

PP-band 工法による組積壁の 耐震補強効果に関する応用要素解析

櫻井 俊彰¹・沼田 宗純²・目黒 公郎³

¹中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻
(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 生産技術研究所Be-604)

E-mail: t-sakurai@risk-mg.iis.u-tokyo.ac.jp

²東京大学生産技術研究所助教 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 生産技術研究所Be-604)

E-mail: numa@iis.u-tokyo.ac.jp

³東京大学生産技術研究所教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 生産技術研究所Be-603)

E-mail: meguro@iis.u-tokyo.ac.jp

発展途上国において甚大な地震被害をもたらす主な要因として、組積造住宅の倒壊が挙げられる。組積造住宅の耐震補強工法として、目黒らは安価かつ施工が容易な工法として、荷造りに用いられるポリプロピレン (Polypropylene) 製の紐を用いた耐震補強工法 (PP-band工法) を開発し、実験と数値解析の手法で、その効果を検証してきた。本稿ではさらに、PP-bandメッシュビッチの影響を評価するため、無補強・補強組積壁を用いた面内方向圧縮試験を行うとともに応用要素法 (Applied Element Method : AEM) による解析を行った。その結果、メッシュビッチを密にすることにより、残留強度が格段に向上し、メッシュビッチがせん断クラックの拘束力に与える影響が大きいことが確認された。

Key Words : masonry, PP-band (polypropylene-band), seismic retrofit, local availability, diagonal compression test, Applied Element Method (AEM)

1. はじめに

組積造住宅とは、レンガや石、コンクリートブロックなどを泥やセメント、モルタルなどをつなぎとして用いて、積み重ねて造る長い歴史をもつとともに現在においても発展途上国を中心に世界の人口の 60%もの人が利用している住居形式である。しかし、組積造住宅は一体性に乏しく、地震に対して非常に脆弱であり、破壊形態が脆性的で、一旦地震が起きると生存スペースと避難猶予時間の確保が難しい。これが組積造住宅の倒壊によって甚大な被害が繰り返えされている理由である。よって、世界規模で地震防災を考える際には、この種の建物の耐震性の向上が最重要課題である。しかし、技術や経済的な問題などから、組積造住宅の耐震化は殆んど推進されてこなかった。また、組積造住宅のほとんどは non-engineered structure と呼ばれる構造物で、工学的な専門知識のない現地の人々が現地で入手できる材料を用いてつくものである。故にこれらの構造物の性能は、耐震基準の有無やその良し悪しとは無関係である。以上のことから、防災上の高い重要性を有する一方で、

その対策にかかわる研究は進んでいない。

これらの現状を踏まえ、目黒らは PP-band と呼ばれる通常は荷造りに使われるポリプロピレン製の紐を用いた組積造住宅の耐震補強法 (PP-band 工法¹⁾) を開発した。PP-band 工法とは、メッシュ状に組んだ PP-band の交点を溶接してとめた PP-band メッシュにより組積壁を内外から包み込み、これにより壁に一体性を持たせ、地震時の生存スペースと避難猶予時間を確保するものである。

PP-band 工法には、安価かつ施工が簡単で、現地の人々の生活スタイルや風土に変化を及ぼさないという特徴がある。目黒らは PP-band 工法によってレンガ組積造や日干しレンガ (アドベ) 組積造の耐震性能が大幅に向上することを確認している²⁾。しかし、これらの技術を推進していくためには、無補強・補強組積造の地震動に対する力学特性を十分に検討し、そのデータを蓄積していくことが重要である。

そこで本研究では、数値解析手法として、目黒らにより開発された三次元応用要素法(3Dimensional Applied Element Method:3D-AEM)³⁾を用いて、組積壁の挙動を数値解析的に検証した。具体的には、無

補強・補強組積壁を用いた面内方向圧縮試験²⁾を3D-AEMで数値解析をするとともにPP-bandメッシュピッチの変化による残留強度への影響を確認するため、3通りのピッチサイズ(40mmX40mm, 20mmX20mm, 10mmX10mm)について解析を行った。

2. 解析手法

(1) 三次元応用要素法(3D-AEM)

3D-AEMでは、各要素は法線1方向、接線2方向を一組とする分布バネによりつながれている(図-1)。各要素が有する自由度は、並進3方向、回転3の計6自由度で、分布バネにより力の伝達が行われ、作用する応力に耐えられなくなると、分布バネが破断し解析対象物へのクラックが自然に表現される。また、組積造などの複合材料を解析対象とする際、3D-AEMでは、それぞれの材料を別々にモデル化するため、レンガとモルタルの材料特性を直接与えることが出来る。

(2) 組積造のモデル化

組積造はレンガとモルタルの複合材料であるため、レンガ内部とモルタル表面の2種類のバネをモデル化する(図-2)。レンガ内部バネ(法線方向 K_{bn} 、接線方向 K_{bs})の剛性は式(1)、(2)で与えられる。また、モルタル表層バネ(法線方向 K_{mn} 、接線方向 K_{ms})の剛性はモルタル、レンガそれぞれの剛性を合成することで式(3)、(4)により表現される。

$$K_{bn} = \frac{E_b \times b \times c}{a} \quad (1)$$

$$K_{bs} = \frac{G_b \times b \times c}{a} \quad (2)$$

$$\frac{1}{K_{mn}} = \frac{a-th}{E_b \times b \times c} + \frac{th}{E_m \times b \times c} \quad (3)$$

$$\frac{1}{K_{ms}} = \frac{a-th}{G_b \times b \times c} + \frac{th}{G_m \times b \times c} \quad (4)$$

ここで、 E_b, G_b はレンガの法線・接線方向の弾性係数を、 E_m, G_m はモルタルの法線・接線方向の弾性係数を表す。 a, b, c, th は図-2に示すレンガ要素の寸法、モルタル厚さを表す。

(3) PP-band メッシュのモデル化

PP-bandは梁要素としてモデル化する。材料特性としては、引張側を線形弾性とし、圧縮側は力を

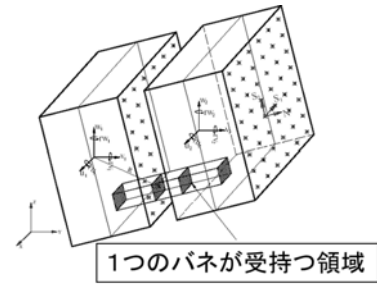


図-1 AEMのバネ分布図

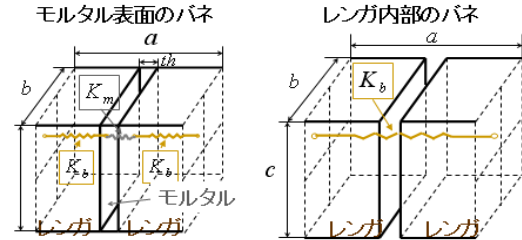


図-2 バネモデル模式図

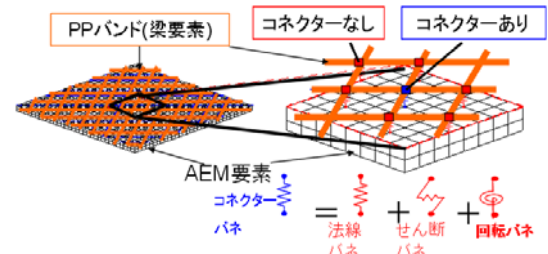


図-3 PPバンドモデル模式図

表-1 材料定数

	ヤング係数 (KN/mm ²)	引張強度 (KN/mm ²)	せん断強度 (KN/mm ²)	摩擦係数	β	Ct (KN/mm ²)
モルタル	0.0145	1.3×10^{-4}	5.89×10^{-5}	0.75	1.0	1
レンガ	15	4.20×10^{-3}	1.20×10^{-3}	0.75	0.8	0.75

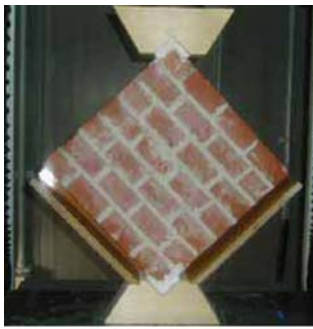
(β, C_t :非線形パラメータ)

受け持たない。また、組積造壁の反対面のPP-bandメッシュと接続を行うコネクターのある場所ではAEM要素と梁要素とを法線、接線、回転の3方向のバネで接続し、コネクターのない場所では法線バネのみで接続する(図-3)。

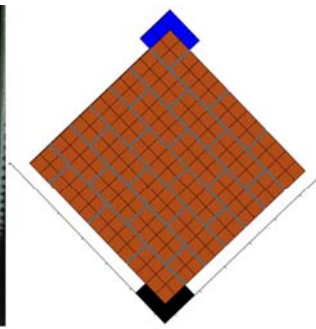
3. 無補強組積壁

(1) 解析モデルの概要

無補強組積造壁の静的解析を行い、解析モデルの妥当性を評価する。数値解析対象としてSathiparanら¹⁾によって行われた面内方向圧縮験の結果を用いる。供試体寸法は280X280X50(単位: mm)で、28個のレンガで構成されている。モルタルの厚さは5mmである。実験では、図-4(a)の上端部分に垂直下向きの変位を与えた。解析モデルでは、図-4(b)の上端要素(青色要素)に垂直下向き方向の変位を与える。境界条件は、



(a)試験供試体



(b)解析モデル

図-4 無補強面内方向圧縮試験

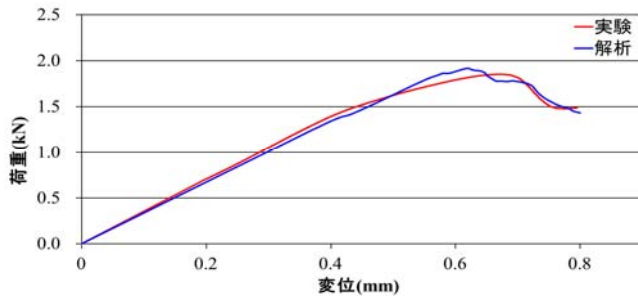
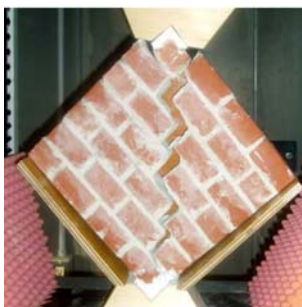
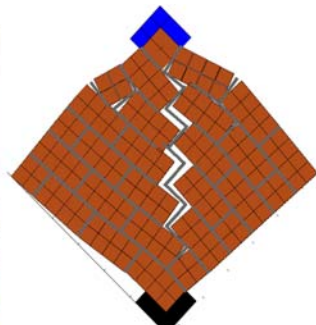


図-5 荷重－変位関係



(a)試験供試体



(b)解析モデル

(変位倍率:5倍)

図-6 クラックパターン

図-4 (b) の下端要素（黒色要素）を完全固定とする．材料定数は表-1 に示す値を用いる．

(2) 解析結果

図-5に実験結果と数値解析結果の荷重－変位関係を示す．これによると，ピーク前の剛性とピークの値に良い一致が見られる．解析結果のクラックパターンを見ると，実験のクラックパターンと非常に類似しており，せん断クラックの進展を精度良く捉えることが分かる(図-6)．

4. 補強組積造壁

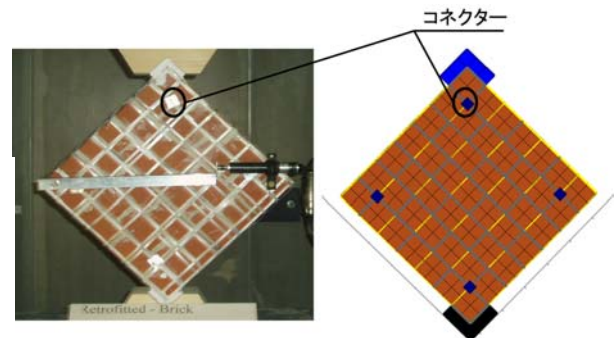
(1) 解析モデルの概要

補強組積造壁の静的解析を行い，補強解析モデルの妥当性を評価する．数値解析対象としては Sathiparanら¹⁾によって行われた補強面内方向圧縮

表 - 2 材料定数

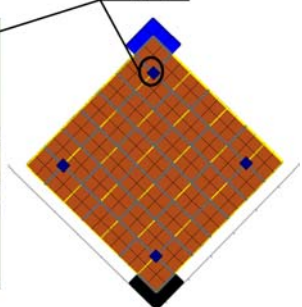
	ヤング係数 (KN/mm ²)	引張強度 (KN/mm ²)	せん断強度 (KN/mm ²)	摩擦係数	β	C_t (KN/mm ²)
モルタル	0.0145	1.3×10^{-4}	5.89×10^{-5}	0.75	1.0	1
レンガ	15	4.20×10^{-3}	1.20×10^{-3}	0.75	0.8	0.75
PP-band	9.38	NA	NA	NA	NA	NA

(β, C_t :非線形パラメータ)



(a)試験供試体

コネクター



(b)解析モデル

図-7 補強面内方向圧縮試験

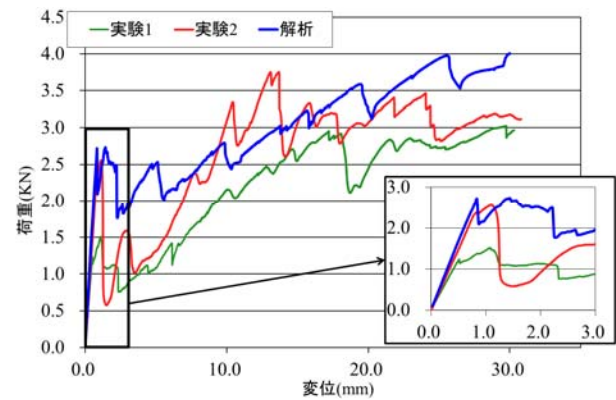
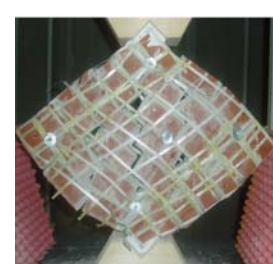
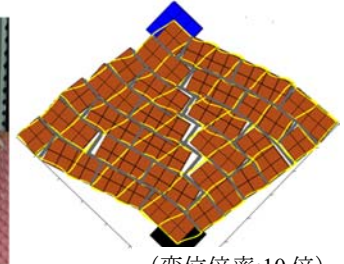


図-8 荷重－変位関係



(a)試験供試体



(変位倍率:10倍)

(b)解析モデル

図-9 クラックパターン

試験の結果を用いる．供試体寸法は 280X280X50（単位：mm）で，28 個のレンガで構成されており，モルタルの厚さは 5mm，PP-band メッシュピッチは 40mmX40mm である．実験では，図-7 (a) の上端部分に垂直下向きの変位を与えた．解析モデルでは，図-7 (b) の上端要素（青色要素）に垂直下方向向きの変位を与える．境界条件は，図-7 (b) の下端要素（黒色要素）の完全固定とする．材料定数は表-2 に示す値を用いる．

表-3 材料定数

	ヤング係数 (KN/mm ²)	引張強度 (KN/mm ²)	せん断強度 (KN/mm ²)	摩擦係数	β	C_t (KN/mm ²)
モルタル	0.0145	1.3×10^{-4}	5.89×10^{-5}	0.75	1.0	1
レンガ	15	4.20×10^{-3}	1.20×10^{-3}	0.75	0.8	0.75
PP-band	9.38	NA	NA	NA	NA	NA

(β, C_t :非線形パラメータ)

(2) 解析結果

図-8に実験結果と数値解析結果の荷重-変位関係を示す。組積造はばらつきの多い材料であるため、実験のピーク値にはばらつきが見られる。また、実験結果と比べ数値解析において、初期クラック発生後の強度低下が小さいのは、組積壁とPP-bandメッシュ間の隙間が数値解析には考慮されていないため、初期クラック発生後に即座にPP-bandの効力が発揮されるためである。これらを考慮すると、ピークまでの剛性、残余剛性を捉える事が出来ている。クラックパターンを見ても解析と実験は良い一致を示している(図-9)。

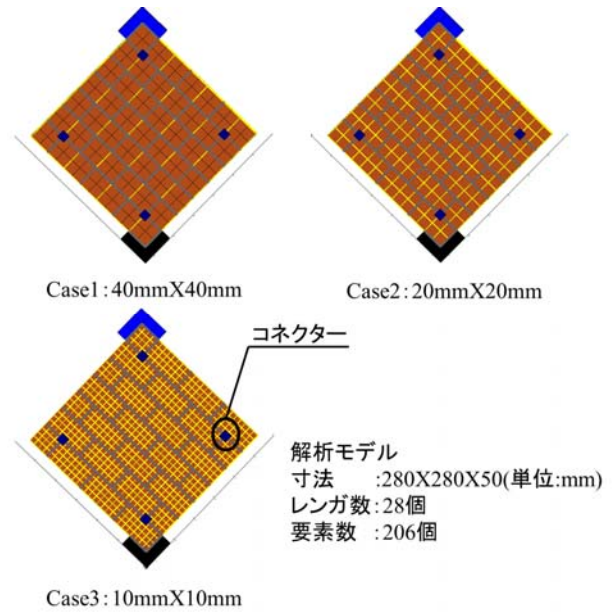


図-10 解析モデル

5. メッシュピッチの残留強度への影響

(1) 解析モデルの概要

図-10に示すようにPP-bandメッシュピッチの変化による残留強度への影響を確認するため、3通りのピッチサイズ(40mmX40mm, 20mmX20mm, 10mmX10mm)について解析を行った。荷重条件は図-10の上端要素(青色要素)に垂直下向き方向への変位を与えることで表す。境界条件は図-10の下端要素(黒色要素)の完全固定とする。材料定数は表-3に示す値を用いる。

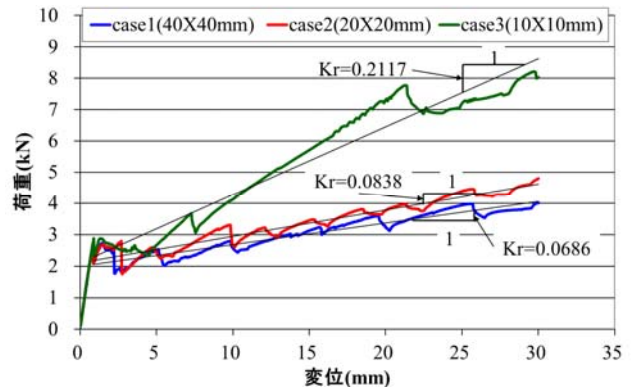


図-11 荷重-変位関係

(2) 解析結果

図-11に3通りのピッチサイズ(40mmX40mm, 20mmX20mm, 10mmX10mm)の解析モデルの荷重-変位関係を示す。組積壁に比べて、PP-bandの剛性が著しく小さいので初期強度を向上させることはできない。しかし、PP-bandメッシュの効力が発揮される残留域では、最終ステップ(変位30mm)における残留強度は各Caseともピーク強度を超える強度を発揮した。各Caseのピーク強度と最終ステップ時の残留強度の関係は、Case1では1.5倍、Case2では1.8倍、Case3では2.8倍の強度増加がみられた。また、最終ステップ時の残留強度におけるCase1に対するCase2, Case3の関係は、Case1に対しCase2は1.2倍、Case1に対しCase3は2.0倍の残留強度を得ることが確認された。最終ステップにおける各Caseのクラックパターンを図-12に示す。また、残留域(変位2mmから30mm)における平準化された残留強度の剛性 K_r (図-11)とメッシュ密度 ρ (組積壁の面積に対するPP-bandメッシュの占める割合)の関係(図-13)より、Case3のメッシュ密度($\rho=0.2177$)において K_r が格段に向上することが分かった。

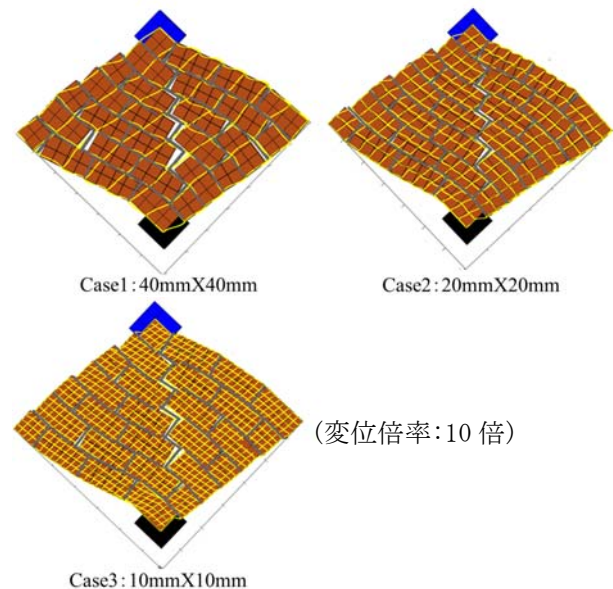


図-12 クラックパターン

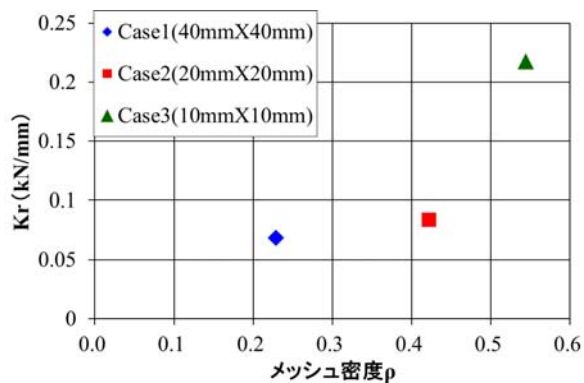


図-13 Kr と ρ の関係

6. まとめ

本研究では、無補強・補強組積壁を用いた面内方向圧縮試験を三次元応用要素法（3D-AEM）で数値解析するとともに、PP-band メッシュピッチの変化による残留強度への影響を確認するため、3通りのピッチサイズ（40mmX40mm、20mmX20mm、10mmX10mm）について解析を行った。

無補強・補強組積壁を用いた面内方向圧縮試験の実験結果と解析結果の比較より解析手法の妥当性が証明された。また、3通りのメッシュピッチのPP-band メッシュで補強された組積造壁の面内圧縮試験の解析結果より、メッシュピッチの変化がせん断クラックに与える影響が大きいことが確認された。以上より、組積造住宅の玄関や窓などの開口部周辺のせん断クラックが生じうる部位に対し、施工性を考慮し、部分的にメッシュピッチを密にすることで、より生存スペース、避難猶予時間の確保が容易になることが考えられる。

謝辞：本研究では、東京大学生産技術研究所博士研究員であったNavaratnarajah SATHIPARAN氏により平成17年に行われた無補強・補強組積壁の面内方向圧縮試験の実験結果を使用しました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) Navaratnarajah SATHIPARAN, Paola MAYORCA, Kourosh Nasrollahzadeh NESHELI, Ramesh GURAGAIN and Kimiro MEGURO, Experimental Study on In-plane and Out-of-plane Behavior of Masonry Wall Retained by PP-band meshes, 生産研究 57, pp.530~533, 2005.
- 2) Kimiro MEGURO, Paola MAYORCA, Ramesh GURAGAIN, Navaratnarajah SATHIPARAN and Nasrollahzadeh NESHELI, Shaking Table Experiment of Masonry Buildings and Effectiveness of PP-band retrofitting Technique, 生産研究 57, pp.534~537, 2005
- 3) Meguro K. and Tagel-Din H.A new efficient technique for fracture analysis of structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure, IIS, The University of Tokyo, No.30, pp. 103-116, 1997.

Applied Element Analysis of Effects of PP-band Retrofit Method for Masonry Wall

Toshiaki SAKURAI, Muneyoshi NUMADA and Kimiro MEGURO

Retrofitting of low earthquake-resistant masonry structures is the key issue for earthquake disaster mitigation in developing countries to reduce the casualties significantly. When we propose the retrofitting method for developing countries, retrofitting method should respond to the structural demand on seismic capacity as well as to availability of material with low cost, and practicability of construction method in each region. Considering these issues, a technically feasible and economically affordable PP-band (polypropylene bands) retrofitting technique has been developed, and many different aspects have been studied by Meguro Laboratory. In this study, in order to discuss the effects of the size of PP-band mesh pitch on seismic capacity of masonry wall retrofitted by PP-band method numerical analysis was carried out by using 3-dimensional Applied Element Method (3D-AEM).