

論文 プレキャストブロックを組積して構築した耐震壁のせん断耐力性状に関する研究

増田 安彦^{*1}・栗田 康平^{*1}・江戸 宏彰^{*1}・古屋 則之^{*1}

要旨：既存建築物の耐震補強のうち、RC耐震壁を増設する工事では、振動や騒音が発生することがしばしば問題にされる。これらの問題を解決するために、プレキャストブロックを組積し、内部にグラウトを充填して構築する耐震壁を開発した。本研究は、プレキャストブロック耐震壁の耐力性状を明らかにするために実施したせん断破壊実験について述べたものである。

キーワード：耐震補強，耐震壁，プレキャスト，ブロック，せん断耐力，接着工法

1. はじめに

近年、耐震補強工事においては、建物を使用しながら工事を行なうことがしばしば求められる。特にコンクリート系構造物で、病院や電算機室を有する建物などでは、工事に伴う騒音や振動を抑制することが同時に求められるため、従来の耐震壁増設工事では対応が困難であった。

このような背景から、施工時の騒音、振動を抑え、建物を使用しながら、より少ないスペースで施工が可能な耐震壁増設工法を開発した^{1),2)}。本論文は、工法の概要を述べ、構造性能確認のために実施した、耐震補強壁せん断破壊実験の結果について述べるものである。

2. 工法の概要

本工法は、耐震補強用に開発したプレキャストブロック(以下、ブロックと略記する)を組積し、ブロック内部の空洞部にモルタルグラウトを充填して増設耐震壁を構築する耐震補強工法である。本工法の標準的な施工法を図-1に示す。施工手順の概略は以下のとおりである。

- 1) 接合筋(アンカー筋)を溶接した溝形鋼や平鋼などの鋼材(以後、単に鋼材と言う)をレイタンス等を除去した既存躯体コンクリート面へエポキシ樹脂接着剤で接着する。
- 2) ブロック相互をエポキシ樹脂接着剤で接着しながらブロックを組積する。同時にブロック内部の空洞部に壁筋を配筋する。
- 3) ブロック内部の空洞部へグラウトを充填する。

本工法で対象とする増設耐震補強壁には、新たに耐震壁を構築する新設壁と、既存の耐震壁の壁厚を増す増厚壁があり、それぞれの壁に応じたブロックを使用する。写真-1にブロックの形状を示す。

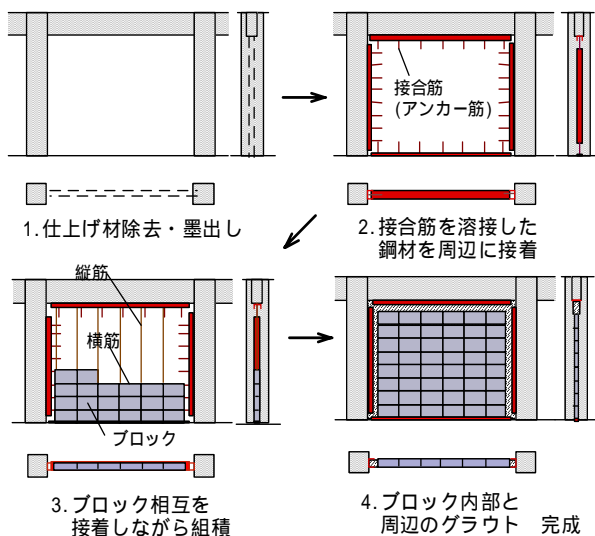
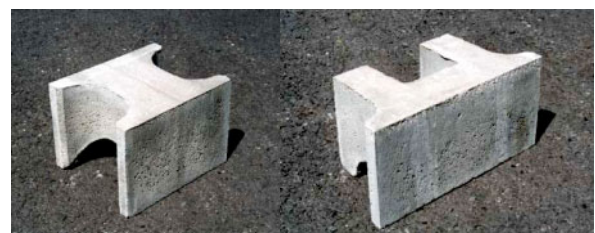


図-1 施工方法の概要



(左：新設壁用、右：増厚壁用)

写真-1 ブロックの形状

*1 (株)大林組技術研究所(正会員)

3. せん断破壊実験

せん断破壊実験は次の2シリーズからなる。シリーズ1は、ブロックの組積に接着剤を使用せずに構築したブロック補強壁の耐力・変形状を調べることで、ならびに周辺フレームへの壁筋定着の有無が耐力性状に及ぼす影響を調べることを目的としている。シリーズ2は、既存架構周辺に鋼材を接着する工法により構築した壁(有開口壁、増厚壁を含む)の耐力・変形状を確認することを主目的としている。シリーズ2では、ブロック相互を接着剤を用いて組積するが、接着しろを構造断面に算入できることも確認する。

3.1 シリーズ1の概要と結果

3.1.1 試験体概要

シリーズ1の試験体概要を表 - 1 に示す。試験体スケールは約1/3で、試験体数は3体である。パラメータは、ブロックサイズ(2種類)、周辺躯体への壁筋定着の有無とした。使用材料の特性を表 - 2 に示す。本シリーズではブロック強度を既存フレームに合わせる計画としている。試験体形状、寸法および配筋図を図 - 2 に、ブロックの形状、寸法を図 - 3 に示す。外周フレームは各試験体共通で、柱はせん断破壊型とし、下部ベースおよび加力梁は十分な耐力と剛性を持つように設計した。

3.1.2 載荷

載荷は、層間変形角1/1000, 2/1000, 4/1000, 6/1000の各ステップで2回ずつ繰り返す正負交番繰返し載荷とし、最後は約20/1000まで変形させた。

3.1.3 実験結果

表 - 1 シリーズ1の試験体概要

		No.1	No.2	No.3
柱配筋 b x D:220 x 220	主筋	12-D13(SD345)pg=3.15%		
	帯筋	-D6@165(SD345)pw=0.176%		
壁の概要 w x h x d: 1,480 x 900 x 70 (有効 70mm)	配筋 pv(%) ph(%)	縦筋:1-D10@240 (SD345)pv=0.42 横筋:1-D6@110 (SD345)ph=0.42	縦筋:1-D6@120 (SD345)pv=0.38 横筋:1-D6@72.5 (SD345)ph=0.63	
	差筋	あり(重ね継手長さ 30d)	なし	
	ブロック	240 x 110 x 90	120 x 72.5 x 90	
軸力		= N/(bD) b=0.15		

実験結果の一覧を表 - 3 に、各試験体の層せん断力と層間変位の関係を図 - 4 に示す。

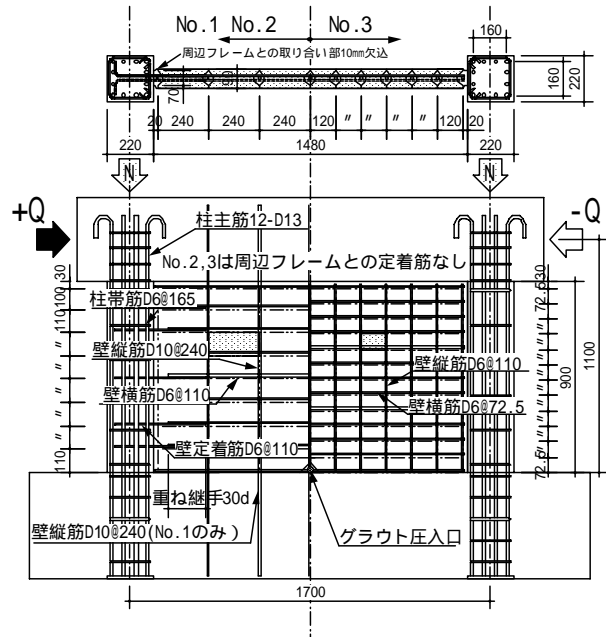


図 - 2 試験体配筋図(シリーズ1)

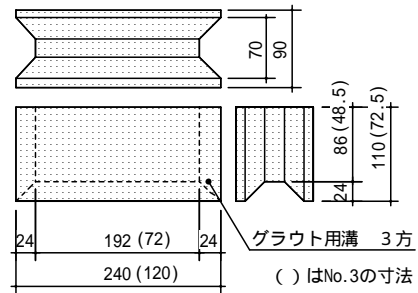


図 - 3 実験に使用したブロックの寸法・形状

表 - 2 使用材料
(コンクリート)

使用部位	圧縮強度 B (N/mm ²)	引張強度 T (N/mm ²)	弾性係数 E _c x 10 ⁴ (N/mm ²)	
No.1	柱	25.4	2.40	2.19
	ブロック	25.1	2.11	2.36
No.2	グラウト材	65.7	-	2.86
No.3	柱	27.1	2.46	2.06
	ブロック	29.9	3.20	2.50
在来試験体	グラウト材	106.3	-	2.96
在来試験体		25.0	2.18	2.64

(鉄筋)

使用部位	降伏点 y (N/mm ²)	引張強度 b (N/mm ²)	弾性係数 E _s x 10 ⁵ (N/mm ²)	
D6	壁筋 帯筋	361	507	2.04
D10	壁筋	339	493	1.90
D13	柱 主筋	335	523	1.95

いずれの試験体も，R = 1/1000(第1ループ)までに柱と壁にせん断ひび割れが発生し，R = 2/1000 では各せん断ひび割れが増加・進展し，荷重-変形関係は逆 S 型ループを描くようになった。壁筋を定着した試験体 No.1 のひび割れ性状は，ブロックに沿った階段状のひび割れが目立ったが，壁全体に分散して生じる傾向があった。一方，周辺躯体への壁筋定着を無くした試験体 No.2,3 では，壁板の対角線方向のストラットによる抵抗機構が主となるため，壁筋定着を確保した試験体 No.1 と比較して，対角線位置にひび割れが集中する傾向があった。

いずれの試験体もR=4～6/1000で最大耐力を示したが，試験体No.1は一体型せん断破壊，試験体No.2,3は柱頭部せん断破壊(パンチングシア)を伴う補強壁のせん断破壊と判定した。

試験体の最大耐力は次の各式で評価した。

・計算値 1 (平均式, N)

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{\sqrt{M / (Q \cdot D) + 0.12}} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \cdot \sigma_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} t_e \cdot j \quad (1)$$

・計算値 2 (下限式, N)

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{M / (Q \cdot D) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \cdot \sigma_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} t_e \cdot j \quad (2)$$

・計算値 3 (修正日総験指針式)

側柱のせん断・パンチングシアを伴う壁板の接着面破壊あるいはせん断破壊を対象とした式で，(財)日本建築総合試験所構造部による鉄筋コンクリート増設壁耐震補強設計・施工指針³⁾(以後，日総験指針式という)を，文献^{4),5),6),7)} お

よび後述するシリーズ2の結果を参考に修正した耐力式である。

$$Q_{su} = \min(Q_{ju}, \Delta Q_{wu}) + p Q_c + \alpha Q_c \quad (3)$$

Q_{ju} : 接着接合部の終局耐力(N)

$$Q_{ju} = 0.08 F_{c1} A_b \quad (4)$$

A_b : 壁板内法長さ l_{w0} × 壁厚 t_w

ΔQ_{wu} : 壁板のせん断力(N)

$$\Delta Q_{wu} = 0.07 F_{c2} (l_{w0} - l_0) t_w \quad (5)$$

l_0 : 開口部長さ

F_{c2} : 壁板圧縮強度

(=min(ブロック, グラウト))

$p Q_c$: 引張側柱頭部パンチングシア耐力⁸⁾

αQ_c : 圧縮側柱の終局耐力⁸⁾

各耐力算定式において，シリーズ1のブロック壁の有効厚には，グラウト材が充填された箇所70mmを用いた。せん断耐力式(1)および式(2)での算定にあたり，周辺躯体への壁筋定着の無い試験体No.2,3では，壁筋のせん断補強筋量を $p_{wh}=0$ とした。なお，弾性剛性は文献²⁾による。

表 - 3 において，実験値との比較より，式(1)は，いずれの試験体の最大耐力も比較的精度良

表 - 3 シリーズ1の実験結果

試験体		No.1	No.2	No.3	
ひび割れ荷重 (kN)		334	202	354	
(目視)		-373	-387	-314	
弾性剛性 (N/mm)	実験値	9.7×10^5	4.9×10^5	9.0×10^5	
	計算値	8.2×10^5	8.2×10^5	8.2×10^5	
	実 / 計	1.18	0.59	1.09	
最大耐力 (kN)	実験値	740	694	812	
	破壊モード	一体型せん断破壊	柱せん断破壊 + 壁せん断破壊	柱せん断破壊 + 壁せん断破壊	
	計算値 1	平均式	694	558	581
	実 / 計 1	1.07	1.24	1.40	
	計算値 2	下限式	472	336	350
	実 / 計 2	1.57	2.07	2.32	
	計算値 3 (モード)	修正日総験指針式	593 (せん断)	514 (接着)	535 (接着)
実 / 計 3	1.25	1.35	1.52		

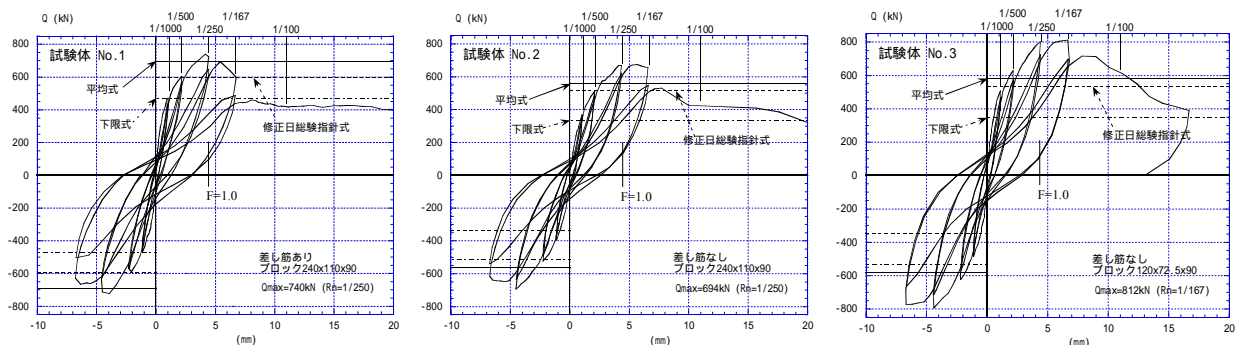


図 - 4 層せん断力(Q) - 層間変位()関係

く評価した。式(3)では破壊モードに応じて同表に示す値となったが、実験値と計算値の比のばらつきが最も少なく、かつ計算値が実験値に対して比較的小さく評価される結果となった。実験終了時の試験体写真例を、写真 - 2 に示す。

3.2 シリーズ2の概要と結果

3.2.1 試験体概要

表 - 4 に試験体概要を示す。試験体のスケールはシリーズ1と同様に約1/3とした。試験体数は4体で、パラメータは新設補強と増厚補強・開口の有無とした。すなわち、試験体A,BおよびCは新設壁、試験体Dは増厚壁とし、試験体BおよびCには開口を設けた。

表 - 5 に使用材料を示す。シリーズ2ではブロックとグラウトが同強度となるよう計画した。

図 - 5 に壁板の配筋図とブロックの割付け図

の例を示す。外周フレームは各試験体共通とし、配筋はシリーズ1と同様とした。壁板は、フレーム内側周辺に鋼材を接着したのち、モルタル製ブロックを接着しながら組積して製作した。

有開口壁の耐力評価は、一般に開口率に応じた耐力低減による方法が用いられている^{9),10)}。本実験においても、以下の開口低減率を用いて耐力を評価し、開口寸法を決定した。

$$=(1-\text{等価開口周比})$$

等価開口周比：

$$\max(\{hi \cdot li / (h \cdot lw)\}, li / lw)$$

試験体の開口は、試験体Bでは壁中央に1ヶ所、(=0.82)、試験体Cでは2ヶ所(=0.66)計画した。開口補強には、架構に接着した鋼材と同一材料で加工した補強枠を製作し、それに差筋を溶接して使用した。

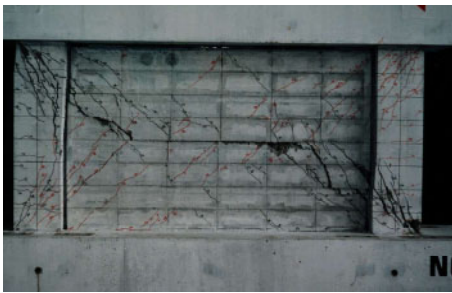


写真 - 2 試験体破壊状況例 (試験体 No.1)

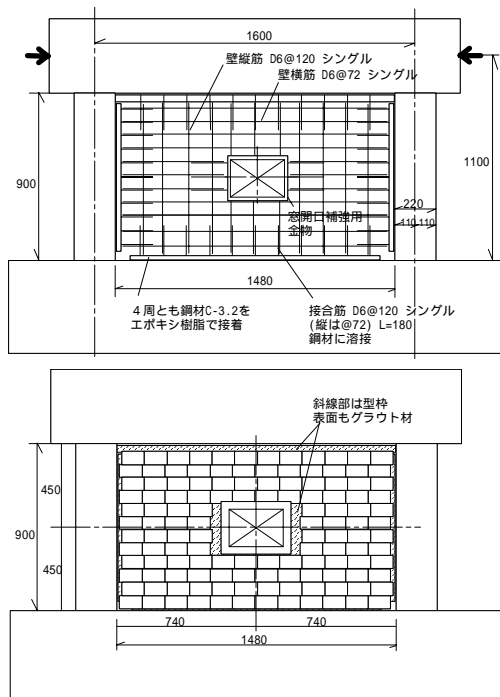


図 - 5 壁の配筋図とブロック割付け例(B試験体)

表 - 4 シリーズ2の試験体概要

試験体	A	B	C	D
補強の種類	新設壁			増厚壁
柱の諸元	b x D x h=220 x 220 x 900(mm) 主筋 12-D13(pg=3.15%) SD295 帯筋 D6 @165(pw=0.18%)			
壁寸法(内法)	lw x hw =1480 x 900 mm			
壁厚	70mm			既存 30mm 増厚 40mm
壁筋	D6 縦@120 x 横@72 シングル			D6 縦@240 x 横@144 ダブル
開口(1 x h)	なし	290 x 200 1ヶ所	290 x 200 2ヶ所	なし
その他		開口は lw, hw と も壁中央に配置	開口位置は高さ hw/2、開口間の あきを 288 mm として中央振り 分け	壁筋ダブル配筋 のうち一方を既 存に、他方を増厚 壁に配筋

表 - 5 使用材料

鉄筋		y (N/mm ²)	u (N/mm ²)	Es (x 10 ⁵ N/mm ²)		
D13(柱主筋)(SD295)		386	442	1.89		
D6(帯筋・壁筋)(SD295)		341	410	2.00		
コンクリート		B (N/mm ²)	t (N/mm ²)	Ec (x 10 ⁴ N/mm ²)		
試験体 A	壁ブロック	102.4	注：実験耐力の評価ではブ ロックとグラウトの低い方 の強度(すなわちグラウト の強度)を用いた			
	壁グラウト	72.1				
試験体 B	壁ブロック	93.3				
	壁グラウト	72.1				
試験体 C	壁ブロック	93.3				
	壁グラウト	69.7				
試験体 D	壁ブロック	97.6				
	壁グラウト	69.7				
共通	既存壁	36.2			2.03	2.36
	柱	25.3			2.36	2.26
	ベース	30.9	2.82	2.38		
	加力梁	27.7	2.53	2.41		
鋼材		y (N/mm ²)	u (N/mm ²)	Es (x 10 ⁵ N/mm ²)		
PL-3.2(SS400)		284	458	-		

試験体Dは、既存壁($F_c=21\text{N/mm}^2$ で、厚さ30mm)の増厚をブロック耐震壁(厚さ40mm)で行なった。壁筋は、既存壁部分、増厚部分とも横筋D6@240、縦筋D6@144(シングル)とした。

加力方法は、シリーズ1と同様である。

3.2.2 実験結果

表 - 6 に実験結果の一覧を、図 - 6 に各試験体の荷重 - 変形を示す。いずれの試験体も、第1ループ($R=1/1000$)で壁板、柱の順にせん断ひび割れが生じ、 $R=2/1000$ ではせん断ひび割れが増加・進展し逆S形ループを描くようになった。

試験体AおよびBは、壁板と周辺架構の接着部のすべりを伴う、側柱のせん断破壊(圧縮側柱のせん断破壊、引張側柱のパンチングシア)を生じた。この破壊の特徴として、最大耐力後も荷重の急激な低下が無いことが挙げられる。また、試験体Aの方が、試験体Bよりも壁板の損傷(ひび割れ本数と幅)は小さかった。

試験体CおよびDは、周辺架構と壁板が一体として挙動し、せん断ひび割れに沿う圧壊が進展し、脆性的なせん断破壊を生じた。試験体Cでは2ヶ所の開口と同じ高さ位置の壁板の損傷が激しく、最大耐力後の圧壊ではブロックが割裂

して面外にはらみ出す破壊を生じた。試験体Dにおいて、既存壁と増厚壁の一体性は良好で、表裏両面のひび割れ発生時期ならびにひび割れパターンは同じであった。また、最大耐力後の破壊時には、ブロックの表面がスケーリング状に剥落する現象を生じた。実験終了時の試験体写真例を写真 - 3 に示す。

最大耐力は、シリーズ1と同様の式(1)~式(3)で評価し、壁厚をブロックの接着しろを含めた70mmとした。

各計算値と実験値を比較すると、式(1)は、一体型せん断破壊を生じた試験体CおよびDの実験値に対してやや低い値となる。式(2)はさらに低く、(実/計)=1.82, 1.65であった。開口率による耐力低減手法を用いると、実際の耐力低下よりも大きな低減率を与える(試験体C)傾向があると言える。式(3)は、接着面が破壊した試験体AおよびBに対し(実/計)=1.23, 1.24で、比較的精度良く評価できた。

増厚壁(試験体D)では、シアコネクタが無くても載荷終了まで新旧壁の一体性は損なわれず、既存壁厚/増打ち厚さ=30/40程度では一枚の壁板として耐力を評価できる。

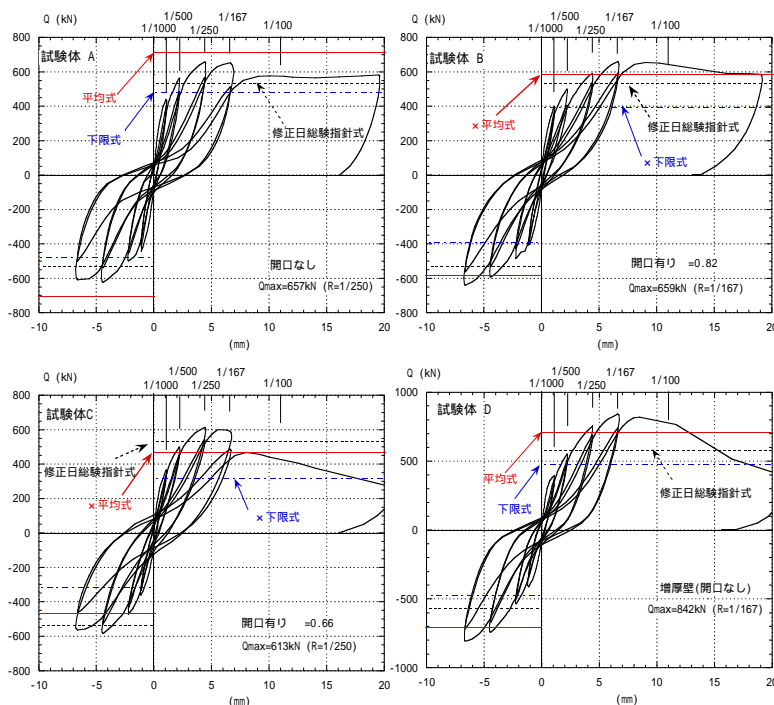
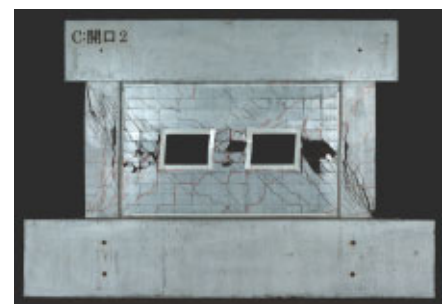
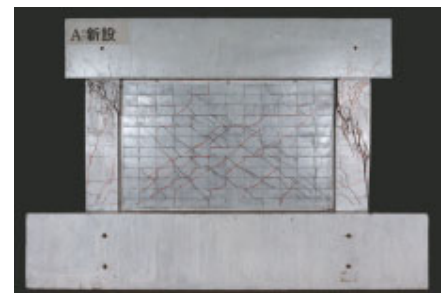


図 - 6 層せん断力(Q) - 層間変位()関係



(上: 試験体 A、下: 試験体 C) 写真 - 3 試験体破壊状況例

表 - 6 シリーズ2の実験結果

試験体		A	B	C	D	
弾性剛性 (N/mm)	実験値	8.8×10^5	6.8×10^5	7.6×10^5	7.4×10^5	
	計算値	8.2×10^5	8.0×10^5	7.8×10^5	8.2×10^5	
	実/計	1.07	0.85	0.98	0.90	
最大耐力 (kN)	実験値	657	659	613	842	
	破壊モード	柱せん断 + 壁接着	柱せん断 + 壁接着	一体型せん断破壊	一体型せん断破壊	
	計算値1	×平均式	706	581	465	706
		実/計1	0.93	1.13	1.32	1.19
	計算値2	×下限式	473	390	312	473
		実/計2	1.39	1.69	1.96	1.78
	計算値3 (モード)	修正日総建指針式 (接着)	533	533	533	568
		(せん断耐力)	730	649	567	
		(接着耐力)	533	533	533	
		実/計3	1.23	1.24	1.15	1.48
	min(計算値2, 計算値3)		473	390	312	473
実験値/min(計2, 計3)		1.39	1.69	1.96	1.78	

4. まとめ

プレキャストブロックを組積し、内部にグラウトを充填して構築する耐震補強方法の概要を述べ、耐震壁のせん断破壊実験を実施した。せん断破壊実験より得られた主な結果を以下に示す。

- (1) ブロック目地を接着しない耐震壁の初期剛性および最大耐力は、壁厚にグラウト材が充填されるブロック溝幅を用いて評価でき、接着した場合はブロック全幅を用いて評価できる。
- (2) シリーズ1の実験の範囲では、ブロック寸法がせん断耐力に与える影響は比較的小さい。
- (3) ブロック耐震壁は、周辺架構と一体として挙動し、せん断破壊するモードと、壁板上部と周辺架構の接着部の破壊を伴い、側柱がせん断破壊を生じる破壊モードが観察された。
- (4) ブロック耐震壁の終局耐力は、提案する修正日総建指針式で精度よく評価される。
- (5) 既存壁にその1.33倍の厚さの壁を増打ちした増厚壁の耐力性状は、シアコネクタを用いずとも新旧コンクリートの一体性が良く、両者を一体の壁として耐力を評価できた。
- (6) 最大耐力時の変形は、いずれの試験体も層間変形角 $R=4/1000 \sim 6/1000$ であった。また、壁板と周辺架構の接着部の破壊を伴う、側柱のせん断破壊モードの試験体は最大耐力後の耐力低下が緩やかな破壊性状を示した。

参考文献

- 1) 栗田他: 小型プレキャストブロックを用いた増設耐震壁工法の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP.139-140, 1998
- 2) 栗田, 増田他: 小型プレキャストブロックを用いた増設耐震壁工法の開発(その2), (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP.687-690, 2002
- 3) (財)日本建築総合試験所 構造部: 鉄筋コンクリート増設壁耐震補強設計・施工指針, 2001.9
- 4) 益尾, 小宮: 実仕様による接着系アンカーを用いたRC造増設耐震壁の実験的研究(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP.391-392, 2000.9
- 5) 毛井他: ノンアンカー工法によるRC補強耐震壁の実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP.393-394, 2000.9
- 6) 小宮, 益尾: 鉄骨増設ブレース補強用の接着接合部および間接接合部の終局耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, PP.1657-1662, 2000.6,
- 7) 益尾, 小宮: 接着接合部と間接接合併用工法による鉄骨増設ブレースの補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, PP.1651-1656, 2000.6,
- 8) (財)日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の改修設計指針 同解説, 平成8年版
- 9) 小宮, 益尾: 実仕様による接着系アンカーを用いたRC造増設耐震壁の実験的研究(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP.389-390, 2000.9
- 10) 青山, 加藤, 勝俣: 増設RC耐震壁の強度と変形能の評価に関する実験的研究(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP.2151-2152, 昭和58年(1983),