論文 PCa・PC 耐震壁の弾塑性解析

鳥屋 隆志^{*1}・小野里 憲一^{*2}・兼平 雄吉^{*3}・望月 洵^{*4}

要旨: PCa・PC フレームに PCa パネルを組み込んだ PCa・PC 耐震壁のマクロモデルによる弾塑 性解析を試みている。マクロモデルは,剛強な上下梁,剛体要素と弾塑性バネからなる両側柱, および軸力バネと滑りバネで柱梁フレームに結合される圧縮ストラットからなるパネルを構 成部材としている。滑りを考慮したマクロモデルによる弾塑性解析は,最大強度の実験値/解 析値の平均値,標準偏差,および変動係数が,それぞれ 1.019,0.178,および 0.174 で,工学 的に有効な解析精度を示した。また,解析値は実験の力-変形関係の包絡線を大要捉えている。 キーワード: PCa・PC 耐震壁,マクロモデル,弾塑性解析,滑り

1. はじめに

筆者らは, プレキャスト・プレストレストコ ンクリート(以後, PCa・PC という)構造の耐震 要素として, PCa・PC フレームに PCa パネルを組 み込んだ PCa・PC 耐震壁を提案し,その破壊実験 を試みてきた^{1),2})。PCa・PC 耐震壁と RC 耐震壁 の破壊性状の基本的な相違は次の点にある。

- PCa・PC 耐震壁のパネルとフレームとの接合 部に滑りが生じる。
- 2) PCa・PC 耐震壁の圧縮側柱に滑りが生じると き,この滑りが最大強度を限界づける。

本研究は,これらを考慮して,RC 耐震壁のマ クロモデル³⁾に接合部の滑りを導入することで, PCa・PC 耐震壁のマクロモデルを構築し,弾塑性 解析の結果から,その妥当性を検討することを 目的としている。

2. PCa•PC 耐震壁と接合部

PCa・PC 耐震壁は両側柱,上下梁,およびパネ ルから構成される。両側柱は,せん断破壊が生 じないよう十分に補強,補剛されている。同様 に,上下梁は連層耐震壁の1層を模して,曲げ 破壊とせん断破壊が生じないよう十分に補強, 補剛されている。パネルと上下梁との水平接合 部は,共通して接合面は平滑で,目地には無収 縮モルタルが圧入される。さらに,補強,補剛 するために,PC鋼棒,ホゾ筋,接合筋,コッタ ー,および鋼板熔接による接合方法が併用され る。PC鋼棒による接合では,パネルと上下梁を 貫通する PC 鋼棒に軽く元張力が導入されるが, 圧着力によるせん断抵抗は期待しない。

パネルと側柱との鉛直接合部は,原則として 接合筋は用いないが,目地には無収縮モルタル が圧入される。側柱下端の接合部は,平滑な目 地のままか,または下梁に根入れされる。目地 に無収縮モルタルを圧入した後に PC 鋼棒で圧 着接合される。

3. マクロモデル

図 - 1 に PCa・PC 耐震壁のマクロモデルを,図 - 2 に接合部と側柱まわりの結合バネを示す。マ クロモデルは,上下梁,側柱,パネル,および 接合部の構成部材から構成される。構成部材の 特徴は以下のとおりとする。

上下梁は剛体で破壊は生じない。

- 2) 側柱は剛体要素に分割され,軸力バネ とせ
- *1 ドーピー建設工業㈱ 技術部 工修 (正会員)
 *2 工学院大学 建築都市デザイン学科 博士(工学) (正会員)
 *3 工学院大学客員研究員 修士(工学) (正会員)
 *4 工学院大学名誉教授 工博 (正会員)

ん断バネで結合される。

- 3)パネルは斜めひび割れが伸展した状態を想 定して,傾斜角 をもつ圧縮ストラットに置 換される。 はパネルの形状比から求められ る RC 耐震壁の推定式⁴⁾を準用する。
- 4) 側柱下端は軸力バネ と滑りバネ で下梁 に結合される。
- 5) 接合部は、扁平な剛体要素とこれを結合する つなぎバネ,および剛体要素と側柱または上 下梁とを結合する軸力バネ と滑りバネ で構成される。

これらの構成部材は図-3の構成則にしたが うものとし,その強度と剛性を表-1,2のよう に定める。これらは RC 耐震壁のそれと PC 鋼棒 と滑りを考慮した点を除いて変わらない。

滑りバネ は,存在軸力の増分に対応して滑 り強度が増加することから,ステップ状の構成 則となる。滑りバネ は複数の接合方法が用い られる場合,それらの累加とする。ここで,滑 リバネ の滑り強度 spQc は文献 6) に基づき, また,パネルの接合方法による滑り強度は文献







図 - 2 要素分割と結合バネ







(c) 圧縮ストラット 図-3 構成部材の構成則

	• •	成部材の強度と剛性	Ę	Ē
--	-----	-----------	---	---

⊮	-Q
(d)	滑りバネ

立びキオ	側柱	正弦フトラット		
아이지	軸力バネ	せん断バネ	圧縮ストノット	
	引張域: $Nnt = \Sigma a_{gi} \cdot s yi/2$		S.Popovics の応力 - ひずみ関係 ⁵⁾	
強度	圧縮域: $Nnc = \frac{\sum a_{gi} \cdot s yi + b \cdot D \cdot B_1}{2}$	降伏せず	ただし, $_{max} = 0.63_{B2}$	
	引張域: $Knt = \Sigma(E_{si} \cdot a_{gi})/2$ h	G.h.D. Kn		
剛性	圧縮域: $Knc = \frac{\Sigma E_{si} \cdot a_{gi} + Ec \cdot b \cdot D}{2 h}$	$Ks = \frac{O(V + D)}{\Delta h} \cdot \frac{Kn}{Knc}$	場件のシースにシンシーのない 場合,パネルの有効厚さ:te=t - を用いる。	

【記号】 a gi: 主筋の全断面積, s yi: 主筋の降伏強度, i: 鉄筋および PC 鋼棒を示す, b·D: 側柱の断面寸法, $_{B1}$: 側柱のコンクリートの圧縮強度, $_{B2}$: パネルのコンクリートの圧縮強度, E_{si} : 鋼材のヤング係数, E_c : コンクリートのヤング係数, h:柱の分割長さ,G:コンクリートのせん断弾性係数,Kn:引張域と圧縮域の 軸カバネ の剛性の平均値, 」:コンクリートの終局ひずみ,t:パネルの厚さ, :シースの外径

表-2 構成部材の強度と剛性[]

		滑りバネ	滑りバネ	平滑目地 <i>Th</i> 1	PC 鋼棒 Th2	ホゾ筋 <i>Th</i> 3	接合筋 <i>Th</i> 4	コッター <i>Th5</i>	鋼板熔接 Th6
強度	軸強度				Svi		Sv		
	滑り 強度	$spQc = 0.6\{Nc + (1 +)Ny/2\}$ + 0.4Ny/2 + b · ho · _{B3}	$\sum_{i=1}^{n} spTvi$ $\sum_{i=1}^{n} spThi$	spTv1 = 0.7Sah spTh1 = 0.7Sav	spTh2 = 0.7Svi	spTh3 = 0.7Svj	spTh4 = 0.7Sv	$spTh5 = 0.1 Asc \cdot B4 + As \cdot y$	spTh6 = Qs
剛性	軸剛性				$E_{si} \cdot a_{si} / h'$		$E_s \cdot a_s / h'$		
	せん断 剛性	$spKs = \frac{G \cdot b \cdot D}{h}$	$spKs = G \cdot t \cdot \frac{bw}{\cos} \cdot \frac{1}{hs}$						

【記号】Nc: 圧縮側柱下端の軸力, Ny: 側柱下端の引張降伏強度, h_0 : 根入れ深さ, B3: 目地モルタルの圧縮強度, : Ny に対する PC 鋼棒の全圧着力 Np の比, hs: 目地の厚さ, Svi: PC 鋼棒の降伏強度, Svj: ホゾ筋の降伏強度, Sh,Sv: 水平, 鉛直接合筋の降伏強度, Asc: コッターの水平断面積の和, ΣAs : コッターの上下方向補強筋 の断面積の和, B4: コッターのコンクリートの圧縮強度, y: コッターの補強筋の降伏強度, Sav, Sah: 圧縮ス トラットから鉛直または水平接合部に働く圧縮力, Qs: 定着筋と鋼板の熔接長さから算定される鋼板熔接による 滑り強度, Es: 接合筋のヤング係数, a_s : 接合筋の断面積, h': パネルの内法高さ, : 圧縮ストラットの傾斜角, t: パネルの厚さ, bw: 圧縮ストラットの分割幅,

軸力バネの軸強度と軸剛性は引張域のみ規定し、圧縮域は剛体とする. 印は単位長さあたりとする.

7)の推奨式を採用している。つなぎバネは圧縮 域で剛体,引張域で有効でないとしている。こ のため,水平荷重のうち,圧縮ストラットを流 れる軸力は接合部の剛体要素を介して滑りバネ

から下梁に伝わり,残りはつなぎバネを介し て側柱に伝わる。滑りバネ は完全弾塑性を仮 定していることから,PCa・PC 耐震壁の最大強度 は圧縮ストラットの最大強度と滑りバネ の滑 り強度の和で限界づけられる。

弾塑性解析は,以上の条件を考慮して,増分 解析法に基づいて行う。

く行つ。 もにハ: 接合: とした試験体 ひっぽか ひっぽん

4. 解析の対象とした試験体

解析の対象とした試験体は,筆者らが実験した PCa・PC 耐震壁 50 体である(表-3)。図-4

に PCa・PC 耐震壁の試験体の形状と配筋の例を 示す。試験体は No.29 を除いて,1スパン1層 の耐震壁で,上下梁は剛強な断面をもっている。 No.29 は3スパン2層,その中央スパンに耐震壁 がある複合構造である。試験体の両側柱は 150 ×150~260×260mm の断面寸法で,上下梁に圧 着接合されている。パネルは厚さ50~60mm で, その鉛直接合部には No.1,2 を除いていずれの試 験体も水平接合筋がない。水平接合部は多様な 方法で接合されている。表-3には引用文献とと もにパネルの接合方法を示してある。

接合方法の記号は,鉛直接合部: Tv1=平滑目地, Tv2=水平接合筋,水平接合部: Th1=平滑目地, Th2=PC 鋼棒, Th3=ホゾ筋, Th4=鉛直接合筋, Th5= コッター,および Th6=鋼板熔接による接合を示



図 - 4 PCa・PC 耐震壁の試験体の形状と配筋の例 (No.46:98PCWW-1)

す。試験体の荷重は, No.29 を除いて,上梁中心 高さに作用する水平交番力で,両側柱には定軸 力を与えていない。No.29 では,水平荷重を2層 上梁中心高さに作用させている。試験体 No.3~ No.6, No.15 は実験において,不都合が生じたた

- め,片側加力としている。 試験体の主なパラメータの変域を以下に示す。
- 1) パネルの形状比: 0.41~1.38
- 2) シアスパン比: 0.48~1.28
- 3) 側柱の寸法:150×150~260×260mm

No	試験体々	Qexp	((kN)	Ocal (kN)	Qexp /Qcal		鉛直接合	水平接合	山田
NO	<u> </u>	+	—	Qcal (KN)	+	—	の方法	の方法	山央
1	PCWA-1	533	543	554	0.96	0.98	T v1 , T v2	T h1, T h4	
2	PCWA-2	456	533	556	0.82	0.96	T_{vl}, T_{v2}	T h1, T h4	
3	PCWB-1	734	—	679	1.08	-	$T_{\nu l}$	T h1, T h2	9)
4	PCWB-2	683	-	680	1.00	-	$T_{\nu I}$	T h1, T h2	8)
5	PCWC-1	683	—	655	1.04	-	$T_{\nu l}$	T h1, T h2	
6	PCWC-2	709	—	666	1.07	-	$T_{\nu l}$	T h1, T h2	
7	92PCWB-1	561	590	585	0.96	1.01	$T_{\nu l}$	T h1, T h2	
8	92PCWB-2	580	584	572	1.01	1.02	$T_{\nu l}$	T h1, T h2	0)
9	92PCWC-1	522	610	634	0.82	0.96	$T_{\nu l}$	T h1, T h2	3)
10	92PCWC-2	558	582	636	0.88	0.91	$T_{\nu l}$	T h1, T h2	
11	93PCWA-1	454	474	456	1.00	1.04	$T_{\nu l}$	T h1, T h2, T h3	
12	93PCWA-2	496	499	458	1.08	1.09	$T_{\nu l}$	T h1, T h2, T h3	
13	93PCWA-3	560	565	596	0.94	0.95	$T_{\nu l}$	T h1, T h2, T h3	
14	93PCWA-4	539	510	594	0.91	0.86	$T_{\nu l}$	T h1, T h2, T h3	
15	93PCWA-5	—	672	677	_	0.99	$T_{\nu l}$	T h1, T h2, T h3	10)
16	93PCWB-1	266	281	242	1.10	1.16	$T_{\nu l}$	T h1, T h2, T h3	10)
17	93PCWB-2	255	281	242	1.06	1.17	$T_{\nu l}$	Th1, Th2, Th3	
18	93PCWB-3	329	342	301	1.09	1.14	$T_{\nu l}$	Th1, Th2, Th3	
19	93PCWB-4	344	358	325	1.06	1.10	$T_{\nu l}$	Th1, Th2, Th3	
20	93PCWB-5	416	426	326	1.28	1.31	$T_{\nu l}$	Th1, Th2, Th3	
21	94PCWA-1	447	428	410	1.09	1.04	$T_{\nu l}$	Th1, Th2	
22	94PCWA-2	398	421	409	0.97	1.03	$T_{\nu l}$	Th1, Th2	
23	94PCWA-3	483	484	584	0.83	0.83	$T_{\nu l}$	T_{h1}, T_{h2}	
24	94PCWA-4	459	482	577	0.80	0.84	$T_{\nu l}$	T_{h1}, T_{h2}	•••
25	94PCWB-1	292	317	272	1.07	1.16	$T_{\nu l}$	T_{h1}, T_{h2}	11)
26	94PCWB-2	297	324	264	1.12	1.22	$T_{\nu l}$	Th1, Th2	
27	94PCWB-3	366	316	396	0.92	0.80	$T_{\nu l}$	T_{h1}, T_{h2}	
28	94PCWB-4	399	419	392	1.02	1.07	$T_{\nu l}$	T_{hl}, T_{h2}	
29	94PCWF-1	486	506	473	1.03	1.07	T_{vl}	T_{hl}, T_{h2}	12)
30	95PCWA-1	469	457	321	1.46	1.42	$T_{\nu l}$	T_{hl}, T_{h2}, T_{h5}	/
31	95PCWA-2	508	496	341	1.49	1.46	$T_{\nu l}$	T_{hl}, T_{h2}, T_{h5}	
32	95PCWA-3	573	572	452	1.27	1.26	$T_{\nu l}$	T_{hl}, T_{h2}, T_{h5}	13)
33	95PCWB-1	334	351	272	1.23	1.20	T_{yl}	T_{hl} T_{h2} T_{h5}	
34	96PCWA-1	498	513	407	1.22	1.29	T_{yl}	T_{hl} T_{h2} T_{h5}	
35	96PCWA-2	586	570	533	1.10	1.20	T_{yl}	T_{hl} T_{h2} T_{h5}	
36	96PCWA-3	530	535	474	1.10	1.07	T_{yl}	T_{hl} T_{h2} T_{h5}	
37	96PCWC-1	441	435	468	0.94	0.93	T_{yl}	T_{hl} T_{h2} T_{h5}	
38	96PCWB-1	317	313	227	1 39	1 38		T_{hl} T_{h2} T_{h5}	14)
39	96PCWB-2	345	337	376	0.92	0.90		T_{hl} T_{h2} T_{h5}	
40	96PCWB-3	380	367	372	1.02	0.99		T_{hl} T_{h2} T_{h5}	
41	96PCWB-4	419	386	413	1.02	0.94			
42	97PCWA	419	447	597	0.75	0.75	T_{vl}		
13	97PCWD	415	/28	511	0.75	0.75			
43	97PCWE-1	346	357	380	0.01	0.04			15)
45	97PCWE-2	154	440	470	0.91	0.94			
46	98PCWW_1	504	496	649	0.78	0.74	T	T_{h1} , T_{h2} , T_{h2}	
47	98PCW/W-1	460	451	649	0.78	0.70	T	T_{hl} $T_{h\ell}$	
4/	98PCWC 1	564	501	666	0.72	0.70		Thi The	16)
40	08DCWC 2	551	622	666	0.03	0.07		T 1, T 15	10)
-+7 50	901 C W C-2	<u> </u>	452	584	0.03	0.74		T_{h1} T_{h2}	
50	701 C W1	 亚长]值 1010		□0.70 副美 0.179		「 ¹¹ 系数 0.174	1 n1,1 n0	

表-3 解析結果



- (記号) :引張側柱下端が引張降伏, :圧縮ストラットが最初に最大強度に到達, :圧縮ストラットが最初に終局ひずみに到達 図 - 5 実験の力 - 変形関係と解析の包絡線
- 4) 側柱 PC 鋼棒の全主筋比: 0.49~1.63%
- 5) パネルの圧縮強度: 24.1~68.9N/mm²
- 6) 側柱の圧着力: 110.0~333.4kN
- 7) 有効パネル厚さ:35~60mm
- 8) 接合方法;

側柱:PC 鋼棒,PC 鋼棒+根入れ,

PCa パネル: PC 鋼棒, 接合筋, ホゾ筋, シ ャーコッタ, 鋼板熔接(いずれの接合も接合 面は平滑目地で無収縮モルタルを圧入。)

解析にあたって,形状寸法は設計値を,材料 強度には実験値を用いた。側柱の分割数は5と し,圧縮ストラットの分割幅は10cm 程度として いる。なお,パネルはすべて1枚パネルとして 扱った。側柱の圧着力は定軸力に置換し,軸力 バネに初期応力として与えている。

また,次のような取扱いをしている。

- 1) 試験体 No.1,2 は, 下梁部分にある側柱の PC 鋼棒のシースにグラウトされていない。この ため,滑りバネの強度式の第2項を省略し ている。
- 2) 試験体 No.21~No.45 は, 側柱脚部が下梁に 100mm 程度根入れされているため, 側柱脚 部の滑りは生じないものとして, 滑りバネ

を除去している。

- 3) コッター接合の試験体 No.30~45,48,49 は, 実験においても滑りが観察されなかったこ とから,滑りバネ の剛性は十分大きいとし ている。
- 5. 解析結果

表-3 に PCa・PC 耐震壁の最大強度の実験値 Qexp,弾塑性解析による解析値 Qcal,および解 析値に対する実験値の比を示す。図-5は,力-変形関係の包絡線の解析値を実験値に重ね書き したもので,同じ接合方法の試験体のうち,比 較的よく解析値が実験値を捉えた試験体である。 最大強度をよく捉えた試験体では,最大強度以 降の変形をよく捉えている解析例が多いが、い くつかの試験体で,最大強度以降の平滑域を過 ぎた劣化域では解析値と実験値のずれが著しく なる。これは、繰返し加力による目地モルタル の滑落などが考慮できていないことに起因して いる。図の包絡線には,解析で引張側柱下端が 引張降伏した点,圧縮ストラットが最大強度に 初めて到達,および圧縮ストラットが初めて終 局ひずみに到達した点を示した。図はこれらが

包絡線の形状を左右していることを示している。

図 - 6 に最大強度の実験値と解析値の関係を 示す。最大強度の実験値 / 解析値の平均,標準 偏差,および変動係数はそれぞれ1.019,0.178, および0.174 である。ここでは,正負加力域にお ける最大強度を2つの標本値とし,全標本数が 95 として求めている。この結果は,ほぼ同じ応 力伝達のメカニズムにあるとしている極限解析 法に基づく解析結果⁶⁾に比べ,ばらつきが大き い。接合部まわりの取扱い,圧縮ストラットの 傾斜角の推定式がもつばらつきなどに原因があ ると考えられる。

6. まとめ

本研究では,PCa・PC 耐震壁のマクロモデルを 構築して,50 体の試験体について弾塑性解析を 試みた。その結果は,マクロモデルはその最大 強度までの力 - 変形関係を,大要,評価できる ことを示している。しかし,実験上の制約から 試験体のパラメータの変域が限定され,また, 最大強度以降の劣化域を的確には捉えていない。 さらなる検証とモデルの検討が必要といえる。

参考文献

- 1) 望月洵 ほか:プレキャストプレストレストコンクリート耐震壁の滑りを考慮した簡略化最大強度式,プレストレストコンクリート,Vol.35, No.4, pp.71-79, 1993.7
- 2) 望月洵 ほか:側柱の滑りを完全に拘束したプレキャストプレストレストコンクリート耐震 壁の破壊性状と強度評価,プレストレストコン クリート, Vol.37, No.4, pp.68-77, 1995.7
- 3) 小野里憲一 ほか:マクロモデルによる単独耐 震壁の弾塑性解析,コンクリート工学年次論文 報告集, Vol.12, pp.575-580,1990
- 4)望月洵 ほか:修正簡略マクロモデルによる耐 震壁 573 体の最大強度の解析精度,日本建築学 会大会学術講演梗概集,C-2,構造 ,pp.205-206, 1997.9
- 5) S.Popovics : Factors Affecting the Elastic Deformations of Concrete, Mechanical Behavior of Materials, Proceeding of the International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Vol., Society of Materials Science, Japan, pp.172-183, 1972
- 6) 鳥屋隆志 ほか: PCa・PC 耐震壁の簡略最大強度 式とその解析精度,第11 回プレストレストコ



図 - 6 最大強度の実験値と解析値の関係

ンクリートの発展に関するシンポジウム論文 集,pp.367-372,2001.11

- 7)日本建築学会:プレキャスト鉄筋コンクリート 構造の設計と施工,1986
- 8) 中村勝 ほか: PC+PCa 耐震壁の破壊性状,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造, pp.869-870,1992.8
- 9) 中居純一 ほか:プレキャスト・プレストレスト耐震壁とその修復耐震壁の破壊性状,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造 ,pp.653-654, 1993.9
- 10)鳥屋隆志 ほか:滑りを拘束したプレキャス ト・プレストレスト耐震壁の破壊性状,日本建 築学会大会学術講演梗概集,構造 ,pp.319-320, 1994.9
- 11)鳥屋隆志 ほか:側柱の滑りを完全に拘束した PC・PCa 単独耐震壁の破壊性状と最大強度の評 価,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造, pp.169-170,1995.8
- 高見徹也 ほか:側柱の滑りを完全に拘束した PC・PCa 連層耐震壁の破壊性状と最大強度の評 価,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造, pp.171-172, 1995.8
- 13)藤野一郎 ほか:滑りを完全に拘束したプレキャスト・プレストレストコンクリート耐震壁の破壊性状,日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造,pp.519-520,1996.9
- 14) 奈良純 ほか:滑りを完全に拘束したプレキャ スト・プレストレストコンクリート耐震壁の破 壊性状,日本建築学会大会学術講演梗概集,構 造,pp.221-222,1997.9
- 15)鳥屋隆志 ほか: 超軽量コンクリート PCa パネ ルを用いた PCa・PC 耐震壁の破壊性状,日本建 築学会大会学術講演梗概集,構造 ,pp.893-894, 1998.9
- 16) 鳥屋隆志 ほか:無開口および有開口 PCa·PC 耐震壁の破壊性状,日本建築学会大会学術講演 梗概集,構造, pp.407-408, 1999.9