

乾式工法で組積した柵状の控壁付 コンクリートブロック塀の面外曲げ載荷実験

荒巻 哲

1. 序

筆者らは、資源循環に寄与する建築構造体として、コンクリートブロックを乾式工法で組積した壁体の開発と提案を行っている。本研究は同構造に関する静力学特性の把握を目的に行ったものである。

本論文では、乾式工法で組積した柵状の控壁付コンクリートブロック塀(以下、控壁付乾式柵状塀)の面外方向繰り返し水平載荷実験を行い、その力学性状を調べ、解析結果との比較を行った。

2. 控壁付乾式柵状塀

本研究室ではこれまでに、リユースやリサイクルなどの資源循環に寄与する構造体として、摩擦抵抗型乾式組積構造(SRB-DUP 構造: Steel Reinforced Brick structure based on Distributed Unbond Prestress theory)を開発し、その力学的特性の解明や設計方法の検討を行ってきた¹⁾。近年、耐震安全性の確保が課題となっている従来の空洞コンクリートブロックを用いたブロック塀壁体に比べて、乾式ブロック壁は鉛直方向に入る補強筋の位置が異なるため、耐震安全性を確保しながら自由な平面、立面形状のブロック塀を構築できる。提案するブロック塀は図1のような形状を想定しており、構成要素であるブロック壁は面内方向の載荷に対し、高いエネルギー吸収能力を示すとともに、面外方向には大変形を与えた後も元の形状に戻る非常に高い復元性が確認されている²⁾³⁾。また、ブロック梁も面内外の曲げに対して塑性化後も耐力上昇し続け、高い変形能力を有することがわかっている⁴⁾。

3. 組積体の曲げ圧壊時の水平力算定

以下における算定式に基づいて、コンクリートブロックに曲げ破壊が生じるときの水平力を算出する。面内壁のみで水平力に抵抗とした場合の組積体の圧縮縁からの中立軸距離 x_n は、組積体に生じる圧縮応力

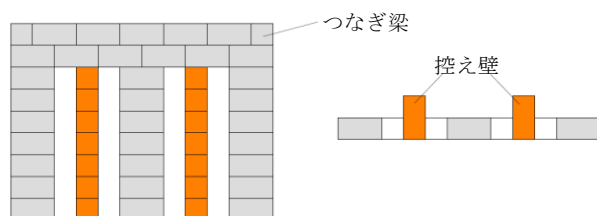


図1 提案するブロック塀

と全ボルトに生じる引張及び圧縮応力のつり合い式で以下のように表される。

$$\frac{1}{2}\sigma_0 t x_n = n\sigma_0 a_t \sum_{i=1}^m \frac{\left\{\frac{p}{2}(2i-1) - x_n\right\}}{x_n}$$

t : 壁体の有効厚さ

n : ヤング係数比(= E_s/E_b)

E_s : ボルトのヤング係数

E_b : 組積体のヤング係数

a_t : ボルトの有効断面積

m : 加力軸上にあるボルトの本数(=2)

p : ボルトのピッチ

この式を変形すると以下の(1)式が得られる。 x_n はこの(1)式の解として算定できる。

$$t x_n^2 + 2m n a_t x_n - p m^2 n a_t = 0 \quad \dots(1)$$

面外曲げを受ける壁も水平力に抵抗するとしたとき、圧縮縁からの中立軸距離 x_n は同様にして組積体に生じる圧縮応力と全ボルトに生じる引張及び圧縮応力のつり合い式で以下のように表される。

$$\frac{1}{2}\sigma_0 t x_n = \frac{n\sigma_0}{x_n} \left\{ \left(\frac{p}{2} - x_n\right) a_t + \left(\frac{3}{2}p - x_n\right) A_t \right\}$$

A_t : 面外壁内のボルトも含めたボルト総断面積(加力方向によって a_t と A_t の位置が入れ替わる)

この式を変形すると以下の(2)(3)式が得られる。

正方向加力時

$$t x_n^2 + 12n a_t x_n - 16p n a_t = 0 \quad \dots(2)$$

負方向加力時

$$t x_n^2 + 12n a_t x_n - 8p n a_t = 0 \quad \dots(3)$$

(1)式及び(2),(3)式で得られた圧縮縁からの中立軸距離 x_n を用いて、組積体の圧縮力、ボルトの引張力及び圧縮力は表1のようになる。

表1の値を使って組積体が曲げ圧壊するときの水平力 Q_{HB} はモーメントのつり合いから以下で算定できる。

表1 組積体の圧縮力とボルトの圧縮力及び引張力

	面内壁のみで抵抗するとき	面外壁と面内壁で抵抗するとき(正方向加力)	面外壁と面内壁で抵抗するとき(正方向加力)
圧縮力(組積体)	$C_b = \frac{1}{2}\sigma_0 t x_n$	$C_b = \frac{1}{2}\sigma_0 t x_n$	$C_b = \frac{1}{2}\sigma_0 t x_n$
圧縮力(ボルト)	$C_s = n\sigma_0 a_t \left(\frac{p}{2x_n} - 1\right)$	$C_s = n\sigma_0 a_t \left(\frac{p}{2x_n} - 1\right)$	$C_s = n\sigma_0 A_t \left(\frac{p}{2x_n} - 1\right)$
引張力(ボルト)	$T_s = n\sigma_0 a_t \left(\frac{3p}{2x_n} - 1\right)$	$T_s = n\sigma_0 A_t \left(\frac{3p}{2x_n} - 1\right)$	$T_s = n\sigma_0 a_t \left(\frac{3p}{2x_n} - 1\right)$
備考	曲げ圧壊: $\sigma_0 = \sigma_c$	正方向加力 $t = 100\text{mm}$	負方向加力 $t = 540\text{mm}$

$$Q_{HB} = \frac{1}{h} \left\{ T_s \cdot \frac{p}{2} + C_s \cdot \frac{p}{2} + C_b \left(p - \frac{x_n}{3} \right) \right\} \quad \dots(4)$$

算定した水平力を表 2 に示す。

表 2 算定した水平力 (単位: kN)

	加力方向	破壊形式	水平力	面内壁のみで抵抗するとき	面外壁と面内壁で抵抗するとき
コンクリートブロックの圧縮強度	正	曲げ圧壊	Q_{HB}	22.5	33.8
	負	曲げ圧壊	Q_{HB}	-22.5	-55.8
組積体の圧縮強度	正	曲げ圧壊	Q_{HB}	11.3	17.7
	負	曲げ圧壊	Q_{HB}	-11.3	-29.2

4. 実験概要

試験体(BW1)の構成要素のうち、使用したコンクリートブロックを図 2 に、水平補強鋼板を図 3 に示す。コンクリートブロックはこのブロック塀に適した形状にプレス成形し製造されたものである。建築用コンクリートブロックの規格 JIS-A-5406 に準じて製造されたもので、同規格中の圧縮強さ試験の方法に従って行った圧縮載荷実験で得られた全断面圧縮強さは平均 42.0N/mm² であった。つなぎ梁中央に用いるブロックは、載荷治具を試験体と固定するためのボルト (M16) を通すための孔が空けられている。

水平補強鋼板は厚さ 1.6mm の普通鋼製亜鉛メッキ鋼板を用い、壁部分には水平補強鋼板 A(1.6×100×100mm)と水平補強鋼板 B(1.6×220×100mm)をそれぞれ約 600mm 間隔で破れ目地状に、つなぎ梁部分には水平補強鋼板 A, B, C(1.6×340×100mm), D(1.6×820×100mm)を図 4 のように破れ目地状に挿入した。

鉛直補強要素にはいずれも普通鋼製で M12 の両切ボルト、高さ 40mm の高ナット、丸座金及びばね座金を用い、両切りボルトは水平補強鋼板の位置で継ぐのに適した長さのものを使用した。

試験体の構成と形状を図 4 及び図 5 に示す。試験体はコンクリートブロックを 11 層目までは図 4 のように芋目地状に組積し、つなぎ梁部分である 12~14 層目では破れ目地状に、また 1/2 タイプのコンクリートブロックをいずれも小口面が外になるように組積して作製した。12 層~14 層を構成するつなぎ梁中央を構成するブロックの孔に STKR(H100×B100×9)や 32 の鉄板で作製した治具をボルトで固定し、ピンジョイントを介して図 5 に示す黄色矢印の位置より荷重を行った。また、組積した際にすべてのボルトに 7.0kN/本のプレストレスを与えた。

載荷方法については、鉛直方向は無載荷とし、水平方向に正負交番載荷を行った。加力に変形角を制御して履歴の同一変形段階で 3 回ずつ行った。変形角は小

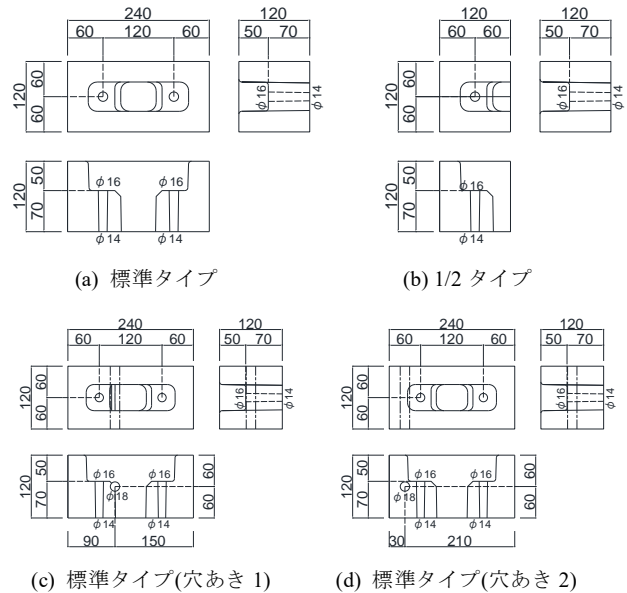


図 2 コンクリートブロックの形状 (単位: mm)

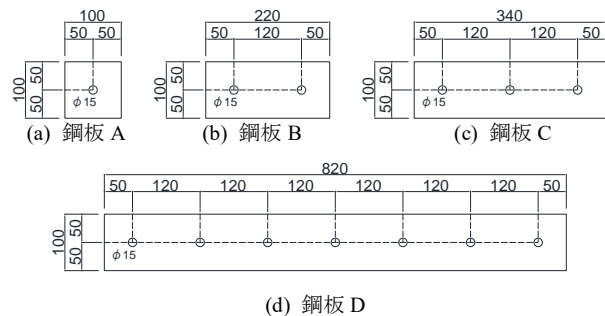


図 3 水平補強鋼板の形状 (単位: mm)

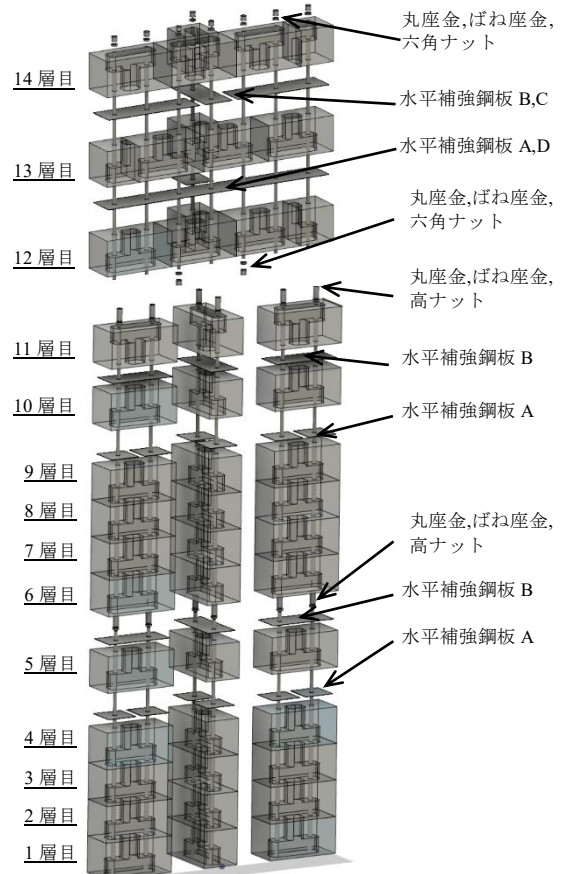


図 4 試験体(BW1)の構成

さい方から $0.10 \times 10^{-2} \text{rad.}$, $0.20 \times 10^{-2} \text{rad.}$, $0.33 \times 10^{-2} \text{rad.}$, $0.50 \times 10^{-2} \text{rad.}$, $0.75 \times 10^{-2} \text{rad.}$, $1.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$, $2.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$, $3.3 \times 10^{-2} \text{rad.}$, $5.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ と大きくしていき計 27 サイクルの繰り返し荷重を行った。

5. 実験結果及び考察

本実験の考察では、既往の研究で行った、今回と同様の構成で芋目地状に組積した曲げ変形が卓越するブロック壁試験体(BL1)も比較対象として検討する。図6に試験体 BW1 及び BL1 の全荷重過程での水平荷重と変形角の関係を示す。図6中には算定した組積体に曲げ圧壊が発生するときの水平荷重(コンクリートブロックの全断面圧縮強度を使用した算定値)とボルトが曲げ降伏したとき(赤丸)を示している。

試験体 BW1 は負方向荷重時においては変形の増大に伴って最大耐力が増大しているが、正方向荷重時は組積体の曲げ圧壊の影響もあってか $5.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の変形では最大耐力が伸びなかった。また、履歴曲線はスリップ型の履歴を示した。BW1 試験体は負方向の荷重で曲げによる圧壊は見られず、面外壁が水平力に抵抗しない場合の圧壊時水平力 $\pm 22.5 \text{kN}$ を実験値が上回っ

ても圧壊しなかったため面外壁は水平力に抵抗していることが確認できる。ボルトが降伏した後に水平耐力が伸びているのは、正方向の荷重では降伏したボルト以外の引張に効くボルトがまだ降伏しておらず、負方向の荷重では圧縮力を負担するコンクリートブロックの面積が広いと考えられる。図6(a)において負方向の荷重ではブロック圧壊時水平力算定式は -55.8kN なので、ブロックが圧壊するか引張ボルトが破断するまで耐力が上昇すると考えられる。

正方向の荷重では曲げ圧壊が発生し、コンクリートブロックの全断面圧縮強度を使用した算定値は概ね実験値と一致した。曲げ圧壊が発生しなかった試験体 BL1 においても水平力算定式を当てはめると実験値がブロックの全断面圧縮強度を使った算定値以下だった

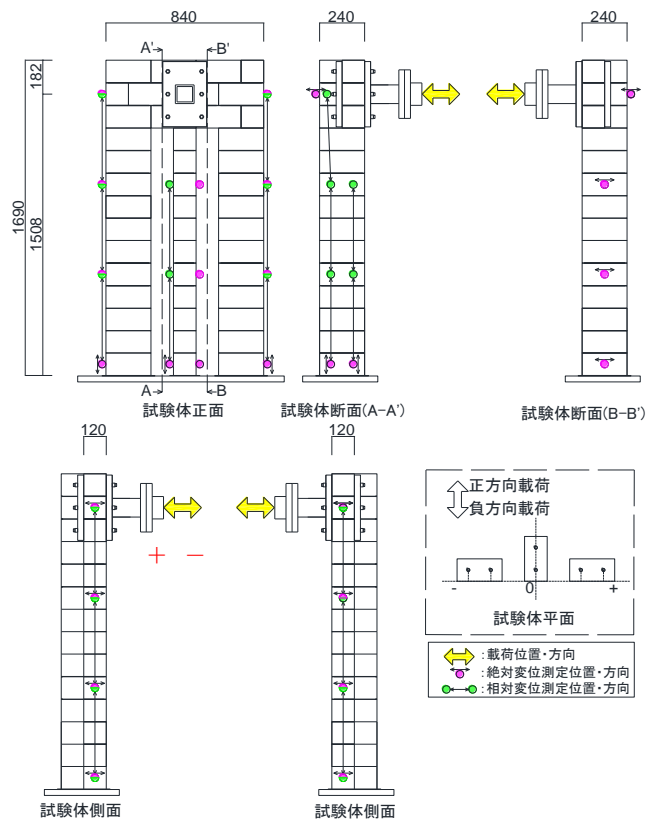
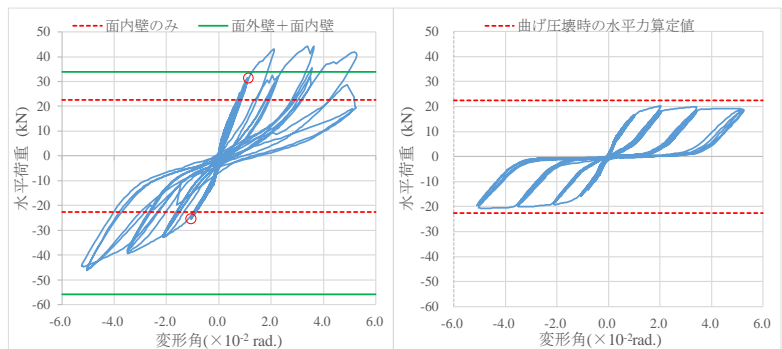


図5 試験体の形状(単位:mm)



(a) 試験体 BW1 (b) 試験体 BL1

図6 水平荷重-変形角関係(全荷重過程)

ため圧壊が発生しなかったといえる。また、ブロック1個分を高さ方向に積んだ試験体 BL1 に面外曲げを受ける壁2体とつなぎ梁がついた形となる試験体 BW1 だが、同一の変形で約二倍の水平耐力を示した。

試験体の頂部変形に占める曲げ変形の割合について実験結果から得られたグラフを図7に示す。グラフは

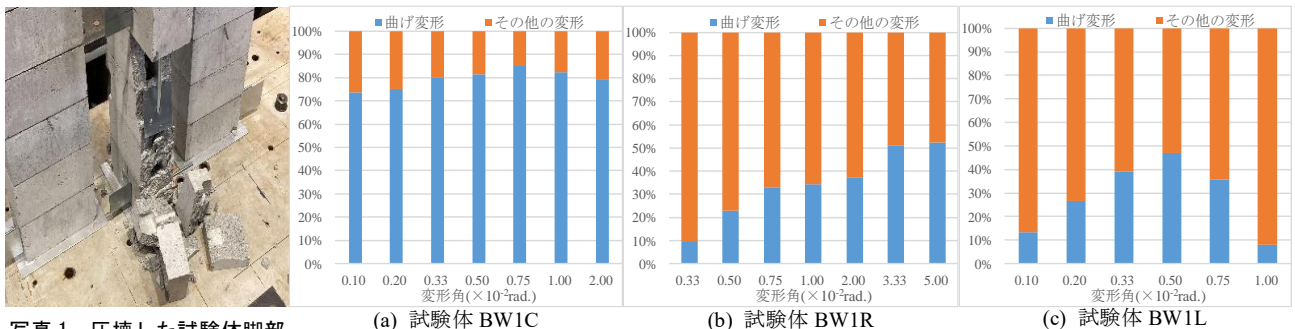


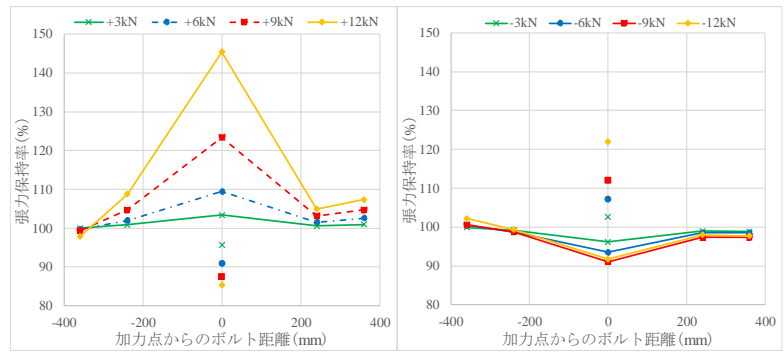
写真1 圧壊した試験体脚部

図7 試験体頂部における全水平変位に占める曲げ変形の割合

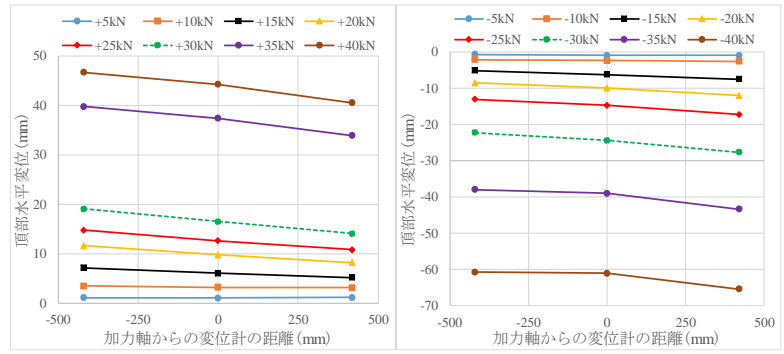
試験体 BW1 の構成要素であるブロック壁 BW1C(試験体中央の面内壁),BW1R, BW1L(試験体左右の面外壁)について示したものであり、試験体各頂部の全水平変位に占める曲げ変形の割合を変形角ごとに表したものである。試験体 BW1C は変形角が小さい時から曲げ変形の割合が高く、 $0.75 \times 10^{-2} \text{rad}$ の変形角以降は曲げ変形が占める割合が減っている。一方、試験体 BW1R や BW1L は曲げ変形が占める割合が BW1C に比べ小さく、左右非対称の挙動が確認された。

次に、荷重中における最下層のボルトの張力変化と加力点からのボルト位置の関係について示す。図 8 には荷重 1 サイクル目における正方向の荷重時と負方向の荷重時の水平荷重 3.0kN ごとの最下層のボルトそれぞれの張力保持率を示している。また、図 8 中に示しているとびとびの値は、加力方向軸上にある加力点から 180mm 離れた面内曲げを受けるブロックのボルトの張力保持率であり、横軸の負の値は図 5 の試験体平面の図において対称軸から左側を表しており、正の値は対称軸から右側を表している。図 8 より、各ボルトでばらつきはあるが+の水平力を受けたときに面内曲げを受けるブロック内の加力点(0mm)のボルトの張力が最も大きくなるが、面外曲げを受けるブロックのボルトの張力も増えているので、少なからず引張力に抵抗していることが確認できる。

また、圧縮力を受けるとき(負方向荷重)と比べて引張力を受けるとき(正方向荷重)の方が張力保持率の変化が大きいのは、圧縮力にはボルトだけでなくコンクリートブロックも抵抗するため、ボルトだけで引張力に抵抗する場合と比べて、ボルトの負担する力が小さくなるためだと考えられる。試験体は加力軸に対して左右対称なので図 8 のグラフも左右対称になると考えていたが、実際はそうならなかった。このようになった原因の一つに試験体が作製時にねじれていたことが考えられる。図 9 は荷重中の頂部水平変位と加力軸からの距離の関係を水平荷重 5kN ごとに示したものである。図 9 より実験では試験体頂部中央に加力したが、両側の壁の剛性が低いため頂部の水平変位はほぼ一様に生じていることが確認できる。しかし、水平荷重が大きくなるほど試験体に時計回りのねじれが生じていることがわかった。



(a) 正方向荷重時 (b) 負方向荷重時
図 8 荷重中の最下層のボルトの張力変化と位置関係



(a) 正方向荷重時 (b) 負方向荷重時
図 9 荷重中における試験体頂部水平変位と位置関係

6. まとめ

本研究では、乾式工法で組積した柵状のコンクリートブロック塀の頂部面外方向に正負交番の繰り返し水平荷重実験を行い、以下の知見が得られた。

- (1) ブロック 1 個を高さ方向に積んだだけの試験体 BL1 に比べ、つなぎ梁や面外壁がついた試験体 BW1 は約 2 倍の水平耐力を示した。
- (2) 組積体曲げ圧壊時の水平荷重算定値は概ね実験値と一致した。また、負方向荷重では圧縮力を負担するコンクリートブロックの面積が広いので圧壊せず、正方向荷重よりも水平耐力が大きくなることがわかった。
- (3) 実験では試験体 BW1 の頂部中央に加力したが、両側の面外壁の剛性が低いため頂部の水平変位はほぼ一様に生じていることが確認できた。
- (4) 作製時の試験体のねじれがボルトの張力保持率や加力につれての試験体のねじれに影響を与えていたことがわかった。課題として、ブロック塀の組立時にねじれが生じないように施工方法を考える必要がある。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C)、課題番号:19K04712, 研究代表者:山口謙太郎)の助成を受けた。末尾ながら記して謝意を示す。

【参考文献】

- 1) 山口謙太郎: 摩擦抵抗型乾式組積構造部材の設計と性能, 九州大学博士論文, 2005.2
- 2) 吉田真央, 山口謙太郎, 石倉大暉, 川瀬博: 乾式工法で組積したコンクリートブロック壁体の力学特性-芋目地または破れ目地状に組積した壁体の面内繰り返し水平荷重実験-, 都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 33, pp. 63-70, 2018.1
- 3) 緒方智: 摩擦抵抗型乾式ブロック造制振壁の開発に関する研究-その3 乾式工法で組積されたコンクリートブロック壁の面外曲げ荷重実験, 日本建築学会九州支部研究報告, 2015年3月
- 4) 窪川祐輔: 乾式工法で組積したコンクリートブロック梁の面外および面内曲げに対する力学特性, 九州大学修士論文, 2020.2