

論文 版築ブロックの接合部に関する基礎的研究

杉山 晴香*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨：版築ブロックの接合部の破壊性状および目地材強度の検討を行うために、目地材の調合が異なる5種類の目地あり版築ブロックを作製し圧縮強度試験、曲げ強度試験、二面せん断試験を行った。その結果、圧縮応力を受ける環境下では版築ブロックの強度は、目地材の強度よりも版築ブロック単体の強度が支配的であることが分かり、曲げ強度試験から膨張材モルタルの目地あり版築ブロックの曲げ強度が最も高く0.23 N/mm²であった。また、二面せん断試験から拘束応力を与えることで目地部での破壊が生じ、拘束応力0.30 N/mm²のとき、タイル用モルタルの目地あり版築ブロックのせん断強度が最も高く約3.0 N/mm²であった。

キーワード：版築ブロック、目地材、圧縮強度試験、曲げ強度試験、二面せん断試験

1. はじめに

版築とは、土壁などの築造法の一つであり、土を主原料とし、締固めにより築造することから、環境への負荷が小さく、歴史的建造物のみならず現代建築の建築材料としても再認識されつつある。

本研究では、版築工法により作製した地産地消型の版築ブロックと鉄骨部材を融合させた新しい構造システムの開発を目指し(図-1)実験を行っており、昨年度までは最適な調合や施工方法についての検討ならびに材料物性が未知である版築ブロックの収縮特性に着目して、線膨張係数測定試験および乾燥収縮試験から、版築ブロックの体積変化について検討を行い、その結果を示した¹⁾。

本稿では、提案する複合構造システムにおいて版築ブロックが負担できるせん断強度に関するデータを蓄積するため、版築ブロックの接合部について、圧縮強度試験、曲げ強度試験、せん断試験から目地材強度の検討を行うとともに、本実験の範囲内で最適な目地材の選定を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合割合

使用材料を表-1に示し、版築ブロックおよび目地モルタルの調合割合を表-2および表-3に示す。

本実験では、版築ブロックの調合は室内実験の結果¹⁾から表-2に示す1調合とし、目地モルタルに関しては、「JIS R 5201 セメントの物理試験方法」に準拠し作製したセメントモルタルに加え、外装タイル用既製調合モルタル(以下、タイル用モルタル)や本実験において版築ブロックの結合材に用いているマグネシウム系硬化材モルタル(以下、マグモルタル)、また、刺激材の異なる高炉モルタル2種(以下、消石灰モルタルおよび、膨張

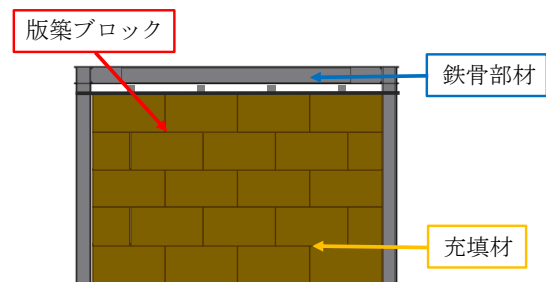


図-1 複合構造システムイメージ図

材モルタル)³⁾の計5調合を作製し、目地モルタルの強度試験を行うとともに目地材の有無による版築ブロックの破壊性状の確認および目地材強度の検討を行った。

2.2 供試体作製方法

(1) 版築ブロック

モルタルミキサーを用いて結合材と土を練り混ぜた後、掻き落とし、その後水を加え練り混ぜ、JIS R 5201に規定された3連式鋼製型枠を用いて1層あたり8回の締固めを4層分行き40×40×70 mmの版築ブロックを作製し、準備した木枠を用いて、各層ごとに充填および締固めを複数回行き100×100×100 mmの版築ブロックを作製した。そして、それぞれ所定材齢まで封緘養生とした。また、層間の密着性を高めるため、下の層に凹凸を付けた後、次の層を充填した⁴⁾。

(2) 目地モルタル

モルタルミキサーによる練り混ぜ後、Φ50×100 mmの円柱供試体を各3体作製し、所定材齢まで封緘養生とした。

(3) 目地あり版築ブロック

版築ブロックと目地モルタルの付着性能を高めるため、金ブラシを用いて版築ブロックの表面に凹凸を付けた後、目地モルタルを付着させ、版築ブロックを組積し、ラップで包んだ状態で所定の材齢まで封緘養生とした(目標目地幅:10 mm)。

*1 東急建設株式会社(元東京理科大学大学院 工学研究科 建築学専攻) (正会員)

*2 東京理科大学 工学部第二部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部第二部建築学科 嘱託助教 博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料

使用材料		記号	備考
土 細骨材	荒木田土	S(A)	埼玉県川越産，土粒子の密度：2.538 g/cm ³
	陸砂	S(N)	表乾密度：2.59 g/cm ³ ，吸水率：2.07 %
	高炉スラグ細骨材	S(BFS)	表乾密度：2.75 g/cm ³ ，吸水率：0.71 %
結合材	マグネシウム系硬化材	B	密度：3.2 g/cm ³ ，比表面積：7640 cm ² /g
	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.16 g/cm ³ ，比表面積：3340 cm ² /g
	外装タイル用既製調合モルタル	D	含有物：セメント，骨材，保水剤，特殊混和剤，顔料 調合：粉体 1 kg に対し水 180 ml
	高炉スラグ微粉末	BFS	密度：2.87 g/cm ³ ，比表面積：4290 cm ² /g， 無水石膏 1.91 % 添加
刺激材	消石灰	CH	密度：2.07 g/cm ³
	膨張材	EA	密度：2.85 g/cm ³ ，CaO 含有率：51.8 %
混和剤		高 AE 減	高性能 AE 減水剤
水		W	上水道水

表-2 調合割合（版築ブロック）

記号	含水比	W/B	B/S	質量比			単位量(kg/m ³)		
				W	B	S(A)	W	B	S(A)
AM100	0.46	1.00	0.46	0.24	0.24	0.52	462	462	1001

表-3 調合割合（目地モルタル）

No.	含水比	W/P	P/S	単位量(kg/m ³)								
				W	B	C	BFS	CH	EA	S(N)	S(BFS)	高 AE 減 (P×1%)
1	0.17	0.50	0.33	253	—	506	—	—	—	1519	—	—
2	0.18	—	—	外装タイル用既製調合モルタル 1 kg : 水 180 ml								
3	0.20	0.51	0.40	281	555	—	—	—	—	1406	—	—
4	0.12	0.30	0.40	192	—	—	618	22	—	—	1600	6.40
5	0.12	0.30	0.40	192	—	—	711	—	16	—	1512	7.27

※W/P：水粉体比

※P：高炉スラグ微粉末＋消石灰または膨張材，B，C

表-4 実験項目

実験項目		供試体寸法 (mm)	供試体数 (体)	拘束応力 (N/mm ²)	試験開始材齢 (日)
目地モルタル	割裂引張強度試験	Φ50×100	各 1	—	7
	圧縮強度試験	Φ50×100	各 2	—	7
版築ブロック単体	圧縮強度試験	100×100×100	2	—	— ^{*3}
目地あり版築ブロック	圧縮強度試験	100×100×210 ^{*1}	各 1	—	7 ^{*4}
	曲げ強度試験	100×100×210 ^{*1}	各 3	—	7 ^{*4}
	せん断試験	40×70×130 ^{*2}	各 2	0, 0.15, 0.30 ^{*5}	11 ^{*4}

*1：100×100×100 mm の版築ブロック体を 2 体組み合わせさせたもの（目地幅：10 mm）

*2：40×40×70 mm の版築ブロックを 3 体組み合わせさせたもの（目地幅：5 mm）

*3：目地あり版築ブロックの圧縮強度試験時に実施

*4：版築ブロックの養生期間ではなく，試験時の目地モルタルの材齢を記載

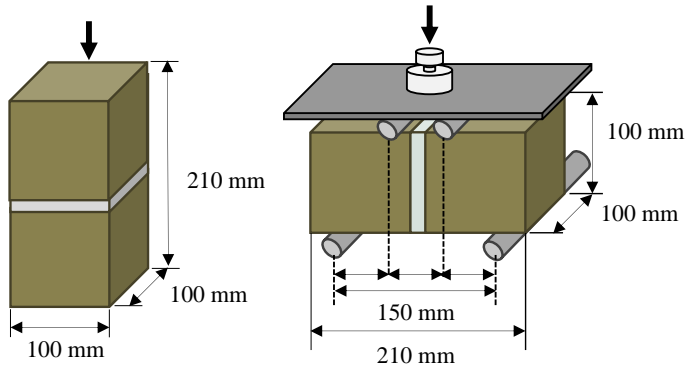
*5：二面せん断試験時の拘束応力を既往研究より引用⁵⁾

また，接合部に関して，圧縮強度試験に用いたものは打込み面と底面を接合し，曲げ強度試験に用いたものは側面をそれぞれ接合した。

2.3 実験項目および試験方法

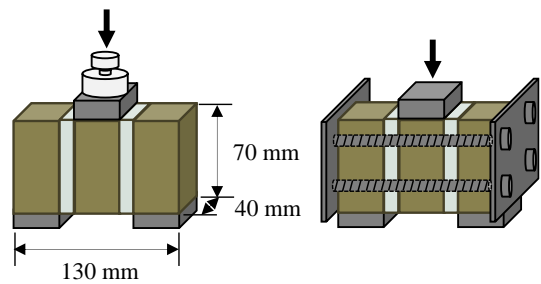
実験項目を表-4 に示し，各試験方法を以下に示す。

既往研究^{1), 3)}におけるマグネシウム系硬化材ペーストおよび高炉スラグモルタルの圧縮強度試験結果から，材齢 7 日の封緘養生を行うことでマグネシウム系硬化材ペースト，高炉スラグモルタル（No.3～5 に対応）の圧縮強度は 15 N/mm² 程度得られることが確認できた。そこ



目地あり版築ブロック
図-2 圧縮強度試験

目地あり版築ブロック
図-3 曲げ強度試験



拘束なし 拘束あり
図-4 二面せん断試験

で、本実験では、目地モルタルの材齢を7日とし、以下の試験を実施した。

(1) 割裂引張強度試験

「JIS A 1113 コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠し、表-4 に示す材齢で割裂引張強度試験を行った。

(2) 圧縮強度試験

「JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、表-4 に示す材齢で目地モルタルの圧縮強度試験を行った。

目地あり版築ブロックの圧縮強度試験の概要図を図-2 に示す。版築ブロックの載荷面にキャッピングを施した後、表-4 に示す材齢で圧縮強度試験を行った。

(3) 曲げ強度試験

曲げ強度試験の概要図を図-3 に示す。

「JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法」を参考にし、表-4 に示す材齢で3等分点載荷による曲げ強度試験を行った。また、ロードセルを用いて曲げ強度の測定を行い、載荷時の圧版間変位の測定も行った。

(4) せん断試験

せん断試験の概要図(拘束なし、拘束あり)を図-4 に示す。

40×40×70 mm の版築ブロックを3体組み合わせた後、表-4 に示す拘束応力を加え二面せん断試験を行った。

拘束応力の制御においては、目地あり版築ブロックを4つのボルトで締め付け、両端2体の版築ブロックの両面に貼り付けたひずみゲージから得られた値に版築ブロックのヤング係数を乗じることで行うこととした。

本試験では、目地材にセメントモルタルを用いた版築ブロック体 (No.1) に対し0, 0.15, 0.30 N/mm² と拘束応力を変化させ、拘束応力の有無による破壊性状およびせん断強度の違いを検討した。その他の版築ブロック体 (No.2~No.5) では拘束応力を0.30 N/mm² に統一し、目地材の調合の違いによるせん断強度の違いを検討した。



No.1 No.2 No.3 No.4 No.5
載荷前



No.1 No.2 No.3 No.4 No.5
割裂引張強度試験後

写真-1 目地モルタル

また、載荷時の圧版間変位に加え、拘束なしと拘束応力0.15 N/mm²とした版築ブロックは、ロードセルを用いてせん断荷重の測定を行った。

3. 実験結果

3.1 割裂引張強度試験

目地モルタルの供試体割裂写真を写真-1 に示し、割裂引張強度試験の結果を図-5 に示す。

図-5 に示すように、結合材にセメントを含むNo.1, 2 のセメントモルタル、タイル用モルタルと比較し、結合材に高炉スラグ微粉末を含むNo.3, 4, 5 のマグモルタル、消石灰モルタル、膨張材モルタルの引張強度が低くなるのが分かった。

3.2 圧縮強度試験

(1) 目地モルタル

目地モルタルの圧縮強度試験結果を図-6 に示す。

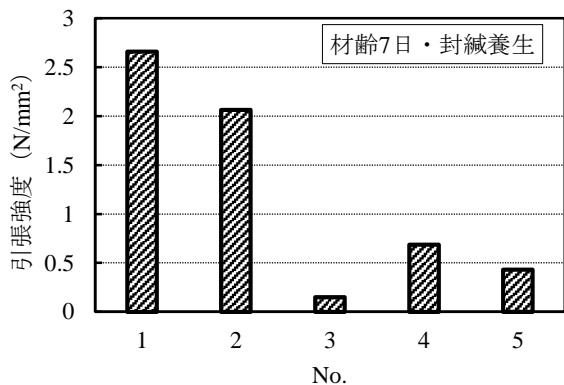


図-5 割裂引張強度試験結果

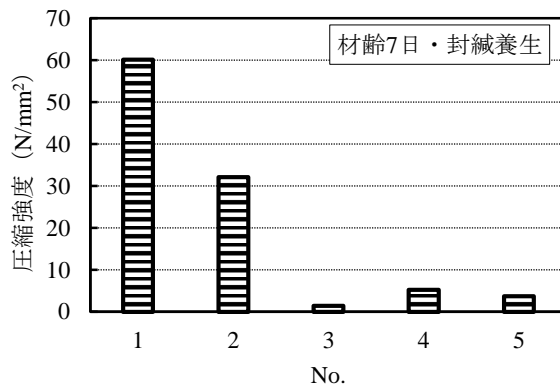


図-6 目地モルタル・圧縮強度試験結果

本試験では、割裂引張強度試験と同様の傾向が見られ、マグモルタル、消石灰モルタル、膨張材モルタル (No.3, 4, 5) の圧縮強度は、材齢7日の時点で10 N/mm²未満であった。

(2) 目地あり版築ブロック

目地あり版築ブロックの圧縮強度試験後における破壊状況の例を写真-2 に示す。そして、版築ブロックの組み合わせ (疎密状況) および試験後の目地付着状況を表-5 に示し、版築ブロックの圧縮強度試験結果を図-7 に示す。ここでは、目視にて、版築ブロックの表面に練り混ぜ不良または締固め不良による大きな空隙がないものを密と定義した。また、目地付着に関しては、圧縮強度試験後の破壊状況から版築ブロックと目地材が一体となり破壊したものを○とし、版築ブロックと目地材の境界面で部分的な剥離が生じたものを△、そして、付着が確認できず版築ブロックの境界面で目地材剥離したものを×とした。

図-7 に示すように、目地材に膨張材モルタル (No.5) を用いた目地あり版築ブロックの圧縮強度が若干高くなる結果となった。しかし、目地モルタルの圧縮強度試験結果と比較し、調合による強度差が小さいことに加え、目地材の有無による強度差も小さいことから、圧縮応力を受ける環境下においては版築ブロックの強度は、目地材の強度よりも版築ブロック単体の強度が支配的になると考えられる。

また、圧縮強度試験後の目地付着状況を確認したところ、セメントモルタル、タイル用モルタル、膨張材モルタル (No.1, 2, 5) を用いた場合、版築ブロックと一体となり破壊することが確認できた。マグモルタル (No.3) の場合、版築ブロックと目地の境界面で目地材剥離が確認できた。消石灰モルタル (No.4) の場合、部分的な目地材剥離が確認でき、マグモルタル (No.3) および消石灰モルタル (No.4) の付着性能はその他の目地モルタル (No.1, 2, 5) と比較し劣ることが判明した。

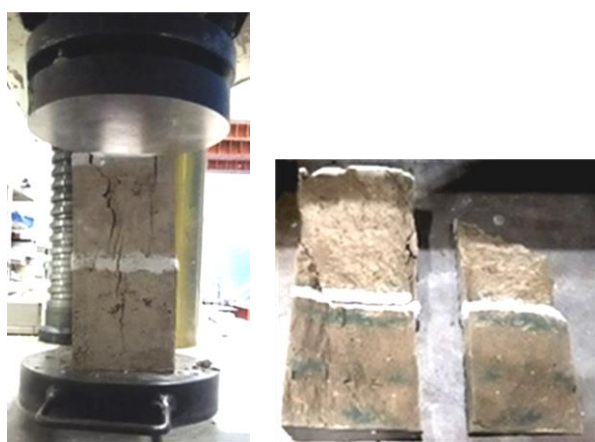


写真-2 圧縮強度試験・破壊状況の例

表-5 版築ブロックの組み合わせおよび目地付着

No.	版築ブロックの組み合わせ		目地付着
	上段	下段	
1	密	密	○
2	密	密	○
3	密	密	×
4	密	密	△
5	密	密	○

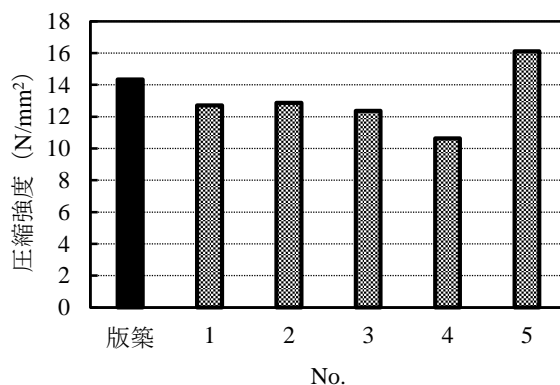


図-7 版築ブロック・圧縮強度試験結果



No.1 セメントモルタル No.2 タイル用モルタル No.3 マグモルタル No.4 消石灰モルタル No.5 膨張材モルタル
 ※囲み枠：目地部の付着範囲を示す，セメントモルタル以外の目地あり版築ブロックでは付着はほとんど確認できず
 写真-3 曲げ強度試験後の目地あり版築ブロック破壊断面

3.3 曲げ強度試験

3 等分点载荷による曲げ強度試験後の破壊断面を写真-3 に示し，試験結果を図-8 に示す。

本試験では，タイル用モルタル（No.2）の曲げ強度が最も低く，膨張材モルタル（No.5）の曲げ強度が最も高くなる結果となった。目地モルタルの強度試験では，タイル用モルタルの割裂引張強度（ 2.1 N/mm^2 ：図-5）および圧縮強度（ 32 N/mm^2 ：図-6）ともに高い強度が得られていたことから，タイル用モルタルの付着性能も高くなると思っていた。しかし，本実験においてタイル用モルタル（No.2）の曲げ強度は低く，この要因として，タイル用モルタル（No.2）では，目地接合部での剥離が生じており，付着が不十分であったためだと考えられる。一方，膨張材モルタル（No.5）では，添加した刺激材の影響により膨張し，拘束効果が得られたことで高い強度が得られたものとする。曲げ強度試験後の破壊断面（写真-3）を確認したところ，セメントモルタルを用いた目地あり版築ブロック（No.1）は付着の跡が確認できたが，ほとんどの目地あり版築ブロックでは版築ブロックと目地の境界面での目地材剥離による破壊であった。そのため，曲げ抵抗性を向上させるためにはグラインダー等を用いて版築ブロック表面にしっかりと凹凸を付け，付着性能を高める必要があると言える。

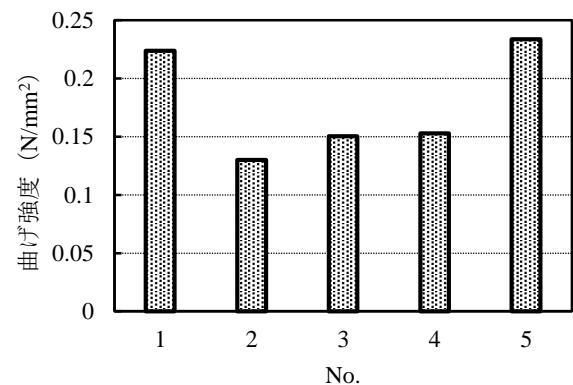


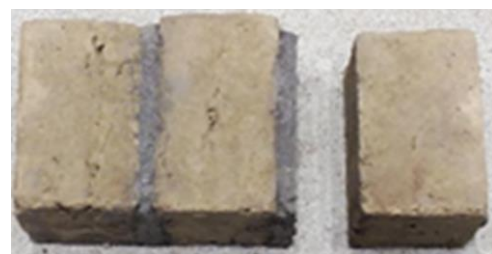
図-8 曲げ強度試験結果

3.4 せん断試験

二面せん断試験後の破壊状況の例を写真-4 に示す。また，セメントモルタルを用いた目地あり版築ブロック（No.1）の拘束応力とせん断強度の関係を図-9 に示し，拘束応力を 0.30 N/mm^2 としたときの二面せん断試験結果を図-10 に示す。

破壊状況に関しては，拘束なしの場合，版築ブロックと目地の境界面で破壊した。本実験では，破壊時に片方の版築ブロックのみ外れたため，回転を伴う曲げの影響を受けた破壊の可能性が考えられる。また，拘束ありの場合，版築ブロックと目地の境界面での破壊が多かったが，载荷時に目地部にひび割れが確認できた目地あり版築ブロックは境界面ではなく目地部での破壊となった。

図-9 に示す拘束応力とせん断強度の関係によると，



拘束なし：片方の版築ブロックのみ外れる



拘束あり：両端の版築ブロックが外れる
 写真-4 二面せん断試験・破壊状況の例

拘束応力の増加とともにせん断強度が増加しており，両者の相関性が高いことが確認できる。版築-鉄骨部材において版築に作用する拘束力はせん断強度の向上につながるものとする。

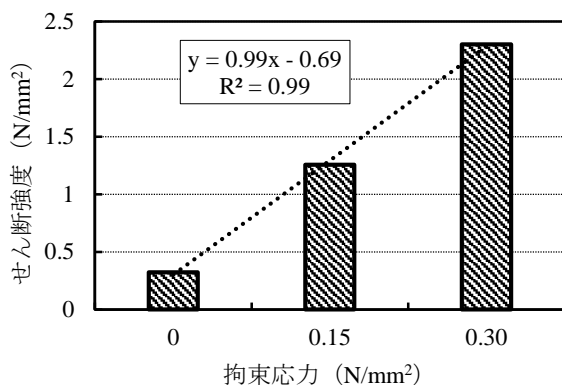


図-9 拘束応力とせん断強度の関係 (No.1 の場合)

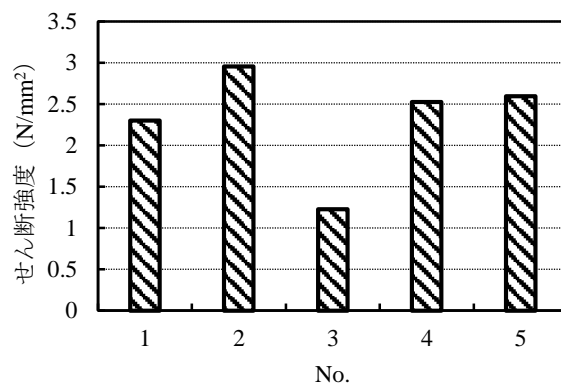


図-10 二面せん断試験結果 (拘束応力 0.30 N/mm²)

拘束応力を 0.30 N/mm² に統一し、二面せん断試験を行ったところ、図-10 に示すように、タイル用モルタル (No.2) を用いた場合のせん断強度は約 3.0 N/mm² と最も高く、マグモルタル (No.3) を用いた場合のせん断強度は 1.2 N/mm² と最も低くなる結果となった。既往研究にて、マグネシウム系硬化材は気中養生による強度発現性が低いことを確認しており、本実験では、養生期間の不足によりマグモルタル (No.3) を用いた場合は十分な強度が得られなかったと考えられる。また、セメントモルタル (No.1) および刺激材の異なる高炉モルタル 2 種 (消石灰モルタル (No.4)、膨張材モルタル (No.5)) のせん断強度はそれぞれ 2.3 N/mm²、2.5 N/mm² および 2.6 N/mm² であり差はあまり見られなかった。

4. まとめ

本研究では、版築ブロックの接合部について圧縮強度試験、曲げ強度試験、二面せん断試験を行い、破壊性状および目地材強度の検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 圧縮強度試験の結果、版築ブロックと目地材は一体となり破壊するものが多いことを確認し、マグモルタルおよび消石灰モルタルでは、版築ブロックと目地境界面での剥離または部分的な剥離が生じることを確認した。
- (2) 圧縮応力を受ける環境下において版築ブロックの強度は、目地材の強度よりも版築ブロック単体の強度が支配的である。
- (3) 3 等分点荷重による曲げ強度試験の結果、曲げ強度の最大値は膨張材モルタルを用いた目地あり版築ブロックであり、その値は 0.23 N/mm² であった。
- (4) 二面せん断試験の結果、拘束応力なしの場合、版築ブロックと目地の境界面で破壊するのに対し、拘束応力を与えることで版築ブロックの目地部で破壊する。

- (5) 拘束応力を 0.30 N/mm² に統一したときのせん断強度の最大値はタイル用モルタルを用いた目地あり版築ブロックであり、その値は約 3.0 N/mm² であった。
- (6) 目地材付着および各強度試験の結果から、本実験の範囲内では、セメントモルタルまたは高炉モルタルの刺激材として膨張材を混合した膨張材モルタルを目地材に用いることが望ましいと考える。

謝辞

本研究に取り組むにあたり、多大なるご助言を賜りました。元東京理科大学非常勤講師の薩田英男先生および東京理科大学工学部建築学科教授の伊藤拓海先生に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 杉山晴香, 今本啓一, 清原千鶴: 版築ブロックの強度特性に関する基礎的研究, 日本コンクリート工学年次論文集, vol.40, No.1, pp.1905-1910, 2018
- 2) 杉山晴香, 今本啓一, 清原千鶴: 版築ブロックの線膨張係数および乾燥収縮に関する基礎的研究, 日本コンクリート工学年次論文集, vol.41, No.1, pp.2021-2026, 2019
- 3) 江詩唯, 今本啓一, 清原千鶴, 徐建恒: 全量産業副産物としたクリンカーフリーコンクリートの開発, vol.40, No.1, pp.69-74, 2018
- 4) 中村航, 輿石直幸: 戸建住宅の組積耐力壁に用いる非焼成土ブロックの材料・調合および製造条件に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第 21 巻, 第 47 号, pp.17-21, 2015.2
- 5) 中浜貴生, 畑中重光, 三島直生: 煉瓦目地のせん断試験方法およ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, pp.1225-1232, 2009.7