

インターロッキングブロックの形状が 組積造壁の荷重-変位関係および破壊挙動に及ぼす影響

Shape effect of interlocking blocks on force-displacement relationship and failure behavior of masonry walls

古川愛子[†], 増田景也*, Gerry Tri Satya Daru**, 清野純史***

Aiko Furukawa, Keiyo Masuda, Gerry Tri Satya Daru, Junji Kiyono

[†]博 (工), 京都大学大学院准教授, 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

*修 (工), 株式会社大林組 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

**元京都大学学生, 工学部地球工学科国際コース (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

***博 (工), 京都大学大学院教授, 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

Diagonal compression tests of masonry walls made of interlocking blocks with various shapes were conducted. I-shaped blocks with right angle, I-shaped blocks with obtuse angle, hourglass-shaped blocks with straight edge, and hourglass-shaped blocks with wavy edge were compared. It was found that the masonry walls made of hourglass-shaped blocks have larger strength and those made of I-shaped blocks have less. The finite element analysis was conducted to understand the mechanism. It was found that the walls with I-shaped blocks have less strength due to stress concentration at the interlocking part. It was also found that the walls with hourglass-shaped blocks have larger strength but larger displacement due to dislocation and rotation of blocks.

Key Words: interlocking block, shape, force-displacement relationship, failure behavior

キーワード: インターロッキングブロック, 形状, 荷重-変位関係, 破壊挙動

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, 地震による死者の大多数は開発途上地域に多く建設されている耐震性の低い組積造構造物の倒壊により亡くなっている¹⁾. 組積造構造物は煉瓦や石材などを積み上げることで建設され, 地震動の揺れに対して非常に脆弱である. しかしながら, 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, 開発途上地域を中心に, 今日においても世界中で建設されている. 人的被害軽減のためには, 組積造構造物の耐震性向上が重要であり, 安価で施工容易な組積造構造物の耐震補強方法が望まれている.

組積造構造物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り, 補強材を要する. 経済的な理由で脆弱な組積造構造物が住み続けられていることを鑑みると, 耐震補強方法も安価である必要があり, 補強材はできるだけ安価であることが望ましい.

補強材を全く用いない組積造構造物の耐震対策に関する研究も行われている. 凹凸のある煉瓦同士の噛み合い (インターロッキング) を利用したものであり⁶⁾, 補強材を用いることなく煉瓦に所定の加工を施すだけで, 従来の組積造壁を上回る耐震性能を期待するものである.

中村らは⁶⁾, 直方体煉瓦を積み上げた組積造壁と I 型煉瓦を積み上げた組積造壁を用い, 面内方向への正負交番載荷試験を行い, インターロッキングによる耐震性向上効果について検討を行った. その結果, I 型煉瓦の組積造壁は直方体煉瓦の組積造壁よりも水平耐力が 1.5 倍以上も上回ることを確認した. しかし, I 型煉瓦の組積造壁では, 噛み合い部分に局所的な応力集中が発生し, 部材角 1/200 程度以降では大きく耐力が降伏したことも報告している. インターロッキングによる効果は限定的

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: furukawa.aiko.3w@kyoto-u.ac.jp

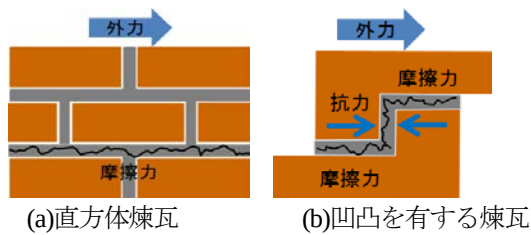


図-1 目地破壊後の抵抗力の比較

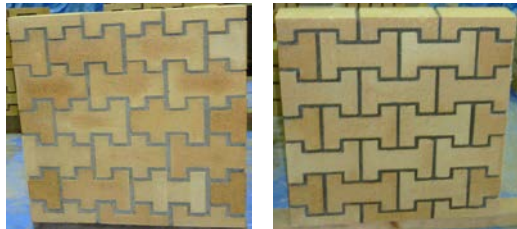


図-2 先行研究で用いた組積造壁試験体

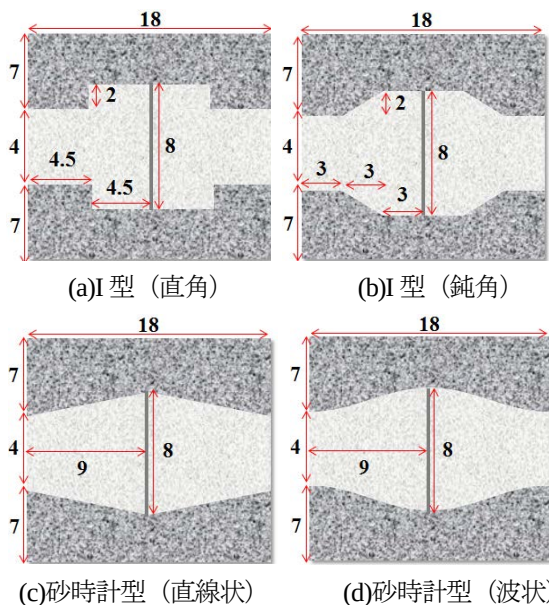


図-3 試験体の寸法 (単位 cm, 奥行きは 6cm)

であったが、水平耐力の向上には成功したことが報告されている。

木村⁷⁾は、直方体煉瓦から構成される 2 種類の組積造壁と、「土」および「I」の形状をした凹凸のある煉瓦から構成される 2 種類の組積造壁、計 4 種類の組積造壁に対して斜め圧縮試験を実施して、破壊挙動と荷重-変位関係を調べ、凹凸のある煉瓦を用いることで耐力を向上できるかどうかを調べた。その結果、煉瓦同士の噛み合い部分に破壊が生じて、凹凸のある煉瓦の組積造壁の方が耐力が小さくなる傾向が確認された。静的有限要素解析により検討した結果、噛み合い部に応力集中が生じて破壊し易くなっていることがわかった。

以上の問題点を踏まえ、本研究では、凹凸の形状を見直し、応力集中の生じにくい噛み合い形状にすることで耐力を向上できないかと考えた。具体的には、I 型煉瓦でも角度を直角でなく鈍角にしたり、砂時計型のようなならかな形状にすることで、噛み合い効果は低減する

ものの応力集中を軽減し、耐力を向上できないかと考えた。これを検証するため、I 型 (直角)、I 型 (鈍角)、砂時計型 (直線状)、砂時計型 (波状) の 4 通りのブロックから構成される組積造壁試験体を作成し、斜め圧縮試験を実施し、ブロックの形状によって荷重-変位関係と破壊形態がどのように変化するかを調べる。また、2 次元静的有限要素解析により、ブロックの形状を変えることで応力集中が軽減され耐力が向上するメカニズムについて分析を行うことを目的とする。

2. 斜め圧縮試験

2.1 試験体概要

(1) インターロッキングを利用した組積造壁

組積造構造物は、直方体の煉瓦をモルタル等の目地材を用いて積み上げるのが一般的である。組積造構造物では一般に、目地で破壊が発生・進展する。直方体の煉瓦では、例えば図-1(a)のように目地が破壊すると、摩擦力以外の抵抗を失うため、非常に脆弱な状態となる。

組積造構造物の耐力向上策として、凹凸を有する煉瓦を用いて、煉瓦同士の噛み合わせ (インターロッキング) を利用する方法が研究されている。煉瓦が破壊しないと仮定すれば、目地で破壊が生じて、煉瓦同士の噛み合いにより、摩擦力に加えて図-1(b)のように抵抗力が発生する。この抵抗力により、組積造構造物全体としての耐力を向上できるのではないかと考えられている。

(2) 先行研究で明らかになったこと

木村⁷⁾は、図-2 に示す「土」および「I」の形状をした土型と I 型の煉瓦を積み上げた組積造壁と、直方体煉瓦を積み上げた組積造壁の試験体を作成し、斜め圧縮試験を実施した。その結果、直方体煉瓦から構成される組積造壁は主に目地で破壊が生じるのに対し、土型や I 型のように噛み合いのある組積造壁は煉瓦にも破壊が起こり、耐力向上効果を確認できなかった。2 次元有限要素解析の結果、噛み合い部分に応力集中が発生し、煉瓦が破壊し易くなっていることが原因であると判明した。

(3) 本研究で用いる組積造壁試験体

本研究では、応力集中の生じにくい形状のブロックを用いることで、耐力を向上できないかと考えた。そこで、図-3 に示す、I 型 (直角)、I 型 (鈍角)、砂時計型 (直線状)、砂時計型 (波状) のブロックから構成される 4 通りの組積造壁を比較する。組積造壁の寸法はいずれも、高さ 18cm、幅 18cm、奥行き 10cm であり、上段、中段左、中段右、下段の 4 つのブロックから構成される。ブロックの数が多くと破壊箇所の候補が多くなり現象が複雑になるため、現象を単純化するためにブロックの数は 4 つとした。

ブロック形状の影響を調べるには、形状以外のばらつき (個々のブロックの物性値・強度のばらつき等) を極力抑える必要があるが、煉瓦の場合は窯のどこの位置で

焼かれたかによって物性値や強度がばらつくことがわかり、テストピースの圧縮強度で最大 1.35 倍、ヤング率で最大 2.55 倍も異なったので、煉瓦の代りにモルタルブロックを使用することとし、ブロックの数だけ型枠を作成し、同時に打設し、同じ条件で養生することで、形状以外の差異を抑えるようにした。気中養生（約 7℃）で、養生期間は 14 日である。モルタルの配合は、砂 60%、水 15%、早強ポルトランドセメント 25%とした。

また、ブロック同士を目地材で接着する場合は、施工精度によって目地強度がばらつき実験結果に影響を及ぼすため、目地材は用いずに、ブロックを接触させるだけとした。そのため、自立しない直方体ブロックから構成される組積造壁は実験の対象としないこととした。

図-3(a)の I 型（直角）は、I の形をしたブロックはないが、I 型ブロックで構成される組積造壁の一部を切り出したものである。上下段のブロックは I の文字を 90 度回転させたものを横方向に半分にカットしたもの、中段左右 2 つのブロックは、I の文字を 90 度回転させたものを縦方向に半分にカットしたものである。他の試験体についても同様である。砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）の違いは、ブロック同士の界面が直線状か波状かの違いである。波状の形状には $\cos$ 関数を用いた。

(4) 試験体の物性値・強度

斜め圧縮試験の試験体ブロックと同時に打設されたテストピースを用いて要素試験を実施した。表-1 に要素試験結果を示す。要素試験は 3 回ずつ実施し平均をとった。

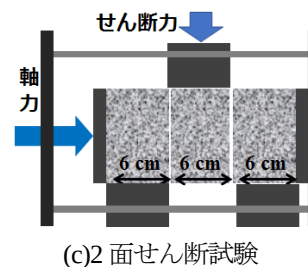
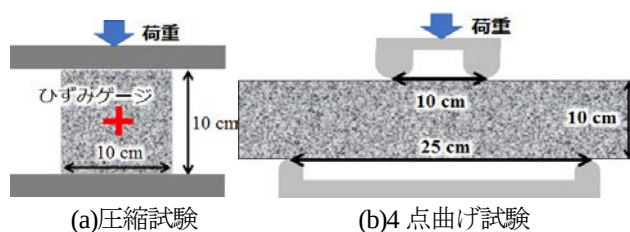
ブロックの弾性係数、ポアソン比、圧縮強度は、幅 10cm、高さ 10cm、奥行き 6cm の直方体ブロックに対する圧縮試験により求めた。載荷重を載荷面積で割ることで応力を求め、ブロックの半分の高さ（5cm）の位置に設置したひずみゲージによって鉛直方向と水平方向のひずみを読み取った。ひずみゲージは 1 面だけに添付した。ヤング率は載荷（鉛直）方向の応力-ひずみ関係から、ポアソン比は鉛直方向と水平方向のひずみの比から求めた。圧縮強度は、最大荷重時の応力とした（図-4(a)）。

ブロックの引張強度は、幅 30cm、高さ 10cm、奥行き 10cm のブロックを用いた 4 点曲げ試験により求めた。4 点曲げ試験治具の支点間長さは 25cm、上部の載荷点間隔は 10cm であり、曲げ破壊時の荷重から下縁の引張応力を求め、引張強度とした（図-4(b)）。

ブロック間の摩擦特性は、2 面せん断試験により求めた。図-4(c)のようにブロック 3 つを水平方向に並べて軸力を与えて固定し、両端のブロックの底面を鋼ブロックで支持した状態で中央のブロックに鉛直荷重（せん断力）を載荷し、滑動が生じたときの直応力とせん断応力を求めた。軸力の大きさを変えて、直応力が約 0.1 (N/mm²)、0.2 (N/mm²)、0.3 (N/mm²) の 3 パターンとなるようにし、それぞれ 3 回ずつ実施した。滑動時の直応力とせん断応力の関係から最小二乗近似により、摩擦係数 0.49 を得た。決定係数は 0.968 となった。

表-1 要素試験結果

ヤング率 (N/m ²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/m ²)	引張強度 (N/m ²)	摩擦係数
2.50×10 ⁹	0.22	3.49×10 ⁷	7.434×10 ⁶	0.49



(c) 2 面せん断試験

図-4 要素試験

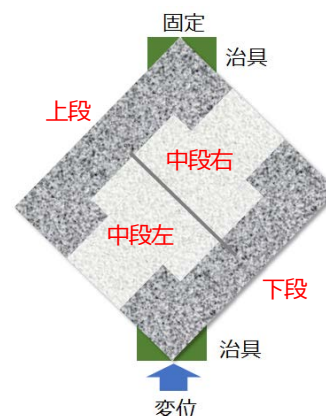


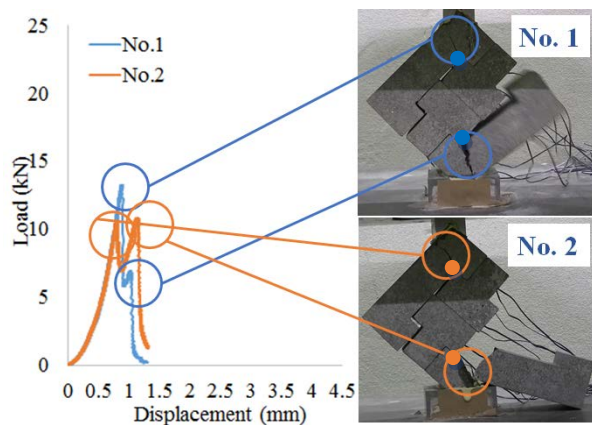
図-5 試験方法および境界条件

2.2 斜め圧縮試験の試験方法

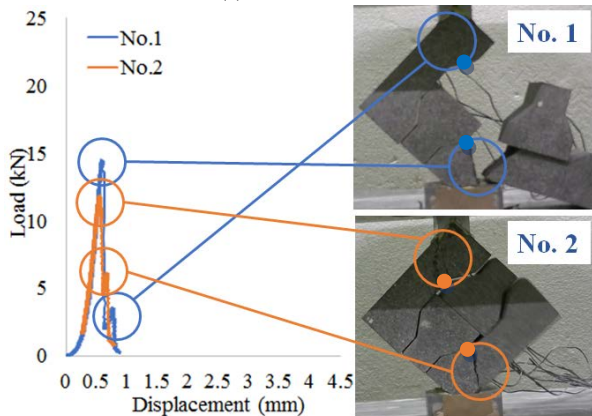
4 種類の組積造壁試験体に対して、斜め圧縮試験を実施し、ブロックの形状によって、荷重-変位関係と破壊挙動がどのように異なるのかを調べた。4 種類の試験体に対してそれぞれ 2 体ずつ試験を実施した。

試験方法の概略を図-5 に示す。万能材料試験機の上下の載荷版に M 字型の治具を装着し、治具の間に組積造壁を設置した。M 字型の治具と組積造壁の間には速乾性の石膏を流し込むことで、治具の表面全体で組積造壁に荷重を伝達するようにした。ブロック間に目地材は使用せず、接しているのみである。

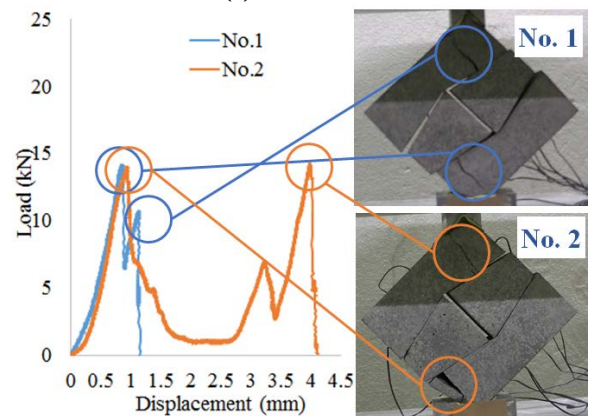
境界条件は、上端が固定で、下端に 2.5×10⁻³mm/s の割合で静的に強制変位を与えた。載荷（鉛直）方向の荷重と変位を計測し、載荷時の挙動をデジタルビデオで撮影した。水平方向の変位は計測していない。



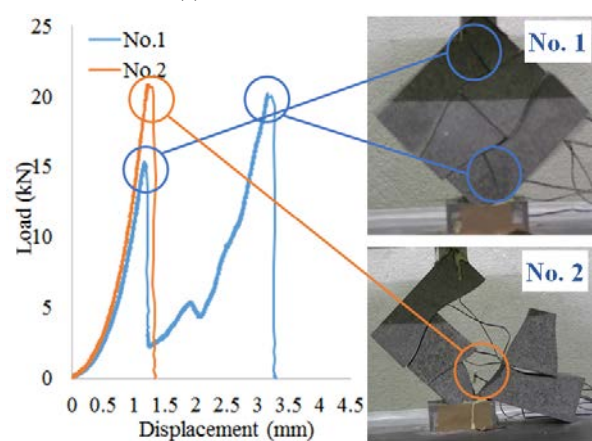
(a)I 型 (直角)



(b)I 型 (鈍角)



(c)砂時計型 (直線状)



(d) 砂時計型 (波状)

図-6 斜め圧縮試験の荷重－変位関係および破壊の様子

表-2 斜め圧縮試験による最大荷重と最大荷重時変位

モデル	No.1		No.2	
	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)
I 型 (直角)	13.2	0.88	10.8	1.13
I 型 (鈍角)	14.5	0.59	11.9	0.55
砂時計型 (直線状)	14.2	0.85	14.2	3.97
砂時計型 (波状)	20.2	3.16	20.8	1.22

2.3 試験結果

各試験体の 1 体目 (No.1) と 2 体目 (No.2) それぞれの荷重－変位関係および破壊挙動の比較を図-6 に示す。荷重－変位関係のどのポイントで試験体のどこに破壊が生じたかを、グラフおよび写真それぞれに○で囲んで対応付けている。また、2 体それぞれの最大荷重と最大荷重時変位の比較を表-2 に示す。

いずれの試験体も、荷重－変位関係は初期勾配が緩やかで、荷重が増加するにつれて勾配が急になり、最大荷重に達する直前に勾配が一定となった。この理由は、載荷直後は治具とブロックの間やブロック間に隙間が残る、載荷とともに隙間が閉じる過程で勾配が増加し、隙間が閉じた時点で勾配が一定になったと考えられる。

(1) I 型 (直角)

I 型 (直角) の荷重－変位関係は、2 体目が最初のピーク荷重に達するまでは 1 体目と 2 体目とではほぼ等しくなった。2 体とも最初に上段のブロックが破壊し荷重が低下するが、圧縮力により安定し、再び荷重が増加し、下段のブロックが破壊して全体崩壊に至った。上下段のブロックは、●を付けた 270 度の角をなす角から破壊した (図-6(a))。

1 体目は上段のブロックが破壊したときに最大荷重 13.2kN を示した。2 体目は下段のブロックが破壊したときに最大荷重 10.8kN を示した (表-2)。

(2) I 型 (鈍角)

I 型 (鈍角) の荷重－変位関係も、2 体目が最初のピーク荷重に達するまでは 1 体目と 2 体目とではほぼ等しくなった。2 体目は計測開始が遅れ最初のデータが欠損している。1 体目は最初に下段のブロックが破壊したのに対して、2 体目は最初に上段のブロックが破壊するなど、破壊順序は異なったが、最初のブロックの破壊後に荷重が低下した後、再び荷重が増加し、2 個目のブロックの破壊により全体崩壊に至るといった共通の傾向が見られた。破壊した上下段のブロックは、●を付けた 180 度超の角の部分から破壊が生じた (図-6(b))。

最大荷重は 1 体目が 14.5kN、2 体目が 11.9kN と、I 型 (直角) よりも僅かに大きい傾向が見られた。最大荷重時変位は、I 型 (直角) より小さい結果となった (表-2)。

(3) 砂時計型（直線状）

砂時計型（直線状）の荷重－変位関係は、最初のピーク荷重に達するまでは1体目と2体目とでほぼ等しくなったが、それ以降は1体目と2体目とで大きく異なる挙動を示した（図-6(c)）。

1体目は、I型（直角）やI型（鈍角）と同様に、最初に下段のブロックが破壊した後、荷重が半分程度に低下した時点で圧縮力により安定して再び荷重が増加し、比較的早い段階で上段のブロックも破壊し、全体崩壊に至った。これに対し2体目は、荷重が初めて約14.2kNに達したときに下段のブロックが破壊し、荷重は1kN程度にまで低下した。この際、ブロック間のずれと試験体の回転が生じたが、再び圧縮力により安定し、1回目のピークと同程度の14.2kNに達したときに全体崩壊に至った。全体崩壊に至るまでの間に約3mm変位した。

2体とも、上下段のブロックが中段のブロックと接している界面には噛み合い部分（凹凸）がないため、直線状のところに亀裂が生じた。2体とも最初に下段ブロックが破壊したが、下段ブロックの破壊面の位置が1体目と2体目とで大きく異なり、最初の破壊後に再び安定するまでの変位量が大きく異なった。したがって、最初の破壊面の発生位置の違いが、下段ブロック破壊後の挙動の違いに影響を与えたと考えられる。試験体によって破壊面の発生位置が大きく異なった原因としては、凹凸がないため亀裂の生じやすい弱点部がなく破壊位置がばらつき易いこと、ブロック間が滑り易く設置の誤差が生じやすいこと、ブロックの界面形状の僅かな誤差の影響が現れやすいことなどが考えられる。以上のように、砂時計型（直線状）はブロック間の噛み合いが小さいため、結果が大きくばらつくものと推察される。

最大荷重は1体目も2体目も約14.2kNであり、本実験では、I型（直角）よりも耐力が大きくなった（表-2）。しかし、2体の荷重-変位関係のばらつきが大きいので、砂時計型（直線状）が常にI型（直角）よりも耐力が大きくなるという結論を導くには、実験ケース数が不十分であると考えられる。

(4) 砂時計型（波状）

砂時計型（波状）でも、1体目と2体目とで異なる挙動を示した。1体目は、砂時計型（直線状）と同様に、最初に上段のブロックが破壊した後、荷重が大きく低下し、ブロック間のずれと試験体の回転が生じた。そして再び安定し、最初のピーク荷重を上回る20.2kNで破壊に至った。これに対し2体目は、荷重が約20.8kNに達したとき下段のブロックが破壊した後、そのまま全体倒壊に至った。この理由は、下段のブロックがM字型治具の外側で破壊して不安定になったためである。これに対して砂時計型（直線状）は、1体目も2体目も最初に下段のブロックが破壊したとき、破壊面がM字型治具の中にあるため、治具に拘束されたため全体崩壊には至らなかったと思われる。このように、破壊面が治具の中にあれば

圧縮力により拘束され安定して2回目のピーク荷重に至るが、破壊面が治具の外にある場合は、1回目のピーク荷重の後に全体崩壊に至ることがわかった。砂時計型（直線状）と同様に、砂時計型（波状）もブロック間の噛み合いが小さいため、試験体の施工誤差や設置の僅かな誤差で、破壊箇所が異なり、結果が大きくばらつくものと推察される。

また、砂時計型（直線状）と同様に、上下段のブロックが中段のブロックと接している界面には噛み合い部分（凹凸）がないため、波状のところに亀裂が生じた。

最大荷重は1体目が20.2kN、2体目が20.8kNであり、全ての試験体で最大となった。最大荷重時の変位も、他の試験体に比べて大きい傾向が見られた（表-2）。本実験では砂時計型（波状）の耐力が最大となったが、1体目では2つ目のピークで、2体目では1つ目のピークで最大荷重が発生するなど、2体の荷重-変位関係のばらつきが大きいので、砂時計型（波状）が常に他の試験体よりも耐力が大きくなるという結論を導くには実験ケース数が不十分であると考えられる。

(5) まとめ

表-2より、各モデルの最大荷重の平均値を比較すれば、「I型（直角）<I型（鈍角）<砂時計型（直線状）<砂時計型（波状）」となり、噛み合い効果が弱くなるほど最大荷重が増加する傾向が確認できた。

最大荷重は砂時計型（波状）が最大となった。しかし、最大荷重時変位についても砂時計型（直線状）の2体目を除けば砂時計型（波状）が最大となったので、最大荷重が大きくても大きな変位が生じてしまうことがわかった。大きな変位の生じることが、構造物にどのような影響を与えるかは、全体系での実験・解析を実施しないと解明できない。したがって、ブロック形状の性能の良し悪しを評価するには、壁の一部を切り出した検討だけでは不十分であり、構造物全体系での検討が必要であると考えられる。また、砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）は、変位のばらつきが大きく、治具の影響も現れているため、治具の影響の小さいケースでより多くの検証を行う必要があると考えられる。

3. 斜め圧縮試験の再現解析

3.1 解析条件

(1) 解析モデル

2次元静的有限要素解析により斜め圧縮試験の再現解析を行うことで、破壊メカニズムの検討を行う。解析には、非線形汎用構造解析プログラム Marc を用いた⁹⁾。解析モデルを図-7に示す。4つのモルタルブロックと治具を2次元平面応力要素でモデル化した。要素の奥行きは10cmとした。ブロックの要素サイズは0.5cm×0.5cm程度とし、要素自体は弾性体だが、節点を共有せず要素間に破壊を考慮した。上下の治具は1cm×1cmの7つの

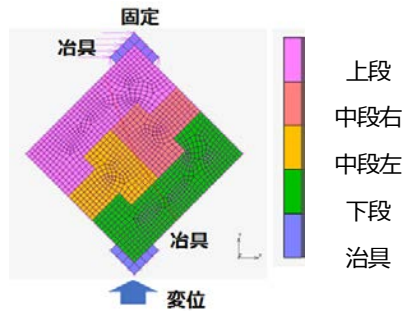


図-7 斜め圧縮試験の解析モデルおよび境界条件

弾性要素でモデル化し、非破壊とした。

境界条件は、上側の治具を固定、下側の治具に1ステップあたり0.005 mmの強制変位を与えた。

(2) 解析諸元

ブロックの解析諸元は、表-1に示す要素試験の結果を用いた。治具の物性値は鋼材の一般的な値として、ヤング率 2.0×10^{11} N/m²、ポアソン比 0.265 とした。

異なるブロックに属する要素間は、接触したときに圧縮力と摩擦に抵抗するとし、摩擦係数は要素試験より求めた表-1の値を用いた。

治具とブロック間は、実験では石膏を入れたため接着状態と考え、表-1のブロックの引張強度を超えたときに要素境界で引張破壊が生じると仮定した。破壊後は圧縮力と摩擦に抵抗するとし、石と金属間の摩擦係数が0.3～0.4程度であることから⁹⁾、摩擦係数0.4を採用した。

ブロックの破壊も考慮した。初期状態において連続している同一ブロック内の要素間は接着状態とし、表-1に示すブロックの引張強度を超えたときに要素境界で引張破壊が生じると仮定した。破壊後は、圧縮力と摩擦に抵抗するとし、破壊後のブロック間の摩擦係数は、表面が成形された状態の摩擦係数よりも大きいと考えられることと、実験の再現性から摩擦係数0.7を採用した。

接触解析には、ラグランジュ未定数法を用いた。ある要素の節点が他の要素の辺と接着している場合に、辺の法線方向および接線方向で両者の変位が同じという条件を課し、要素間の法線方向の引張応力が引張強度を超えると引張破壊が生じ、それ以降は引張に抵抗しないとした。接触している要素間の圧縮への抵抗は、ある節点と、接触相手要素の辺の法線方向の変位が同じであるという拘束条件によって考慮される。摩擦は、法線方向と接線方向の力の間にクーロン摩擦モデルを適用しており、節点が接触相手要素の辺に沿って移動できるようになっている。

3.2 解析結果

各モデルの解析結果を図-8～11および表-3に示す。

(1) 荷重－変位関係

図-8～11(a)は、実験と解析の荷重－変位関係の比較である。実験の載荷直後は治具とブロックの間やブロック間に隙間が残る、載荷とともに徐々に隙間が閉じる過程

で勾配が増加し、隙間が閉じた時点で勾配も一定になると考えられる。これに対して解析では、初期状態から隙間のない理想的な状態であるため、最大荷重に達するまでは勾配はほぼ一定となった。そこで、最大荷重発生時の変位がほぼ等しくなるように、解析結果を右側にシフトしたものを示している。現段階では破壊状況を正確に再現できていないため、ここでは定性的な考察に留める。

I型（直角）と砂時計型（直線状）は、最大荷重発生直前は勾配、最大荷重ともに実験と解析に近い結果となった（図-8,10(a)）。

I型（鈍角）は、最大荷重は1体目とほぼ一致したが、実験の方が急勾配であった。実験では、I型（鈍角）が他のモデルに比べて勾配が急で最大荷重時変位が小さかったが、解析ではこの傾向は再現できなかった（図-9(a)）。

砂時計型（波状）の解析結果は、実験の最大荷重を過小評価したが、1体目の最初のピークは最大荷重、勾配ともに良好な精度で再現できた（図-11(a)）。

実験では、最初に破壊が生じて荷重が低減した後、再び荷重の増加が見られたが、解析ではその効果はわずかであった。

(2) 10kN 載荷時の最大主応力分布

図-8～11(b)は、10kNの荷重を載荷したときの最大主応力分布である。引張が正であるため、引張応力を表している。

I型（直角）では、90度と270度の角が噛み合っている箇所の、角度が270度のブロック（上下段のブロック）に、局所的に4Mpaを超える大きな引張応力が生じていることがわかる。この応力が集中した箇所は、実験で破壊が生じた箇所に一致する（図-8(b)）。

I型（鈍角）でも、噛み合い部のうち、角度が大きい側のブロック（上下段のブロック）に大きな引張応力が生じているが、I型（直角）に比べるとその応力の値は小さく2～3Mpa程度であることがわかる。この大きな引張応力が生じた箇所は、実験で破壊が生じた箇所である（図-9(b)、図-6(b)）。しかし後述するが、解析ではこの応力集中箇所には破壊が生じなかった。

砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）は、上下段のブロックと中段左右のブロックの間に噛み合い箇所がないため、ブロック同士が接する部分に生じる応力の値は小さく1～2Mpa程度であり、応力の大きな箇所は局所的でなくある程度の広がりがある。しかし、治具の先端に接着しているブロックに大きな引張応力が生じている（図-10,11(b)）。

以上のことから、I型でも鈍角にすることで、また砂時計型にすることで、局所的な応力集中を軽減できることがわかった。

(3) 破壊挙動

図-8～11(c)(d)は破壊時の挙動である。変形や破壊の状況を分かりやすくするため、変位を10倍に拡大して図示している。

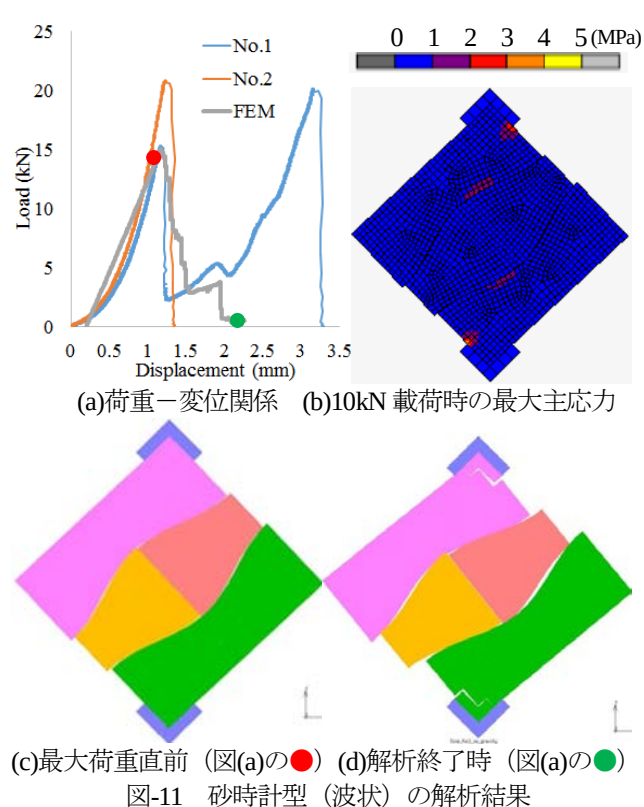
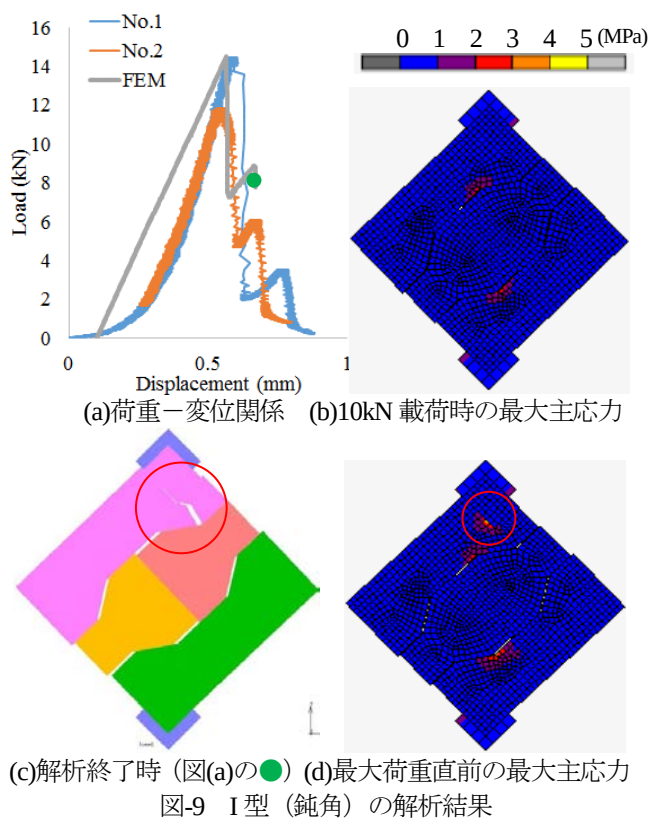
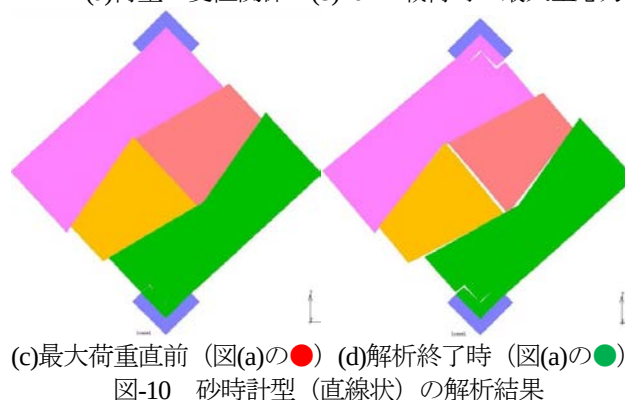
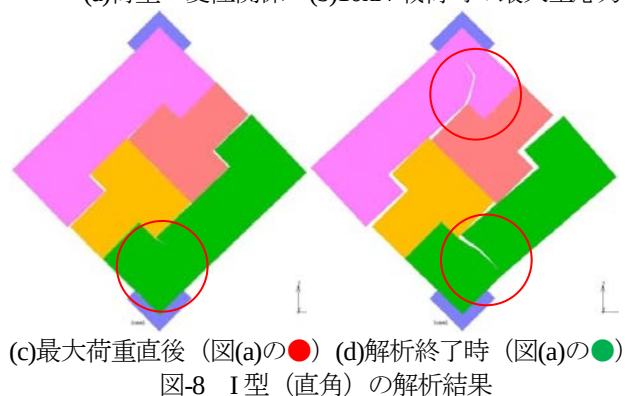
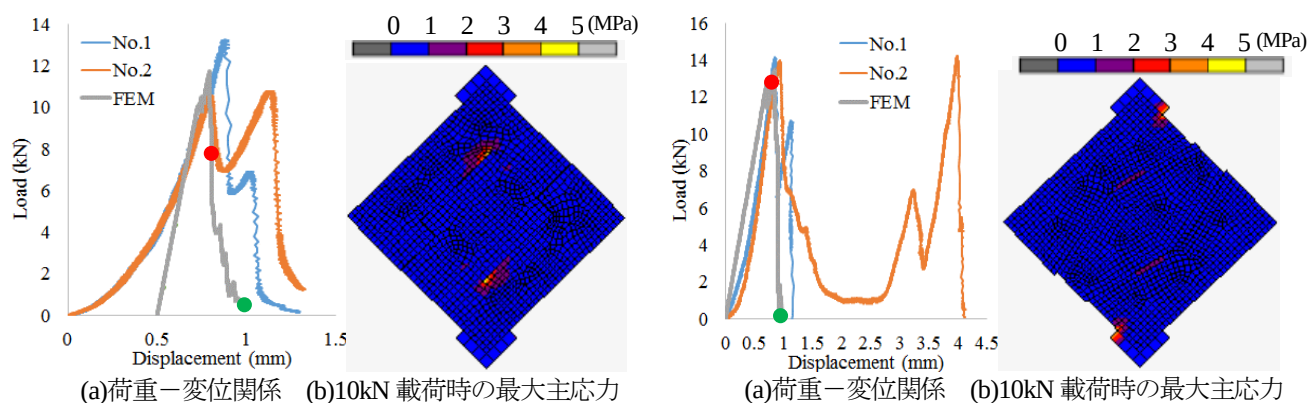


表-3 最大荷重, 最大荷重時変位, 勾配の比較

モデル	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位(mm)	勾配(kN/mm)
I型（直角）	11.7	0.294	39.9
I型（鈍角）	14.5	0.465	31.1
砂時計型（直線状）	13.5	0.845	16.0
砂時計型（波状）	15.0	0.972	15.4

I 型（直角）では、下段のブロックの噛み合い部分に破壊が発生し、治具方向へと進展した（図-8(c)）。次に上段のブロックにも噛み合い部から破壊が発生し、治具方向へと進展した（図-8(d)）。実験で生じた破壊箇所（図-6(a)）とほぼ同じ位置に解析でも破壊が生じた。実験とは違い、解析では上下段のブロックに破壊が生じるタイミングがほぼ同じであったため、荷重－変位関係のピークはほぼ1つとなった。

I 型（鈍角）では、上段のブロックのみに、噛み合い部に破壊が発生したが、図-9(b)で応力が集中した箇所とは違う箇所から破壊が生じた（図-9(c)）。この理由を調べるために、破壊発生直前の最大主応力分布を調べたところ、図-9(d)のように上段ブロックの赤丸で囲んだところに噛み合い部より大きな応力が発生していることがわかった。上下の载荷点を結ぶ対角線上にあり、大きな上下方向の圧縮力が作用したため、ポアソン効果により水平方向に引張応力が生じ、これが引張破壊を引き起こしたと考えられる。当初の応力が集中していた噛み合い部は、ブロックのずれによりブロック間に隙間ができ（図-9(c)）、引張応力がそれほど増加しなかったと推察される。

砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）では、破壊が発生する最大荷重直前までにブロック間のずれと壁の回転が生じている様子が再現できた（図-10,11(c)）。しかし、治具先端に接着しているブロックから破壊が生じ、実験で生じたような上段ブロックと中段右ブロックの界面を始点とする破壊にはならなかった。治具付近で先に破壊してしまったものの、噛み合い効果の低い形状に変更することで、噛み合い部の破壊を軽減できる様子は再現することができた。砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）の解析では、治具付近で不自然な破壊が発生してしまったが、この原因については解明できておらず、今後の検討課題としたい。要素境界で破壊するように破壊箇所が限定されていることも解析精度を下げると思われるので、任意の方向の破壊が考慮できるように改良することもあるのではないかと考えている。

(4) 最大荷重、最大荷重時変位、勾配の比較

各モデルの最大荷重、最大荷重時変位、最大荷重を最大荷重時変位で除した勾配の比較を表-3に示す。

最大荷重は、「I 型（直角）＜砂時計型（直線状）＜I 型（鈍角）＜砂時計型（波状）」の順で増加し、噛み合い効果を低減することで最大荷重が増加する傾向を確認できた。I 型（直角）の最大荷重が最小で、砂時計型（波状）の最大荷重が最大であり、これは実験で見られた傾向と一致している。砂時計型（波状）の最大荷重が実験に比べて過小評価となったのは、治具先端に接着しているブロックが先に破壊してしまったためではないかと推察される。砂時計型（直線状）の最大荷重がI 型（鈍角）より小さくなったのも、砂時計型（直線状）では治具先端に接着しているブロックが先に破壊してしまったためではないかと推察される。

最大荷重時変位は、「I 型（直角）＜I 型（鈍角）＜砂時計型（直線状）＜砂時計型（波状）」の順で増加し、噛み合い効果を低減するほど最大荷重時変位も増加する傾向を確認できた。噛み合い効果が低いほどブロック間のずれと壁の回転が生じやすいためであると考えられる。

最大荷重を最大荷重時変位で除した傾きは、「I 型（直角）＞I 型（鈍角）＞砂時計型（直線状）＞砂時計型（波状）」の順で減少し、噛み合い効果を低減するほど勾配が緩やかになる傾向を確認できた。これも、噛み合い効果が低減するにつれてブロック間のずれと壁の回転が生じやすくなるためと考えられる。

4. 結論

本研究では、インターロッキングブロックの形状が、組積造壁の荷重－変位関係や破壊挙動に及ぼす影響を調べるために、斜め圧縮試験を実施した。インターロッキングブロックの形状としては、I 型（直角）、I 型（鈍角）、砂時計型（直線状）、砂時計型（波状）の4種類を考えた。また、2次元静的有限要素解析により斜め圧縮試験を再現し、噛み合い部の形状の影響を分析した。得られた知見は以下の通りである。

- ・斜め圧縮試験により、I 型（直角）とI 型（鈍角）は噛み合い部分の角から破壊が生じること、砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）はブロック間のずれと試験体の回転が生じやすいことがわかった。本研究の実験では、噛み合い効果の小さい形状のブロックの方が、最大荷重が大きくなる傾向が確認できた。I 型（直角）の最大荷重が最小で、砂時計型（波状）の最大荷重が最大であることがわかった。ただし、噛み合い効果の小さい砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）は荷重－変位関係のばらつきが大きいこともわかった。
- ・2次元静的有限要素解析により、斜め圧縮試験で得られた荷重－変位関係の最大荷重、勾配を概ね再現することができた。I 型（直角）については、破壊状況も概ね再現することができた。砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）については、破壊状況の再現に課題を残した。
- ・再現解析により、同じ荷重（10kN）を载荷したときの最大主応力分布を比較したところ、I 型（直角）では噛み合い部の角に局所的に大きな引張応力が発生すること、I 型（鈍角）も噛み合い部の角に引張応力が発生するがI 型（直角）に比べて応力集中の度合いが小さいこと、砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）では噛み合い部に生じる引張応力はさらに小さいことが確認できた。噛み合い効果の低い形状にすることで、噛み合い部の応力集中を抑制する効果のあることがわかった。噛み合い効果の小さい形状のブロックの方が、最大荷重が大きく、ブロック間のずれと試験体の回転により最大荷重時変位も大きくなる傾向が確認できた。

- ・ 斜め圧縮試験でも、その再現解析でも、噛み合い効果の小さい形状をしたブロックほど最大荷重が大きくなったが、最大荷重時変位も増加しており、噛み合い効果の弱いインターロッキングブロックを用いることの優位性を確認することはできなかった。

本研究では斜め圧縮試験を実施したが、今後は、地震時に組積造壁が受ける荷重をより模擬した載荷方法による試験を実施して、インターロッキングの効果を検証したいと考えている。本研究では、ブロックの数が多いと破壊箇所の候補が多くなり現象が複雑になるため、現象を単純化するためにブロックの数は4つとした。しかし、壁の一部を切り出したミクロなモデルと、壁全体または建物全体を表したマクロなモデルとでは、インターロッキングの効果が異なってくるので、今後はマクロなモデルでの検証を行いたい。また、本研究ではブロックの形状以外の影響を極力排除するために、ブロック間を目地材で接着しなかったため、直方体ブロックとの比較ができなかった。今後は、直方体ブロックとインターロッキングブロックを比較することで、インターロッキングブロックを用いた耐震対策の可能性について検討を行いたい。

謝辞

本研究はJSPS科研費15K06178の助成を受けたものです。実験の実施に際して、京都大学の荒木慶一先生にご指導頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) OCHA (Office for the Coordination of Humanitarian Affairs), <http://www.unocha.org/>, 2015.
- 2) A. Darbhanzi, M.S. Marefat, M. Khanmohammadi : Investigation of in-plane seismic retrofit of unreinforced masonry walls by means of vertical steel ties. *Construction and Building Materials*, 52, 122–129, 2014.
- 3) Giancarlo Marcari, Gaetano Manfredi, Andrea Prota, Marisa Pecce : In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP. G. Marcari et al. / *Composites: Part B* 38, 887–901, 2007.
- 4) Ahmet Turer, Mustafa Golalm : Scrap tire as low-cost post tensioning material for masonry strengthening. *Materials and Structures*, 41, 1345-1361, 2011.
- 5) 櫻井光太郎, Navaratnarajah SATHIPARAN, 目黒公朗 : 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, 第30回土木学会地震工学研究発表会講演概要集, 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) 木村翔汰: インターロッキング機構を利用した組積造壁の耐震性に関する研究, 京都大学大学院修士論文, 2015.
- 8) MSC. Software Corporation : *Experimental Elastomer Analysis*, 2010
- 9) 中浜貴生, 畑中重光, 三島直生: 煉瓦目地のせん断試験方法及び破壊基準に関する実験的研究, 日本建築学会構造論文集, 第74巻, 第641号, 1225–1232, 2009.

(2017年9月25日受付)

(2018年2月1日受理)