

PP-band 工法による石積み組積造壁の 耐震補強に関する実験的研究

櫻井 光太郎¹・Navaratnarajah SATHIPARAN²・目黒 公郎³

¹東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 生産技術研究所Be-604)

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

²東京大学生産技術研究所博士研究員 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 生産技術研究所Be-602)

E-mail: sakthi@risk-mg.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

発展途上国における甚大な地震被害の主な理由として、無補強組積造住宅の倒壊が挙げられる。本研究では、組積造住宅の中でも工学的な扱いがもっとも困難な、整形されていない石積み組積造の耐震補強として、PP-band工法の適用性を検討する基礎的な実験を行う。PP-band工法とは、通常は荷造りに使われるポリプロピレン (polypropylene) 製の紐であるPP-bandを用いた安価で施工が簡単な工法で、かつ現地の人々の生活スタイルに影響を及ぼさない、local acceptability を満足する耐震補強法である。PP-bandは安く世界中で入手可能な材料で、耐久性・加工性に優れているなど様々な利点がある。またPP-band工法は新設構造物だけではなく既存構造物にも適応可能な特徴を持っている。

Key Words : masonry, stone masonry, PP-band (polypropylene-band), retrofitting technology, local availability, diagonal compression test, out-of-plane test

1. はじめに

途上国を中心に世界中で建設されている組積造住宅は、地震に対して非常に脆弱であり、その倒壊によって甚大な被害を繰り返し引き起こしてきた。今日においても、組積造住宅は世界でもっとも利用されている住居形式である。地震防災を世界規模で考えた場合、組積造住宅の耐震補強が最重要課題であることは疑いがないが、技術や経済的な問題などから、組積造住宅の耐震補強はほとんど推進されていない。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るものである。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。また、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¹⁾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) を開発した。PP-band 工法とは、メッシュ状に

組んだ PP-band で組積造壁を内外から包み込むことによって壁に一体性を持たせ、組積造住宅の倒壊を防ぐものである。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悪影響を及ぼさないという特徴がある。目黒ら²⁾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。しかし組積造住宅は多種多様であり、すべてのタイプの組積造に対しての効果が検証されたわけではない。特に途上国の山岳地帯や石が豊富な地域では、レンガやアドベではなく石を材料とした石積み組積造住宅が建設されているが³⁾、提案されている PP-band 工法の石積み組積造住宅に対する効果は未確認である。

そこで本研究では、石積み組積造の中でも整形されていない石を用いた石積み組積造 (以下では不整形石積み組積造と呼ぶ) を対象に、その基本的な力学的挙動を理解するため材料試験として、せん断試験、引張り試験、圧縮試験を行った。さらに石積み組積造への PP-band 工法の適用性を検証するために、石積み組積造壁を 1/4 スケールでモデル化した無補強供試体と PP-band 補強供試体を準備し、面内圧縮試験と面外水

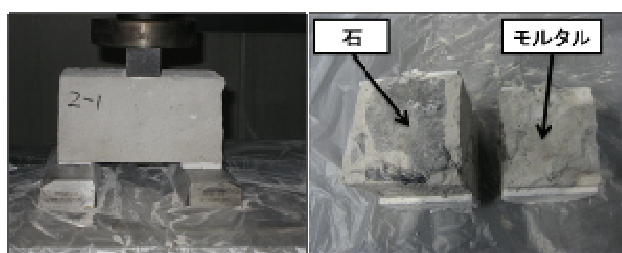
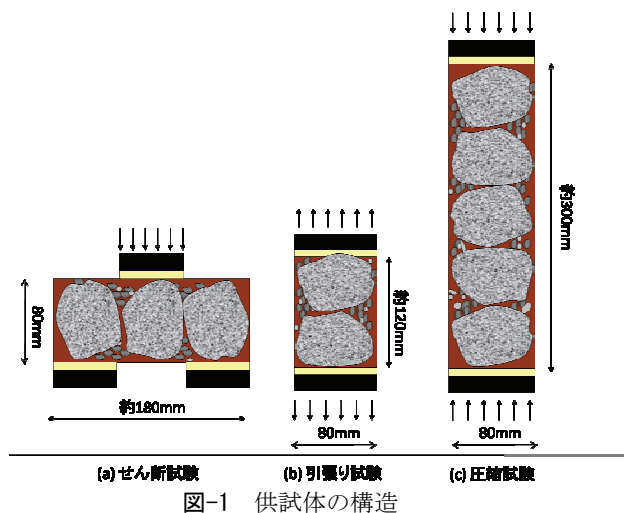


表-1 石積み組積造の強度

せん断強度	0.0596 MPa
引張り強度	0.0237 MPa
圧縮強度	0.6814 MPa

平載荷試験を行った。

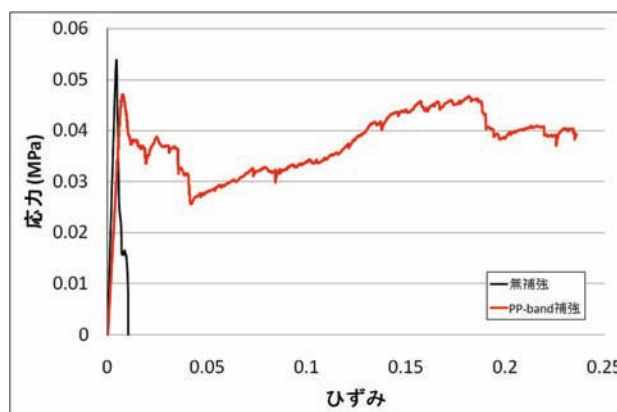
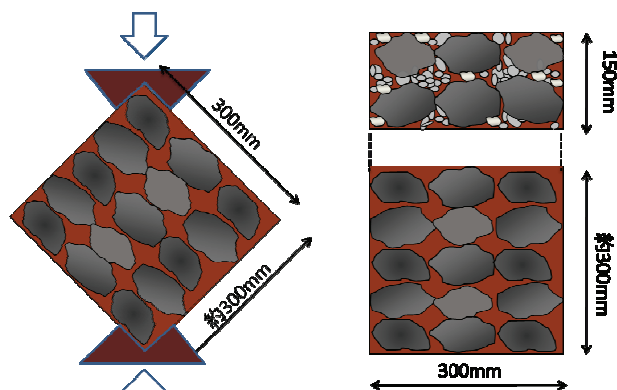
2. 材料試験

(1) 実験の概要

図-1 に各試験の供試体の構造を示す。供試体は 60mm から 80mm 程度の大きさを持つ一号砕石を使用し、これをモルタルで接合してつくった。モルタルはセメント、石灰、砂、水を重量比で 1 : 5.25 : 14 : 5 の割合で配合してつくった。またセメント・水比は 0.20 である。さらに、途上国の石積み組積造を再現するために一号砕石どうしの間隙に 10mm 程度の大きさを持つ砂利を詰めた。一号砕石の数はせん断試験供試体では 3 つ、引張り試験供試体では 2 つ、圧縮試験供試体では 5 つとした。各試験ごとに 5 つの供試体を作成し実験を行った。なお、実験実施時の供試体の材齢は 28 日である。

(2) 実験結果

組積造の破壊形態は、レンガや石などの要素と要素をつないでいるモルタル目地の破壊と、モル



タル目地と要素が剥離する破壊形態が主である。要素そのものが破壊する形態は、アドベなどの強度の低い組積造の場合に限られる。

せん断試験の結果、石積み組積造の破壊形態は要素とモルタルの界面の剥離であることがわかった。図-2にせん断試験後の供試体を示す。この破壊形態は、目地であるモルタル自体の強度よりも界面の強度が低いことを原因として起きる。表-1に各試験で得られた強度の平均値を示す。

3. 面内圧縮試験

(1) 実験の概要

PP-band工法による石積み組積造住宅の耐震補強の有用性を評価するため、面内圧縮試験を行った。供試体は石積み組積造住宅の壁をモデルとして、1/4スケールで作成した。寸法は、長さ300mm、高さ約300mm、厚み150mmであり、それぞれの方向に一号砕石を3つ、5つ、2つ配置している。石の配置を図-3に示す。なお、石の大きさが均一ではないために供試体の高さに10数mmの違いがでた。モルタルはセメント、石灰、砂、水を重量比で 1 : 7.3 : 18.7 : 6.67 の割合で配合してつくった。なお、セメント・水比は0.15である。

準備した供試体は無補強供試体とPP-band 補強供



図-5 载荷試験後の供試体（左：無補強供試体，右：PP-band補強供試体）

試体に加え，PP-band 補強後に厚さ10mmのモルタルを被覆した供試体の3種類である．なお，実験実施時の供試体の材齢は28日で，载荷速度は载荷開始から変位10mmまでは0.5 mm/分，変位50mmまでは2mm/分，変位100mmまでは5mm/分とした．

(2) 実験結果

図-4の応力-ひずみ曲線は，無補強供試体とPP-band補強供試体の挙動を示している．無補強供試体はクラックの発生とともに強度が急激に減少し，その後は強度の回復がなく，1.1%の鉛直ひずみで破壊した．PP-band補強供試体に関しては，最初のクラックまでは無補強供試体とほぼ同じ挙動を示すが，その後はPP-bandメッシュの効果により降伏時の強度低下が初期強度の64%で止まり，その後は強度が増加する．ひずみが大きくなる過程では，鉛直ひずみ10%において初期強度の95%を，鉛直ひずみ20%においては初期強度の92%を保持するに至った．最大では初期強度の126%の強度を発揮し，24%の鉛直ひずみを与えても一体性を保った．変形能は少なくとも無補強供試体の21倍に向上した．図-5は载荷試験後の供試体であり，左の無補強供試体は鉛直ひずみ1.1%を与えたもので，右のPP-band 補強供試体は鉛直ひずみ24%を与えたものである．

ひずみが大きくなる過程で，PP-bandメッシュが供試体に食い込む現象が確認された．これによって降伏後の強度増加が抑制されたが，実物の石積み組積造住宅をPP-band工法で耐震補強する際は，本実験で使用したPP-bandの4倍程度の幅のPP-bandを用いる．よって，PP-bandメッシュの石積み組積造住宅への食い込みは抑制され，さらなる強度増加が期待される．

図-6は，PP-band補強供試体とPP-band補強をした上からモルタルを10mmの厚さで被覆した供試体を比較したものである．PP-band補強供試体は，降伏時にPP-bandメッシュの効果で初期強度の64%の強度を確保したが，PP-band補強+モルタル被覆の供試体では降伏時に初期強度の77%の強度を確保した．この効果は，PP-bandメッシュの上からモルタルを被覆することでPP-bandメッシュの拘束力が高まったことによる．PP-bandメッシュの上からモルタルや泥を上塗りすることで，PP-band工法の耐震補強効果をさらに向上可能なことがわかった．

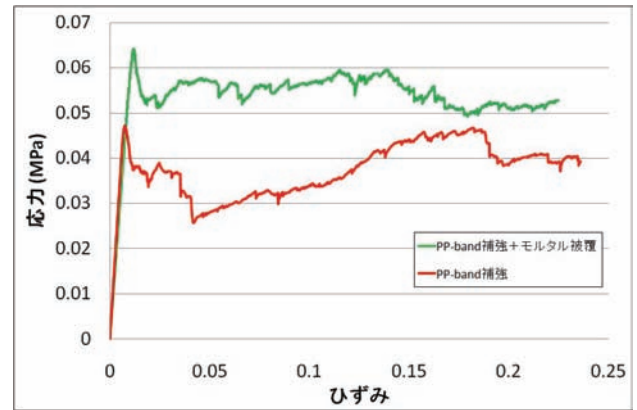


図-6 モルタル被覆を施した供試体の挙動

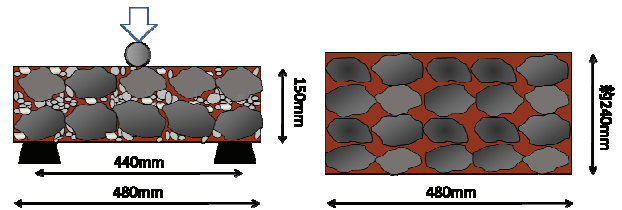


図-7 石の配置

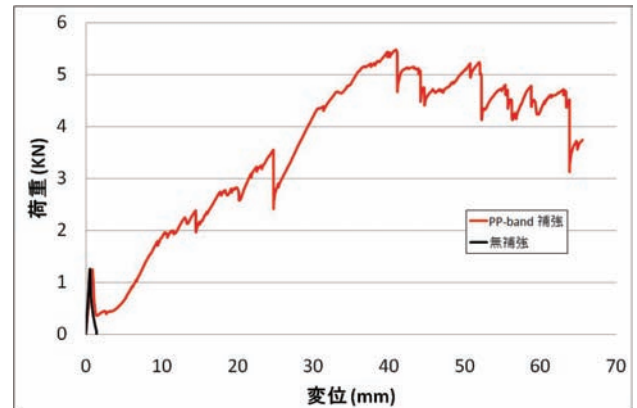


図-8 無補強供試体とPP-band補強供試体の比較

4. 面外水平载荷試験

(1) 実験の概要

面外水平载荷試験の目的は，石積み組積造の壁に面外方向の力が作用したとき，PP-bandメッシュがどのような効果を発揮するかを検証することである．供試体は石積み組積造住宅の壁をモデルとして，1/4スケールで作成した．寸法は長さ480mm，高さ約240mm，厚み150mmであり，それぞれの方向に一号碎石を5つ，4つ，2つ配置している．石の配置を図-7に示す．なお，石の大きさが均一ではないために供試体の高さに10数mmの違いがでた．モルタルはセメント，石灰，砂，水を重量比で1：4：11.2：4の割合で配合してつくった．セメント・水比は0.25である．試験の载荷速度は载荷開始から変位6mmまでは0.5mm/分，変位65mmまでは2mm/分とした．



図-9 試験後の供試体（左：無補強供試体，右：PP-band補強供試体）

（２）実験結果

図-8の応力－ひずみ曲線は，無補強供試体とPP-band補強供試体の挙動を示している．無補強供試体はクラックの発生とともに強度が急激に減少し，その後は強度の回復がなく1.4mmの変位で破壊した．PP-band補強供試体は，PP-bandメッシュの効果により降伏時の強度低下が初期強度の33%で止まり，その後は強度が増加する．ひずみが大きくなる過程では，変位10mmにおいて初期強度の131%を，変位20mmにおいては初期強度の188%の強度を示した．最終的に，PP-band補強供試体は62mmの変位を与えても一体性を保った．変形能は少なくとも無補強供試体の45倍に向上した．図-9は載荷試験後の供試体であり，左の無補強供試体は1.4mmの変位を，右のPP-band補強供試体は62mmの変位を与えたものである．

面外水平載荷試験では，面内圧縮試験と比べ降伏後に大きく強度が増加した．面内圧縮試験の供試体はセメント・水比が0.15のモルタルを使用しているのに対し，面外水平載荷試験の供試体はセメント・水比が0.25のモルタルを用いて作成しているので，PP-bandメッシュが供試体に食い込まず，大きな強度増加を実現した．

5. まとめ

本研究では不整形石積み組積造の基本的な力学的特性を知るため，材料試験としてせん断試験，引張り試験，圧縮試験を行った．また，PP-band工法による不整形石積み組積造の耐震補強の効果を検証するため，壁をモデル化した1/4スケールの無補強供試体とPP-band補強供試体を作成し，面内圧縮試験と面外水平載荷試験を行った．

（１）面内圧縮試験のまとめ

面内圧縮試験では，PP-bandメッシュの効果によって降伏時の強度低下が初期強度の64%で止まり，その後は強度が増加して最終的に初期強度の1.3倍の最大強度と，少なくとも無補強の21倍の変形能を記録した．また，PP-bandメッシュを取り付けた上からモルタルを被覆するとPP-bandメッシュの拘束力が上がり，初期強度の77%の強度を確保した．PP-bandメッシュの上からモルタルや泥を上塗りす

ることによって，さらにPP-band工法による耐震補強効果を向上させることが可能である．

（２）面外水平載荷試験のまとめ

面外水平載荷試験においても，PP-bandメッシュの効果によって降伏時の強度低下が初期強度の33%で止まり，その後は強度が増加して最終的に初期強度の2.9倍の最大強度と，少なくとも無補強の21倍の変形能を記録した．

参考文献

- 1) Paola MAYORCA and Kimiro MEGURO. Proposal of an efficient technique for retrofitting unreinforced masonry dwellings, Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C., Canada, Paper No.2431, 2004.
- 2) 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.
- 3) Marjana LUTMAN. STONE MASONRY CONSTRUCTION. (www.world-housing.net), アクセス日時2009年4月1日．
- 4) 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