

論文 直方型ブロック組積造壁とI型ブロック組積造壁の面内水平載荷試験の数値解析によるインターロッキング効果の検討

古川 愛子*1・八木 亮介*2・清野 純史*3

要旨：発展途上地域に多く建設されている組積造の補強方法として、直方型ブロックでなく凹凸のあるブロックを用いてブロック同士の噛み合い（インターロッキング機構）に期待する構造が提案されているが、その効果について十分な検証はなされていない。本研究では、まず、既往研究で行われた直方型ブロック組積造壁とI型ブロック組積造壁を対象とした静的載荷試験について、有限要素法を用いて再現解析を行った。解析の再現性を確認した上で、鉛直応力とブロックの強度および摩擦係数がインターロッキング機構を有する組積造壁の耐力および破壊性状に及ぼす影響を検討した。

キーワード：組積造壁、インターロッキング、引張強度、摩擦係数、耐力、破壊性状、有限要素解析

1. はじめに

世界の自然災害による死者の約60%は地震により亡くなっており、地震による死因の75%は建物の倒壊によるものとされている。犠牲者の大多数が、発展途上地域で多く建設されている耐震性の低い組積造の倒壊によって亡くなっている¹⁾。東アジア、中東、中南米などの発展途上地域で多く建設されている組積造は、煉瓦や石材などを積み上げることで建設され、地震の揺れに対して非常に脆弱であるが、材料が安価である点、施工が容易である点、断熱性や保湿性に優れているなどの理由のために、発展途上地域を中心に、今日においても世界中で建設されている。安価で施工のしやすい組積造の耐震補強方法が望まれている。

組積造の耐震補強方法に関する既往研究としては、鋼棒を用いたもの²⁾、強化繊維プラスチックを用いたもの³⁾、廃タイヤを用いたもの⁴⁾、荷造りで使われるポリプロピレン製の紐であるPP-bandを用いたもの⁵⁾などが提案されている。いずれも材料の引張抵抗に期待するものである。発展途上地域で普及させるには、材料が安価で入手容易な方法である必要があるが、PP-bandは材料を世界中で容易に入手することができ、施工も簡単であるため、発展途上地域において既に導入されている。

以上の耐震補強方法は、いずれも補強材を要する。これに対して、補強材を用いない方法の1つとして、ブロックの噛み合わせ（インターロッキング）を有する組積造壁⁶⁾が提案されている。噛み合い効果のあるブロック形状としてはI型が代表的である。インターロッキングの効果は、鉛直応力（上載荷重）によって異なると考えられるが、鉛直応力の影響を検討した研

究はほとんど例がない。また、ブロックの強度によってもインターロッキングの効果の度合いは異なると考えられるが、ブロックの材料強度（引張強度や摩擦係数）がインターロッキング組積造の耐震性能に及ぼす影響について、十分な研究はなされていない。

そこで本研究では、ブロックの材料強度や鉛直応力がインターロッキング機構を有する組積造壁の耐力および破壊性状に及ぼす影響について検討することを目的とする。まず、著者らのグループによって行われた直方型ブロックで構成される組積造壁と、I型ブロックで構成される組積造壁を対象とした静的載荷試験⁷⁾について、有限要素法を用いて再現解析を行った。解析の再現性を確認した上で、3通りの鉛直応力に対して、ブロックの引張強度と摩擦係数を変えた数値解析を実施し、鉛直応力と材料強度が組積造壁の耐力と破壊性状に及ぼす影響を検討した。

2. 水平載荷試験の再現解析

2.1 実験供試体のモデル化

本章では、2次元静的有限要素解析により、直方型ブロック組積造壁（以降、直方型）と、I型ブロック組積造壁（以降、I型）の2種類の組積造壁の水平載荷試験の再現解析を行うことで、数値解析の再現性を確認するとともに破壊メカニズムの検討を行った。数値解析には構造解析プログラム Marc を用いた⁸⁾。

解析モデルを図-1に示す。試験体は、12個のブロックで構成される幅24cm、高さ30cm、奥行き10cmの組積造壁であり、上下は鋼製治具で覆われている。解析では、ブロックを5mm×5mm四方程度、鋼製治具を10mm×10mm四方の平面応力要素でモデル化した。

*1 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻准教授（正会員）

*2 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻修士課程学生

*3 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻教授

表-1 解析パラメータ

	ブロック	鋼製治具
密度 (kg/m ³)	2100	7800
ヤング率 (N/m ²)	3.0×10 ⁹	2.0×10 ¹¹
ポアソン比	0.216	0.265
摩擦係数	0.438	
引張強度 (N/m ²)	5.8×10 ⁶	

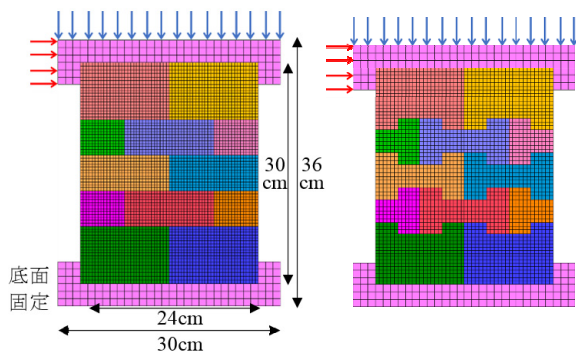
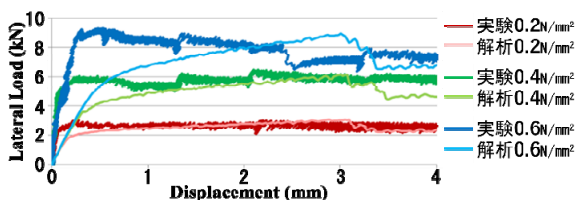
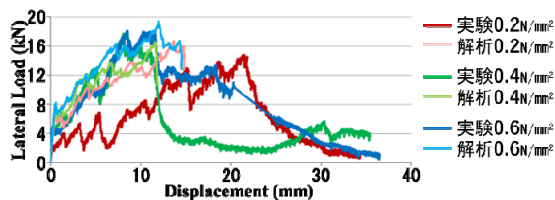


図-1 解析モデル (左: 直方型, 右: I 型)



(a) 直方型



(b) I 型

図-2 荷重-変位関係 (実験と解析の比較)

要素試験により求めた材料の物性値を表-1 に示す。ブロックの破壊は、ブロック内の隣り合う要素境界において発生すると仮定した。ブロックの要素は互いに節点を共有しないとした。初期状態において連続している要素間は接着状態とし、要素間の引張応力が表-1 に示す引張強度を上回ったときに要素境界で破壊するとした。破壊後に要素が再接触する場合や、元々連続していない要素同士が接触する場合、要素間は圧縮力と摩擦力にのみ抵抗するとした。ブロック間に目地材はないため、異なるブロックを構成する要素間では圧縮力と摩擦力にのみ抵抗するとした。ブロック間の摩擦力は、ブロック同士が接触しておりブロック間に圧縮力が働いているときのみ働き、ブロックが離れていて圧縮力が作用していない場合は0とした。鋼製治具を構成する要素は弾性体とした。ブロック自身は弾

性体とし、ブロックのヤング率は、ブロックの応力-ひずみ関係の初期勾配ではなく、応力が最大となる点と原点を結ぶ勾配とし、解析を通して一定の値としている。従って、ブロックが破壊しない直方型の再現解析ではヤング率を過小評価していることになる。本来はブロックの非線形の応力-ひずみ関係をモデル化することが望ましいが、ブロック間の接触のモデル化を伴う不安定な解析であるため、解析の安定のためブロックのヤング率を一定する単純なモデル化を行った。荷重-変位関係の初期勾配よりも最大水平荷重 (耐力) の再現性を優先することとし、応力-ひずみ関係の応力が最大となる点と原点を結ぶ勾配をヤング率とした。

境界条件は、底面の鋼製治具上の節点を固定とした。また実験では、2, 4, 6 階建ての建物の1階が受ける屋根荷重を想定し、鉛直応力が 0.2, 0.4, 0.6 N/mm² となるように、3 通りの強制変位を与えているため、解析でも上側鋼製治具の上面の節点に強制変位を与えた。水平方向は、実験では上側の鋼製治具の左側側面に漸増強制変位を与えたことから、解析でも上側鋼製治具の左側側面上の節点に漸増強制変位を与えた。そして、水平変位を与えた節点の水平反力を足し合わせることで、水平荷重-水平変位関係を求めた。

実験では、2 台の高速度カメラにより試験体を撮影し、画像計測により面内のひずみ分布を計測している。

2.2 実験結果と解析結果の比較

(1) 水平荷重-水平変位関係

図-2(a) に直方型の水平荷重-水平変位関係の比較を示す。直方型の実験では、比較的小さな水平変位において最大水平荷重 (耐力) が発生した。最大水平荷重に達した後は、ブロックは横滑りをするだけで、ブロックは破壊せず、水平荷重はほぼ一定であった。全ての鉛直応力のケースにおいて、解析は最大荷重を概ね再現できている。解析の初期勾配が実験より小さくなっているのは、ブロックのヤング率を、応力-ひずみ関係の初期勾配ではなく、応力が最大となる点と原点を結ぶ勾配を用いており、ブロックが破壊しない直方型においてはヤング率を過小評価しているためと考えられる。なお、ブロックのヤング率を大きくした解析により、荷重-変位関係の初期勾配が増加することを確認している。最大水平荷重は鉛直応力に比例して増加しており、ブロック間に目地材のない直方型の耐力は、摩擦力によって支配されていることがわかる。

図-2(b) に I 型の水平荷重-水平変位関係の比較を示す。解析では、最大荷重に達するまでを再現することを目標としたことから、鉛直応力が 0.2 N/mm² のときは水平変位が 14.82 mm まで、0.4 N/mm² のときは 11.88 mm まで、0.6 N/mm² のときは 14.60 mm までの結

果を示している。すべての鉛直応力のケースにおいて、最大水平荷重の大きさは概ね再現できている。また 0.2 N/mm^2 を除いて、グラフの勾配に関しても概ね一致している。 0.2 N/mm^2 の試験体は、ブロック間に隙間があり、 0.4 N/mm^2 や 0.6 N/mm^2 の試験体に比べて変位が大きくなったのではないかと考えている。ブロック間に隙間がない場合は水平荷重直後から噛み合い水平荷重に抵抗するが、隙間がある場合は水平方向にずれながらブロックが噛み合うために水平変位が大きくなり、勾配が小さくなったのではないかと考える。最大水平荷重が鉛直応力に比例した直方型と違い、I型の水平荷重は鉛直応力の影響が小さく、ブロック間の噛み合いにより水平荷重に抵抗していることがわかる。

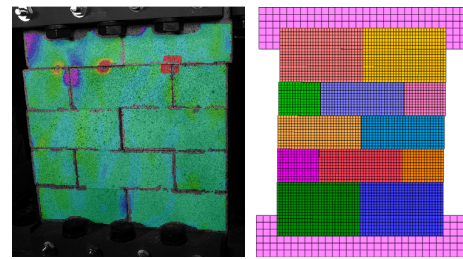
(2) ブロックの破壊状況

図-3 は、 4 mm 水平変位したときの直方型ブロックの状況を、実験結果と解析結果を比較したものである。実験結果は、画像計測による水平方向ひずみ分布であり、紫は圧縮ひずみ、赤～黄色は引張ひずみ、緑色はひずみが生じていないか小さいことを示している。試験体左上の紫色は、水平荷重により水平方向に圧縮ひずみが生じている様子を示している。局所的なひずみが見られるものの、ほとんどのブロックにひずみは生じていないことがわかる。ブロックの挙動に着目すると、鉛直応力の大きさに関係なく、実験では、一番上のブロックが上から2段目のブロックに対して横滑りしているのが見てとれる。解析では、全ての段で上下のブロック間に水平ずれが生じた。実験も解析も、ブロックに破壊は生じなかった。直方型はブロック間の摩擦力によって水平力に抵抗しており、水平力が摩擦力を上回ったときに横滑りが生じていると考えられる。実験と解析では、横滑りの生じる箇所に違いが見られるが、ブロックが破壊せず、ブロック間の水平ずれが生じている様子を再現することができた。

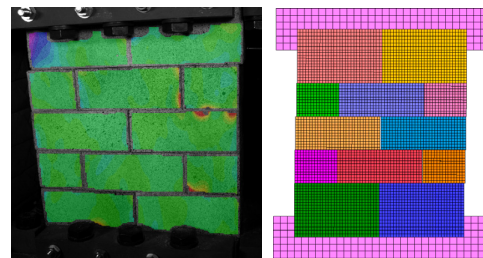
図-4 は、解析で再現できた最大水平変位におけるI型のブロックの状況を、実験結果と解析結果とで比較したものである。図-4の左図は実験時の水平方向ひずみも示しており、噛み合い部においてくびれている側に大きな引張ひずみ（赤～黄色）が生じており、ブロックの噛み合いによって水平力に抵抗している様子が確認できる。実験と解析の比較から、ブロックの噛み合い部にてブロックに破壊が生じている様子、概ね対角線上に破壊が進展している様子が再現できている。

(3) 最大主応力分布

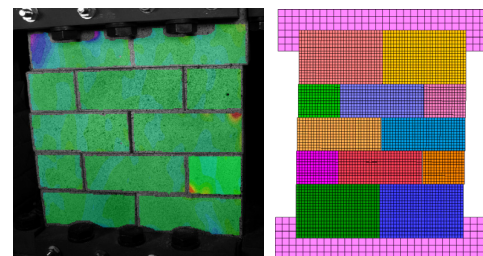
図-5 左側の図は、直方型の最小主応力（圧縮応力）分布である。水平荷重を与えた左上から右下に向かって、圧縮応力が生じているが、図-5 右側のI型に比べるとその値は小さいことが見てとれる。



(a) 初期鉛直応力 0.2 N/mm^2 (水平変位 4 mm)

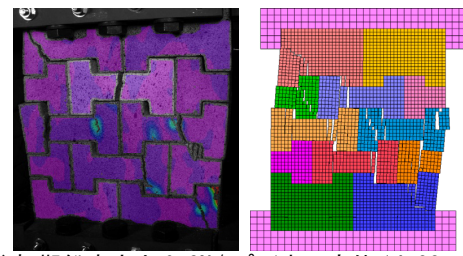


(b) 初期鉛直応力 0.4 N/mm^2 (水平変位 4 mm)

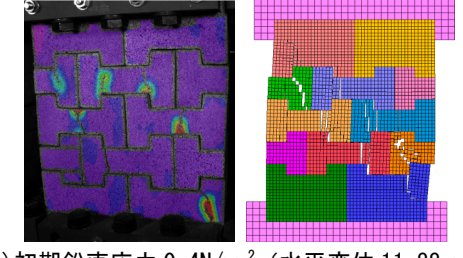


(c) 初期鉛直応力 0.6 N/mm^2 (水平変位 4 mm)

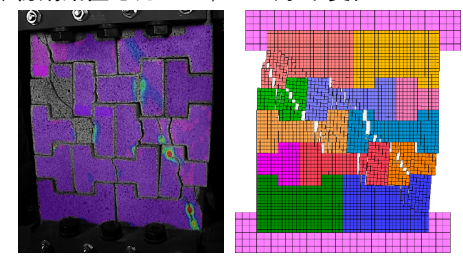
図-3 直方型の破壊挙動 (左: 実験, 右: 解析)



(a) 初期鉛直応力 0.2 N/mm^2 (水平変位 14.82 mm)

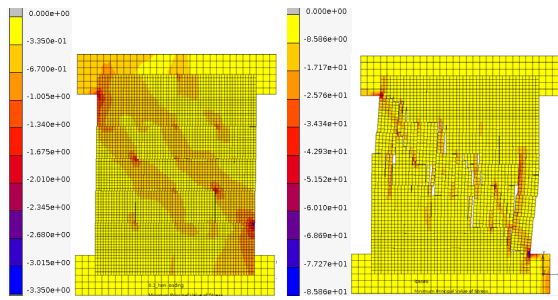


(b) 初期鉛直応力 0.4 N/mm^2 (水平変位 11.88 mm)

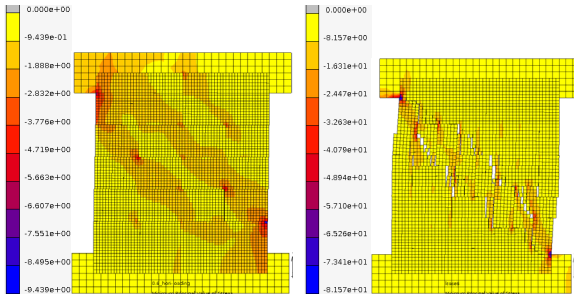


(c) 初期鉛直応力 0.6 N/mm^2 (水平変位 14.60 mm)

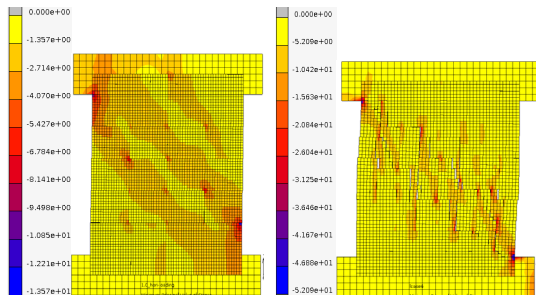
図-4 I型の破壊挙動 (左: 実験, 右: 解析)



(a) 初期鉛直応力 0.2N/mm² (左：直方型，右：I型)



(b) 初期鉛直応力 0.4N/mm² (左：直方型，右：I型)



(c) 初期鉛直応力 0.6N/mm² (左：直方型，右：I型)

図-5 最大水平荷重時の最小主応力（圧縮応力）分布

表-2 解析ケース

ケース	着目量	引張強度(N/m ²)	摩擦係数
1	基準	5.80	0.438
2	ブロックの 引張強度	2倍 (11.6)	0.438
3		0.5倍 (2.90)	
4	ブロック間 の摩擦係数	5.80	2倍(0.876)
5			0.5(0.219)

図-5の右図は、I型の最小主応力（圧縮応力）分布を示したものである。I型では、ブロック同士が噛み合うところで応力集中が生じており、ブロックが破壊し易くなっていることが見てとれる。

2.3 再現解析のまとめ

以下の3点に着目して、解析による実験結果の再現性について考察する。

- ・荷重－変位関係における最大耐力・勾配
- ・破壊モード

最大耐力に関しては、直方型、I型の全ての鉛直荷

重条件において、実験と解析結果が概ね一致した。

勾配に関しては、直方型の全てのケースで、実験に対して解析は小さい勾配を示した。それに対して、I型では0.2 N/mm²のケースを除いて概ね実験と一致した。直方型の勾配を過小評価した理由は、ブロックのヤング率を、応力－ひずみ関係において応力が最大となる点と原点を結ぶ勾配を用いており、ヤング率を一定にして解析を行ったことで生じたと考えられる。実際のブロックの応力－ひずみ関係は非線形であることから、非線形の応力－ひずみ関係をモデル化することで、荷重－変位関係の傾きは修正できると考えられる。

破壊モードについては、直方型ではブロック自身は破壊せず上下のブロック間に水平ずれが生じるモードであること、I型についてはブロック同士の噛み合いによって対角線上にひび割れが生じるモードであることを再現することができた。

以上のことから、勾配において改善点があるものの、最大耐力および破壊モードについては概ね良好な精度で再現することができたと考えられる。

3. 鉛直応力および材料強度の影響に関する検討

3.1 概説

本章では、前章で述べた再現解析のモデルを用いて、鉛直応力およびブロックの材料強度（引張強度、摩擦係数）が組積造壁の耐力および破壊性状に及ぼす影響に関する検討を行う。

3.2 解析ケース

解析ケースは、表-2に示す5通りである。ケース1を基準とする。ケース2, 3ではブロックの引張強度、ケース4, 5ではブロック間の摩擦係数の影響を検討する。鉛直荷重に関しては、2, 6, 10階建て建造物を想定し、それぞれ鉛直応力0.2, 0.6, 1.0 N/mm²とする。

3.3 解析結果（引張強度の影響）

ケース毎に荷重－変位関係を比較する。まず図-6に、ケース1の結果を示す。直方型の耐力は鉛直応力にほぼ比例しているが、I型の耐力は鉛直応力の影響が小さい。次に、ケース1の2倍の引張強度で解析を行ったケース2の結果を図-7に示す。ケース1の0.5倍の引張強度で解析を行ったケース3の結果を図-8に示す。

直方型は、ケース1, 2, 3がほぼ同じ結果となり、摩擦力により水平力に抵抗する直方型は、鉛直応力の影響を受けやすく、引張強度の変化の影響を受けにくいことがわかった。

対してI型は、全ての鉛直応力において、ケース2ではケース1の2倍程度、ケース3では半分程度の耐力となっている。I型は引張強度の変化の影響を受けやすいことがわかった。

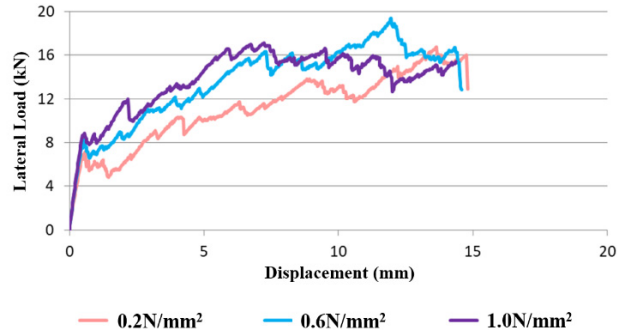
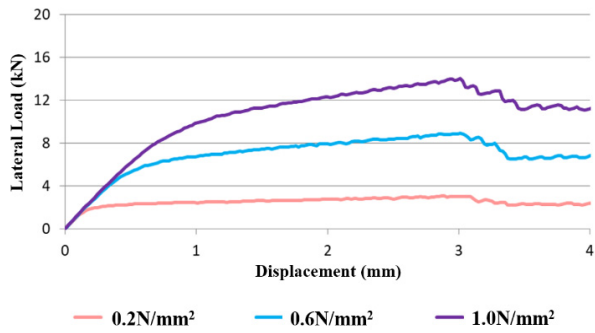


図-6 ケース 1 (基準, 左: 直方型, 右: I 型)

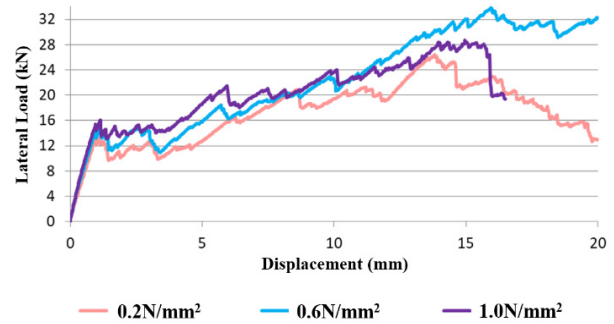
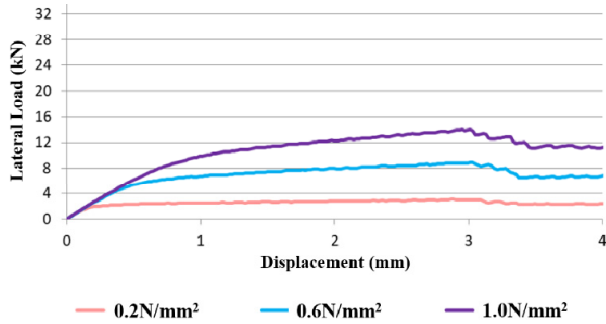


図-7 ケース 2 (強度 2 倍, 左: 直方型, 右: I 型)

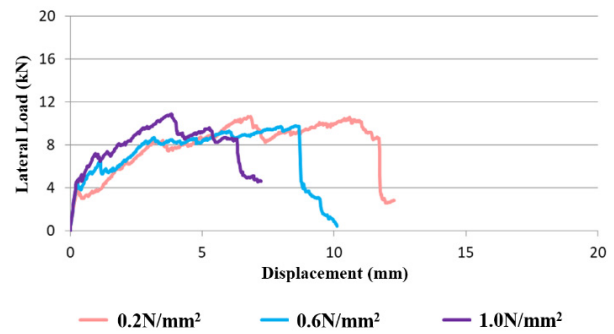
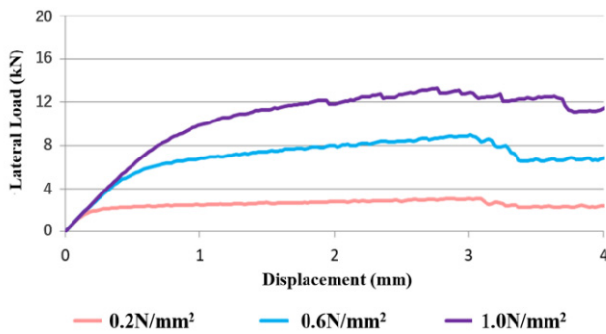


図-8 ケース 3 (強度 0.5 倍, 左: 直方型, 右: I 型)

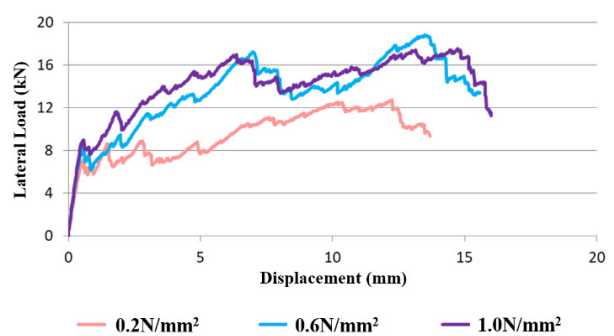
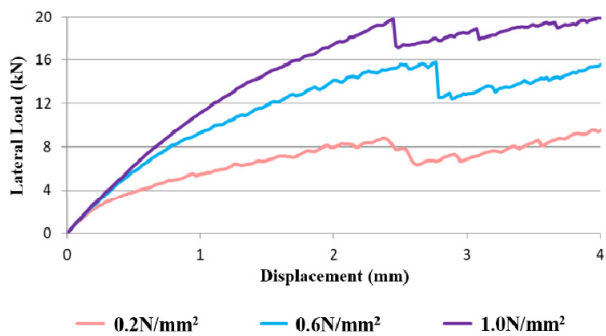


図-9 ケース 4 (摩擦係数 2 倍, 左: 直方型, 右: I 型)

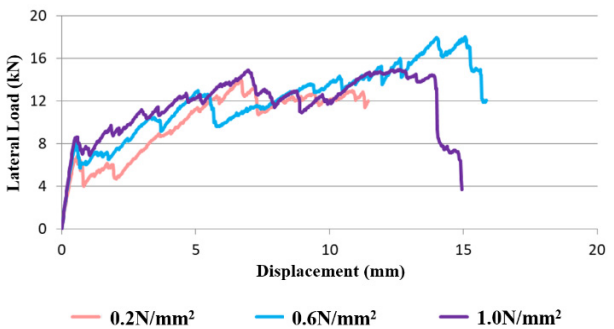
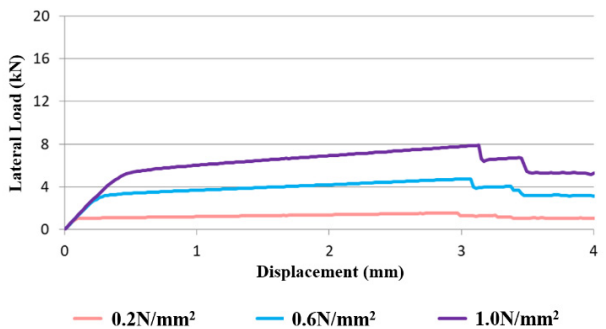


図-10 ケース 5 (摩擦係数 0.5 倍, 左: 直方型, 右: I 型)

3.4 解析結果（摩擦係数の影響）

ケース1の2倍の摩擦係数で解析を行ったケース4の結果を図-9に示す。直方型は、全体的に摩擦係数の影響を受けており、特に鉛直応力の小さい場合に、大きく強度が上昇している。I型は摩擦係数の影響をあまり受けていない。鉛直応力1.0N/mm²に関しては、直方型はI型の最大耐力を上回っている。また、直方型はI型に比べて、最大耐力に達した後もある程度の強度を保っている。ただし、図は省略するが摩擦力が大きくなったことによって応力が大きくなり、途中でブロックに亀裂が生じた。

次に、ケース1の0.5倍の摩擦係数で解析を行ったケース5の結果を図-10に示す。直方型は摩擦係数の影響を大きく受けており、ケース1のおよそ半分の耐力となった。I型は、摩擦係数の影響をあまり受けておらず、全体的に耐力が直方型を上回っている。

I型は、鉛直応力0.2N/mm²では、摩擦係数2倍のときは0.5倍のときより最大耐力が低下している。これは、摩擦係数が大きくなったことによって、摩擦力に起因する応力が増加し、破壊が生じやすくなったためと考えられる。一方、鉛直応力1.0N/mm²では、摩擦係数2倍のときは0.5倍のときより最大耐力が増加しており、摩擦力により破壊が抑制されている。I型の場合、摩擦係数の増加は最大耐力を増加させる場合も減少させる場合もあることがわかった。

以上より、直方型は、摩擦係数の影響を大きく受けており、摩擦係数と最大耐力はほぼ比例関係となっていることがわかった。対してI型は、摩擦力の影響をあまり受けていないが、摩擦力により最大耐力が増加する場合も減少する場合もあることがわかった。

3.5 解析結果のまとめ

直方型の組積造壁は、摩擦力の影響を大きく受け、I型の組積造壁は、ブロックの引張強度の影響を大きく受けることがわかった。直方型では鉛直荷重が増加すると、耐力も比例的に増加する傾向にあるが、I型では鉛直荷重が増加しても最大耐力が増加するとは限らず、鉛直応力の増加により噛み合い部のブロックが早いタイミングで破壊する場合もあることがわかった。

2階建ての組積造の1階の壁のように、組積造壁が受ける鉛直応力が小さいケースでは、直方型よりI型組積造壁の方が耐力の大きいこと、引張強度の大きいI型ブロックを用いることによる耐力向上が期待できることがわかった。一方、階数の高い組積造の低層階の壁のように、組積造壁が受ける鉛直応力が大きいケースでは、噛み合いの効果は相対的に小さくなり、ブロックの引張強度の低い場合はI型よりも直方型の方が耐力の高いことがわかった。

4. 結論

本研究では、直方型ブロックから構成される組積造壁とI型ブロックから構成される組積造壁の有限要素解析により、インターロッキングの効果を検討した。3通りの鉛直応力に対して、ブロックの引張強度を0.5倍、1倍、2倍したとき、摩擦係数を0.5倍、1倍、2倍したときの解析結果を比較することで、ブロックの引張強度と摩擦係数が、組積造壁の耐力に及ぼす影響を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- ・直方型の耐力は、摩擦係数の大きさに概ね比例し、摩擦係数の影響を大きく受けること、引張強度の影響をほとんど受けないことが分かった。
- ・I型の耐力は、引張強度の影響を大きく受けること、摩擦係数の影響は小さいことがわかった。
- ・鉛直応力が増加すると摩擦力が増加するため、直方型の耐力が大きくなることがわかった。

非線形の応力-ひずみ関係のモデル化や、ブロック間の目地材の強度の影響など検討が今後の課題と考えている。

参考文献

- 1) OCHA (Office for the Coordination of Humanitarian Affairs): <http://www.unocha.org/> (2018年1月参照)。
- 2) Darbhanzi, A., Marefat, M. S. and Khanmohammadi, M.: Investigation of in-plane seismic retrofit of unreinforced masonry walls by means of vertical steel ties, *Construction and Building Materials*, Vol. 52, pp. 122-129, 2014.
- 3) Marcari, G., Manfredi, G., Prota, A. and Pecce, M.: In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP, *Composites: Part B*, Vol. 38, pp. 887-901, 2007.
- 4) Turer, A. and Golalm, M.: Scrap tire as low-cost post tensioning material for masonry strengthening, *Materials and Structures*, Vol. 41, pp. 1345-1361, 2011.
- 5) 櫻井光太郎, Navaratnarajah SATHIPARAN, 目黒公朗: PPband 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, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, 3-0053, 2009.
- 6) 真田靖士, 中村友紀子, 山内成人, 崔琥, 中埜良昭: 枠組組積造壁の水平力抵抗機構から推察される無補強組積造建築の高耐震化技術, 日本建築学会論文集, 第605号, 159-166, 2006.
- 7) Johanes Jefry Prasetyo : Study on the load-deformation performance of interlocking brick walls during lateral loading, 京都大学工学部地球工学科卒業論文, 2017.
- 8) MSC. Software Corporation : Experimental Elastomer Analysis, 2010.