

# 応急補強手法を考慮した無補強組積造壁の面外耐震性能に関する実験的研究

1815064 山田 應堂  
 1815065 山田 凜斗  
 指導教員：崔 琥

無補強組積造壁 面外耐震性能 4点曲げ試験  
 応急補強 最大耐力 破壊パターン

## 1. 研究の背景および目的

無補強組積造建物は施工の簡便さから、最も古く、最も多く使われている構造形式である。しかし、無補強組積造建物の耐震性能は他の構造形式に比べて相対的に乏しいため、地震が発生すると必ず甚大な被害を受けている。

そこで本研究では、①無補強組積造壁の面内および面外方向の破壊メカニズムおよび耐震性能を明らかにすること、また、②余震に対する2次災害を減らすための残存耐震評価手法および応急補強手法を開発すること、を主目的とする。本年度は、昨年度に行った開口をパラメータとした無補強組積造壁の面内正負交番繰り返し載荷実験に引き続き、応急補強手法を考慮した面外静的実験を行い、無補強組積造壁の面外耐震性能を実験的に明らかにするとともに、本研究で提案した応急補強手法による面外耐震性能への効果を詳細に検討する。

## 2. 実験の概要

### 2.1 試験体の概要

本研究では、表1および図1に示す British Standard の BS EN 1052-2:2016<sup>1)</sup>の規定に従い、面外静的載荷実験用試験体を制作した。本実験の試験体の詳細を図2に示す。同図に示すとおり、試験体は横目地破壊型が430mm×550mm（幅×高さ）、縦目地破壊型が870mm×270mm（幅×高さ）とし、計36体の試験体を制作した。

表1 British Standard の BS EN 1052-2:2016 の規定

破壊方向	$H_u$ (mm)	$b$ (mm)	追加条件	加力点から試験体端まで(mm)
横目地	any	$\geq 400$ and $\geq 1.5 l_u$	$l_2$ 内に最低2つの横目地が入る	$\geq 15$
縦目地	$\leq 250$	$\geq 240$ and $\geq 3 l_u$	$l_2$ 内に最低1つの縦目地が入る	
	$> 250$	$\geq 1000$	$l_2$ 内に最低1つの縦目地と最低1つの横目地が入る	

### 2.2 試験体名の付け方

各試験体名は[破壊モード] - [レイヤー数] - [レンガの種類] - [補強方法] - [補強面]の順とし、[破壊モード]はHJ (Head Joint Collapse Type、縦目地破壊型)とBJ (Bed Joint Collapse Type、横目地破壊型)、[レイヤー数]は1L (Layer、赤レンガあるいはセメントレンガ)、2L (赤レンガ+セメントレンガ)と3L (赤レンガ+断熱材+セメントレンガ)、1Lの場合において[レンガの種類]はCB (Cement Brick、セメントレンガ)とRB (Red Brick、赤レンガ)、[補強方法]はWR (Wire mesh Reinforcing、ワイヤーメッシュ補強)とFR (FRP Reinforcing、FRP補強)、[補強面]はOS (One Side、片面)とBS (Both Sides、両面)とした。

### 2.3 応急補強の概要

本研究では、地震で損傷を受けた無補強組積造壁が余震などで崩壊するのを防ぐため、応急補強手法による面外耐震性能評価も合わせて行うこととする。本研究で適用する応急補強手法は、補強材の入手の容易さ、施工の簡便さや補強の確実さなどを総合的に考慮し、以下の3種類とした。

補強面は片面補強と両面補強を製作した。また、実験室

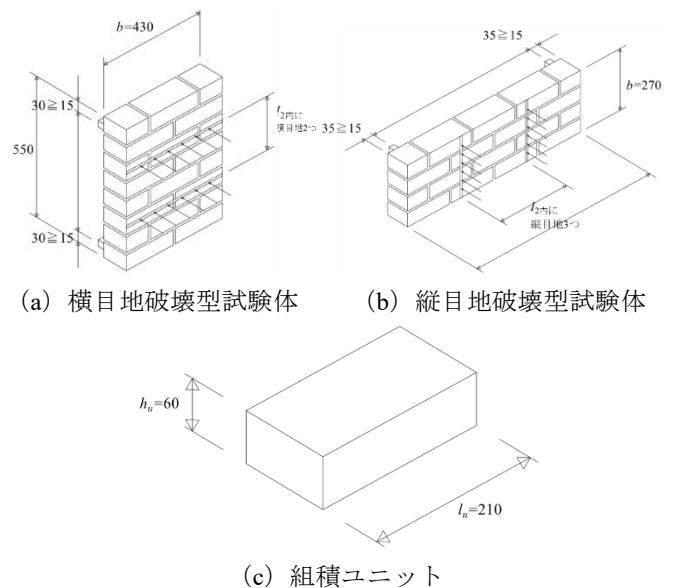


図1 試験体の詳細 (単位: mm)

の制約上、転倒防止補強材による補強は計算上でのみ行う。

(1) ワイヤーマッシュによる応急補強

ワイヤーマッシュによる BJ-1L-RB-WR-BS 試験体の補強の様子を図 2(a)に示す。ワイヤーマッシュは亜鉛引亀甲金網の径 0.7mm、番手#20、目開き 10mm のものを使用した。

(2) GFRP シートによる応急補強

GFRP (ガラス繊維シート) による BJ-1L-RB-FR-BS 試験体の補強の様子を図 2(b)に示す。接着剤はポリエステル樹脂塗料 94%、硬化剤 1%、空気硬化剤 5%を配合したものを使用した。

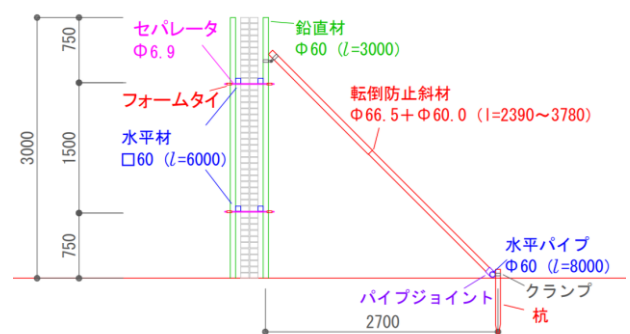
(3) 転倒防止補強システムによる応急補強

転倒防止補強システムによる補強の様子を図 2(c)に示す。本システムは主にアルミ合金製のφ60.0mm の丸パイプの鉛直材、φ60.0mm の角パイプの水平材、伸縮可能な転倒防止斜材で構成され、接合部はそれぞれクランプやパイプジョイントを用いることとした。転倒防止斜材、鉛直材および水平材は両端固定と仮定し、高さ 3m の壁体を支えるものとして計算を行った。その結果、転倒防止斜材および鉛直材は 2,000mm 間隔、水平材は 1,500mm 間隔で配置することとなり、その際の転倒防止斜材の弾性座屈荷重は 66.8kN、たわみは鉛直材が約 2mm、水平材が約 7mm となる。

壊すのに対し、FR 試験体ではガラス繊維シートが壁体を一体化させる効果があったため、レンガユニット内で破壊が生じた。



(a) ワイヤーマッシュ補強 (b) GFRP 補強



(c) 転倒防止補強システムの様子

図 2 応急補強の様子

3. 実験計画

3.1 加力計画

横目地破壊型 (BJ) 試験体のセットアップの様子を図 3 に示す。同図に示すとおり、1 台の加力ジャッキを用いた 2 つの加力点と 2 つの支点を有する 4 点曲げ試験を行う。加力は片側一方向繰り返し载荷とした。载荷ルールは、水平部材角+1/300、+1/200、+1/150、+1/100、+1/75、+1/60、+1/50、+1/37.5、+1/30 まで行い、試験体の破壊状況に応じて適宜変更した。

3.2 計測計画

図 4 に横目地破壊型 (BJ) 試験体の計測計画を示す。同図に示すように、BJ 試験体は各段で計測し、水平部材角は中央の 2 つの変位の平均値から求めた。一方、縦目地破壊型 (HJ) 試験体は上から 2 段目と 3 段目で計測し、水平部材角は BJ 試験体と同様、2 段目の中央の 2 つの変位の平均値から求めた。

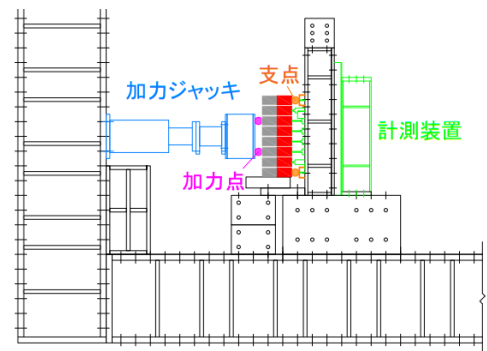


図 3 試験体のセットアップの様子 (横目地破壊型 (BJ) 試験体)

4. 実験結果

4.1 破壊パターン

代表的な無補強試験体および補強試験体のひび割れ図を図 5 および図 6 にそれぞれ示す。同図の実線はひび割れを、点線は外側が支点、内側が加力点を意味する。

図 5 および図 6 より、無補強および補強試験体ともほぼ全ての試験体で加力点間にひび割れが発生した。一方、BJ 試験体は目地モルタル間でひび割れが生じているのに対し (図 5 (a))、HJ 試験体はレンガを貫通するひび割れを伴うほぼ直線上のひび割れが生じた (図 5 (b))。また、FR 試験体以外の試験体では、基本的に目地モルタルで破

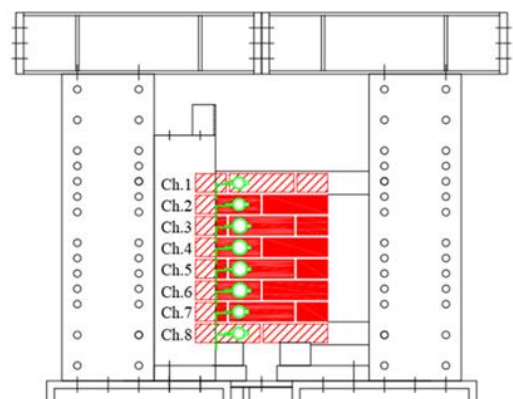


図 4 計測計画 (横目地破壊型 (BJ) 試験体)

### 4.2 荷重－変形関係

補強を施した試験体を含む全試験体の荷重－変形関係を図7に、最大荷重を後術の表2に、それぞれ示す。

無補強試験体において、BJ試験体の最大耐力はHJ試験体より高い結果となったが、両試験体の断面積を考慮すると（BJ試験体の断面積がHJ試験体の1.6倍程度）、両試験体の最大せん断応力はほぼ同程度となる。また、RB試験体の最大耐力がCB試験体より小さくなっており、RB試験体が面外方向により脆弱であることがわかった。

1L試験体は最大耐力を経験した後は急激に耐力が低下するのに対し、BJ-3Lを除き、2Lおよび3L試験体は支点側のRBが破壊され耐力が落ちた後に、加力点側のCBはまだ健全であるため、再び耐力が上昇した。また、2Lおよび3L試験体の最大耐力が1L試験体より若干高くなっていることから、片方の壁が破壊するまで他の壁も耐力に寄与していることがわかった。

WR試験体において、最大耐力が無補強試験体と同程度であったため、WRは耐力には寄与しないが、試験体の破壊に伴う耐力低下後、再び耐力が上昇していることから、壁体の崩壊防止には大いに効果があることが確認できた。また、使用した亜鉛引亀甲金網は方向性があるため、HJ試験体よりBJ試験体により適していることがわかった。さらに、上記のとおりWRは耐力に寄与しないため、無補強試験体と同様、RB試験体が面外方向により脆弱であった。

FR試験体において、最大耐力が無補強試験体より高いことから、FRは組積壁体を一体化させ、耐力を上昇させることがわかった。また、その効果はCB試験体がRB試験体より顕著であった。

### 4.3 最大曲げ応力の評価

式(1)および図8より各試験体の最大曲げ応力を評価し、その結果を表2に示す。

$$\sigma = \frac{3F(L_1 - L_2)}{2b \cdot t^2} \quad (1)$$

ここで、 $F$ は最大荷重、 $L_1$ は支点間距離、 $L_2$ は加力点間距離、 $b$ は破壊断面長さ、 $t$ は試験体の厚さである。

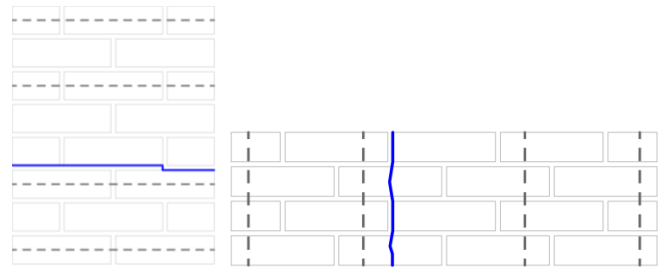
無補強試験体において、BJ試験体の最大曲げ応力はHJ試験体より小さい結果となった。この結果より、組積造壁は横目地にひび割れが入り上下方向に壁が割れて、面外方向に崩壊する破壊モードが卓越することが確認できた。また、最大耐力と同様、RB試験体の最大曲げ応力がCB試験体より面外方向に脆弱であることも確認できた。

2Lおよび3L試験体において、破壊実態を考慮せず全体の断面積で除した最大曲げ応力は1L試験体より小さいが、前述したとおり、2Lおよび3L試験体では両壁が同時に破壊しなかったため、それぞれの壁の断面積で除した最大曲げ応力は概ね1L試験体と同様の結果となった。

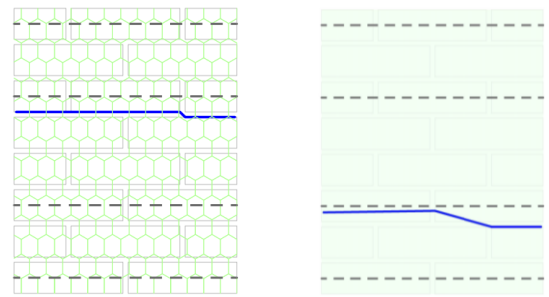
WR試験体において、最大耐力と同様、WRは最大曲げ応力には寄与せず、崩壊防止に効果があることや、RB試

験体が面外方向により脆弱であることが確認できた。また、無補強試験体と同様、BJ試験体の最大曲げ応力がHJ試験体より小さかったため、横目地破壊モードが卓越することが再度確認できた。

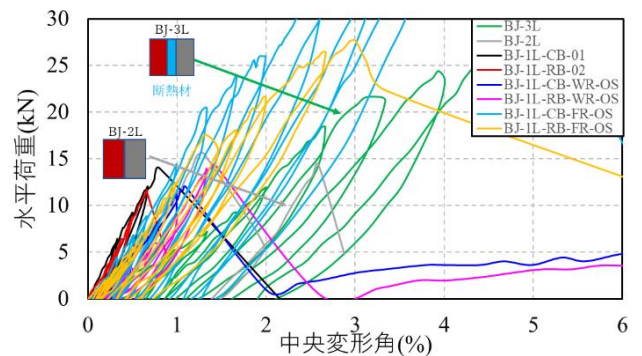
FR試験体において、最大耐力と同様、FRは最大曲げ応



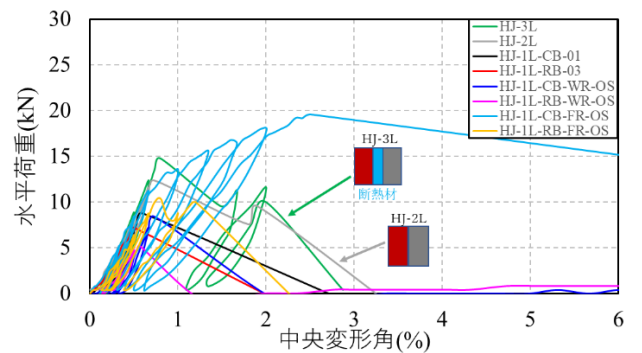
(a) BJ-CB-01 無補強試験体 (b) HJ-CB-01 無補強試験体  
図5 代表的な無補強試験体のひび割れ図



(a) BJ-CB-WR-OS 試験体 (b) BJ-CB-FR-OS 試験体  
図6 代表的な補強試験体のひび割れ図



(a) BJ 試験体



(b) HJ 試験体

図7 無補強試験体の荷重－変形関係

力を上昇させる効果があることがわかった。また、BJ 試験体と HJ 試験体の最大曲げ応力が同程度であることから、FR は破壊型と関係なく、壁体を一体化させる効果があることが確認できた。

OS および BS 試験体の最大曲げ応力は同程度であった。これは本実験が片側一方向載荷であることに起因するもので、正負交番繰り返し載荷の場合は異なる結果になる可能性はあると思われる。

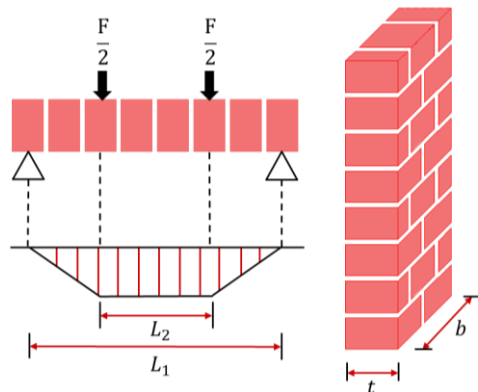


図 8 4点曲げ試験の概念図 (BJ 試験体)

5. まとめ

本論文では、応急補強手法を考慮した組積造壁の面外静的実験を行い、無補強組積造壁の面外耐震性能を明らかにするとともに、本研究で提案した応急補強手法の効果を詳細に検討した。本実験で得られた知見は以下のとおりである。

(1) BJ 試験体は目地モルタル間でひび割れが生じているのに対し、HJ はレンガを貫通するひび割れを伴うほぼ直線上のひび割れが生じた。また、FR 試験体以外の試

験体では、基本的に目地モルタルで破壊するのに対し、FR 試験体ではガラス繊維シートが壁体を一体化させる効果があるため、レンガユニット内で破壊が生じた。

- (2) 無補強試験体において、1L 試験体は最大耐力を経験した後、急激に耐力が低下するのに対し、2L および 3L 試験体は RB と CB が同時に破壊しないことがわかった。また、組積造壁は横目地にひび割れが入り上下方向に壁が割れて、面外方向に崩壊する破壊モードが卓越することがわかった。さらに、RB 試験体が CB 試験体より面外方向に脆弱であることがわかった。
- (3) WR 試験体において、WR は耐力および曲げ応力には寄与しないが、壁体の崩壊防止には大いに効果があることがわかった。また、使用した亜鉛引亀甲金網は方向性があるため、HJ 試験体より BJ 試験体により適していることがわかった。さらに、WR は耐力に寄与しないため、無補強試験体と同様、RB 試験体が CB 試験体より面外方向に脆弱であることがわかった。
- (4) FR 試験体において、FR は組積壁体を一体化させ、耐力および曲げ応力の増加に効果があることがわかった。また、その効果は CB 試験体がより顕著であった。
- (5) OS および BS 試験体の最大曲げ応力は同程度であった。これは本実験が片側一方向載荷であったためであり、正負交番繰り返し載荷の場合は異なる結果になる可能性がある。

今後、本研究の実験結果に基づき、組積造壁体の面内および面外耐震性能に関する解析的研究を行う予定である。

【参考文献】

- 1) Methods of test for masonry - Part 2: Determination of flexural strength: BS EN 1052-2,2016

表 2 最大耐力および最大曲げ応力

破壊モード	試験体名	最大耐力 (kN)	曲げ応力 (N/mm <sup>2</sup> )	備考	破壊モード	試験体名	最大耐力 (kN)	曲げ応力 (N/mm <sup>2</sup> )	備考
BJ	BJ-1L-CB(1)	14.0	1.37	平均 1.60N/mm <sup>2</sup>	HJ	HJ-1L-CB(1)	8.8	2.28	平均 2.38N/mm <sup>2</sup>
	BJ-1L-CB(2)	14.4	1.41			HJ-1L-CB(2)	10.4	2.69	
	BJ-1L-CB(3)	20.8	2.03			HJ-1L-CB(3)	8.4	2.17	
	BJ-1L-RB(1)	9.6	0.94	平均 1.11N/mm <sup>2</sup>		HJ-1L-RB(1)	6.8	1.78	平均 1.86N/mm <sup>2</sup>
	BJ-1L-RB(2)	11.6	1.14			HJ-1L-RB(2)	7.6	1.97	
	BJ-1L-RB(3)	12.8	1.25			HJ-1L-RB(3)	7.2	1.86	
	BJ-2L	15.6	0.38	CB 応力 : 1.41N/mm <sup>2</sup> RB 応力 : 1.52N/mm <sup>2</sup>		HJ-2L	12.4	0.80	CB 応力 : 2.48N/mm <sup>2</sup> RB 応力 : 3.21N/mm <sup>2</sup>
	BJ-3L	26.4	0.65	—		HJ-3L	14.8	0.96	CB 応力 : 2.58N/mm <sup>2</sup> RB 応力 : 3.82N/mm <sup>2</sup>
	BJ-1L-CB-WR-OS	12.0	1.17	平均 1.45N/mm <sup>2</sup>		HJ-1L-CB-WR-OS	8.4	2.17	平均 2.27N/mm <sup>2</sup>
	BJ-1L-CB-WR-BS	17.6	1.72			BJ-1L-CB-WR-BS	9.2	2.37	
	BJ-1L-RB-WR-OS	14.4	1.41	平均 1.24N/mm <sup>2</sup>		BJ-1L-RB-WR-OS	5.2	1.34	平均 1.71N/mm <sup>2</sup>
	BJ-1L-RB-WR-BS	10.8	1.06			BJ-1L-RB-WR-BS	8.0	2.07	
	BJ-1L-CB-FR-OS	45.2	4.42	平均 4.54N/mm <sup>2</sup>		BJ-1L-CB-FR-OS	19.6	5.07	平均 4.61N/mm <sup>2</sup>
	BJ-1L-CB-FR-BS	47.6	4.65			BJ-1L-CB-FR-BS	16.0	4.14	
BJ-1L-RB-FR-OS	27.6	2.69	平均 2.85N/mm <sup>2</sup>	BJ-1L-RB-FR-OS	10.4	2.87	平均 2.78N/mm <sup>2</sup>		
BJ-1L-RB-FR-BS	30.8	3.01		BJ-1L-RB-FR-BS	10.4	2.69			