

論文 水平接合部を含む PCa 耐震壁のせん断耐力に関する研究

川島秀貴^{*1}・カストロホワンホセ^{*2}・山口輝彰^{*3}・今井弘^{*4}

要旨：本研究は、主筋後挿入方式を用いた水平接合部を含むプレキャストコンクリート（以下、PCa）耐震壁のせん断耐力に関するものであり、特に曲げ塑性変形がせん断耐力に与える影響を調査することを目的としている。PCa 耐震壁に正負の曲げモーメントを与え、十分に曲げ降伏させた状態で、水平接合部にせん断力を加え、水平接合部を含む PCa 壁のせん断耐力と滑り量を調べた。水平接合部の破壊形式は、従来の敷きモルタル方式のものとは異なった。また、与える曲げ塑性変形が大きくなるとせん断耐力は低下したが、従来の耐力式による計算値を上回った。破壊機構に合った耐力式を提案し実験値との適合性を調べた。

キーワード：水平接合部、曲げ塑性変形、シアコッタ、グラウト充填方式

1. はじめに

これまで、敷きモルタル方式の PCa 壁の水平接合部のせん断耐力式は数多く提案されているが、壁底面をグラウト材で全充填する方式の PCa 壁のせん断耐力に関する実験的研究が不足している。また、実際の最下層の PCa 壁は正負に曲げ降伏した状態でせん断力を受けるが、水平接合部のせん断耐力に関する既往の研究は、一定軸応力下での単調なせん断加力実験に基づくものが多い。そこで、本研究では、曲げ降伏型の最下層の PCa 壁の水平接合部を想定し、一定の軸力と正負の曲げモーメントのみを与え、十分に曲げ降伏させた状態で、水平接合部にせん断力のみを加え、水平接合部を含む PCa 壁のせん断耐力を調べた。

2. 試験体と材料の特性

PCa 試験体は表-1 に示すように、計 14 体である。14 体の内、8 体は PCa で、6 体が一体打ち（以下、RC）となっている。試験体の外部形状は、図-1 に示すように全て同一であり、壁部分は長さ 140cm、厚さ 15cm、内法高さ 70cm である。壁部分と加力用上梁とは一体となっている。壁部分の上部 50cm は、両側に 20cm ずつ張り出

表-1 試験体一覧

試験体名	打設方法	曲げ	軸力	主筋	シアコッタ	備考	
HJ-1	PCa	M=0	0.5 (N/mm ²)	4-D25	各主筋ごと 100 ×100 ×20	(曲げ降伏後の水平耐力を調べる)	
HJ-2		M(ϕ y)					
HJ-3		M(3 ϕ y)					
HJ-4		M(5 ϕ y)	2.0 (N/mm ²)		平滑面	(軸力の影響を調べる)	
HJ-5		M=0					
HJ-6		M(3 ϕ y)					
HJ-7		M=0	RC		16-D13	一体打ち	(コッターの有無の影響を調べる)
HJ-8		M(3 ϕ y)					
HJ-9		M(3 ϕ y)					
HJ-11	M=0						
HJ-12	M(ϕ y)						
HJ-13	M(3 ϕ y)						
HJ-14	M(5 ϕ y)	(鉛直筋の影響)					

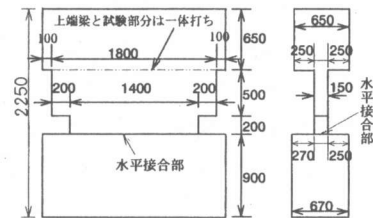


図-1 試験体外部形状

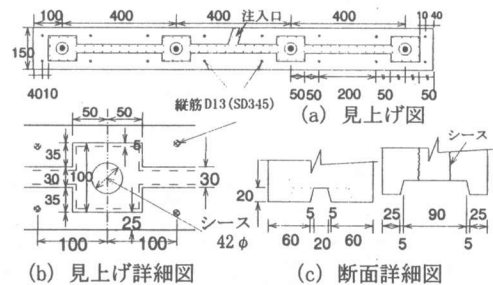


図-2 PCa 壁底面のシアコッタ

*1 筑波大学大学院生 工学研究科 構造工学専攻 (正会員)
 *2 株木建設 (株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)
 *3 株木建設 (株) 技術研究所 主任研究員 (正会員)
 *4 筑波大学助教授 構造工学系 工博 (正会員)

し、さらに補強して破壊しないように設計してある。壁の底面である水平接合面には、各シース管をつなぐように、グラウト圧入用の溝が設けてある。

HJ-1～6では、各シースの位置に、図-2に示すような凹状のシアコッタを設けて、この部分は接合時にグラウト材によって充填される。HJ-7と8では溝のみを設けた。加力の変動因子は、繰り返し曲げによる曲率（塑性率）と軸力である。さらに水平接合部のないRC壁との比較も行った。

配筋は全てのPCa試験体共通で、主筋に4-D25 (SD345) を、壁の縦筋（水平接合部より上に配筋）に8-D13 (SD345) @200 ダブル、横筋に4-D13 (SD345) @200 ダブルを用いた。主筋には試験体下端より上端まで、連続した一本の鉄筋を用いた。PCa壁では、主筋位置にシース管（内径42mm、山高さ2mm）を配した。HJ-9の配筋は、シースが無い点を除くとPCa試験体と同じである。ただ、打設方法のみが異なり、壁を横にして打設した。HJ-11～14では主筋はなく、壁の縦筋に8-D13 (SD345) @200 ダブルとし、下梁まで連続して配筋した。

試験体の接合は、①下梁の設置、②主筋の挿入、③下梁のグラウト材の注入、④PCa壁の設置、⑤水平接合部周辺のシール、⑥グラウト材の圧入、という手順で行った。なお、グラウト材は、水平接合部中央に設けた注入口に通じるパイプより、水平接合部とシース管に同時に圧入した。

表-2に鉄筋、コンクリート、及びグラウト材の材料試験結果を示す。

表-2 材料試験結果

(a) 鉄筋 (単位: N/mm ²)					(b) グラウト (単位: N/mm ²)			
径	規格	σ_y	σ_b	$E(\times 10^5)$	備考	試験体	下梁	PCa壁部
D25	SD345	382	567	1.94	主筋(HJ-1～9)	7日	61.3	60.0
D13	SD345	372	552	1.90	縦横筋(HJ-1～9)	28日	75.9	75.8
D13	SD345	376	539	1.82	縦横筋(HJ-11～14)	試験日	75.6	71.9

(c) コンクリート (単位: N/mm ²)								
試験体	4週	試験日	試験体	4週	試験日	試験体	4週	試験日
HJ-1	31.4	32.6	HJ-6	30.4	34.0	HJ-11	33.3	32.5
HJ-2	31.4	33.2	HJ-7	31.4	33.0	HJ-12	33.3	35.2
HJ-3	30.4	31.3	HJ-8	31.4	32.2	HJ-13	31.6	36.9
HJ-4	30.4	31.3	HJ-9	33.6	33.4	HJ-14	31.6	37.7
HJ-5	30.4	32.4						

3. 実験方法

加力は、曲げ降伏した水平接合部のあるPCa壁のせん断力の余裕度を調べる目的で、図-4に示すように、鉛直方向の中央の100tジャッキによって一定軸応力を与え、また、両側の2基の鉛直アクチュエータにより正負の繰り返し曲げモーメントを与え、試験部分を曲げ降伏させた状態で、水平アクチュエータにより、水平接合部にせん断力のみを単調に加えた。水平接合部より上部200mm区間の曲率を常に観測しながら、引張側主筋が降伏したときを曲げ降伏曲率 ϕ_y とした。図-3に示すように、 $-\phi_y$ 、その後、試験体に応じて、 $\pm\phi_y$ 、 $\pm 3\phi_y$ 、または $\pm 5\phi_y$ を正負交互に2回ずつ繰り返した後、3回目の正側の曲率まで加え、この時の曲げモーメントを保持しながら、水平せん断力のみを単調に増加して、最終まで破壊した。HJ-1, 5, 7及び11では曲げを与えないで軸力のみを加えた状態で、せん断力を単調に増加した。

水平接合部の滑り量 δ (5ヶ所)と壁下部20cmの曲率、せん断変形、及び主筋の歪を測定した。

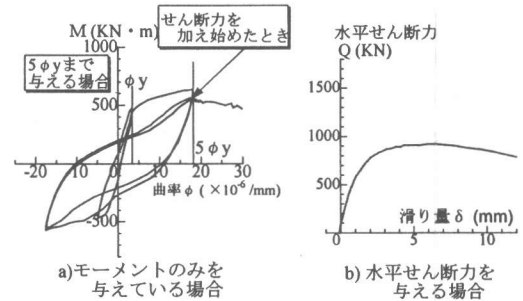


図-3 加力履歴

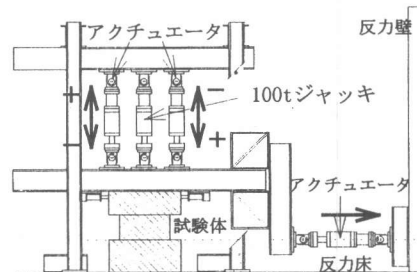


図-4 加力装置図

4. ひび割れ状況

最大荷重時におけるひび割れ状況を、図-5に示す。曲げ降伏させる試験体の場合、正負の繰返し曲げモーメントを与えていくと、接合部でひび割れが貫通し、ひび割れ幅が5~8mmまで広がった。曲げ塑性率が大きいほど壁圧縮端に破壊が集中した。曲げを与えないものでは全体に均等に激しくせん断ひび割れが入り、水平接合部直上の全域にわたってコンクリートの斜め圧縮破壊が見られた。PCa壁のせん断ひび割れの方がRC壁より少し激しかった。

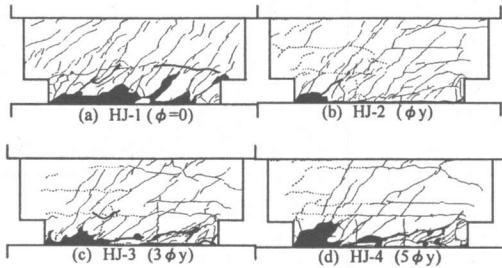
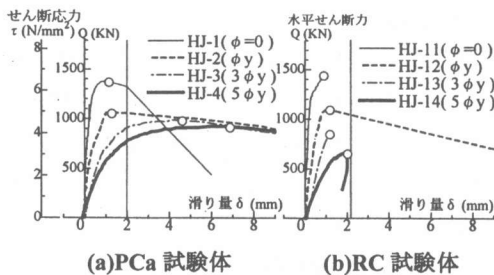


図-5 ひび割れ状況

5. せん断力-滑り量関係

5.1 曲げ塑性率による影響

曲げ塑性率 ϕ の違いによる影響についてみると、図-6に示すように、曲げ塑性率の量が大きいほど、せん断耐力が低下し、同時に最大耐力時の滑り量が大きかった。また、曲げを与えないHJ-1は最大耐力を示した後、脆性的に破壊しているのに対し、曲げ塑性率の大きいものでは、最大耐力に達した後も耐力の低下は小さい。RC壁においては、最大耐力後、耐力が急激に減少した。



(a)PCa 試験体 (b)RC 試験体

図-6 曲げ塑性率による影響

5.2 軸力による影響

軸応力の影響について見てみると、図-7に示すように、高軸応力のHJ-5と6は、低軸応力のHJ-1と3より約10~20%高いせん断耐力を示した。また、高軸応力の場合は最大耐力時の滑り量が、低軸応力のものに比べ、約半分になっている。これは、軸力が高い場合には、コンクリートの摩擦による効果が大きくなるためと考えられる。

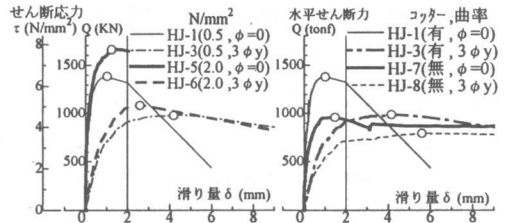


図-7 軸力による影響 図-8 コッタによる影響

5.3 シアコッタの有無による影響

コッタによる影響についてみると、図-8に示すように、コッタの有るHJ-1と3は無いHJ-7と8に比べ、曲げ変形を与えない場合で約44%、与えた場合で約24%高いせん断耐力を示した。コッタを持たず、曲げを受けないHJ-7は、コッタを持ち、5 ϕy まで曲げを受けたHJ-4(図-6(a))程度の耐力しかなく、コッタがないために明らかに耐力低下が見られた。

5.4 PCa壁とRC壁の比較

PCa壁とRC壁を比較してみると、図-9に示すように最大耐力に達するまでは、どちらもほぼ同様の挙動を示した。その後、RC壁はコンクリートが斜め圧縮破壊したため、急激に耐力を失い、脆性的に破壊した。一方、HJ-3では、緩やかに耐力が上昇し、滑り量約4mmで最大耐力を示した後も、大変形にわたり耐力を保持した。コッタのあるPCa壁(HJ-3)の最大耐力はRC壁(HJ-9)とほぼ同じであったが、そのときの変形量はPCa壁の方がかなり大きかった。コッタのないPCa壁(HJ-8)(図-8)はRC壁より2割ほど低い耐力を示し、かつ変形量も大きかった。

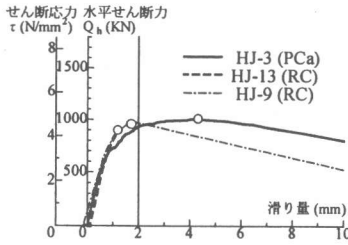


図-9 PCa壁とRC壁の比較

6. 既往の耐力式による計算値との比較

水平接合部のせん断耐力の実験値と既往の耐力式による計算値を表-3に示す。実験値については、最大耐力及びその時点の水平接合部の滑り量を示した。また、滑り量 $\delta=2\text{mm}$ での耐力も示した。実験式(1)~(3)は、敷きモルタル方式を用い、一定軸応力下での単調せん断実験に基づいて提案された式であり、曲げによる効果が入っていない。式(1)と(2)については建築学会式¹⁾を用いた。式(3)は望月や楨谷²⁾らによるもので、式(2)のうち主筋の効果をダウエル効果と摩擦効果に分解したものであり、ほぼ同じ値を示している。

曲げ塑性率の影響についてみると、曲げを与えないHJ-1の水平接合部のせん断強度の実験値は計算値を1.4倍以上上回った。与える曲げ塑性率を大きくするほど耐力が低下し、曲げ塑性率を $5\phi_y$ とし、十分に曲げ降伏させたHJ-4では実験値は式(2)や(3)による計算値より約10%小さいが、式(1)の値よりは大きい。

上述したことは、従来の水平接合部の研究成果と比較すると全く逆の内容である。既往の研究によると、曲げを与えることは、水平接合部のせん断耐力の上昇に有効であると報告されていることが多い。しかし、これらの研究では、敷きモルタル方式の水平接合部に、一定の曲げを与えた実験より導かれている。本研究では、水平接合部にコッタを設けグラウト材を充填する方式を用いており、また、正負の曲げ塑性変形を与えた後せん断力を加えている。このため、最大耐力は水平接合部の滑りでなく、水平接合部直上の壁コンクリートの斜め圧縮破壊によって決定している。

軸力による影響についてみると、高軸力で曲げ変形を与えないHJ-5では、最大耐力は式(1)~式(3)による計算値を大きく上回った。しかし、曲げ変形を $3\phi_y$ 与えたHJ-6では、最大耐力が小さくなり、式(2)と式(3)による計算値を下回った。

シアコッタによる影響については、 $3\phi_y$ まで曲げを与えたHJ-8の耐力は、式(2)と式(3)による計算値を少し下回った。

表-3 既往の耐力式による計算値と実験値との比較

試験体 番号	最大耐力時		Q(t) ($\delta=2\text{mm}$)	計算値 Q(t)		
	Q(t)	δ (mm)		式(1)	式(2)	式(3)
HJ-1	140.8	1.03	135.2	62.7	102.9	106.2
HJ-2	108.0	1.02	107.4	62.7	103.1	106.4
HJ-3	100.7	4.11	93.3	62.7	102.3	105.7
HJ-4	94.2	6.62	78.8	62.7	102.3	105.7
HJ-5	170.1	1.33	167.8	84.8	134.3	128.8
HJ-6	111.1	2.58	108.0	84.8	135.0	129.3
HJ-7	98.0	1.47	94.6	62.7	89.6	94.2
HJ-8	80.9	5.68	72.5	62.7	89.6	94.2
HJ-9	98.0	1.49	93.2	62.7	89.6	94.2
HJ-11	146.7	0.83	-			
HJ-12	111.8	1.06	107			
HJ-13	87.2	1.17	-			
HJ-14	66.7	1.86	56.4			

$$Q_u = 0.7 \times (\sigma_y \times \sum a_s + N) \text{-----(1)}$$

$$Q_u = 0.1 \times F_c \times A_c + a_s \times \sigma_y + N \text{-----(2)}$$

$$Q_u = 0.09 \times F_c \times A_c + 1.28 \times a_s \times \sqrt{\sigma_y \times F_c} + 0.54 \times A_s \times \sigma_y + 0.84 \times \sigma_n \times A \text{-----(3)}$$

$\sigma_y, a_s(A_s)$: 鉛直主筋の降伏強度と断面積
 F_c, A_c : コッタのコンクリート強度と面積
 $N(= \sigma_n \times A)$: 軸力

7. PCa壁が斜め圧壊する時の耐力式の提案

本実験では、壁コンクリートの斜め圧縮破壊により試験体が破壊した。そこで、コンクリートの斜め圧縮破壊により決まるせん断強度を求めることを試みた。

最初に、水平接合部に曲げを与えない場合を考える。トラス機構によるコンクリート圧縮束角度 θ はひび割れ図より、 45° と仮定する。そのため引張端より20cmは、斜め圧縮応力 c_σ は作用していないものとする。

図-10(b)に圧縮斜材の一部を図示する。厚さ t の断面ABに生じる力 N は、式(4)で表される。

$$N = \sigma_c \times \frac{dx}{\sqrt{2}} \times t \quad \text{----- (4)}$$

長さ dx の水平接合部でのせん断応力 τ は、式(5)で表される。

$$\tau = \frac{N}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{dx \times t} = \frac{\sigma_c}{2} \quad \text{----- (5)}$$

このせん断応力 τ に水平接合部の接着面積 $X_n \times t$ をかけ、壁コンクリートによって伝達されるせん断耐力 Q_c は式(6)によって求まる。曲げがないので、 $X_n = l - 20 = 120\text{cm}$ となる。

$$Q_c = \tau \times X_n \times t \quad \text{----- (6)}$$

壁コンクリートが斜め圧壊する際に示すコンクリートの強度 σ_c (N/mm^2) は、式(7)に示す有効強度係数 ν を掛けることにより求める。

$$\nu = 0.7 - \frac{\sigma_B}{200} \quad \text{----- (7)}$$

次に曲げを受ける水平接合部を考える。水平接合部が繰り返し曲げ変形を受けることにより、引張側端部ではひび割れ幅が徐々に大きくなり、せん断力を与え始めるときには完全に浮き上がるのが実験で確認された。

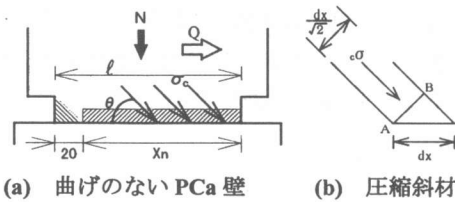


図-10 曲げを受けない水平接合部

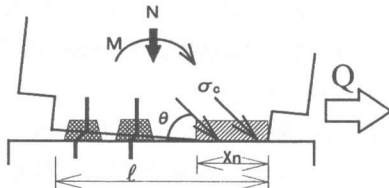


図-11 曲げ変形を受ける水平接合部

コンクリートの圧縮域 X_n では、式(6)を用いてコンクリートが負担するせん断強度 Q_c を求める。この際、引張側鉄筋は全て降伏しているものとし、圧縮側となった鉄筋の効果は無視した。

さらに、引張域 ($l - X_n$) では鉄筋及びコッタがせん断力を負担していると仮定し、その強度は、望月らの提案した(3)式のうちコッタと、鉄筋のダウエル効果の項を用いて計算する。

本研究ではコッタ内には主筋と共に高強度グラウト材が充填されるので、コッタによるせん断力は、壁コンクリートの支圧強度によって決まることになる。支圧強度 F_{c1} は、圧縮強度の2倍と、また、ダウエル効果を算出するときのコンクリート強度 F_{c2} には、グラウト材の強度を仮定した。

以上から、壁コンクリートが斜め圧縮破壊する場合の耐力 Q_s は式(8)により算出される。

$$Q_s = F_{c1} \times A_{c1} + 1.28 \times a_s \times \sqrt{\sigma_y \times F_{c2}} + Q_c \quad \text{--(8)}$$

表-4に、計算結果と実験値を比較して示す。

曲げ塑性率がせん断耐力に与える影響について図-12に示す。PCa試験体 HJ-1~4 では、計算値は実験値にかなり近い値を示し、曲げ塑性率が大きくなるとせん断耐力が低下していく傾向も示した。RC試験体 HJ-11~14 についても、計算値は実験値に近い値をとり、同じ傾向を示した。

次に、軸力の影響について図-13に示す。計算式との整合性もよく、また、曲げ塑性率を0から3とした場合の耐力減少の傾向はどちらも同様の傾向を示した。

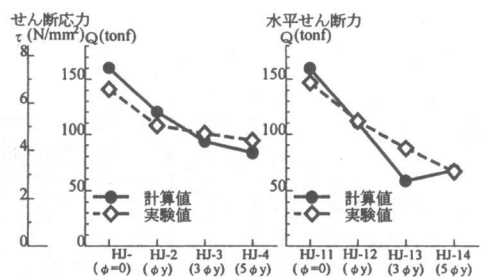


図-12 曲げ塑性率の影響

コッタの影響については図-14に示すように、曲げを与えていない HJ-1 と 7 では計算値は実験値より大きくなった。特に、コッタの無い HJ-7 では、計算値は実験値より非常に大きくなった。

この理由の一つとして、コッタが無くても曲げが無い HJ-7 では水平接合部では全面接着していると仮定しているため、大きな計算値になる。一方、曲げを受ける HJ-8 では、溝の側面での摩擦の効果が取り入れられていないため、摩擦の効果が過小に評価されてしまうものと思われる。

総合的に見て、シアコッタを有し、グラウトを全充填する水平接合部を含む PCa 壁に対しては、本実験において提案した式は、敷きモルタルの水平接合部を対象とした従来の耐力式と比べ、実験結果と良い整合性を示した。RC 壁の HJ-13 で、計算値が実験値よりかなり小さくなっているのは、耐力式の Q_c を算出する時に必要な X_n が、実測曲げモーメントに基づいて算出されており、その実測曲げモーメントだけが計算値よりかなり大きかったためである。

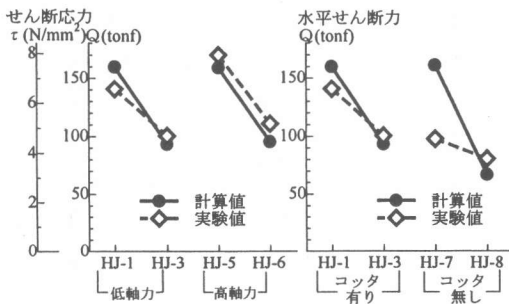


図-13 軸力による影響 図-14 コッタによる影響

表-4 本提案式によるせん断耐力

と実験値の比較 (単位: tonf)

試験体	実験値	提案式による計算値			
		合計	第1項	第2項	第3項
HJ-1	140.8	159.9	0.0	0.0	159.9
HJ-2	108.0	120.4	19.0	22.0	79.4
HJ-3	100.7	93.5	26.8	32.9	33.7
HJ-4	94.2	83.3	26.8	32.9	23.6
HJ-5	170.1	159.2	0.0	0.0	159.2
HJ-6	111.1	95.7	29.1	32.9	33.6
HJ-7	98.0	161.2	0.0	0.0	161.2
HJ-8	80.9	67.1	0.0	32.9	34.2
HJ-9	98.0	48.6	0.0	29.9	18.7
HJ-11	146.7	159.6	0.0	0.0	159.6
HJ-12	111.8	110.5	0.0	22.9	87.6
HJ-13	87.2	58.5	0.0	23.5	35.0
HJ-14	66.7	67.9	0.0	27.7	40.3

8. 結論

主筋後挿入方式を用いる水平接合部を含む PCa 壁のせん断耐力に関し、次のような知見を得た。

- (1) 曲げ塑性率が水平接合部を含む PCa 壁や RC 壁のせん断耐力や最大耐力時の変形量に大きな影響を与える。
- (2) 高軸力を受けている水平接合部を含む PCa 壁のせん断耐力は、低軸力のものより大きくなるが、最大耐力時の変形量は小さく、また、最大耐力後、急激に耐力が低下した。
- (3) コッタを設けない場合、水平接合部を含む PCa 壁のせん断耐力は減少した。また、大きな曲げ塑性変形を受けた後でも、コッタを設けたものの方が、最大耐力時の滑り量は小さかった。
- (4) コッタを設けた PCa 壁は一体打ちの RC 壁とほぼ同じ最大せん断力を示した。最大耐力後、一体打ちの耐力低下は急激であったのに対し、PCa 壁のものは緩やかであった。
- (5) 水平接合部の既存の耐力式（敷きモルタル方式によるもの）による値と比べ、グラウト充填方式の水平接合部の最大耐力が大きかった。
- (6) 提案した耐力計算値は実験値にかなり近い値を示した。また、曲げ塑性率を大きくしていくと、耐力が減少する傾向も示した。

参考文献

- (1) プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工、日本建築学会、昭和 61 年 10 月 25 日、第一版
- (2) 望月重、榎谷栄次、永坂具也：壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力、日本建築学会構造系論文報告集、第 424 号、1991 年 6 月、pp.11