

論文 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と変形の解析

望月 洵^{*1}・藤野 一郎^{*2}・倉持 春夫^{*3}

要旨：本研究は、PC構造の保有水平耐力の確保と施工上の省力化を意図した、PCaパネルを柱・梁フレームに組み込んだプレキャスト・プレストレストコンクリート耐震壁についての実験を行い、その破壊性状を捉え、最大強度および力-変形関係をマクロモデルによって評価したものである。結果は、柱とPCaパネルの滑りを完全に拘束した耐震壁の破壊性状は、横補強筋が定着されていない一体打ちRC耐震壁に近いものであり、そのマクロモデルを修正したものによって耐震壁の最大強度と力-変形関係をよく評価できることを示している。

キーワード：PCa・PC耐震壁，マクロモデル，最大強度，力-変形関係

1. はじめに

プレストレストコンクリート柱・梁フレーム構造の保有水平耐力の確保にとって耐震壁は有効であり、その施工上の省力化のためには壁板をPCaパネルにすることが必要である。筆者らは、プレストレストコンクリート柱・梁フレーム構造にPCaパネルを組み込んだプレキャスト・プレストレストコンクリート耐震壁（以下、PCa・PC耐震壁という）について実験を行い、耐震要素として有効であり、その最大強度が、一体打ち耐震壁のマクロモデルに滑りを考慮することで、評価できることを示した[1], [2]。昨年度の報告[3]では、柱を深く根入れさせ、またPCaパネルの上下水平目地にコッターを設けたPCa・PC耐震壁の実験から、その破壊性状が横補強筋が定着されていない一体打ち耐震壁に近いものであり、滑りが生じないことにより、その挙動がばらつきの小さい安定したものであることを示した。しかし、PCa・PC耐震壁は一体打ち耐震壁に比べて多くのパラメータを含んでいる。このため、PCa・PC耐震壁の破壊性状の把握とその強度と変形の評価手法の確立には、多くの実験例をもつことが不可欠である。

本研究は、このような考えにたって、滑りを完全に拘束したPCa・PC耐震壁の実験例を蓄積するために、前報告[3]に比べてPCaパネルの板厚とコンクリート強度を、また柱のPC鋼棒の全主筋比を変えた試験体、およびPCaパネルの接合部のコッターを省略した試験体の実験から、その破壊性状の把握とマクロモデルによる強度と変形の解析を試みたものである。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体はタイプA 3体、タイプB 4体、およびタイプC 1体のPCa・PC耐震壁である。図1にタイプAの試験体の形状、配筋、および加力方法を示す。試験体は、連層PCa・PC耐震壁の基層を想

* 1 工学院大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

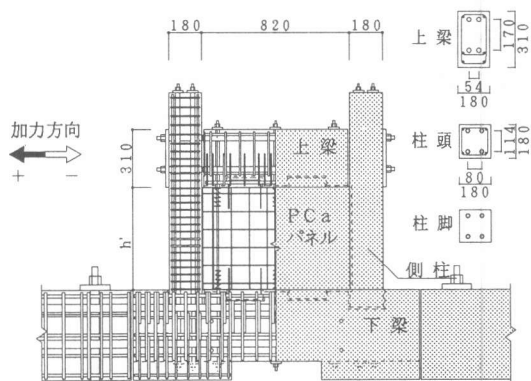
* 2 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻

* 3 ドーピー建設工業(株)（正会員）

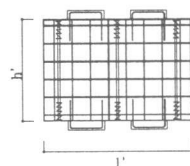
定した剛強な上下梁、せん断補強規準を満たす補強筋と根入れ深さ100mmをもつ柱、および上下水平接合部にのみコッターをもつPCaパネルで構成されている。各部材をPC鋼棒で圧着接合した後、PCaパネルのシースを除く柱、梁のシースはグラウトされる。柱脚部とPCaパネルの接合部の目地には樹脂モルタルがグラウトされる。いずれの試験体も、手締めで接合したPCaパネルのPC鋼棒を除くPC鋼棒の圧着力は、PC設計施工規準にもとづき、その値はひずみゲージの計測で制御された。試験体の主なパラメータは、壁板の形状比と柱のPC鋼棒の全主筋比である。タイプBは背高なPCa・PC耐震壁を想定して、タイプAとはPCaパネルの形状寸法だけが異なる。タイプCは、タイプAの試験体96PCWA-3と、PCaパネルの上下水平接合部にコッターがない点を除いて同じものである。

2.2 加力と計測方法

荷重は、アクチュエータを用いた正負繰り返し水平力を試験体の上梁に加えた。加力サイクルは、層間変形角 $R=1.0 \times 10^{-3}$ rad.までは 0.5×10^{-3} rad.ごと1回、以降 $R=20.0 \times 10^{-3}$ rad.まで 2.0×10^{-3} rad.ごと2回、さらに 25.0×10^{-3} rad.を2回とした。変形の計測には、上下梁の相対変位およびPC鋼棒の上梁下端と下梁上端位置における柱のひずみを、それぞれ変位計およびひずみゲージを用いて行った。表1に試験体の諸性質を示す。



(a) 形状と配筋



(b) PCaパネル

図1 試験体 タイプA (単位: mm)

表1 試験体の諸性質

試験体	PCaパネル					柱							
	$l' \times h'$	P_s	t_e	σ_B	ΣP_i	目地 σ_B	P_g 柱頭	P_g 柱脚	σ_y	σ_B	ΣP_i	目地 σ_B	
96PCWA-1	82 × 57	0.48	5.2	435	12.0 (3-D7.1)	789	1.35	0.47	14256	635	16.0(4-D7.1)	802	
96PCWA-2		0.49	5.1	435		763	1.70	0.82	14036	590		747	
96PCWA-3		0.48	5.2	327		776	1.70	0.82	14036	641		747	
96PCWC-1		0.48	5.1	327		773	1.70	0.82	14036	601		756	
96PCWB-1	82 × 107	0.47	5.3	327	12.0 (3-D7.1)	699	1.35	0.47	14256	635	16.0(4-D7.1)	730	
96PCWB-2		0.49	5.1	327		852	1.70	0.82	14036	590		20.0(4-φ9.2)	730
96PCWB-3		0.48	5.2	327		819	2.05	1.17	13986	641		28.0(4-φ11.0)	648
96PCWB-4		0.48	5.2	327		869	2.52	1.64	13985	601		40.0(4-φ13.0)	773

【記号】 l' (cm) × h' (cm) : PCaパネルの寸法

t_e (cm) : 有効板厚 $t - \phi = (\text{壁厚}) - (\text{シーす径})$

P_g (%) : 柱の主全筋比

σ_y (kgf/cm²) : 鉄筋、PC鋼棒の降伏点強度

【共通】 PCaパネル : 補強筋 4φ40#100, $\sigma_y = 4295$ (kgf/cm²)

上梁 : $\Sigma P_b = 68.0$ (tf), 4-φ17

P_s (%) : PCaパネルの補強筋比

σ_B (kgf/cm²) : コンクリートの1軸圧縮強度

σ_B (kgf/cm²) : 目地モルタルの圧縮強度

ΣP_i (tf) : 部材の全圧着力

柱 : $b \times D = 18$ (cm) × 18 (cm)

: 主筋 4-D10, $\sigma_y = 3734$ (kgf/cm²)

: 帯筋 D6#40, $\sigma_y = 3924$ (kgf/cm²)

3. 実験結果

3.1 破壊性状

(1)試験体96PCWA-1 層間変形角 $R=1.0 \times 10^{-3}$ rad. でPCaパネルに斜めひびわれ、引張柱脚部に曲げひびわれが生じ、 $R=3.0 \sim 5.0 \times 10^{-3}$ rad. で引張柱脚部の曲げひびわれが進展し、頭部にも生じた。 $R=5.0 \sim 7.0 \times 10^{-3}$ rad. でPCaパネルに多くの斜めひびわれが形成され、下水平接合部にまで水平ひびわれが生じた。最大強度には 7.0×10^{-3} rad. で達し、 $R=10.0 \times 10^{-3}$ rad. までその強度を保持した。その後、PCaパネルの圧壊が生じ、強度が漸減した。PCaパネルのコッターには水平ひびわれのほかに著しい破損は認められなかった。 $R=15.0 \times 10^{-3}$ rad. 以降、力-変形関係の包絡線は安定な平滑域を示した。図2に最終破壊状況と力-変形関係を示す。力-変形関係は、コッターのない既往の試験体に比べて著しく原点で絞られた形を示している。これは、他の試験体についても共通している。

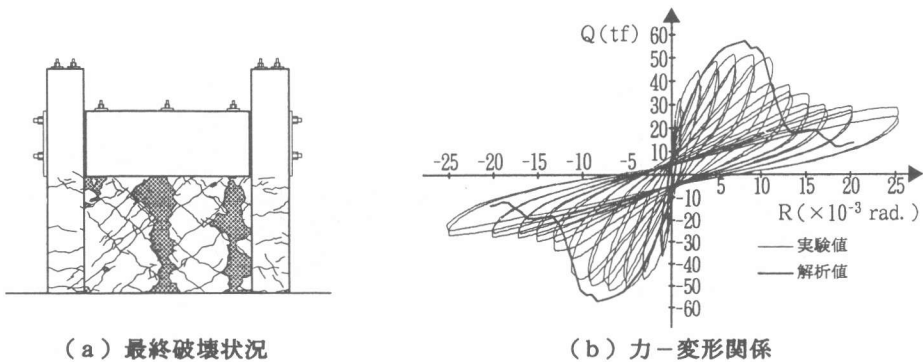


図2 試験体96PCWA-1

(2)試験体96PCWA-2 この試験体は、96PCWA-1と比べて柱のPC鋼棒の断面積が大きい。このため最大強度は大きくなったが、破壊性状は96PCWA-1と変わらなかった。

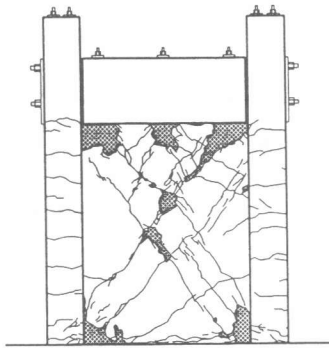
(3)試験体96PCWA-3 この試験体は、96PCWA-2と比べてPCaパネルのコンクリート圧縮強度が低い。このため、PCaパネルにはより多くの斜めひびわれが生じ、最大強度は小さくなった。この試験体もまたPCaパネルのコッターには水平ひびわれのほかに著しい破損は認められなかった。

(4)試験体96PCWB-1 $R=1.0 \sim 7.0 \times 10^{-3}$ rad. でPCaパネルに斜めひびわれ、PCaパネルの上下水平接合部に水平ひびわれ、および引張柱脚部から頭部にかけて曲げひびわれが生じた。最大強度に $R=11.0 \sim 13.0 \times 10^{-3}$ rad. で達した。この試験体もまたPCaパネルのコッターには水平ひびわれのほかに著しい破損は認められなかった。図3に最終破壊状況と力-変形関係を示す。

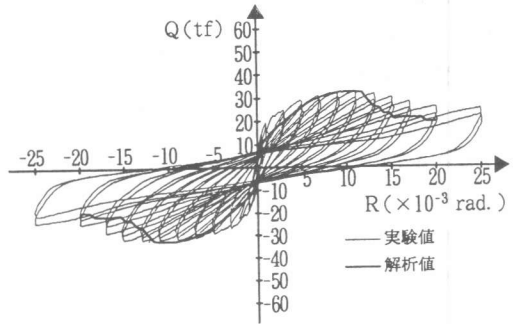
(5)試験体96PCWB-2, 3, 4 タイプBの試験体のパラメータは柱のPC鋼棒である。PC鋼棒の径の増大にともない最大強度も大きくなる。破壊性状は96PCWB-1と変わらなかったが、最大強度を保持しての変形性能は幾分小さくなった。

(6)試験体96PCWC-1 この試験体は、96PCWA-3のPCaパネルのコッターを除去したものである。このため、PCaパネルに滑りが生じ、PCaパネルの鉛直目地付近に破壊がみられた。また、最大強度は96PCWA-3より小さくなった。図4に最終破壊状況と力-変形関係を示す。

タイプAとBの試験体に共通して、最大強度時付近におけるPCaパネルの鉛直接合部の目開きは、目視で1~2 mm以下と観察された。

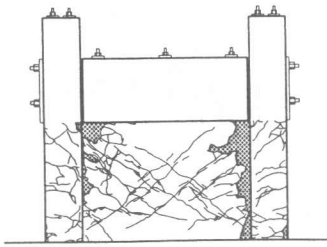


(a) 最終破壊状況

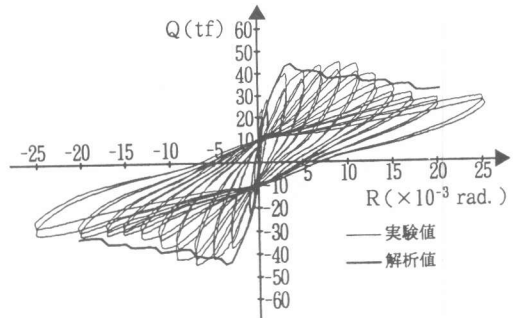


(b) 力-変形関係

図3 試験体96PCWB-1



(a) 最終破壊状況



(b) 力-変形関係

図4 試験体96PCWC-1

3.2 PC鋼棒のひずみと柱脚部の滑り

図5に試験体96PCWA-1の左柱脚部における4本のPC鋼棒のひずみと層間変形角の関係を示す。PC鋼棒のひずみは導入張力による元ひずみからの増分である。これより最大強度時付近において、柱は正加力時には曲げ降伏かそれに近い状態に、負加力時には引張降伏かそれに近い状態にある。図6に試験体96PCWB-4の左柱脚部の滑りを示す。最大強度時においても滑りが5/1000mm以下で、柱に滑りが生じていない。これらは他の試験体にも、大要、共通している。

以上、実験の破壊性状は、鉛直接合目地の目開き、96PCWC-1のPCaパネルの滑りを除いて、横補強筋が定着されていない一体打ち耐震壁の破壊性状と大要同じものといえる。

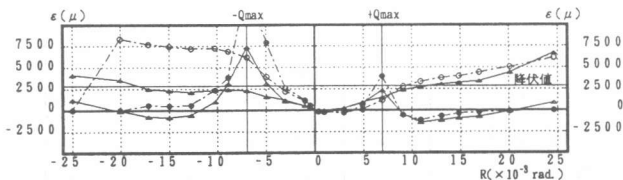


図5 試験体96PCWA-1のPC鋼棒(左柱脚部)のひずみ

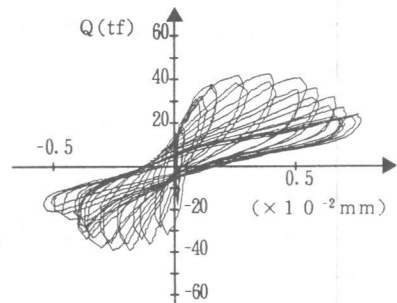


図6 試験体96PCWB-4の左柱脚部の滑り

4. 最大強度の解析

4.1 簡略化マクロモデルによる解析

図7にPCa・PC耐震壁の簡略化マクロモデルとその仮定される応力状態を示す。モデルは剛強な上下梁、柱、傾斜角 θ をもつ圧縮ストラット、および縦引張補強筋によって構成される。最大強度時において引張柱は下端で引張降伏、圧縮柱は下端で曲げ降伏、圧縮ストラットは $0.63\sigma_B$ で圧縮降伏、および引張補強筋はすべて引張降伏していると仮定される。これらを考慮した最大強度式は簡単な式で表される[3]。解析にあたって、タイプAとBの試験体の取扱いは文献[3]と同じとしたが、タイプCの試験体96PCWC-1は、PCaパネルにコッターがないことを考慮して、下水平接合部のせん断力 τ_{ah} は滑り強度 $sp\tau_{ah}(=\mu \cdot 0.63\sigma_B \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta)$ で限界づけられるとした。表2に最大強度の解析結果を、図8に解析値と実験値の比較を示す。表2と図8の○印は傾斜角 θ に実験で観測されたひびわれの傾斜角を、●印は θ をPCaパネル形状比 h'/l' で表した経験式($h'/l' < 1.0$ のとき、 $\theta = 45^\circ$ 、 $h'/l' > 1.6$ のとき、 $\theta = 50^\circ$ 、 $1.0 \leq h'/l' \leq 1.6$ のとき、直線補間)を用いた場合である。表2の結果は解析値が大きめになっているものがあるが、簡略化マクロモデルが、大要、実験値を捉えていることを示している。

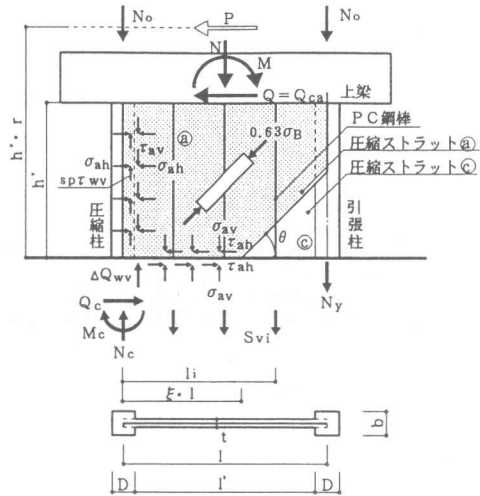


図7 簡略化マクロモデルと応力状態

表2 解析結果

試験体	Qexp		Qcal		Qexp/Qcal		Qana		Qexp/Qana		θ	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
96PCWA-1	50.8	52.3	43.8	43.8	1.16	1.19	57.0	57.0	0.89	0.92	45	45
96PCWA-2	59.8	58.1	61.7	61.7	0.97	0.94	70.0	70.0	0.85	0.83	40	40
96PCWA-3	54.0	54.6	55.3	55.3	0.98	0.99	59.9	59.9	0.90	0.91	45	45
96PCWC-1	45.0	44.4	39.8	39.8	1.13	1.12	44.3	44.3	1.02	1.00	40	40
96PCWB-1	32.3	31.9	27.7	27.7	1.17	1.15	32.5	32.5	1.00	0.98	55	55
96PCWB-2	35.2	34.4	36.9	36.9	0.95	0.93	37.5	37.5	0.94	0.92	55	55
96PCWB-3	38.7	37.4	45.9	45.9	0.84	0.81	40.8	40.8	0.95	0.92	55	55
96PCWB-4	42.7	39.4	56.4	56.4	0.76	0.70	43.5	43.5	0.98	0.91	55	55

Qexp: 最大強度の実験値 (tf)

Qcal: 簡略化マクロモデルによる最大強度の解析値 (tf)

Qana: 弾塑性解析による最大強度の解析値 (tf)

θ: 解析に用いた圧縮ストラットの傾斜角 (deg.)

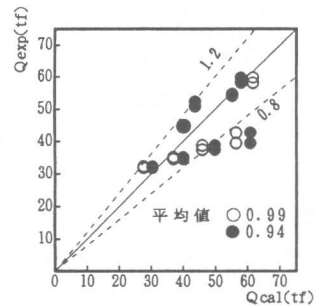


図8 解析値と実験値の比較

4.2 マクロモデルによる弾塑性解析

図9に弾塑性解析モデルとその分割状況を示す。圧縮ストラットは一体打ち耐震壁のモデルと異なり、接合部目地を置換した接合バネで柱または梁と結合される(図10)。これらモデルの構成と部材の構成則は既往の方法[2]と同じであるが、つなぎバネは圧縮ストラットと同じ構成則にしたがうと修正し、柱脚部に滑りが生じないことを考慮するため、柱脚部下端の滑りバネを除去した、また試験体96PCWC-1のPCaパネルの滑りを考慮するため、滑りバネの剛性を弾性剛性の1/100

とした。解析は圧縮ストラットの分割幅を10cm程度とし、その他の取扱いは簡略化モデルと同じとした。表2に弾塑性解析による最大強度の解析結果を、図11に解析値と実験値の比較を示す。前出の図2～4の力-変形関係に弾塑性解析による力-変形関係の包絡線を重ねて描いた。最大強度の解析値は実験値を的確に捉えているが、力-変形関係は大要を捉えているにすぎない。モデル化と構成則について、さらに検討が必要といえる。

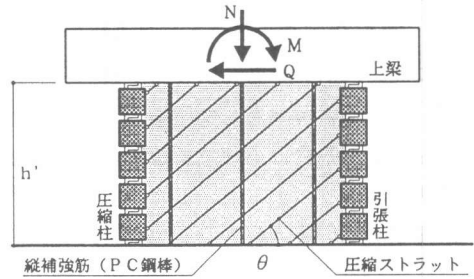


図9 弾塑性解析のマクロモデル

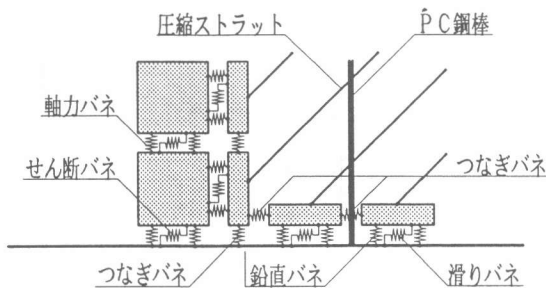


図10 接合バネ

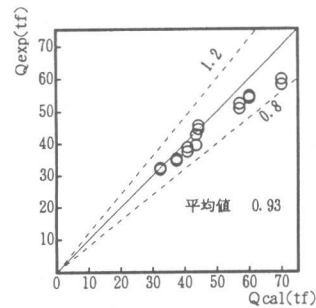


図11 解析値と実験値の比較

5. 結び

PCa・PC耐震壁の実験とマクロモデルによる強度と変形の解析から、次のまとめを得た。

- 1) 滑りを完全に拘束したPCa・PC耐震壁の破壊性状は、横補強筋のない一体打ち耐震壁の破壊性状と大要同じである。
- 2) 簡略化マクロモデルによる最大強度および弾塑性解析による強度と変形の評価は、工学的には十分な精度である。しかし、よりの確に強度と変形を評価するためには、さらにいろいろなパラメータをもつPCa・PC耐震壁についての実験と解析法の検討が必要である。

参考文献

- [1] 望月洵, 倉持春夫, 鳥屋隆志, 高見徹也: 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最大強度の評価、プレストレストコンクリート、Vol. 37、No. 4、pp. 68-77、1995. 7
- [2] 望月洵, 小野里憲一, 中村勝, 倉持春夫: プレキャスト・プレストレストコンクリート耐震壁の強度と変形、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 2、pp. 1201-1206、1993
- [3] 望月洵, 倉持春夫, 高見徹也, 藤野一郎: 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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 2、pp. 1007-1012、1996