

(48) 付帯柱と絶縁したプレキャスト壁版付きPCフレームの弾塑性解析

オリエンタル建設(株) 技術部 非会員 ○森山 毅子彦  
 同上 技術部 正会員 小山内 裕  
 同上 営業本部 正会員 大島 幸  
 同上 建築支店 正会員 木村 義男

1. はじめに

構造的に柱と絶縁されたPCa壁版付きのPCフレームは、柱と壁の間で存在応力が伝達されないため、付帯柱と一体となった従来の耐震壁付きのフレームとは異なった挙動が予想される。本研究で対象としているPCa壁版は水平方向に数個に分割されているため、鉛直方向長さ-幅比が大きくなり従来のプロポーションの壁に比べて曲げの影響が大きくなる。更に、柱と壁との間で応力の伝達が行われない点や鉛直荷重の作用を考慮すると、壁というより柱に近い部材と考えられる。それ故、供試体の解析においてマクロモデルを設定する場合には、従来の方法でモデルを仮定する事ができない。そこで、壁を軸力を受ける曲げ部材として考え、解析モデルを設定し、剛性マトリックス法により解析する。本研究では柱との接合を省略したPCa壁版の耐力と変形に着目して、模型試験を行い、解析した荷重-変位関係を実験値と比較検討して解析モデルの適合性を検証する事を目的とする。

表1 コンクリートの材料試験結果 (kgf/cm<sup>2</sup>)

供試体 部 位	PW2,PW3		PW5	
	$\sigma_b$	$E_c \times 10^3$	$\sigma_b$	$E_c \times 10^3$
基礎	778	-	706	-
柱, 梁, 壁	456	298	365	263
床, 小梁	438	-	482	-
基礎目地	332	-	535	-
柱梁目地	503	-	577	-

2. 実験

表1、表2に供試体の製造に使用した材料の試験結果、表3に、供試体のパラメーター、及び図1に供試体の(PW3)の形状寸法、配筋図を示す。供試体は、3スパン(13m+5.4m+13m)、9層(階高4m)のフレームから1スパン3層の独立連層耐震壁を取り出し、実構造の1/4スケールとした。実験要因は1スパン内の壁の分割数、壁の曲げ補強筋量とした。壁の分割数はPW2、PW3、PW5で各々2、3、3とし、壁の曲げ補強筋は引張り筋を各々2-D13、2-D13、1-D13とした。柱と壁版付き梁はプレキャスト部材として製作した。組立方法、加力方法は参考文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

表2 鋼材の機械的性質 (kgf/cm<sup>2</sup>)

種類	径	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$E_s \times 10^4$
鉄筋	$\phi 5$	-	5606	-
	D6	3751	5617	210
	D10	3639	5178	210
	D13	3823	5199	210
PC 鋼棒	$\phi 13$	13580	14170	200
	$\phi 17$	10870	11540	203
	1) $\phi 23$	9480	10520	200
	2) $\phi 23$	10420	11530	203

1)供試体PW5; 2)供試体PW2、PW3

3. 解析

3.1 解析モデルの設定

供試体の解析モデルを図2に示す。このモデルは次の様な仮定に基づいて設定した。

- 1) 柱や壁などの、軸力の作用する曲げ部材は、図3に示すトリリニア型部材特性を有する。
  - 2) 各部材の接合点には剛域が存在する。
  - 3) 部材の対角長と部材長の差の大きな幅広部材の回転による影響を考慮する。
- 図3において曲線の折曲点になっている $M_{bc}$

表3 供試体のパラメーター

供試体	PW2	PW3	PW5	
柱	断面(cm)	20x20	20x20	20x20
	主筋	8-D13	8-D13	6-D13,2-D6
	Hoop	D6@30	D6@30	D6@25
梁	断面(cm)	20x30	20x30	20x25
	軸方向筋	4-D13	4-D13	4-D13
	Stp.	D6@50	D6@50	D6@50
	厚さ(cm)	7.0	7.0	7.0
壁	曲げ補強筋	4-D13	4-D13	2-D13
	壁筋	D6@100	D6@100	$\phi 5@50$
	分割数	2	3	3

$M_u$  は各々曲げひび割れ耐力、部材の曲げ降伏耐力である。  
各耐力の計算式は、次式による。

$$M_{BC} = 1.8 \cdot Z_e \cdot \sqrt{F_c} + N \cdot Z_e / A_c \quad \dots \textcircled{1}$$

$N < 0$  の時

$$M_u = a_t \cdot (\sigma - N / a_g) \cdot (d - d_c) \quad \dots \textcircled{2}$$

$0 < N \leq 0.4 \cdot b \cdot D \cdot F_c$  の時

$$M_u = 0.8 \cdot a_t \cdot \sigma \cdot D + 0.5 \cdot N \cdot D \cdot (1 - N / (b \cdot D \cdot F_c)) \quad \dots \textcircled{3}$$

$N > 0.4 \cdot b \cdot D \cdot F_c$  の時

$$M_u = 0.8 \cdot a_t \cdot \sigma \cdot D + 0.12 \cdot b \cdot D^2 \cdot F_c \quad \dots \textcircled{4}$$

$a_t$ : 引張鉄筋総断面積       $a_g$ : 鉄筋総断面積

$\sigma$ : 鉄筋引張強度               $N$ : 軸方向力

②式は、全断面引張応力度の場合である。①、③、④式、及び剛域長の設定は鉄筋コンクリート構造計算規準（建築学会）に従う。

### 3.3 募股要素

壁等の幅広部材は、線材で置換すると曲げ耐力を評価する事は可能であるが、対角長と部材長の差による挙動を評価することができない。幅広の部材に回転変形が生じれば、対角線上に圧縮ストラット図4が形成される事によりトラス部材的挙動を示す。そこで本供試体の部材を図5に示す部材（以後、募股要素と呼ぶ）に置換し、曲げ部材の組み

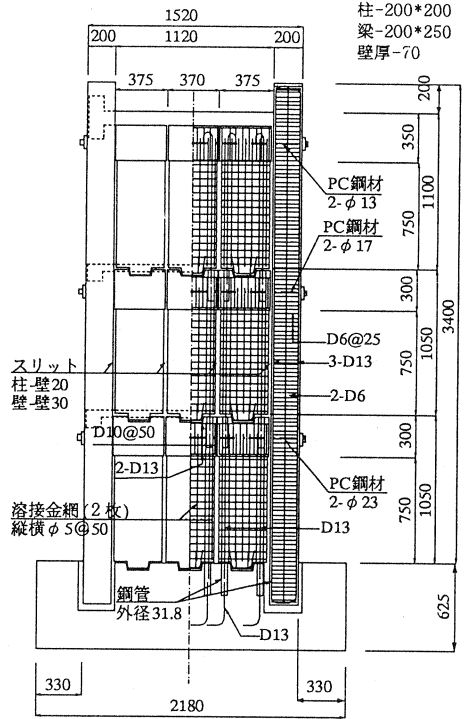


図1 供試体図 (PW5)

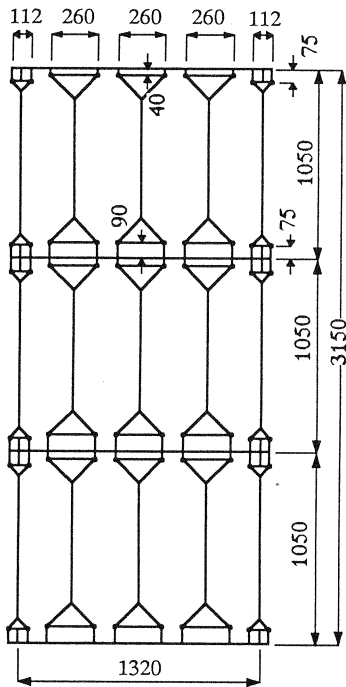


図2 解析モデル

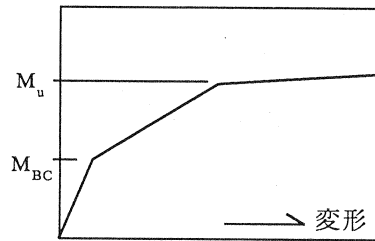


図3 部材特性

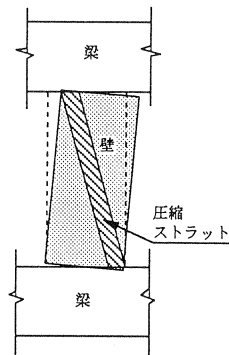


図4 部材の回転変形

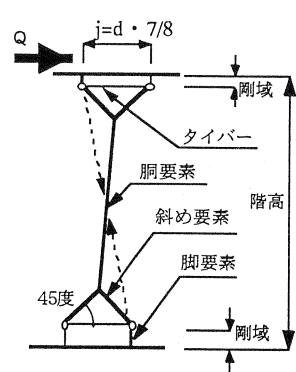


図5 募股要素

水平荷重  
P = 24.00ton

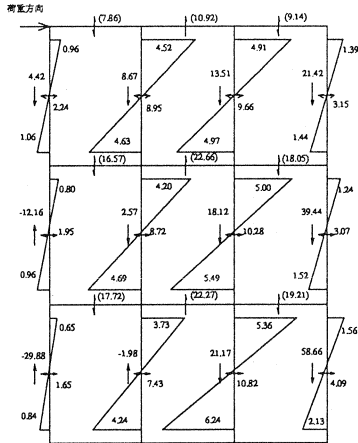


図6 部材の応力 (PW2 : 解析値)

水平荷重  
P = 24.73ton

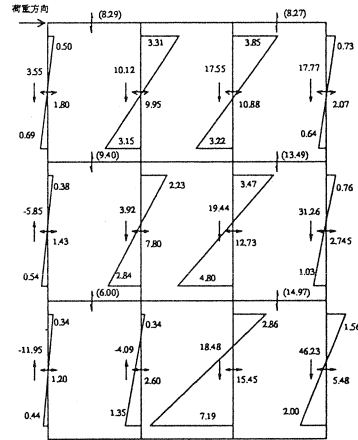


図7 部材の応力 (PW2 : 実験値)

水平荷重  
P = 24.00ton

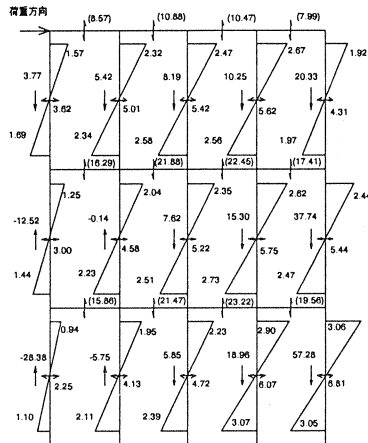


図8 部材の応力 (PW3 : 解析値)

水平荷重  
P = 24.66ton

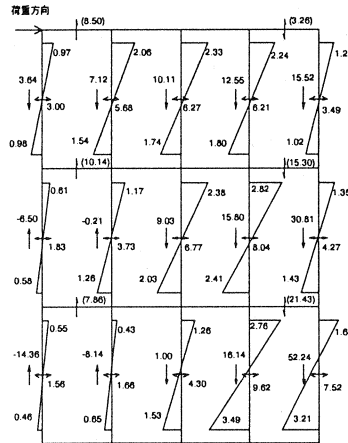


図9 部材の応力 (PW3 : 実験値)

水平荷重  
P = 26.00ton

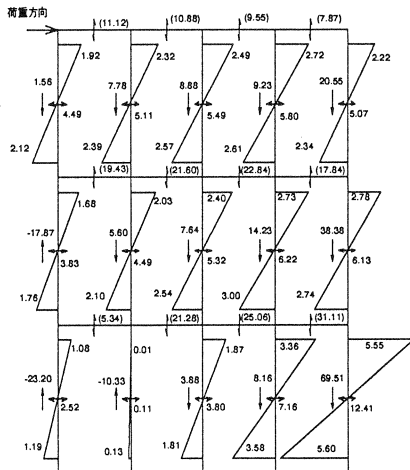


図10 部材の応力 (PW5 : 解析値)

水平荷重  
P = 25.85ton

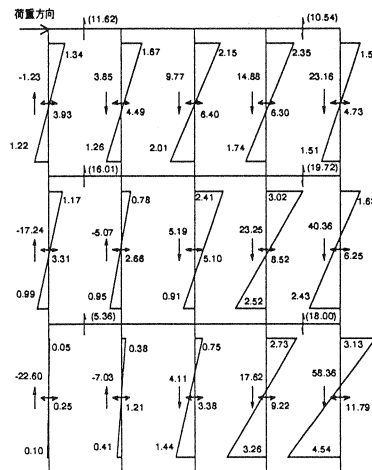


図11 部材の応力 (PW5 : 実験値)

合わせによりトラス効果を有するモデルを設定した。

胴要素は曲げ剛性と軸剛性が壁版と同性能の要素で、図3に示すトリリニアア型の部材特性を有する巻股要素の主材である。脚要素は壁版の回転変形時の支点となり、鉛直方向鉄筋と同性能の部材特性を有し、壁版のモーメントに対して軸引張力により抵抗する。引張力が鉄筋の耐力を超えれば、増分荷重に対し他方の脚要素を支点として片足立ちのヒンジを形成する。両端がヒンジ化すると巻股要素に置換された壁版は、対角の脚要素によりピン支持されトラス効果を有する部材となる。斜め要素は胴要素端部の回転剛性及び鉛直変位剛性について、胴要素が梁まで延長されている場合と等価な断面とした。タイバーは脚要素の開きを防止する要素である。

### 3.4 加力方法

鉛直荷重は、各鉛直部材要素の応力度が均一になるように最上階の梁の各節点に分散して、計N = 4.8 tonを一定荷重で設定した。水平荷重は片押しの静的暫増載荷法とした。

## 4. 解析値と実験結果の比較検討

### 4.1 各部材の応力

架構が比較的弾性的挙動を示す段階の各部材の応力について解析値と実験値を比較検討し、設定した解析モデルが弾性領域において供試体の部材の応力状態を推定するのに適切であるかどうかを確認する。採用した載荷ステージは、各部材の鉄筋が降伏する直前の正荷重の最大値とした。

図6～11に各供試体の部材応力の解析結果と実験結果を示す。

PW2：解析値は柱のモーメントが壁に比べて小さく、壁のせん断力が大きい。実験値で1層左側の引っ張り応力状態にある壁の応力が小さい点を除けば解析値は概ね実験値と同様の傾向を示している。

PW3：PW2と同じように1層の引っ張り力の作用している左側壁の応力が小さい点を除き、解析値は概ね実験値と同様の傾向にある。

PW5：1層の左側壁の応力は解析値、実験値共に値が小さく、解析値は実験値と同じ傾向を示す。しかし、圧縮柱の曲げ応力については、解析値は実験値に比べて大きい。

すべての供試体についての傾向としては、上層においては実験値と解析値は適合性が高いこと、下層の引っ張り応力が卓越している部分では実験値と解析値に差があることが挙げられるが、総体的には、解析モデルは供試体の応力状態を表現しているといえる。

表4 各層の柱と壁の水平力負担率(%)

供試体	層	区分	左柱	左壁	中壁	右壁	右柱
PW2	3	実験	7.3	40.2	-	44.0	8.5
		計算	9.3	37.3	-	40.3	13.1
		実/計	78.5	107.8	-	109.2	64.9
	2	実験	5.7	31.6	-	51.5	11.1
		計算	8.1	36.3	-	42.8	12.8
		実/計	70.4	87.1	-	120.3	86.7
	1	実験	4.9	10.5	-	62.5	22.2
		計算	6.9	31.0	-	45.1	17.0
		実/計	71.0	33.9	-	138.6	130.5
PW3	3	実験	12.2	23.0	25.4	25.2	14.2
		計算	15.1	20.9	22.6	23.4	18.0
		実/計	80.8	110.0	112.4	107.7	78.9
	2	実験	7.4	15.1	27.5	32.6	17.3
		計算	12.5	19.1	21.8	24.0	22.7
		実/計	59.2	79.1	126.1	135.8	76.2
	1	実験	6.3	6.7	17.4	39.0	30.5
		計算	0.1	17.2	19.7	25.3	28.4
		実/計	*	39.0	88.3	154.2	107.4
PW5	3	実験	15.2	17.4	24.8	24.4	18.3
		計算	17.3	19.7	21.1	22.3	19.5
		実/計	87.9	88.3	117.5	109.4	93.8
	2	実験	12.8	10.3	19.7	33.0	24.2
		計算	14.3	17.3	20.5	23.9	23.6
		実/計	89.5	59.5	96.1	138.1	102.5
	1	実験	0.9	4.4	12.1	40.3	42.4
		計算	9.7	0.4	14.6	27.5	47.7
			実/計	9.2	*	82.9	146.5

\*：解析値が小さいため値が過大となるので表記を少略

#### 4.2 水平力負担率

表4に、柱および壁の水平力負担率の実験値、解析値および解析値に対する実験値の比を示す。

PW2、PW3およびPW5の壁版1枚あたりの曲げ剛性は、柱の曲げ剛性のそれぞれ7.3倍、2.0倍および1.7倍である。曲げ剛性の高い壁版は、当然のことながら1枚あたりの水平力負担率が高い。今回の実験のように転倒モーメントが大きい場合は、引っ張り力の卓越する部材が存在する。引っ張り力の作用する部材は曲げ耐力が低下し、水平力負担率は部材の曲げ剛性の比率より小さい。

1層の左側の柱や壁は水平力負担率が小さく、右側の部材では負担率が高い。これは、左側の部材は引っ張り応力が卓越するために曲げ抵抗力が小さく、右側の部材は圧縮応力が卓越するため曲げ耐力が高くなっているためである。

1層の分割された壁版の負担水平力の合計を柱1本あたりの平均負担水平力で除した値は、PW2は5.5、PW3は3.4、PW5は2.6である。すなわち、1スパン内の壁版の水平剛性は、それぞれ柱1本の水平剛性の5.5倍、3.4倍、2.6倍と考えることができる。

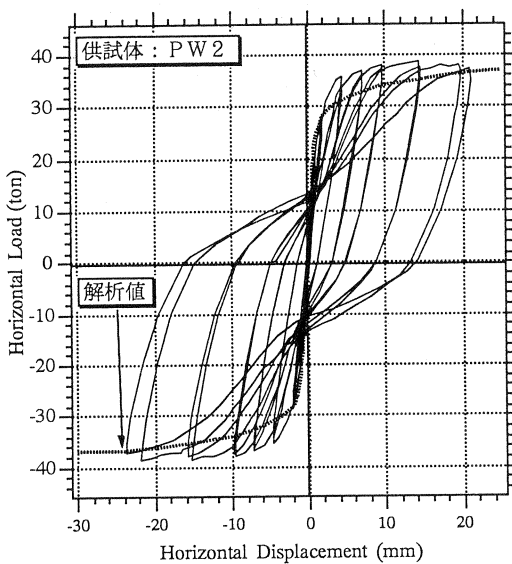


図12 荷重 - 変位曲線 (PW2)

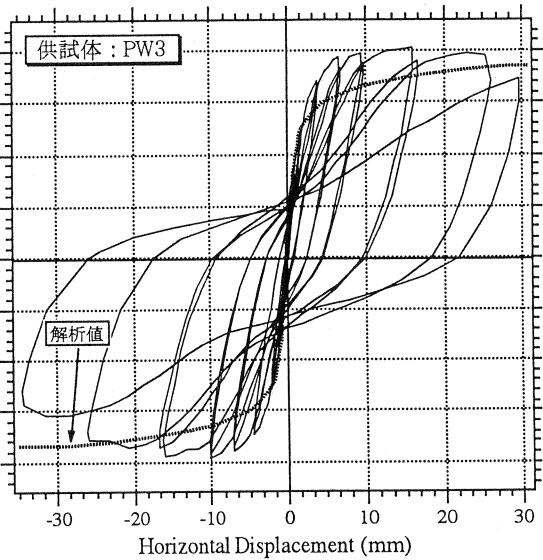


図13 荷重 - 変位曲線 (PW3)

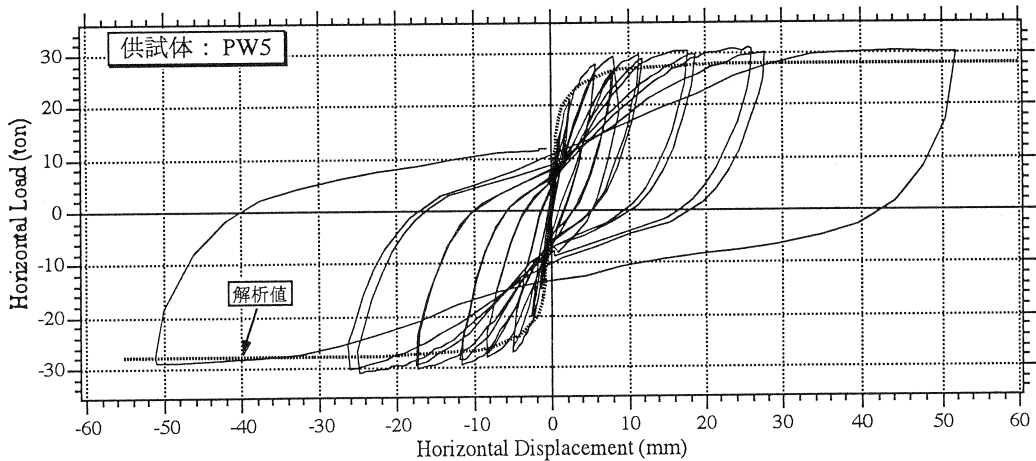


図14 荷重 - 変位曲線 (PW5)

#### 4.3 荷重-変位曲線

実験結果と褓股要素を適用したモデルの塑性領域における解析結果の1層の荷重-変位曲線を図12~14に示す。

初期剛性については、PW3は実験値とほぼ一致しているが、PW2、PW5では解析値の方が高い。

終局耐力は、壁補強筋量の多いPW2、PW3が高く、壁補強筋量の少ないPW5は低い。解析による終局耐力は実験値よりやや小さいものの、解析による荷重-変位曲線は実験で得られた荷重-変位曲線の包絡線を概ね表現している。

また各供試体とも架構の降伏は変位量 $\delta = 5$  mm付近と見られ、塑性率は $\mu = 4$ 以上となっている。とくにPW5では変位量 $\delta = 50$ mmの変位においても安定した挙動を示し、塑性率 $\mu = 10$ を確認することができた。

1層の層間変位 $R = 1/100$ radにおける水平荷重を表5に示す。水平荷重の解析値に対する実験値はPW2、PW3およびPW5で各々110%、115%および107%であり、よく適合している。

各供試体とも層間変位量 $\delta = 22$ mm( $R = 1/50$ rad)に到るまで水平荷重の低下は見られず、また鉛直耐荷力の低下もなかった。繰り返しのループは安定しており、曲線の描く面積も広く、エネルギー吸収性が高いことを示している。

表5 R = 1/100 (rad) における  
水平荷重の比較

供試体	実験値 (ton)	計算値 (ton)	実験 / 計算 (%)
PW2	37.6	34.1	110
PW3	38.4	33.3	115
PW5	28.8	26.9	107

#### 5. 結論

以上から本研究の範囲内で、柱と絶縁され水平方向に分割された壁版については、次のような知見が得られた。

- 1) 褓股モデル解析による材料弾性領域における各部材の応力は実験値を概ね表現している。
- 2) 褓股モデルによる塑性領域における耐力及び剛性の評価は実験値に適合している。
- 3) 本研究が対象としたプレキャスト壁版を組み込んだプレキャストPCフレームは、1層の層間変形角 $R = 1/50$ radにおいても水平耐力、鉛直耐荷力は低下せず、高い靱性と高いエネルギー吸収性能を示した。

#### 謝辞

本研究は、(社)建築研究振興協会に設置された「プレキャスト耐震壁の性能検討委員会(委員長:渡辺史夫、委員:岡本伸、勅使川原正臣、加藤博人、立花正彦、世良耕作、小幡学)」で行われた事を報告します。各委員には多くの助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 小山内裕、大島幸、木村義男、今井昌文:付帯柱と絶縁したプレキャスト壁版の耐震性に関する実験的研究、第4回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、p135~138、1994年10月
- 2) 小山内裕、渡辺史夫、勅使川原正臣、森山毅子彦:柱との接合を省略したプレキャスト壁の耐震性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp559~564、1995
- 3) 鉄筋コンクリート構造計算規準:日本建築学会