供試体では写真10、11に示すように、供試体の対角線上に亀裂が入り、煉瓦自体にも亀裂が多く見られたが、無補強のような崩壊はしなかった。これは横目地方向にせん断力が発生したが、垂直方向に打設されている補強コンクリートが抵抗し崩壊までには至らなかったと考えられる。亀裂が生じた後も荷重のみの載荷を続けたが、荷重が大きく増加することなく、供試体が崩壊した段階で実験を終了した。

各供試体の試験結果を以下に示す。図4はせん断ひずみとせん断応力の関係図である。ほぼ直線的に荷重が増大し、目地にひび割れが発生し、煉瓦壁の一部の煉瓦にずれが生じたり、欠落すると急激に耐力を失い荷重が低減した。このことから、煉瓦組積造は構造部材のずれや欠落により崩壊を招く原因になると考えられる。供試体の各数値の計算方法を図5に示す。ASTMに従い、試験により得られた垂直荷重から式2を用いせん断応力 S を算出する。式3の有効せん断面積の割合 n とは供試体の縦方向の穴に関係しており、補強供試体で $n=1.00$ 、無補強供試体は空洞の面積の割合を引いて $n=0.89$ となる。次に垂直変位 ΔV 、水平変位 ΔH から式4を用いせん断ひずみ γ を求める。求めたせん断応力 S 、せん断ひずみ γ からせん断弾性係数 G を計算した。せん断弾性係数 G は試験結果から式5を用いて算出する。

各供試体の試験結果を表6、7に示す。無補強の供試体で、破壊荷重や引張応力、最大せん断応力の値が低くなったのは、本来斜め圧縮試験はせん断力や内部の引張応力で、供試体の縦方向の対角線上に亀裂が生じる試験であるが、亀裂が生じる前に煉瓦と目地の間に亀裂が生じ、大きな構造部材のずれや剥離が起こったためであると考えられる。試験における煉瓦壁の引張応力に対し、目地の引張強度が低かったことがずれや剥離が生じた原因だと考えられる。表6、7に示すように、補強した供試体では破壊荷重は568.8kNであり、無補強の供試体での破壊荷重331.9kNに比べて1.7倍の荷重に耐えた。また、せん断弾性係数は253.9N/mm²で、無補強の供試体のせん断弾性係数212.4N/mm²に比べて1.2倍のせん断弾性係数の上昇が見られ、また縦方向の対角線に亀裂が生じたことから、補強により煉瓦と目地の一体性が増し、一定の耐震補強効果があると考えられる。



写真8 無補強供試体1 (破壊後)



写真10 補強供試体に生じた亀裂



写真9 無補強供試体2 (破壊後)

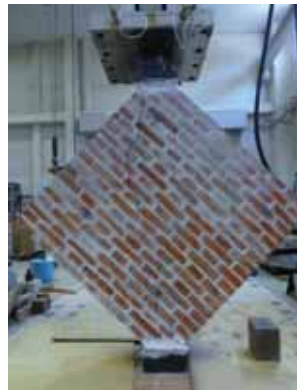


写真11 補強供試体に生じた亀裂

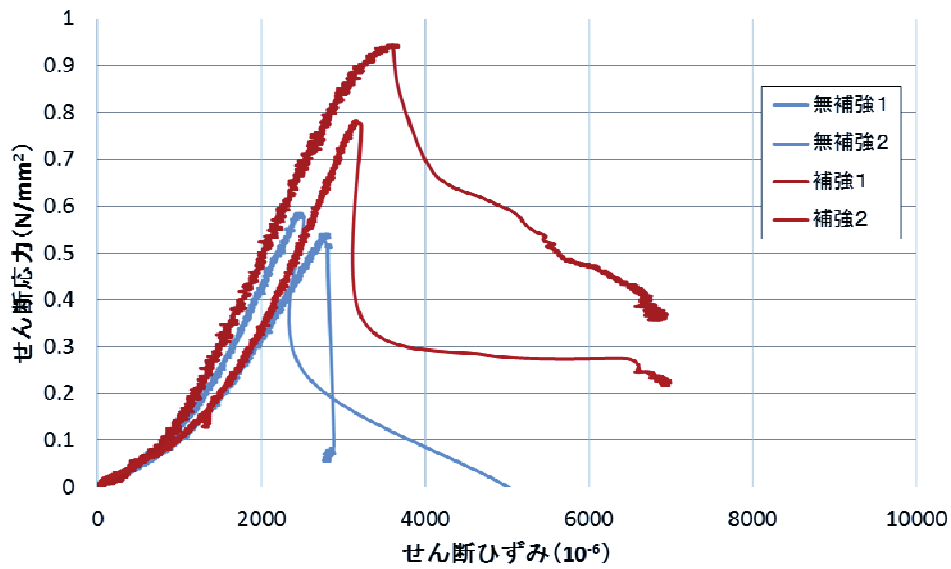


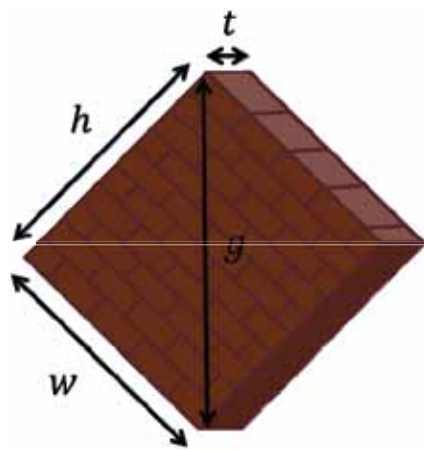
図4 斜め圧縮試験におけるせん断ひずみとせん断応力の関係

$$S = \frac{0.707P}{A_n} \quad (2)$$

$$A_n = \left(\frac{w+h}{2}\right)tn \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (4)$$

$$G = \frac{S}{\gamma} \quad (5)$$



- w : 供試体の水平長さ(mm)
- h : 供試体の高さ(mm)
- t : 供試体の奥行(mm)
- g : 供試体の対角線長さ(mm)
- A_n : 有効せん断面積(mm²)
- n : 有効せん断面積の割合

図5 供試体の寸法と各数値の計算方法⁵⁾

表6 斜め圧縮試験の結果(その1)

		供試体重量 (kN)	破壊荷重 (kN)	引張応力 (N/mm ²)	最大せん断応力 (N/mm ²)	せん断弾性係数 (N/mm ²)
無補強	供試体1	8.64	318.70	0.38	0.54	193.98
	供試体2	8.71	345.10	0.41	0.58	230.85
	平均	8.68	331.90	0.40	0.56	212.41
補強	供試体1	10.54	622.62	0.67	0.94	261.85
	供試体2	10.29	514.91	0.55	0.78	246.01
	平均	10.42	568.77	0.61	0.86	253.93

表7 斜め圧縮試験の結果（その2）

		最大垂直変位 (mm)	最大水平変位 (mm)	最大垂直ひずみ ($\times 10^{-6}$)	最大水平ひずみ ($\times 10^{-6}$)	最大せん断ひずみ ($\times 10^{-6}$)
無補強	供試体1	4.8	0.2	2718	154	2818
	供試体2	4.3	0.2	2437	145	2535
	平均	4.6	0.2	2577	149	2677
補強	供試体1	6.4	0.2	3593	171	3595
	供試体2	5.4	0.3	3032	215	3172
	平均	5.9	0.2	3313	193	3384

5. 結論

本研究は、高度な専門知識や技術を必要としない手法で、かつ、途上国でも入手できるような素材で簡易的な煉瓦組積造の地震時被害軽減対策の構築を目指し、実験を中心とした研究を行った。その結果、以下のようなことが言える。

- 1) 途上国で建物を建造する際に用いられている目地材は非常に脆いことが分かり、3段積み煉瓦のせん断試験では、日本の煉瓦と中国の煉瓦の力学的特性を比較し、中国の煉瓦はせん断強度においては日本の煉瓦より強いということが分かった。また建造物を想定した時の破壊挙動として、圧縮荷重の大きくなるほど煉瓦や目地に亀裂が入りやすくなった。
- 2) 提案した地震時被害軽減対策の補強材の力学的特性は、曲げ強度試験では、曲げ強度が向上し、さらにコンクリートが降伏してからも供試体が破断することなく靱性を発揮することが分かった。
- 3) 斜め圧縮試験において煉瓦壁の力学的特性と補強効果の検討を行い、補強を施さなければ煉瓦壁に亀裂が生じる前に、煉瓦と目地が剥離することが分かった。また補強によって亀裂が生じた後も耐力を維持し続けたことから、煉瓦と目地の一体性が成され、一定の補強効果が得られることが分かった。

以上のことから、提案した地震時被害軽減対策は、煉瓦組積造が大地震時のクラックの発生を免れるほどの、強度の向上にはならないが、クラックの拡大や構造部材の落下を防ぎ、外力に対する耐力を維持し続ける可能性は示唆された。これにより、地震時の煉瓦組積造の大規模な倒壊を防ぐ可能性のあることが分かり、また倒壊を避けられないとしても、倒壊までの時間を稼ぐことで住民が避難する時間を確保でき、人的被害の軽減につながると考えられる。

謝辞：本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（A）海外学術調査 研究代表者：宮島昌克）の補助を受けた。記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 目黒公郎：2005年パキスタン北部地震による一般住宅の被害と簡便で低価格な耐震補強法の提案,自然災害科学 J.JSND25-3381-392 (2006) , pp.381-392, 2006.
- 2) CMC株式会社：SSファイバー , http://www.din.or.jp/~cmc/pdf/ss_fiber_pamph.pdf. 2013年4月参照.
- 3) 全愛知県赤煉瓦工業協同組合HP：煉瓦の積み方/敷き方, <http://www.akarenga-aichi.or.jp/ja/pile.html>, 2013年4月参照.
- 4) ASTM: Designation:C78-02, 2002.
- 5) ASTM: Designation:E519-07, 2007.