

曲げ変形が卓越する乾式組積コンクリートブロック壁の 面内繰り返し水平載荷実験

箆島 遼也

1. 序

本研究は、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を鉄骨ラーメン構造などの比較的剛性の低い建築物の制振壁として利用する方法の開発を目的に行っている。

本論文では、高さに比べて長さの短い乾式組積コンクリートブロック壁を試験体として、その頂部面内方向に正負交番の静的繰り返し水平載荷実験を行い、水平耐力や剛性、変形性状などの力学特性を調べた。

2. 摩擦抵抗型乾式組積コンクリートブロック壁

筆者が所属する研究室では、リユースやリサイクルなどの資源循環に寄与する建築構造体として、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、その力学特性の解明や設計方法の検討を行ってきた。また、このSRB-DUP 構造の壁体乾式ブロック造壁体を利用した摩擦制振システムの開発を行ってきた。乾式組積コンクリートブロック造制振壁に用いるブロック壁は、水平方向に補強コンクリートブロック造壁体の横筋に相当する補強鋼板を挿入し、鉛直方向にコンクリートブロックを組積しながら縦筋に相当する鋼製のボルトを等間隔に配置する。そして、補強鋼板の位置で高ナットを締め付け、その上部に次のボルトを接合して構築していく。乾式組積の手順は基本的に SRB-DUP 構造に準じたものである。SRB-DUP 構造の壁体がすべての層でナットの締め付けを行うのに対し、この乾式ブロック造制振壁では補強コンクリートブロック造壁体の横筋に近い間隔で水平補強板の挿入と固定が行われている。また、ブロックを一部上下逆使いにすることにより、滑り層の制御も容易に行うことができる。

既往の研究では、長さ720mm以上のコンクリートブロック壁については、主な塑性変形は壁体上部におけるせん断滑りであった。しかしそれらの壁部材よりも細長い形状の壁、柱部材は曲げ変形が卓越する可能性が高い。そのため、本研究では、長さをブロック1個、2個分とした乾式組積コンクリートブロック壁の面内水平載荷実験を行い、水平耐力や変形性状などの力学特性を調べた。

3. 壁体の曲げ耐力と曲げ剛性解析式

今回の試験体では、SRB-DUP 構造壁部材に準じた乾式組積を行うため、SRB-DUP 構造壁部材に関する耐力や剛性の算定式を準用して、諸数値を算定する。

3.1 曲げ降伏発生時の曲げ耐力

高さに比べて長さの短い SRB-DUP 構造壁部材については、水平力に対して曲げ変形が卓越する。曲げ降伏時の曲げ耐力は次式で与えられる。

$$Q_{MAS} = \frac{M_{AS}}{H} \quad (1)$$

Q_{MAS} ：壁部材の損傷限界時の曲げ耐力によるせん断耐力

M_{AS} ：壁部材の損傷限界時の曲げ耐力

H ：壁部材の高さ

$$M_{AS} = \left\{ \frac{2}{3} \cdot a_t \cdot p^2 (4N^3 - N) + \frac{tD^3}{12n} \right\} \sigma_{s0} \quad (2)$$

a_t ：ボルトの断面積

p ：ボルトのピッチ

N ：壁部材長さを構成する個体要素の個数で、 $D/240$ で与えられる

D ：壁部材長さ

n ：ブロックに対するボルトのヤング係数比

σ_{s0} ：プレストレスを与えたボルトが降伏するとき、中立軸から単位長さ離れた位置でボルトに生じている応力

$$\sigma_{s0} = \frac{2(f_s - P_{st}/a_t)}{D - 120} \quad (3)$$

f_s ：ボルトの降伏点

P_{st} ：壁部材両端の最下層のボルトに入っているプレストレス

本研究では実験により最下層のボルトが降伏するときの耐力を調べ、(1)~(3)式の検証を行う。

3.2 曲げ剛性解析式

壁および柱部材に生じるせん断応力度と変形角の関係は次式で表される。

$$\theta = \theta_b + \theta_e = \left(\frac{Ah^2}{3EI} + \frac{\kappa}{G} \right) \tau \quad (4)$$

θ ：変形角

A ：有効断面積

h ：壁体の高さ

G：組積体のせん断弾性係数

κ ：せん断変形の形状係数(=1.2)

τ ：せん断応力度

ここで、変形角は壁体の頂部の水平変位を壁体高さで除した部材角、せん断応力度は壁体に与えた水平荷重を有効断面積で除した平均せん断応力度とする。

対象の壁体にはプレストレスが与えられており、載荷初期においては全断面が圧縮、引張のどちらにも有効であり、載荷に伴って中立軸の位置は移動する。この移動は組積体に生じる圧縮応力と全ボルトに生じる引張応力および圧縮応力が釣り合うまで継続する。中立軸の移動が完了した時点のEIは(5)式で表される。

$$EI = E_s I_s + E_b I_b = E_s \left(I_s + \frac{I_b}{n} \right) \quad (5)$$

E：壁部材のヤング係数

I：壁部材の断面二次モーメント

E_s ：ボルトのヤング係数

I_s ：ボルトの断面二次モーメント

E_b ：コンクリートブロックのヤング係数

I_b ：コンクリートブロックの断面二次モーメント

n：ヤング係数比

I_s はボルトに等間隔に挿入されていることから、数列の和に関する式を利用して(6)式で表される。

$$I_s = m I_{s0} + a_t \left\{ \begin{aligned} &\frac{p^2}{6} m(m+1)(2m+1) \\ &+ pm(m+1)(60-p-x_n) + m(60-p-x_n)^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

I_{s0} ：ボルト単体の断面二次モーメント

m：ボルトの本数

p：ボルトのピッチ

a_t ：ボルトの有効断面積

x_n ：壁体圧縮縁から中立軸までの距離

x_n は組積体に生じる圧縮応力と全ボルトに生じる引張応力および圧縮応力の釣り合いの式である(7)式で表される。

$$\frac{1}{2} \sigma_0 t x_n^2 = n \sigma_0 a_t \sum_{t=1}^m \{ (p_i - (p - 60 + x_n)) \} \quad (7)$$

この式を整理して(8)式が導かれ、 x_n は以下の(8)式の解として求められる。

$$t x_n^2 + 2 m n a_t x_n - (p m - p + 120) m n a_t = 0 \quad (8)$$

これらの式を用いてコンクリートブロック壁の曲げ降伏発生時の水平力および面内剛性を算出する。

4. 実験概要

試験体を使用するコンクリートブロックと水平補強鋼板を図1に示す。コンクリートブロックはこのブロック壁に適した形状にプレス形成されたもので、全断

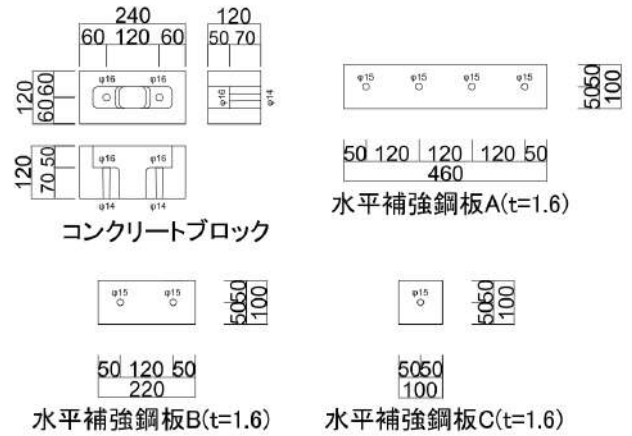


図1 試験体の構成要素

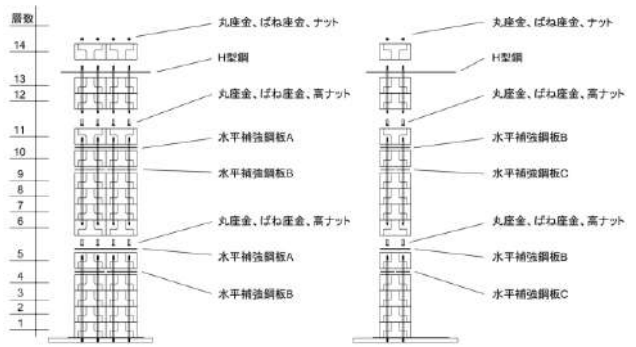
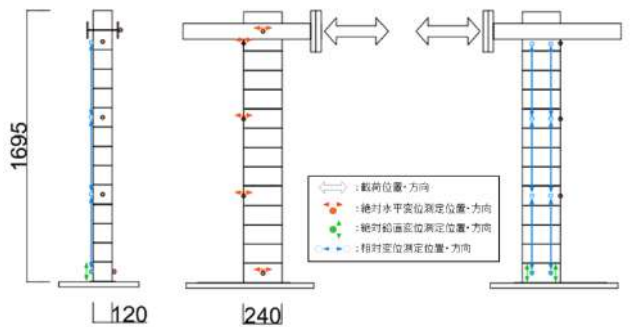
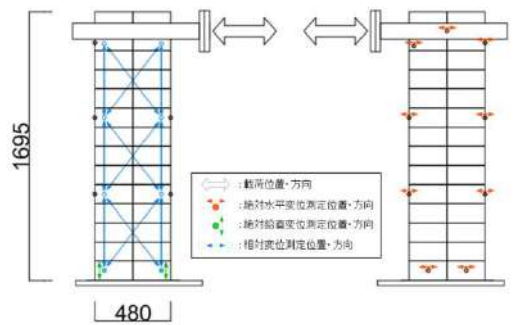


図2 試験体の構成(左：BW480 右：BW240)



BW240



BW480

図3 試験体の形状

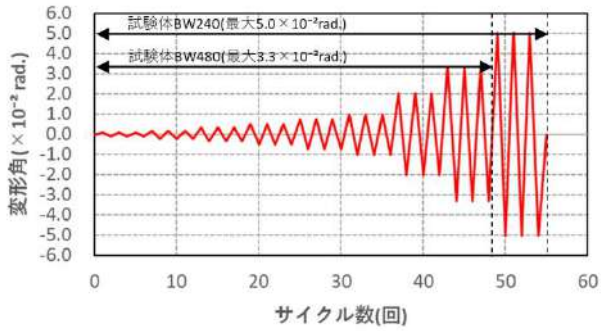


図4 荷重プログラム

面圧縮強度は圧縮試験により平均 42.0N/mm^2 であった。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、水平補強鋼板 A($1.6 \times 460 \times 100\text{mm}$)、水平補強鋼板 B($1.6 \times 220 \times 100\text{mm}$)、水平補強鋼板 C($1.6 \times 100 \times 100\text{mm}$) を補強コンクリートブロック造の横筋に近い間隔で図2のように2層ずつ挿入した。

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

試験体の形状を図3に示す。試験体はコンクリートブロックを長手方向に1個、2個並べた長さで、高さ方

向に14層組積した。13-14層間にはSS400で黒皮のH形鋼($H200 \times B800 \times t_w 5.5 \times t_f 8$)で制作した治具を挿入し、ピンジョイントを介して図3に示す白矢印の位置より荷重を行った。

ブロック壁試験体の各層のボルトには、下から1層目~5層目、6層目~11層目、12層目~最上層のすべての層に7.0kN/本のプレストレスを与えた。

荷重プログラムを図4に示す。鉛直方向は無荷重とし、水平方向に正負交番荷重を行った。水平荷重は履歴の同一変形段階で3回ずつ繰り返し、試験体 BW240 には約 $5.0 \times 10^{-2}\text{rad}$ まで、試験体 BW480 には約 $3.3 \times 10^{-2}\text{rad}$ まで変形角を与える荷重を行った。

5. 実験結果および考察

試験体 BW240 に 5.0×10^{-2} まで変形角を、試験体 BW480 に 3.3×10^{-2} までの変形角を与えたときの水平荷重-変形角関係を図5に示す。この時水平荷重は、圧縮を正、引張を負としている。図中の●印は塑性変形が発生した点を示している。試験体に塑性変形が発生した点は図5において、その直後の測定点までの傾きが1/2以下になったことを塑性変形の発生とみなしている。

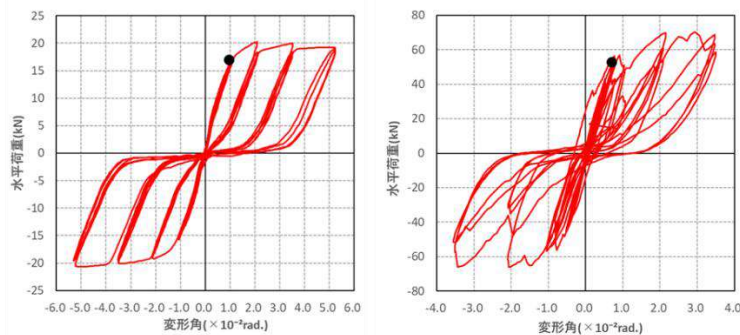


図5 水平荷重-変形角関係(左: BW240 右: BW480)

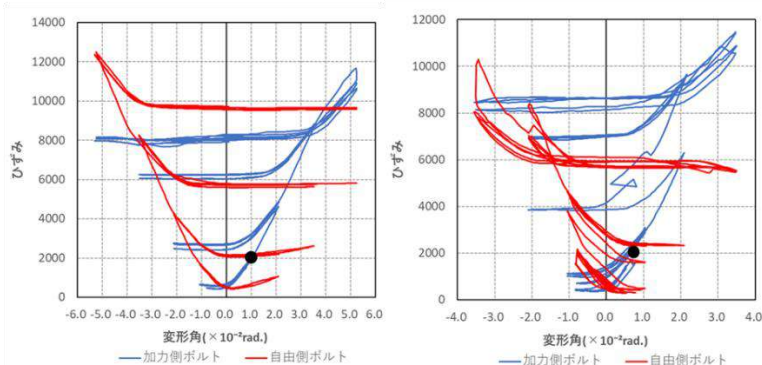


図7 最下層ボルトのひずみ-変形角関係

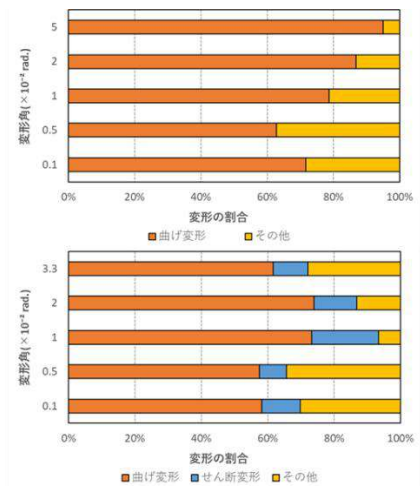


図6 荷重初期の変形の割合 (上: BW240 下: BW480)

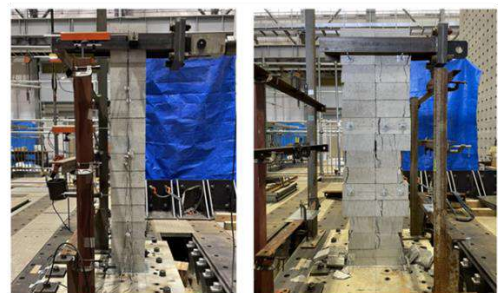


写真1 荷重後の試験体の状況

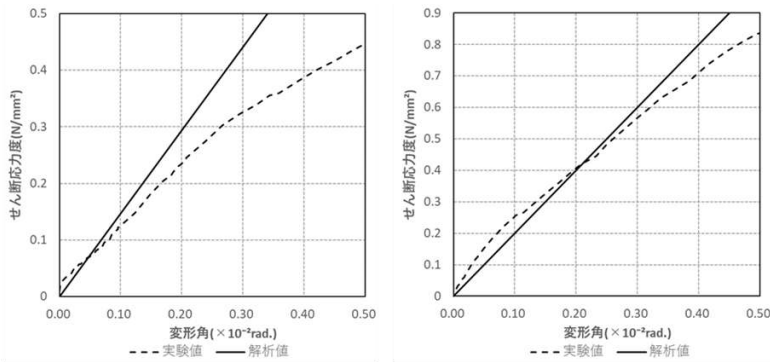


図8 壁体の面内初期剛性(左: BW240 右: BW480)

図5より、両試験体はスリップ型の履歴を示している。試験体 BW240 は塑性変形発生まで最大耐力は増加し続け、塑性変形後も急激に耐力低下することはなかった。試験体 BW480 もボルト降伏まで最大耐力は増加し続け、ブロックの破損後はブロックの脱落に伴って、耐力が低下した。また、BW240 よりもボルト本数が多く壁体の断面積の大きい BW480 は、水平耐力が BW240 の 3.4 倍であった。表1に、(1)式により求められた曲げ耐力の算定値と実験値の比較を示す。両試験体とも実験値を安全側に適切に評価していた。

図6は各試験体の曲げ変形とせん断変形の割合を示したものである。荷初期において曲げによる変形が60~90%を占めており、曲げ変形が卓越している。

各試験体を変形させたときの最下層のボルトのひずみ-変形角関係を図7に示す。図中の●印はボルトのひずみが 2000μ に到達した点を示している。図7から試験体 BW240 は $1.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ を、試験体 BW480 は $0.75 \times 10^{-2} \text{rad.}$ を超えた値周辺でひずみが 2000μ に到達しており、ボルトが降伏していることがわかる。図5の試験体が塑性変形した点と図7ボルトが降伏した点の変形角は一致している。

試験体の初期剛性の解析値と実験値を図8に示す。変形のごく初期に剛性の高い範囲が見られるが、曲げの中立軸が壁体の中央付近に位置する段階の挙動と考えられる。ここではその後の範囲を荷初期の弾性域とし、変形角が $0.002 \times 10^{-2} \text{rad.}$ から $0.2 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の範囲において各試験体の初期剛性の実験値を求めた。実験値と算定値の比較を表2に示す。面内初期剛性を試験体 BW240 は約35%過大評価し、試験体 BW480 は約1%過大評価した。面内初期剛性の算定式はおおよそ妥当であると考えられるが、さらなる検討が必要である。

荷後の試験体の状況を写真1に示す。荷後、試験体 BW240 にはブロックの割れはほとんど見られなかったが、脚部のブロックがやや崩れていた。

表1 曲げ耐力の比較

試験体	実験値 (kN)	算定値 (kN)	算定値/ 実験値(%)
BW240	16.7	15.0	89.8%
BW480	51.8	39.6	76.4%

表2 面内剛性の比較

試験体	実験値 (N/mm ²)	算定値 (N/mm ²)	算定値/ 実験値(%)
BW240	107	147	137%
BW480	199	200	101%

試験体 BW480 にはほぼすべてのブロックにひび割れが発生したが、壁体脚部、中央側面の曲げによる破損が顕著にみられた。

6. まとめ

本研究では、曲げ変形が卓越する乾式組積コンクリートブロック壁を試験体として頂部面内方向に正負交番の繰返し水平荷重実験を行い、以下の知見を得た。

- (1)試験体に $0.75 \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ の変形角を与えた段階で最下層のボルトに降伏が生じたが、その点での水平耐力は、BW480 が BW240 の 3.4 倍であった。
- (2)変形角の増大にともなって最大耐力は増大し、ブロックのひび割れ後は、ブロックの脱落に伴って耐力が低下した。
- (3)高さ比べて長さの短い乾式組積コンクリートブロック壁において、壁体の変形における曲げ変形の割合は両試験体とも60~90%程度あり、曲げ変形が卓越しているといえる。
- (4)コンクリートブロック壁のボルトに曲げ降伏が生じるときの水平耐力は算定式を準用して概算することができた。
- (5)壁体の面内初期剛性は、SRU-DUP 構造壁体に関する算定式を準用して概算したが、さらなる検討が必要である。

謝辞

本研究の実験は、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)を利用して行った。末尾ながら記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 山口謙太郎, 川瀬博, Bradley Guy: 循環型の建築構造- 凌震構造のすすめ -, 技報堂出版, 2008年3月
- 2) 山口謙太郎, 他3名: 炭素固定に有効な解体材活用・建物制震システムの開発研究, 科学研究費助成事業データベース, 2013年度研究成果報告書, 2014年5月
- 3) 山口謙太郎: 摩擦抵抗型乾式組積造部材の設計と機能, 九州大学博士論文, 2005年2月
- 4) 山口謙太郎, 他3名: 分散型アンボンドプレストレスを用いた組積造構造物の常用設計に関する研究その3 壁体の面内剛性解析とその検証実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000年9月