

論文 プレキャストコンクリートブロックを組積して構築した有開口耐震補強壁に関する実験的研究

栗田 康平*1・増田 安彦*1・木村 耕三*1

要旨: 既存躯体との接合部に接着工法を用い、プレキャストコンクリートブロックを組積して構築した増設耐震壁に、ドア開口を設けた場合の耐力と破壊性状の把握を目的とした実験を実施した。試験体には、ドア開口位置と、補強壁脚部接着接合部の補強の有無をパラメータとした一層壁せん断試験体を用いた。実験結果から、開口位置と荷重の作用方向の関係により、破壊性状と最大耐力が異なる事、終局耐力の算定には開口と破壊性状を考慮し、既往の算定式を低減した手法で安全側に評価できる事を示した。

キーワード: 耐震補強, 耐震壁, 鉄筋コンクリート, プレキャストブロック, 接着工法

1. はじめに

近年の耐震補強工事では、建物を使用しながらの作業がしばしば求められる。しかし従来の耐震補強工法では騒音や振動の点から適用が困難な場合が多く、これらを抑制でき、補強状況に柔軟に対応できる工法が求められた。こうした背景から筆者等は、既存躯体との接合部に接着工法を用い、その内部に組積されたプレキャストブロック(以下 PCa ブロックと記す)壁の内部にグラウト材を充填する耐震補強工法を開発し、施工性・構造性能を報告してきた^{1)~2)}。本報では、ドア開口を有する補強壁の耐力や破壊性状を、一層壁試験体によるせん断加力実験結果から報告する。

2. 実験概要

2.1 実験計画および試験体形状

実験計画を表-1に、使用した材料強度を表-2に、試験体形状を図-1に示す。実験因子は、(1)ドア開口の位置、(2)壁脚部における接着接合部の補強の有無で、試験体数は4体、縮尺は約1/3とした。周辺フレームは共通で、柱はせん断破壊型とし、上下の加力梁には十分な強度と剛性を持たせた。補強壁は、三方に溝を有する小型のPCaブロック相互をエポキシ系樹脂で接着して組積し、溝内部の壁筋と充填グラウトによって全体を一体化するPCaブロック壁とした。PCaブロック壁の周囲には、壁筋と定着させる接合筋を溶接した鋼製枠(以下ガイドスチール)

表-1 試験体一覧

試験体		DR1	DR3	DR4	DR4h
周辺 フレーム	柱諸元	b×D×h=220×220×900(mm) 主筋12-D13($p_g=3.15\%$) 帯筋D6@165($p_w=0.18\%$)			
	軸力比	$N/(b \cdot D \cdot \sigma_B)=0.12$			
PCa壁	補強壁	$l_w \times h_w \times t_w=1480 \times 900 \times 70(\text{mm})$			
	壁配筋	D6シングル縦@120×横@72 ($p_w=0.38\%$)			
	ガイドスチール	PL4.5×70 接合筋D6 定着長さ30d溶接			
	開口形状 $l_o \times h_o$	300×650(mm) ドア開口 中央 1箇所	300×650(mm) ドア開口 偏在0.2 l_w 1箇所	300×650(mm) ドア開口 柱際 1箇所	300×650(mm) ドア開口 柱際 1箇所
	開口周比	$\eta=0.32$			
	開口補強ガイドスチール	PL4.5×70 接合筋D6 定着長さ30d付き			
	開口補強アンカー	脚部:1-M16×2	脚部:2-M10×2	頂部:2-M10 脚部:2-M10	頂部:2-M10 脚部:2-M10
併用アンカー	なし			M8@120($p_w=0.5\%$) (壁脚部のみ)	

*1 (株)大林組技術研究所 (正会員)

を配し、周辺フレームへ樹脂で接着した。ドア開口面積は、等価開口周比 $\eta=0.32$ で共通とし、その位置は補強壁の中央部、 $0.2l_w$ 偏在(l_w は壁内法寸法)、および柱際とした。開口部の靴摺り部を除く三方には、周辺ガイドスチールと同仕様の開口補強ガイドスチールを配し、周辺フレームに接着したガイドスチールと高力ボルトで固定した。開口隅部の既設躯体との取合い部には、開口補強あと施工アンカーボルトを打設し、ガイドスチールを固定した。試験体 DR4h は、壁脚部のガイドスチールを、開口補強用とは別に打設したあと施工アンカーボルト(以下併用アンカーと記す)で補強して固定した。なお DR1 の試験体製作中に、グラウト型枠の締め過ぎにより、開口隅部のブロックおよび壁脚部ブロックの接着部にひび割れを生じさせた。

2.2 荷重方法

層せん断水平力 Q は、圧縮力で加力梁に載荷した。荷重履歴は、層間変形角 R (=荷重高さの水平変位/荷重高さ)の目標所定値での交番荷重($\pm 1.0, 2.0, 4.0, 6.67 \times 10^{-3}$ rad.で 2 回, 13.3×10^{-3} rad.で 1 回)とし、最後は正方向に単調荷重($R=30 \times 10^{-3}$ rad.まで)した。鉛直軸力は柱頂部から一定に荷重した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状および荷重-変形関係

実験により得られた各種耐力を表-3に、荷重-変形関係を図-2に、最終破壊状況を写真-1に示す。

初ひび割れは、いずれの試験体も開口隅部から斜め方向に生じた。その後、ガイドスチール

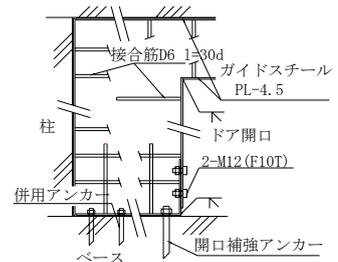
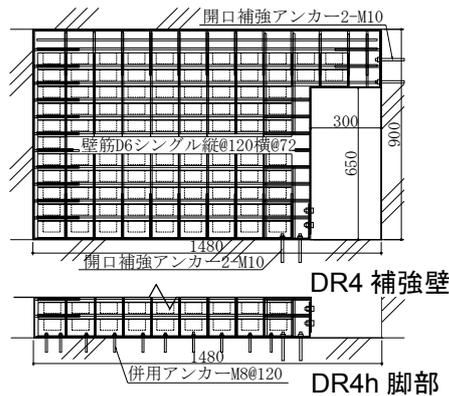
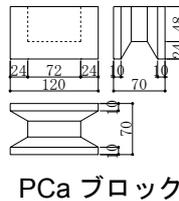
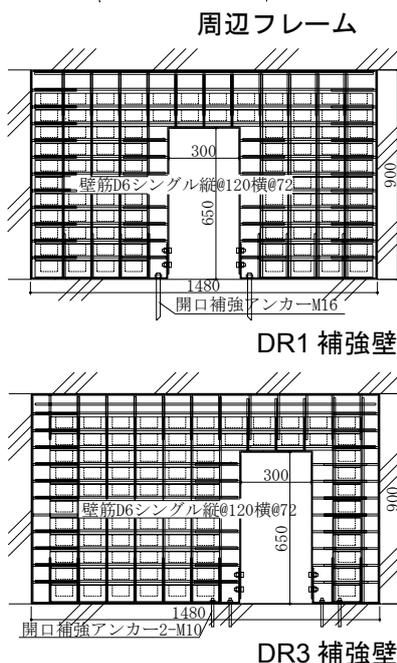
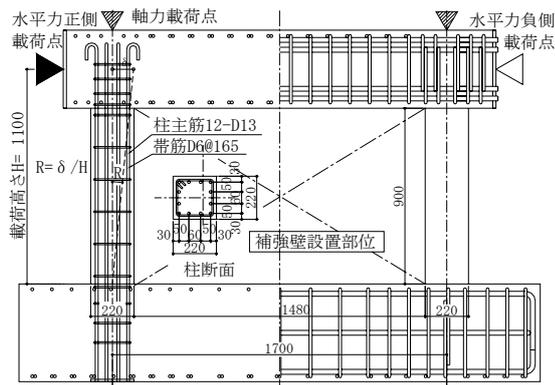


図-1 試験体形状

表-2 材料強度

鋼材		降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
DR1	D13(柱主筋)	353	520	186	20.1
	D6(帯筋・壁筋)	371	540	195	14.6
	PL-4.5(ガイドスチール)	237	347	202	40
	M16(アンカーボルト)	540	721	207	—
DR3 DR4 DR4h	D13(柱主筋)	349	514	182	20.8
	D6(帯筋・壁筋)	371	540	195	14.6
	PL-4.5(ガイドスチール)	312	441	198	33.9
	M10(アンカーボルト)	570	641	202	7.8
	M8(アンカーボルト)	543	631	205	10.7

コンクリート		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
DR1	柱	26.4	2.43	21.0
	ベース	28.1	2.80	22.4
	壁PCaブロック	103	3.94	36.6
	壁グラウト	46.3	3.93	24.8
DR3 DR4 DR4h	柱	24.3	2.50	21.6
	ベース	28.1	2.71	22.6
	壁PCaブロック	75.6	4.40	27.0
	壁グラウト	69.2	4.18	27.8

のグラウト界面側のひび割れや柱の曲げひび割れが発生し、剛性が徐々に低下した。壁のせん断ひび割れは、 $R=0.9\sim 1.3\times 10^{-3}\text{rad}$.で、柱頭のせん断ひび割れは、 $R=16\sim 20\times 10^{-3}\text{rad}$.に生じた。

周辺躯体との接合部では、DR1の梁下接着部のひび割れは、 $\pm 1\times 10^{-3}\text{rad.cycle}$ で生じたものの、その後大きく進展することなく、最終破壊状況でも軽微であった。床上接着面および柱際接着

表-3 実験結果一覧

単位:kN (部材角R)

試験体名	DR1		DR3		DR4		DR4h		
	正側	負側	正側	負側	正側	負側	正側	負側	
各耐力	部材角 $R=1.0\times 10^{-3}\text{rad}$	296	-307	328	-341	331	-372	341	-378
	$R=2.0\times 10^{-3}\text{rad}$	430	-434	438	-454	432	-511	448	-539
	$R=4.0\times 10^{-3}\text{rad}$	561	-550	562	-577	540	-666	574	-618
	$R=6.0\times 10^{-3}\text{rad}$	637	-511	588	-525	499	-611	568	-497
	$R=10.0\times 10^{-3}\text{rad}$	499	-	502	-	410	-	368	-
最大耐力	639 (0.0058)	-551 (-0.004)	601 (0.0067)	-577 (-0.004)	540 (0.004)	-666 (-0.004)	574 (0.004)	-632 (-0.0038)	
破壊形式	正側	圧縮側壁せん断 +柱せん断		両壁せん断 +柱せん断		グラウト接合面すべり+柱せん断		引張側壁せん断 +柱せん断	
	負側	-		両壁せん断 +柱せん断		圧縮側壁せん断 +柱せん断		圧縮側壁せん断 +柱せん断	
ひび割れ	ガイドスチールグラウト界面	220 (0.0007)		200 (0.0005)		200 (0.0004)		220 (0.0005)	
	開口隅部	101 (0.0003)		180 (0.0002)		140 (0.0003)		180 (0.0005)	
	開口脚部曲げ	140 (0.0004)	-160 (-0.0003)	314 (0.001)	-300 (-0.0008)	-	-160 (-0.0003)	-	-240 (-0.0005)
	PCa壁初せん断	277 (0.001)	-280 (-0.0009)	280 (0.0007)	-323 (-0.0009)	363 (0.0013)	-365 (-0.001)	383 (0.0013)	-381 (-0.001)
	柱初せん断	429 (0.002)	-434 (-0.002)	455 (0.0024)	-453 (-0.002)	404 (0.0016)	-365 (-0.001)	447 (0.0019)	-420 (-0.0012)
	ガイドスチール躯体側 接着面 部位	448 (0.0024) 不明確		413 (0.0018) 梁下		320 (0.0009) 引張柱側脚部		322 (0.0009) 引張柱側脚部	
鉄筋降伏	柱主筋	620 (0.0053)		578 (0.0054)		515 (0.0056)		確認できず	
	帯筋	537 (0.0072)		507 (0.0064)		400 (0.0114)		-522 (-0.00561)	
	壁筋	-416 (-0.0018)		-410 (-0.0017)		395 (0.002)		460 (0.0024)	
	接合筋	-416 (-0.0018)		-422 (-0.0018)		-590 (-0.0029)		-572 (-0.0025)	

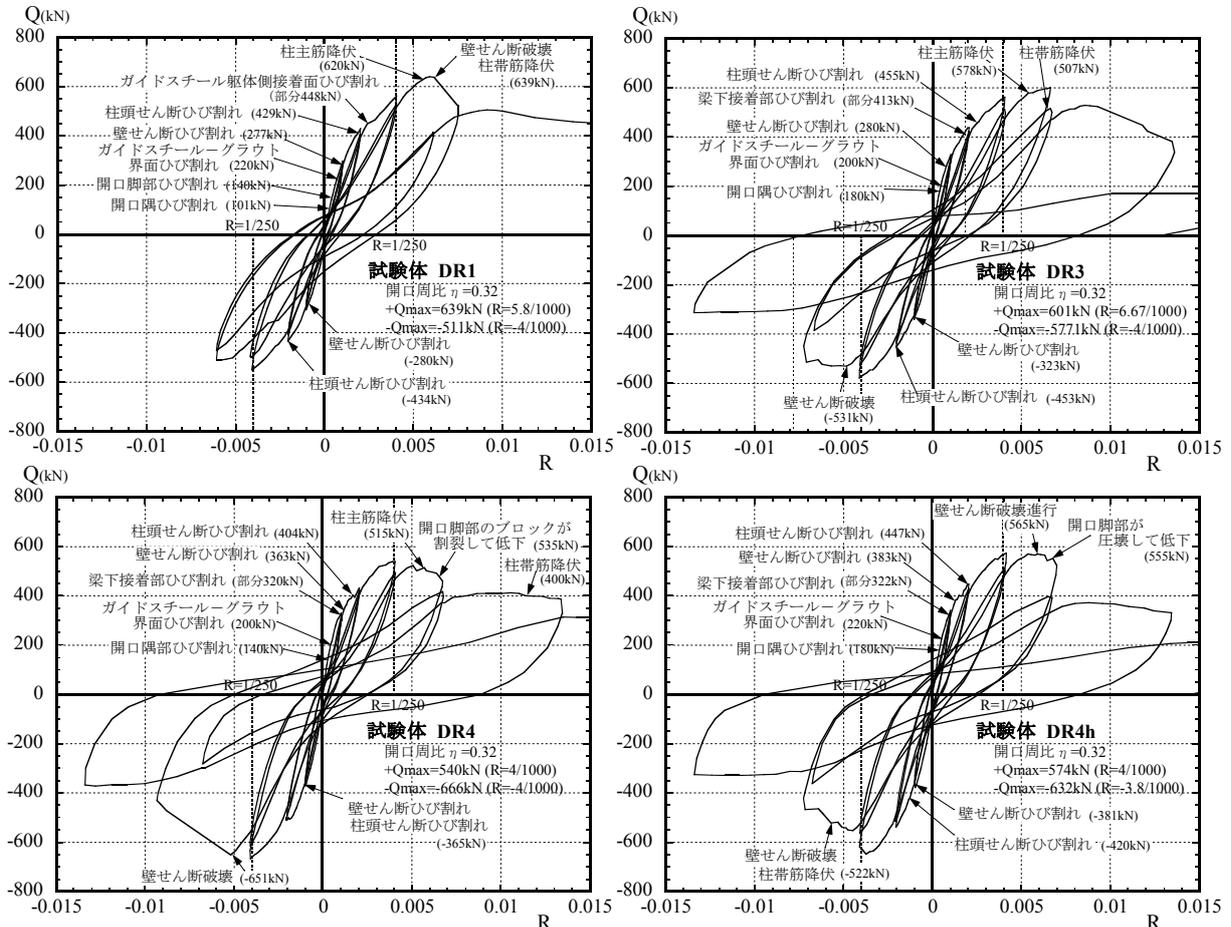


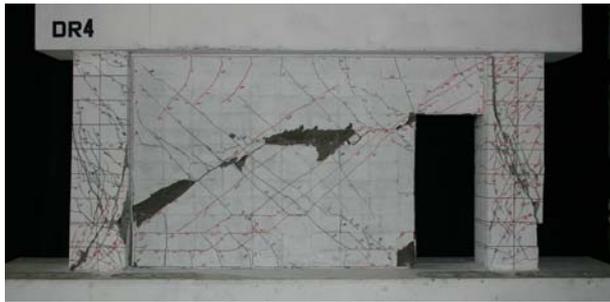
図-2 荷重-変形関係



試験体 DR1



試験体 DR3



試験体 DR4



試験体 DR4h

写真-1 最終破壊状況

部のひび割れは、 $\pm 1 \times 10^{-3} \text{rad.cycle}$ で発生し、 $\pm 6 \times 10^{-3} \text{rad.cycle}$ の最大耐力付近で壁せん断破壊とともに剥離し、最終破壊状況では、ずれや目開きを伴うものとなった。DR3, DR4h の梁下接着部, 床上接着部, 柱際接着部のひび割れは、開口近くや壁端部に $\pm 1 \times 10^{-3} \text{rad.cycle}$ で生じたものの、その後大きく進展することなく、最終破壊状況でも軽微でずれを伴うものではなかった。DR4 の梁下接着部, 床上接着部は軽微であったが、柱際接着部のひび割れは $\pm 6 \times 10^{-3} \text{rad.cycle}$ 以降で目開きを伴う剥離となり、同時に床上ガイドスチールの接合筋で結合されたグラウト界面では、ずれ破壊が著しく進行した。

最終破壊状況をモデル化して、図-3 に示す。圧縮側壁の破壊性状は、DR1 正加力, DR3, DR4, DR4h 負加力では、圧縮側壁の開口上隅部から圧縮側柱の柱脚に貫通する著しいせん断破壊を示し、周辺フレームと補強壁とがほぼ一体的に挙動したせん断破壊と考えられる。引張側壁の破壊性状は、DR3, DR4h では、一体的な挙動によるせん断破壊を示したが、DR1 では接着面でのずれ破壊が、DR4 ではグラウト界面でのずれ破壊から接合筋と開口補強ガイドスチールの破断がそれぞれ生じた。併用アンカーを有する DR4h

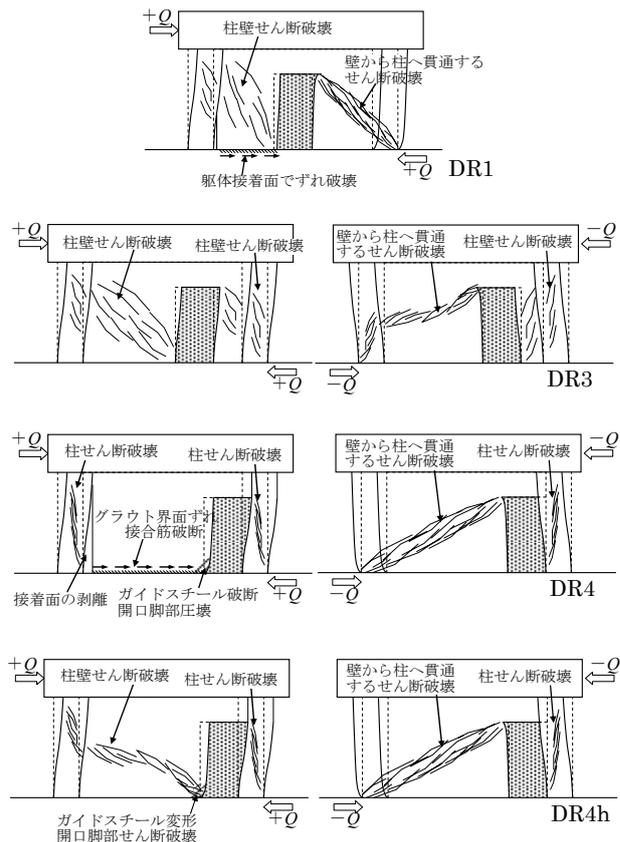


図-3 モデル化した最終破壊状況

では、DR4 と比較してグラウト界面でのずれ破壊が抑制され、グラウト界面よりも壁のせん断破壊が進行したと考えられる。DR4, DR4h の開口補強ガイドスチールの脚部には局部変形が生じたが、DR1, DR3 には生じなかった。

3.2 実験変数による比較

実験変数による荷重—変形関係の包絡線の比較を図-4に示す。開口位置による相違をDR1・DR3・DR4で比較すると、 $R=4.0 \times 10^{-3}$ rad.までは、圧縮側の壁幅が小さい正加力時は荷重履歴に対する影響は小さいが、圧縮側の壁幅が大きくなる負加力時には、壁幅が大きくなるに伴い、耐力、剛性とも大きくなっている。併用アンカーの有無による相違をDR4、DR4hで比較すると、いずれにおいても補強壁脚部の接着面ですべり破壊を起さなかったため、 $R=4.0 \times 10^{-3}$ rad.までの荷重履歴に対する影響は小さかった。

3.3 初期剛性

等価開口周比 η と正加力時初期剛性実験値 K_e の関係を、無開口壁の剛性計算値 K_{co} で無次元化した K_e/K_{co} で図-5に示す。同図中には、既往のPCaブロック補強壁実験で得られた結果¹⁾も合わせて示す。図よりDR1の実験値が低いも

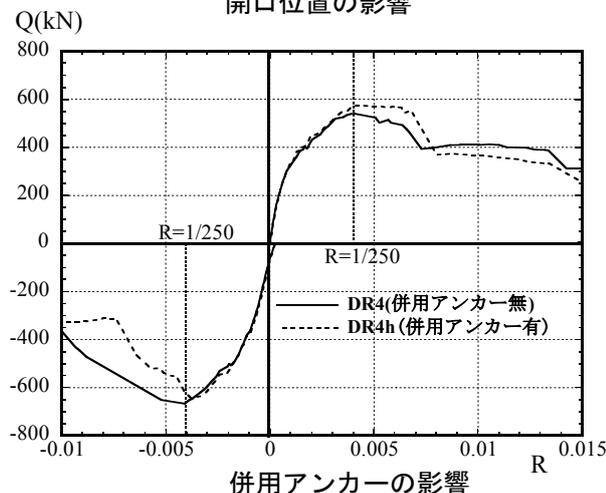
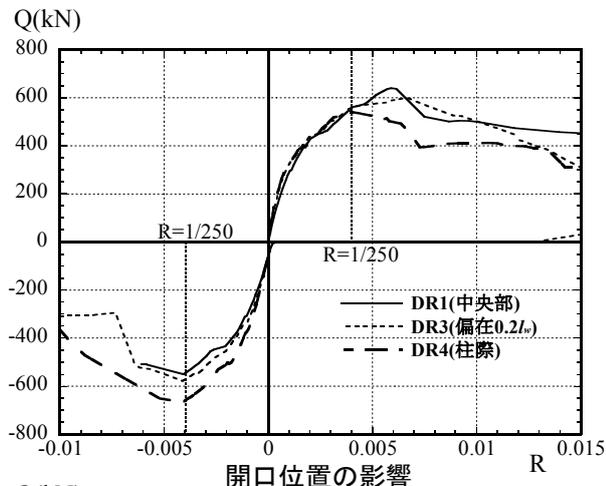


図-4 実験変数による荷重—変形関係の比較

の、製作時に生じたひび割れの影響と考えられ、本試験体の初期剛性は、既往の算定手法³⁾で概ね評価できると考えられる。

3.4 最大耐力

開口位置と $R=4.0 \times 10^{-3}$ rad.時耐力および最大耐力(正負の絶対値)の関係を図-6に示す。図より、開口位置によって同一部材角での耐力には差が生じ、 $R=4.0 \times 10^{-3}$ rad.時耐力では、開口位置が壁中央よりも加力側に寄るに従い上昇した。

PCa ブロック壁により補強された耐震補強壁の最大耐力は、柱と補強壁を一体と仮定した一体型破壊による算定値と、水平接合面でのずれ破壊を仮定し、接着面のせん断耐力と引張側柱頭に集中的に作用するせん断力(以下パンチングシアと記す)によるパンチングシア耐力を考慮した接合面破壊による算定値との、いずれか小さい方で評価している¹⁾。ドア開口を有する場合の接合面破壊による算定式では、接着面のせん断耐力で靴摺り部分を低減するが、本実験による破壊性状から、引張側柱頭に仮定するパンチングシア耐力を考慮できない場合もあると考えられる。以上より、最大耐力の計算値を次のように仮定し、実験値と比較した。すなわち、一体型破壊による終局せん断耐力 wQ_{SU} は、開口による耐力低減率を用いた有開口壁として求められるせん断耐力とし、式(1)で求めた。

$$wQ_{SU} = \gamma \left\{ \frac{0.068 P_{te}^{0.23} (18 + \sigma_B)}{\sqrt{M/Qd + 0.12}} + 0.85 \sqrt{P_{se} \cdot \sigma_{sy}} + 0.1 \sigma_o \right\} b_e \cdot j \quad (1)$$

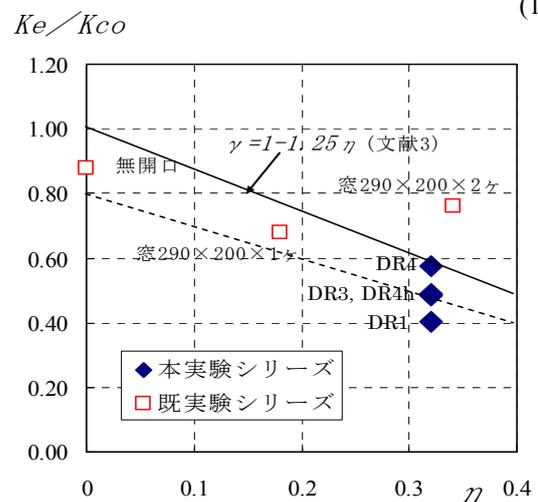


図-5 初期剛性—開口周比関係

γ : 耐力低減率 $\gamma=1-\eta$, σ_B : コンクリート圧縮強度で柱と壁の低い方, σ_o : 軸応力度, P_{te} : 引張鉄筋比, $P_{se} \cdot \sigma_{sy}$: 壁せん断補強筋比および降伏強度, b_e : 等価壁厚, j : 応力中心間距離.

接合面破壊による終局せん断耐力 ${}_a Q_{SU}$ は, 周辺フレームとの接着接合面のせん断耐力に, 引張柱側のパンチング耐力および圧縮柱側のせん断耐力を累加して式(2)で求め, パンチング耐力を考慮しない場合には, ${}_p Q_C$ を ${}_a Q_C$ とした.

$${}_a Q_{SU} = Q_{ju1} + {}_p Q_C + \alpha Q_C \quad (2)$$

Q_{ju1} : 水平接着接合面の終局せん断耐力平均式⁴⁾, $Q_{ju1} = 0.11\sigma_{B1} \cdot A_{PC} + Q_a$, A_{PC} : PCaブロック壁の実水平接着面積で靴摺り部は考慮しない, σ_{B1} : 柱圧縮強度, $Q_a = \min(0.5\sigma_{ay}, 0.3\sqrt{E_{cl} \cdot \sigma_{B1}})$: 併用アンカーの付加強度, σ_{ay} : 併用アンカーの降伏強度, ${}_p Q_C$: 引張側柱頭部パンチングシア耐力平均式で ${}_p Q_C = k_{av} \cdot \tau_o \cdot b \cdot D$, $k_{av} = 0.58 / (0.76 + a/D)$, $a: D/3$, $b \cdot D$: 柱の幅及び成, $\tau_o = 0.22 \sigma_{B1} + 0.49 \sigma_o$, α : 変形状況を考慮した低減係数, Q_C : 柱の終局強度でせん断強度は荒川平均式, 曲げ強度は耐震改修指針⁴⁾.

実験値と計算値の比較を表-4に示す。一体型破壊による計算値との比較では, 実験値/計算値=1.18~1.45で評価した。柱のパンチング耐力を考慮した接合面破壊の計算値との比較では,

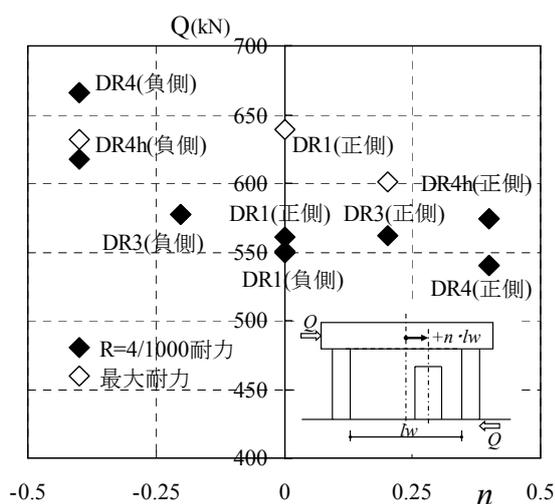


図-6 開口位置と耐力の関係

ドア開口を壁のほぼ中央に有する DR1, DR3 の正負加力方向と柱際にドア開口を有する DR4, DR4h の負加力において実/計=0.93~1.07で評価したが, 柱際にドア開口を有する DR4, DR4h の正加力では, 実/計=0.84~0.87となり, 過大に評価した。パンチング耐力を考慮しない計算値との比較では, 実/計=1.28~1.73となり, 安全側の評価となった。実験で得られた破壊モードから, DR4, DR4h の負加力は柱のパンチング耐力考慮しない接合面破壊で評価し, 他は一体型破壊で評価する(表-4中の斜体)と, 実/計=1.26~1.45で評価できた。ドア開口の位置や, 破壊性状をより明確に組み込んだせん断耐力の算定方法は今後の課題である。

4.まとめ

ドア開口を有する PCa ブロック補強壁による一層壁せん断実験から, 開口位置と荷重の作用方向の関係により, 破壊性状と最大耐力が異なる事を確認した。

[謝辞] 試験体の製作にあたり接着剤を提供して頂きました日本シーカ(株)藤井洋宣氏にお礼申し上げます。

参考文献:

- 1) 増田安彦他: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, コンクリート工学年次論文集 Vol.25, No.2, p1459-1464, 2003
- 2) 栗田康平他: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6), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2 分冊, pp.567-568, 2005
- 3) 武藤清:耐震設計シリーズ I 耐震設計法:9.開口のある壁, 丸善, pp.189-198, 昭和38年
- 4) (財)日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート造建物の耐震改修指針・同解説, 2001年版

表-4 実験結果と計算値の比較

試験体		単位:kN						
実験値 最大耐力		DR1	DR3		DR4		DR4h	
計算値	一体型破壊 式(1)	476	601	-577	540	-666	574	-632
	(実/計)	(1.34)	(1.31)	(1.26)	(1.18)	(1.45)	(1.25)	(1.38)
	接合面破壊 式(2) 柱パンチング耐力考慮	662	620		620		682	
	(実/計)	(0.97)	(0.97)	(0.93)	(0.87)	(1.07)	(0.84)	(0.93)
	柱パンチング耐力無視	424	386		386		448	
	(実/計)	(1.51)	(1.56)	(1.49)	(1.40)	(1.73)	(1.28)	(1.41)