

(29) 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に関する研究

工学院大学大学院		○奈良	純
工学院大学建築学科	正会員	望月	洵
ドーピー建設工業(株)	正会員	倉持	春夫
(株)大林組		藤野	一郎

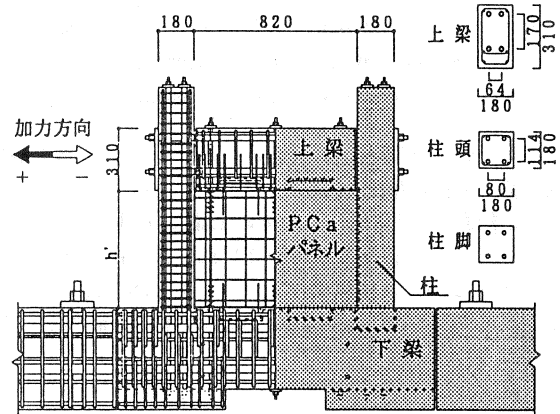
1. はじめに

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を確保するために耐震壁が有効であり、またその施工上の省力化のためには壁板を PCa パネルにするのが望ましいといえる。筆者らは、さきに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) が十分な強度と高い靱性をもつことを実験から示した [1]。このとき、柱は十分な根入れをもち、完全に滑りが拘束されていたが、PCa パネルは上・下梁と PC 鋼棒で圧着接合されているだけで、目地モルタルの滑落にもなう PCa パネルの滑りの発生は避けられなかった。滑りの発生によって、靱性的な曲げ破壊モードの変形形状となるが、強度の低下を示し、破壊形状に不明確な要因が増加することのため、その評価がばらつきの大きいものになるなどの難点が残った。一方、PCa・PC 耐震壁の開発のためには、一体打ち RC 耐震壁に近い、滑りの生じない PCa・PC 耐震壁の破壊性状を明確にすることもまた必要といえる。

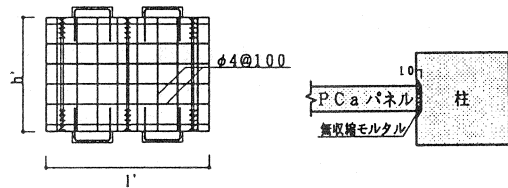
本研究は、このような考えにたって柱脚部の十分な根入れと PCa パネルの上・下水平接合部のコッターによって、滑りを完全に拘束した PCa・PC 耐震壁について一連の水平加力実験を行い、その破壊性状の把握とマクロモデルによる強度と変形の解析を試みたものである。

2. 実験計画

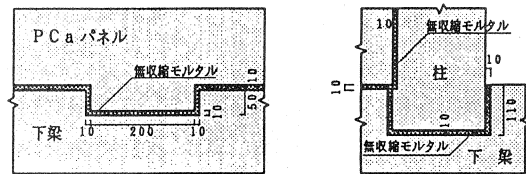
試験体： 試験体は、95 シリーズのタイプ A 4 体、タイプ B 2 体、および 96 シリーズのタイプ A 3 体、タイプ B 4 体、タイプ C 1 体の計 14 体である。シリーズは実験年度の違いを、タイプは形状またはディテールの違いを示す。図-1 にタイプ A の試験体の形状、配筋、および加力方法を示す。試験体は、連層 PCa・PC 耐震壁の基層を想定した上下梁、せん断補強基準を満たす補強筋と根入れ深さ 100mm をもつ柱、および上下水平接合部にのみコッターをもつ PCa パネルで構成されている。試験体の各部材を組み立て、PC 鋼棒で圧着接合した後、PCa パネルのシースを除く柱、梁のシースはグラウトされ、柱脚部と PCa パネルの接合部目地には無収縮モルタルがグラウトされる。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 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形状寸法である。試験体の主なパラメータは、PCa パネルの形状寸法、柱の PC 鋼棒の断面積、およびコン



(a) 形状と配筋



(b) PCa パネル (c) 柱・PCa パネル鉛直接合部



(d) PCa パネル・下水平接合部 (e) 柱下端の根入れ

図-1 試験体 タイプ A (単位: mm)

表-1 試験体の諸性質と実験結果

試験体名	PCaパネル					柱							Q _{exp}	
	l'×h'	P _s	t _e	σ _B	ΣP _i	目地 σ _B	柱頭 P _g	柱脚 P _g	PC鋼棒 σ _y	σ _B	ΣP _i	目地 σ _B	Q _{exp}	
													+	-
95PCWA-1	82×57	0.5	4.0	277	12.0	296	1.37	0.49	14192	632	16.0(4-D7.1)	460	47.8	46.6
95PCWA-2				246		296	1.70	0.82	13363	580	20.0(4-φ9.2)	460	51.8	50.6
95PCWA-3				138		296				553	460	40.1	42.2	
95PCWA-4				321		572	2.05	1.17	13910	550	32.0(4-φ11.0)	419	58.4	58.3
95PCWB-1	82×107	0.5	4.0	292	12.0	282	1.70	0.82	13363	611	20.0(4-φ9.2)	410	34.1	35.8
95PCWB-2				146		488	2.05	1.17	13910	515	32.0(4-φ11.0)	327	27.4	28.8
96PCWA-1	82×57	0.48	5.2	435	12.0	789	1.35	0.47	14265	635	16.0(4-D7.1)	802	50.8	52.3
96PCWA-2		0.49	5.1	435		763	1.70	0.82	14036	590	20.0(4-φ9.2)	747	59.8	58.1
96PCWA-3		0.48	5.2	327		776	1.70	0.82	14036	641	20.0(4-φ9.2)	747	54.0	54.6
96PCWB-1		0.47	5.3	327		699	1.35	0.47	14265	635	16.0(4-D7.1)	730	32.3	31.9
96PCWB-2	82×107	0.49	5.1	327	12.0	852	1.70	0.82	14036	590	20.0(4-φ9.2)	730	35.2	34.4
96PCWB-3		0.48	5.2	327		819	2.05	1.17	13986	641	28.0(4-φ11.0)	648	38.7	37.4
96PCWB-4		0.48	5.2	327		869	2.52	1.64	13985	601	40.0(4-φ13.0)	773	42.7	39.4
96PCWC-1		82×57	0.48	5.1		327	12.0	773	1.70	0.82	14036	601	20.0(4-φ9.2)	756

【記号】 l'(cm)×h'(cm):PCaパネルの寸法, P_s(%):PCaパネルの補強筋比, t_e(cm):有効壁厚 t_e=t-φ=(壁厚)-(シス径),

σ_y(kgf/cm²):コンクリート,モルタルの1軸圧縮強度, P_g(%):柱の全主筋比, σ_y(kgf/cm²):鉄筋,PC鋼棒の降伏点強度,

ΣP_i(tf):部材の全圧着力, Q_{exp}(tf):実験による最大強度

(95シリーズ)PCaパネル:補強筋 筋径φ #φ40100, σ_y=5306(kgf/cm²), 柱:主筋4-D10, σ_y=3624(kgf/cm²) 帯筋D6@40, σ_y=4115(kgf/cm²)

(96シリーズ)PCaパネル:補強筋 筋径φ #φ40100, σ_y=4295(kgf/cm²), 柱:主筋4-D10, σ_y=3734(kgf/cm²) 帯筋D6@40, σ_y=3924(kgf/cm²)

【共通】 柱:b×D=18(cm)×18(cm), 上梁:ΣP_i=68.0(tf), PC鋼棒4-φ17, 主筋4-D13, 下梁:ΣP_i=240.0(tf), PC鋼棒4-φ32, 主筋6-D16

クリート強度である。これらのパラメータによって破壊モードが予め設定されている。表-1に試験体の諸性質と実験結果を示す。

加力と計測: 荷重は、試験体の上梁に作用するアクチュエータによる正負繰返し水平力とし、その加力サイクルは層間変形角 R=1.0×10⁻³rad. までは 0.5×10⁻³rad. ごと1回、以降 R=20×10⁻³rad. まで 2.0×10⁻³rad. ごと2回、さらに 25×10⁻³rad. を2回である。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の計測を、それぞれ変位計およびひずみゲージを用いて行った。

3. 実験結果

各試験体の破壊性状は、大要、次のようである。

タイプA: 各試験体とも同じ破壊性状を示したので、ここでは96PCWA-1について述べる。

96PCWA-1: 層間変形角 R=1.0×10⁻³rad. 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=3.0~5.0×10⁻³rad. 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=5.0~7.0×10⁻³rad. で PCa パネルに多くの斜めひびわれが、また上・下水平接合部に水平ひびわれが生じた。最大強度に R=7.0×10⁻³rad. で達し、R=10.0×10⁻³rad. 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。上・下水平接合部のコッターは、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

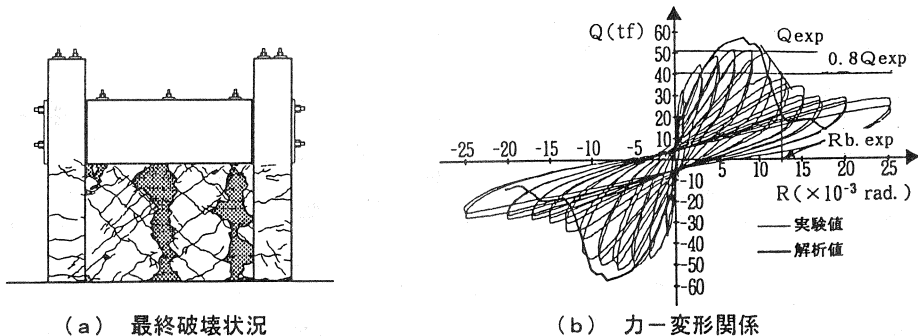


図-2 試験体 96PCWA-1

$\times 10^{-3} \text{rad}$.以降、カー変形関係の包絡線は安定な平滑域を示した。他の試験体の限界層間変形角 $R_b (0.8Q_{\max}$ の水平線とカー変形関係の交点に相応する層間変形角)は、 $9.0 \sim 12.5 \times 10^{-3} \text{rad}$.で、どの試験体も曲げ・せん断破壊または曲げ破壊モードで終わった。図-2に96PCWA-1の最終破壊状況とカー変形関係を示す。

タイプB: タイプAとほとんど同じ破壊性状を示した。 R_b は、 $9.0 \sim 20.0 \times 10^{-3} \text{rad}$.で、タイプAに比べてより靱性的であった。図-3に96PCWB-1の最終破壊状況とカー変形関係を示す。

タイプAおよびタイプBに共通して、最大強度時近傍におけるPCaパネルの鉛直接合目地の目開きは著しくなく、PCaパネルのコッターが有効に作用した。また、PC鋼棒の断面積、コンクリート強度およびPCaパネルの形状が大きいかほど最大強度が大きくなった。カー変形関係は、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た。

タイプC(96PCWC-1): この試験体は、96PCWA-3のPCaパネルのコッターがないものである。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、最大強度はコッターのある96PCWA-3より20%程度小さかったが、 R_b は $11.0 \sim 15.0 \times 10^{-3} \text{rad}$.で、曲げ破壊モードであった。

以上の破壊経過から、PCa・PC耐震壁の最大強度時における抵抗のメカニズムは次のようにまとめられる。

PCaパネルに圧縮ストラットが形成されてから、PCa・PC耐震壁は、引張柱と圧縮ストラットによるアーチ作用と圧縮柱のせん断力の和で抵抗する。この結果、タイプAとBの最大強度は、圧縮ストラットの圧壊強度で、またタイプCはPCaパネルにコッターがないため、圧縮ストラットの圧壊強度または滑り強度で限界づけられる。このようなメカニズムは滑りの発生を除いて、一体打ちRC耐震壁のそれと大きく変わらない。

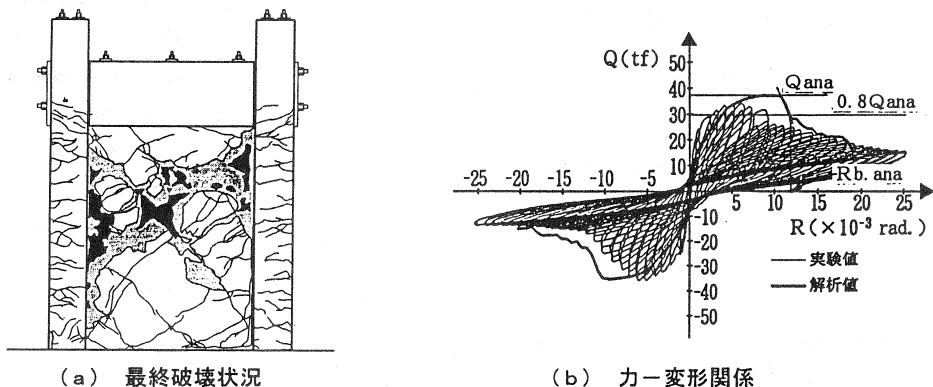


図-3 試験体95PCWB-1

4. 簡略化モデルによる解析

滑りが完全に拘束されたPCa・PC耐震壁の最大強度の評価方法として、筆者らは簡略化モデルを提案している[1]。図-4はPCa・PC耐震壁の簡略化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、および縦引張補強筋はすべて引張降伏していると仮定される。実験では、PCaパネルの水平接合部にコッターがあるタイプAおよびタイプBの試験体では、滑りが生じていない。また、すべての試験体の柱脚部は深い根入れをもち、目地にモルタルが充填されているため滑りが生じない。このため、柱下端せん断力 Q_c は、すべての試

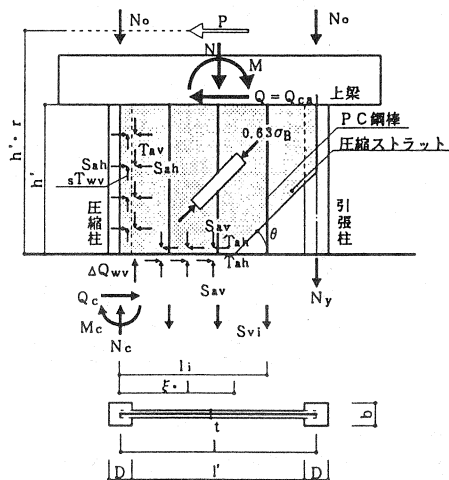


図-4 簡略化モデルと応力状態

験体について、および PCa パネルの下水平接合部のせん断力 T_{ah} は、タイプCを除く試験体について、ともに滑り強度によって限界づけられない。鉛直接合部のせん断力 T_{av} とその滑り強度 sT_{wv} との差は下梁の反力 ΔQ_{wv} によってつりあう。これらを考慮した簡略化モデルにもとづく最大強度式は、下梁上端位置における水平力およびモーメントのつりあいだけから求められる。強度式を表-2に示す。

解析にあたって、すべての試験体に共通して材料強度には実測値を用い、有効壁厚 t_e は実測の壁厚からシースの径 10mm を差し引いた値としている。表-3に最大強度の解析結果を、図-5に解析値と実験値の比較を示す。図の○印は圧縮ストラットの傾斜角に実験で観測されたひびわれの傾斜角を用いた場合である。●印は一体打ち耐震壁について得られた推定式 [2] による傾斜角を用いた場合である。表-3の結果は解析値が大きめになっているものもあるが、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。

表-2 最大強度式

$Q_{cal} = Q_w + Q_c$

ここで、 $Q_w = T_{ah} \cdot \xi \cdot l$ ただし、タイプCでは、 $T_{ah} = sT_{ah}$

$sT_{ah} = \mu S_{sav} = \mu \cdot 0.63 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot t_e$, $\mu = 0.6$

$Q_c = \sqrt{2 \cdot \mu_c (N_c) \cdot S_{ah}} \geq 2 \cdot \mu_c \cdot h'$

$\xi = \eta \frac{T_{ah}}{S_{sav}} + \sqrt{\left(\eta \frac{T_{ah}}{S_{sav}}\right)^2 + \frac{2 \cdot \sum S_{vi} \cdot l_i}{S_{sav} \cdot l^2} + X}$, $\eta = -h' \cdot \gamma / l$

$X = \frac{2}{S_{sav} \cdot l} \left[\left\{ \eta - \left(\frac{T_{av}}{S_{ah}} - \mu \right) D / 2l \right\} \sqrt{N_y \cdot D \cdot S_{ah} + N_0 + N_y (D/2l + 1)} \right]$

$N_c = \left\{ \eta' - \left(\frac{T_{av}}{S_{ah}} - \mu \right) (1 - D/2l) \right\} \sqrt{N_y \cdot D \cdot S_{ah}} + \left\{ \eta' - \frac{S_{av}}{T_{ah}} (1 - \xi / 2) \right\} \cdot Q_w$

$+ \frac{\sum S_{vi} (l - l_i)}{l} + N_0 - N_y \cdot D / 2l$, $\eta' = h' \cdot \gamma / l$

Q_{cal} : 最大強度の解析値

Q_c : 圧縮柱下端のせん断力

Q_w : 圧縮ストラットのせん断力

μ_c : 圧縮柱下端の曲げ降伏強度

N_c : 圧縮柱下端の軸力、 N_0 : 軸力

N_y : 引張柱下端の軸降伏強度

ξ : 圧縮ストラットの水平有効幅係数

S_{vi} : PCa パネル PC 鋼棒の降伏強度

S_{ah} : 鉛直接合部の法線力

S_{sav} : 水平接合部の法線力

T_{ah} : 水平接合部のせん断力

T_{av} : 鉛直接合部のせん断力

○印: 実験で観測されたひびわれの傾斜角を用いた場合

●印: 一体打ち耐震壁について得られた推定式 [2] による傾斜角を用いた場合

表-3 解析結果

試験体	Qcal I		Qcal II		Qexp/Qcal I		Qexp/Qcal II		Qana		Qexp/Qana	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
95PCWA-1	42.0	42.0	40.8	40.8	1.14	1.11	1.17	1.14	51.6	51.6	0.93	0.90
95PCWA-2	47.2	47.2	46.6	46.6	1.09	1.07	1.11	1.09	53.1	53.1	0.97	0.95
95PCWA-3	28.5	26.8	28.6	28.6	1.41	1.57	1.40	1.48	40.3	39.6	1.00	1.07
95PCWA-4	56.1	56.1	60.9	60.9	1.04	1.04	0.97	0.97	68.0	60.8	0.85	0.85
95PCWB-1	36.5	34.1	37.5	37.5	0.94	1.05	0.91	0.96	37.3	35.2	0.91	1.01
95PCWB-2	26.2	27.8	30.5	30.5	1.05	1.04	0.90	0.94	28.8	29.1	0.94	0.98
96PCWA-1	43.8	43.8	45.3	45.3	1.16	1.19	1.12	1.16	57.0	57.0	0.89	0.92
96PCWA-2	61.7	61.7	59.9	59.9	0.97	0.94	1.00	0.97	70.0	70.0	0.85	0.83
96PCWA-3	55.3	55.3	57.1	57.1	0.98	0.99	0.95	0.96	59.9	59.9	0.90	0.91
96PCWB-1	27.7	27.7	30.4	30.4	1.17	1.15	1.06	1.05	32.5	32.5	1.00	0.98
96PCWB-2	36.9	36.9	40.2	40.2	0.95	0.93	0.88	0.86	37.5	37.5	0.94	0.92
96PCWB-3	45.9	45.9	50.0	50.0	0.84	0.81	0.77	0.75	40.8	40.8	0.95	0.92
96PCWB-4	56.4	56.4	61.0	61.0	0.76	0.70	0.70	0.65	43.5	43.5	0.98	0.91
96PCWC-1	39.8	39.8	40.1	40.1	1.13	1.12	1.12	1.11	44.3	44.3	1.02	1.00
平均値					1.05		1.00				0.94	
標準偏差					0.18		0.19				0.06	
変動係数					0.17		0.18				0.06	

Qexp : 実験の最大強度 (tf) Qana : 弾塑性解析モデルによる最大強度 (tf)
 Qcal I : 圧縮ストラットの傾斜角に実験値のひびわれの傾斜角を用いた簡略化モデルによる最大強度 (tf)
 Qcal II : 圧縮ストラットの傾斜角に推定式の傾斜角を用いた簡略化モデルによる最大強度 (tf)

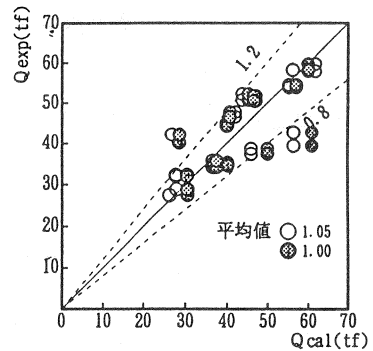


図-5 最大強度の解析値-実験値

5. 弾塑性解析モデルによる解析

筆者らは、PCa・PC耐震壁の変形性状を捉えるために、一体打ち RC 耐震壁の弾塑性解析のためのマクロモデルを修正し、接合部の滑りを考慮したマクロモデルを構築している [3]。これを、滑りが完全に拘束

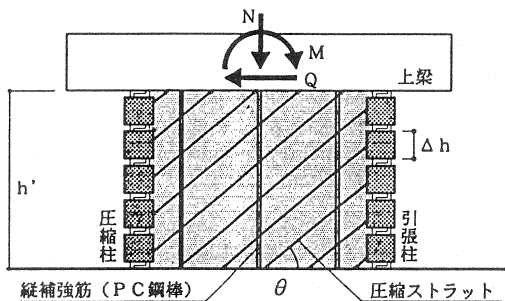


図-6 弾塑性解析モデル

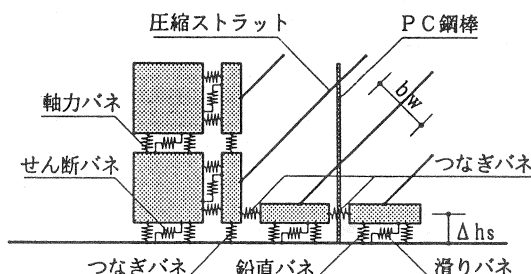


図-7 接合バネ

された場合にも適用できるように修正した。その概要と試験体の解析結果を示す。図-6に弾塑性解析モデルとその分割状況を示す。モデルは、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。圧縮ストラットは、一体打ち RC 耐震壁のモデルと異なり、接合目地を置換した接合バネで柱または梁と接合される(図-7)。

モデルを構成する各部材は、次のような性質をもつものと仮定される。(図-8)

- 1) 上・下梁は剛体で破壊しない。
- 2) 柱は、剛体要素とそれらを接合する軸力バネおよびせん断バネで構成される。軸力バネは、完全弾塑性とし、その位置は片側 PC 鋼棒と主筋の強度の中心とする。軸力バネの強度と剛性は次の式で表される。

$$\begin{aligned} \text{引張域: 強度 } cNnt &= \Sigma a_g \cdot \sigma_y / 2 & \text{圧縮域: 強度 } cNnc &= (\Sigma a_g \cdot \sigma_y + b \cdot D \cdot \sigma_B) / 2 \\ \text{剛性 } cKnt &= \Sigma Es \cdot a_g / (2\Delta h) & \text{剛性 } cKnc &= (\Sigma Es \cdot a_g + Ec \cdot b \cdot D) / (2\Delta h) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $Ec = 2.1 \times 10^5 \times \sqrt{\sigma_B / 200}$ (kg/cm²)、 Σ は PC 鋼棒と主筋についての和を示す。せん断バネの剛性は次の式で表される。

$$\text{剛性 } cKs = G \cdot b \cdot D \cdot cKn / (\Delta h \cdot cKnc) \quad (2)$$

ここで、 $cKn / cKnc$ は、剛性の低減率で 2 つの軸力バネの同一時刻における剛性の平均である。

- 3) 圧縮ストラットは、式(3)の Popovics の応力-ひずみ関係にしたがう。

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{n \cdot \xi}{n - 1 + \xi^n} \cdot \sigma_B' & \text{ただし、} \sigma_B' &= 0.63 \sigma_B, \quad n = 0.57 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma_B' + 1 \\ \xi &= \epsilon / \epsilon_0, & \epsilon_0 &= 4.29 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_B'^{0.25} \end{aligned} \quad (3)$$

圧縮ストラット端部の軸力バネは接合部目地の圧縮性能を表し、式(3)と同じ応力-ひずみ関係にしたがう。つなぎバネは圧縮域において剛体、引張域において抵抗しない。滑りバネは接合部のせん断性能を表すために導入したもので、ここでは接合目地モルタルのせん断剛性で代替している。滑りバネは圧縮力の増分に関係したステップ状の構成則をもち、その滑り強度と剛性は次の式で表される。

$$\text{滑り強度: 水平目地 } sTah = \mu \cdot Sav \quad \text{剛性 } cKs = G \cdot te \cdot bw / \sin \theta \cdot \Delta hs \quad (4)$$

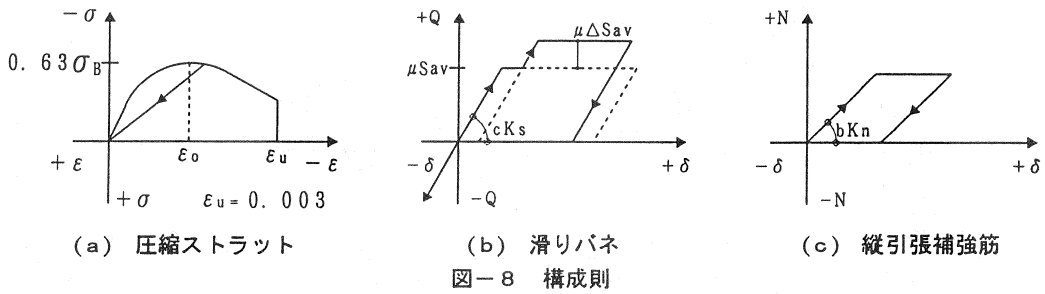
$$\text{鉛直目地 } sTav = \mu \cdot Sah$$

$$\text{ただし、 } Sav = \sigma_{av} \cdot te \cdot bw / \sin \theta \cdot \Delta hs \quad \sigma_{av} = 0.63 \sigma_B \cdot \sin \theta \cdot \sin \theta$$

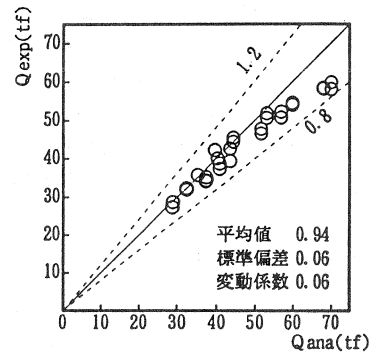
$$Sah = \sigma_{ah} \cdot te \cdot bw / \cos \theta \cdot \Delta hs \quad \sigma_{ah} = 0.63 \sigma_B \cdot \cos \theta \cdot \cos \theta$$

- 4) 縦引張補強筋は PCa パネルの接合 PC 鋼棒を表し、完全弾塑性とする。引張域における強度と剛性は次の式で表される。また、圧縮域において抵抗しないものとする。

$$\begin{aligned} \text{強度 } bNt &= as \cdot \sigma_y & \text{剛性 } bKn &= as \cdot Es / h' \end{aligned} \quad (5)$$



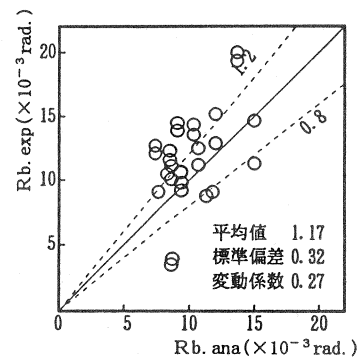
解析は、柱の全圧着力を軸力バネに初期応力として与え、層間部材角の増分ステップを $\Delta R = 0.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ とする増分解析法によった。なお、縦補強筋には初期応力を与えない。柱は5分割、圧縮ストラットの分割幅は95シリーズは20cm、96シリーズは10cm程度とした。柱脚に滑りが生じなかったことを考慮するために、モデル構築の際に柱脚の滑りバネを除去した。コッターがあるためPCaパネルの滑りが生じなかったタイプAとB、およびコッターがないため滑りの生じたタイプCについては、それぞれ滑りバネの剛性に目地モルタルの弾性せん断剛性、および弾性せん断剛性の1/100を設定した。表-3に弾塑性解析による最大強度の解析結果を、図-9に解析値と実験値の比較を示す。前出の図-2、3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。図-10は限界層間変形角Rbの解析値と実験値である。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。特に最大強度以降を捉えていない。モデル化と構成則について、さらに検討が必要である。



6. おわりに

柱とPCaパネルの滑りを完全に拘束した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・中島直子：修正簡略マクロモデルによる耐震壁573体の最大解析の解析精度，日本建築学会大会学述講演梗概集，1997. 9
- [3] 望月 洵・小野里憲一：プレキャスト・プレストレス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