

(81) プレキャストプレストレスト 耐震壁の最大強度式

ドービー建設工業(株)

○八木沼宏己

工学院大学

望月 洵

同 大学院

中村 勝

ドービー建設工業(株)

正会員 倉持 春夫

1. はじめに

プレストレスト構造の大スパン化と高層化に対処した、構造の保有耐力を確保する方法としては、施工上の省力化をも考慮したプレキャスト耐震壁の利用が有効である。わが国においては、壁式プレキャスト構造における耐震壁の研究は、積極的に行われてきたが、プレストレスト構造における研究はあまり見あたらない。本論文は、プレストレストフレーム構造にプレキャスト壁パネルを組み込んだプレキャストプレストレスト耐震壁(以下、PCa・PC耐震壁という)の提案を行い、実験の破壊性状に基づいた解析モデルから、PCa・PC耐震壁の最大強度式を誘導し、その妥当性を検討したものである。

2. PCa・PC耐震壁の概要

ここで提案するPCa・PC耐震壁は、図-1に示すように、プレストレストフレーム構造に単一または数々に分割されたPCa壁パネルを組み込み、PC鋼棒で圧着接合したものである。この場合、PCa壁パネルの水平および鉛直目地にはモルタルを注入するが、PCa壁パネルの中央鉛直目地を除いてシャコッターやつなぎ筋は用いない。このPCa・PC耐震壁の意図する点は、

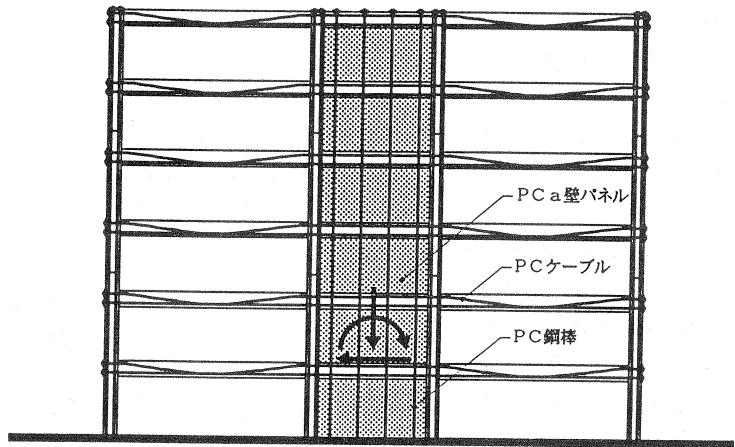


図-1 提案PCa・PC耐震壁の概略

a) 強度、剛性、および靱性の制御

b) PCa壁パネルの施工性の改良である。

現場打ち耐震壁の抵抗機構は、大要、明確になっている。これにもとづけば、PCa・PC耐震壁の場合、その形状、寸法に加えて、PCa壁パネルの圧縮強度、PCa壁パネルのPC鋼棒の強度と配置、および側柱の引張強度と曲げ強度などの調整によって、耐震壁の強度、剛性、および靱性などの力学的性質の意図的な制御が期待できる。

また、壁式プレキャスト構造における耐震壁では、鉛直目地のつなぎ筋の存在が施工性を損なうものとして問題になっている。このPCa・PC耐震壁では、フレーム構造が健全であれば、つなぎ筋によるトラス作用を期待することなく、アーチ作用だけで抵抗力が保持できるとして、シャコッターおよびつなぎ筋を除去し、施工性の改良を計っている。なお、PCa壁パネルのPC鋼棒のシース内には、モルタルを注入しているが、これが不要であれば、激震後、PCa壁パネルの新規取替えによって、PCa・PC耐震壁の修復・再利用も期待できる。

3. 実験の概要

PCa・PC耐震壁の抵抗機構と力学的性質を明確にするため、次の基礎的実験を行った。この詳細については、すでに報告^[1]してあるので、ここではその概要を述べる。

3.1 試験体

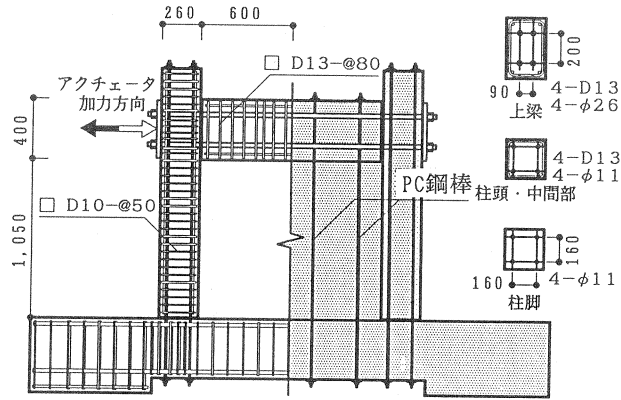
試験体はフレームのみのPCF-1, 2、単一のPCa壁パネルのPCWB-1, 2、および2ヶに分割したPCa壁パネルのPCWC-1, 2の計6体である。図-2(a)の左半分にPCF、右半分にPCWBとPCWCの形状、寸法、および加力方法を示す。図-2(b)は、PCa壁パネルの配筋詳細である。PCWBおよびPCWCとも望月らの判別式^[2]によって、曲げまたは曲げ・せん断破壊モードで終わると予測されている。

加力は、変位制御方式で最大強度までは層間変形角 $R=1.0 \times 10^{-3}$ rad. ごとに2回のサイクル、それ以降は1回のサイクルとしているが、アクチュエーターの能力の関係で、 $P=60$ tfを超える場合は押しだけの片方向加力である。計測は、層間変位の測定および側柱とPCa壁パネルのPC鋼棒の上・下梁内側位置における歪測定である。表-1に試験体の寸法、配筋、材料強度、および実験結果を示す。

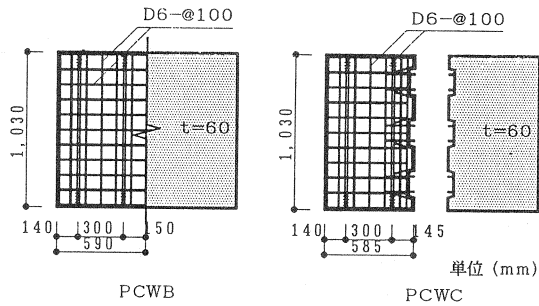
3.2 破壊性状

図-3は、PCF-2のQ-R関係で典型的なプレストレスト構造のそれを示し、側柱の上・下端の曲げ降伏で終わっている。図-4はPCWB-1のQ-R関係および最終時亀裂状況

である。図-5は計測によるPC鋼棒の歪分布である。引張側柱の引張降伏、圧縮側柱上下端の曲げ降伏、および引張側柱に近いPCa壁パネルのPC鋼棒の降伏が認められた。破壊経過は、PCa壁パネルに斜め亀裂の発生→引張側柱の引張降伏→PCa壁パネルの亀裂の伸展→側柱上端、中間部に曲げ亀裂の発生、およびPCa壁パネルのPC鋼棒の降伏→圧縮側柱脚部の破損→PCa壁パネルの隅角部の圧壊であった。この間、目地モルタルの局



(a) PCF-2とPCWB, C



(b) PCa壁パネル

図-2 試験体

表-1 試験体諸性質と実験結果

試験体	PCaパネル				側柱				モルタル σ_B (kgf/cm ²)	実験結果		
	P_s (%)	σ_y (kgf/cm ²)	σ_B (kgf/cm ²)	$\Sigma P_i w$ (tf)	βP_g (%)	τP_g (%)	σ_y (kgf/cm ²)	σ_B (kgf/cm ²)		$\Sigma P_i c$ (tf)	Q_{exp} (tf)	R_b ($\times 10^{-3}$ rad.)
PCF-1	—	—	—	—	1.34 4-φ17	2.10 4-φ17 4-D13	(φ17)	494	69.0	262	39.2	25.0以上
PCF-2	—	—	—	—	0.56 4-φ11	1.31 4-φ11 4-D13	(φ11) (D13)	541 467 465 469 468	27.4	239 339 558 416 442	22.4 74.8 69.6 69.6 72.3	
PCWB-1	—	—	300	27.4	0.56 4-φ11	1.31 4-φ11 4-D13	(φ11) (D13)	467 465 469 468	27.4	239	22.4	18.0
PCWB-2	0.53	11314	277							339	74.8	
PCWC-1	4-φ11		277							558	69.6	
PCWC-2	—		283							416	69.6	

【共通】 PCa壁パネル内法寸法: $l' \times h' = 120(\text{cm}) \times 105(\text{cm})$ PCa壁パネルの厚さ: $t = 6(\text{cm})$ 反曲点高さ: $h' \cdot r = 125(\text{cm})$
 側柱寸法: $b \times D = 26(\text{cm}) \times 26(\text{cm})$ 側柱帯筋: $P_w = 1.09(\%)$, $\sigma_y = 3792(\text{kgf/cm}^2)$ 上梁圧着力: $\Sigma P_i g = 161.4(\text{tf})$, $4-\phi 26$
 【記号】 βP_g : 側柱下端主筋比 P_s : 壁補強筋比 ΣP_i : 全圧着力 Q_{exp} : 実験の最大強度 σ_B : コンクリート圧縮強度 σ_y : 鉄筋、PC鋼棒の降伏点強度
 τP_g : 側柱上端および中間部主筋比 R_b : $0.8 Q_{exp}$ と包絡線の交点に対する層間変形角

部的滑落、側柱およびPCa壁パネルに2~5mm程度の滑りが観察された。

図-6はPCWC-2のQ-R関係および最終時亀裂状況である。破壊経過は全くPCWB-1.2と同じもので、PCa壁パネルを2ヶに分割した影響は観察されなかった。PCWBおよびPCWCの破壊経過は、目地モルタルの滑落、多少の滑りの発生を除けば、現場打ち耐震壁で観測される破壊経過と変わるところはなく、その最大強度時における抵抗機構は次のようであると考えられる。

- 1) 引張側柱は引張降伏している。
- 2) 亀裂発生後、PCa壁パネルは圧縮ストラットを形成し、アーチ作用でせん断力を伝達している。
- 3) 引張側柱に近いPCa壁パネルのPC鋼棒は降伏しており、外力の曲げに抵抗している。
- 4) 圧縮側柱は下端で曲げ降伏しており、側柱にとりつく圧縮ストラットからのせん断力に抵抗している。

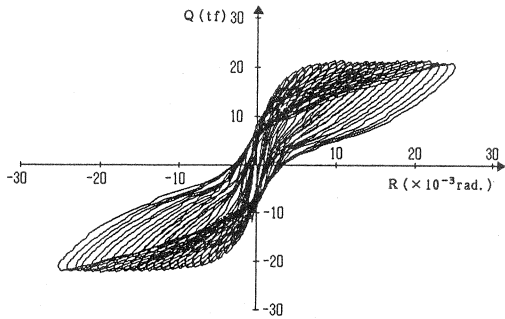


図-3 Q-R関係(PCF-2)

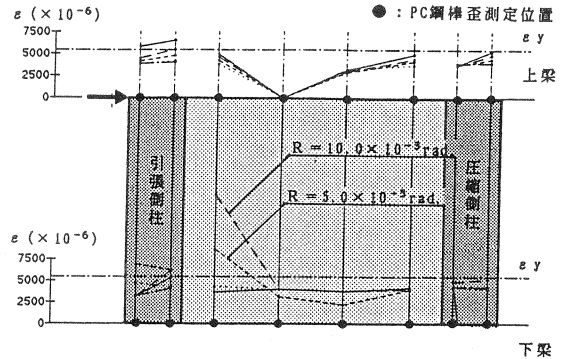
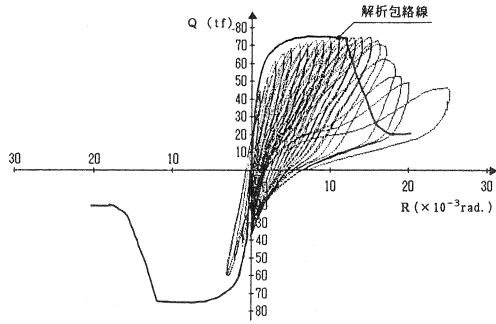
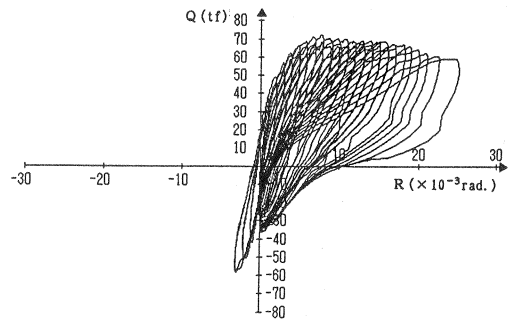


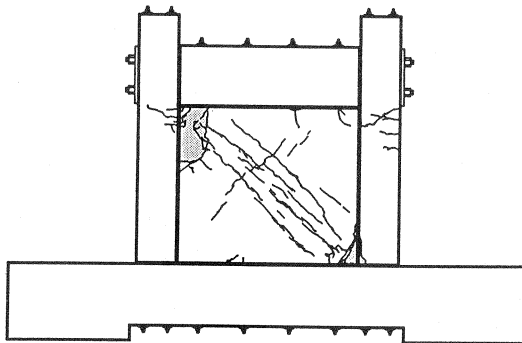
図-5 PC鋼棒の歪分布(PCWB-1)



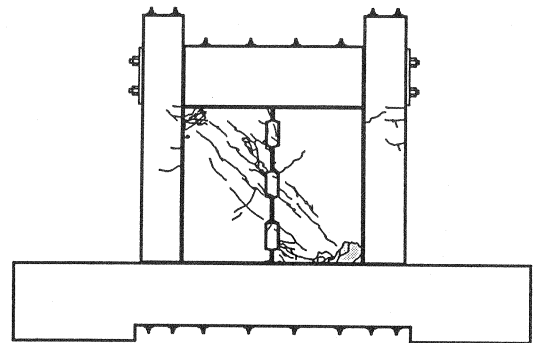
(a) Q-R関係



(a) Q-R関係



(b) 最終時亀裂状況



(b) 最終時亀裂状況

図-4 試験体 PCWB-1

図-6 試験体 PCWC-2

4. マクロモデルによる弾塑性解析

図-7は、望月らが現場打ち耐震壁の弾塑性解析用マクロモデル^[3]として提案しているものを一部修正したものである。上・下梁は剛強な部材に、側柱は剛体+バネに、PCa壁パネルは45°に傾斜した圧縮ストラットに、およびPCa壁パネルのPC鋼棒は縦補強筋にそれぞれ置換される。これらの部材は次の性質をもつ(図-8)。

- 1) 上・下梁は剛強で破壊しない。
- 2) 軸力バネは、完全弾塑性で、その位置は、側柱下端でPC鋼棒の、その他で主筋を考慮した強度の中心にある。軸力バネの強度は、引張域で主筋とPC鋼棒の累加強度、圧縮域で側柱断面の1/2のコンクリートおよび主筋、PC鋼棒との累加強度とする。軸力バネの剛性は、引張域で主筋とPC鋼棒、圧縮域で主筋、PC鋼棒およびコンクリートを考える。なを、せん断バネは破壊しないとしている。
- 3) 圧縮ストラットは、圧縮域でPopovicsの応力-歪関係にしたがい、引張には抵抗しない。ただし、その最大応力は $0.63\sigma_B$ とし、限界歪は $\epsilon_u=0.003$ とする。
- 4) 縦補強筋は引張のみの完全弾塑性とし、圧縮には抵抗しない。

解析は、初めにPC鋼棒による圧着力の総和を縦補強筋を除いたモデルに初期応力として与え、後、増分解法によった。表-2に、最大強度の実験値、解析値、およびその比を示す。解析値は実験値を的確に捉えている。図-9はPCWB-1の破壊経過における部材の降伏状況と変形である。実験で観察された破壊経過によく対応している。図-4(a)に解析による包絡線を描いてある。モデルは滑りの効果を考慮していないため、変形は小さめになっている。

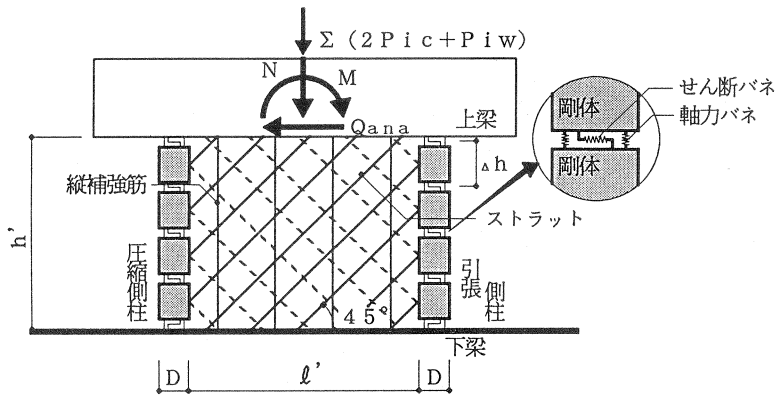


図-7 弾塑性解析用マクロモデル

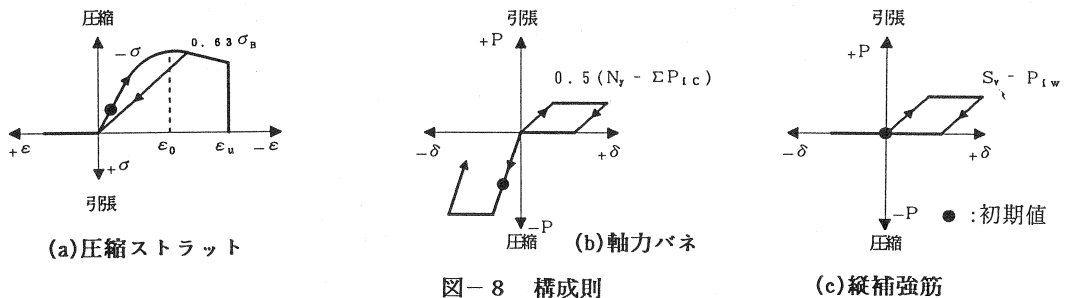


図-8 構成則

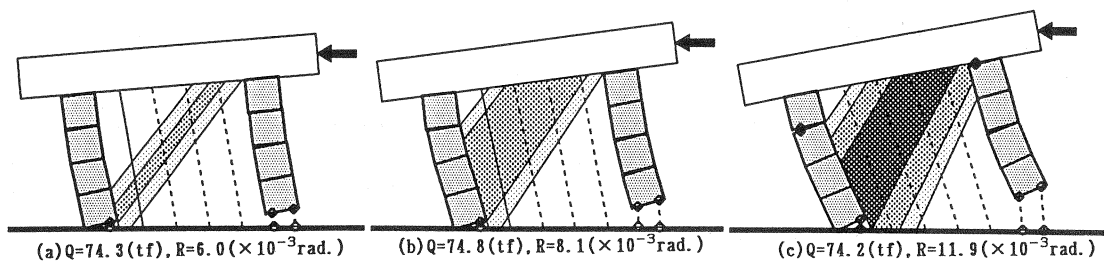


図-9 破壊経過(PCWB-1)

5. 簡略化モデルによる最大強度式

図-9の最大強度時の降伏状態は、望月らが提案している現場打ち耐震壁の簡略化モデル^[4]の仮定に対応している。このモデルは反復計算を必要としないもので、これに基づく強度式は有用である。ここではPCa・PC耐震壁のために、モデルを一部修正して誘導した最大強度式を示す。図-10に修正した簡略化モデルを示す。モデルの部材は最大強度時において次の状態にあると仮定される。

- 1) 上・下梁は剛強で破壊しない。
- 2) 引張側柱下端の曲げモーメントとせん断力は無視できるほど小さい。圧縮側柱下端は曲げ降伏している。
- 3) 圧縮ストラット②は降伏しており、その降伏応力は $0.63\sigma_B$ である。圧縮ストラット③は、これと交差する側柱の領域が引張降伏しているとして除かれる。
- 4) 縦補強筋は降伏している。

これらの仮定のもとで、PCa・PC耐震壁の最大強度式は、側柱下端まわりの2ヶのモーメントのつりあいから容易に誘導できる。ここでは、結果のみを記す。

$$Q_{cal} = Q_w + Q_c \quad (1)$$

$$Q_w = S_c \cdot \xi \cdot l \quad (2)$$

$$Q_c = \sqrt{2Mc \cdot S_c} \quad (3)$$

(ただし、 $Q_c \geq 2Mc/h'$)

ここで、

$$S_c = 0.63\sigma_B \cdot t/2$$

$$\xi = \eta + \sqrt{\eta^2 + \frac{2\sum S_v \cdot l_i}{S_c \cdot l^2} + 2 \frac{\eta \sqrt{N_y \cdot D \cdot S_c + N_o + N_y (D/2l + 1)}}{S_c \cdot l}}$$

$$Mc = (N_c + N_y) \cdot e/2$$

$$N_c = \eta' \sqrt{N_y \cdot D \cdot S_c} + (\eta' + \xi/2 - 1) Q_w + \frac{\sum S_v (l - l_i)}{l} + N_o - N_y \cdot D/2l \quad (4)$$

$$\eta = \tan \theta_p / 2 - h' \cdot \gamma / l$$

$$\eta' = \tan \theta_p / 2 + h' \cdot \gamma / l$$

表-2 解析結果

試験体	Q_{exp} (tf)	Q_{ana} (tf)	$\frac{Q_{exp}}{Q_{ana}}$	Q_{cal} (tf)	$\frac{Q_{exp}}{Q_{cal}}$
PCF-1	39.2	39.1	1.00	—	—
PCF-2	22.4	21.5	1.04	—	—
PCWB-1	74.8	74.8	1.00	70.0	1.07
PCWB-2	69.6	74.8	0.93	70.0	1.00
PCWC-1	69.6	73.8	0.94	68.8	1.01
PCWC-2	72.3	74.0	0.97	69.1	1.05

Q_{exp} : 実験の最大強度
 Q_{ana} : 弾塑性解析の最大強度
 Q_{cal} : 最大強度式の最大強度

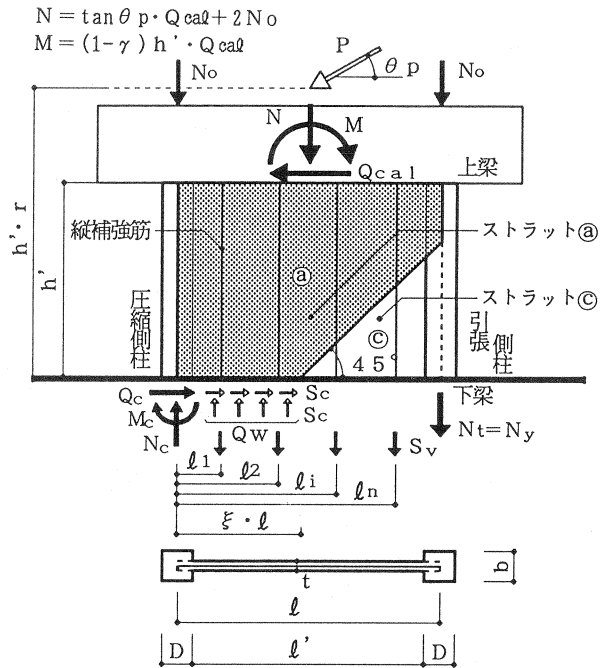


図-10 簡略化マクロモデル

ただし、 Q_{cal} :最大せん断強度	S_c :圧縮ストラットの降伏応力の水平成分
Q_c :圧縮側柱下端のせん断力	S_v :縦補強筋(PCa壁パネルのPC鋼棒)の降伏強度
Q_w :圧縮ストラットのせん断力の総和	N_t :引張側柱下端の軸力 ($= A_{si} \cdot s \sigma_y$)
M_c :圧縮側柱下端の曲げ降伏強度	N :作用軸力
M :作用モーメント	N_y :引張側柱の引張降伏強度 ($= A_g \cdot g \sigma_y$)
σ_B :コンクリートの圧縮強度	e :側柱PC鋼棒の中心間距離

式(1)~(4)に関わる諸量はすべて既知量であるから、最大強度 Q_{cal} は簡単な計算で求めることができる。試験体の解析値および実験値との比を表-2に示す。誘導された最大強度式によつて的確に実験値を評価できること示している。

6. 結び

PCa・PC耐震壁に関する実験および解析的検討から次のようなまとめを得た。

- 1) 提案したPCa・PC耐震壁は耐震要素として有用である。
 - 2) PCa・PC耐震壁の最大強度は、簡略化モデルを用いて誘導した最大強度式で的確に評価できる。
 - 3) 1), 2)のまとめは、片方向加力をうけて曲げまたは曲げ・せん断破壊モードに終わる少数の試験体によるもので、PCa・PC耐震壁の実用化のためには、いろいろな破壊モードで終わる数多くの試験体に関する実験的、および解析的検討が必要である。
 - 4) 側柱、およびPCa壁パネルの滑りを拘束するために、シャコッター的なディテールが、また耐震壁の靱性をあげるために、目地モルタルの滑落防止およびPCa壁パネルの補強が必要である。
- 3), 4)を以後の課題としたい。





参考文献

- [1] 望月洵、小野里憲一、中村勝、倉持春夫:PC+PCa耐震壁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.14, No. 2, PP. 843~848, 1992.6
- [2] 望月洵、小野里憲一:連層耐震壁の破壊モードの判別式, コンクリート工学年次論文報告集vol.13, No. 2, PP. 559~564, 1991.6
- [3] 望月洵、小野里憲一、鈴木章司:連層耐震壁のスケルトンカーブの解析その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C. 構造Ⅱ, PP. 397~398, 1991.9
- [4] 望月洵、小野里憲一:連層耐震壁の簡略化最大せん断強度式, 第8回日本地震工学シンポジウム, PP. 1425~1430, 1990.12

【記号】

A_{si}	: PCa壁パネルPC鋼棒の断面積
A_g	: 側柱下端PC鋼棒の全断面積
$s \sigma_y$: PCa壁パネルPC鋼棒の降伏強度
$g \sigma_y$: 側柱PC鋼棒の降伏強度
ΣP_{ic}	: 側柱の圧着力
ΣP_{iw}	: PCa壁パネルの圧着力

【図-9の説明】

	: 圧縮ストラット破壊
	: 圧縮ストラット降伏
	: 圧縮ストラット降伏近傍
	: 圧縮ストラット弾性
---	: 縦補強筋降伏
—	: 縦補強筋弾性
●	: 軸力バネ降伏