

(28) 修復プレキャスト・プレストレストコンクリート耐震壁に関する研究

ドーピー建設工業(株) 正会員 ○鳥屋 隆志
 工学院大学 建築学科 同 望月 洵
 ドーピー建設工業(株) 同 倉持 春夫
 工学院大学大学院 奈良 純

1. はじめに

筆者らは文献[1]で、PC柱・梁フレーム構造の保有耐力の確保のために、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)を提案した。PCa・PC耐震壁は、特に、柱とPCaパネルの滑りが拘束されたとき、一体打ちRC耐震壁に近い破壊性状と十分な構造性能を有することが確かめられた[2]。一方、耐震設計または耐震補強の面からは、このようなPCa・PC耐震壁が激震をうけて破損した場合の修復の可能性を捉えることもまた重要である。

本研究は、修復の可能性を捉えるために、加力実験したPCa・PC耐震壁の試験体(以下、元PCa・PC耐震壁または元試験体という)のPCaパネルを新規に交換した試験体(以下、修復PCa・PC耐震壁または修復試験体という)について実験を行い、その破壊性状の把握とマクロモデルによる強度評価を試みたものである。

2. 実験計画

試験体: 修復PCa・PC耐震壁の試験体は93シリーズのタイプA 4体、タイプB 4体、および96シリーズ4体の計12体である。試験体93PCAR-1, 3, 4, 5 および93PCBR-1, 2, 3, 5 は、それぞれ文献[3]の93PCAR-1, 3, 4, 5 および93PCWB-1, 2, 3, 5 を、また96PCWR-1~4 は、文献[2]の試験体95PCWA-1, 2, 3, 95PCWB-1 を次の手順で修復したものである。

- 1) 実験終了後、破損したPCaパネルと接合PC鋼棒を除去する。
- 2) 破損したPCaパネルと全く同じで新規のPCaパネルを組み込む。
- 3) PCaパネルの接合目地に粘着性の高い樹脂モルタルを充填する。
- 4) 接合PC鋼棒を手締めする。
- 5) PCaパネルの接合PC鋼棒のシースにはグラウトしない。
- 6) 損傷の激しい柱頭、柱脚に簡単な補修を行う。

なお、試験体96PCWR-1~4は施工性を考慮してPCaパネルの接合部コッターと接合PC鋼棒を省略している。

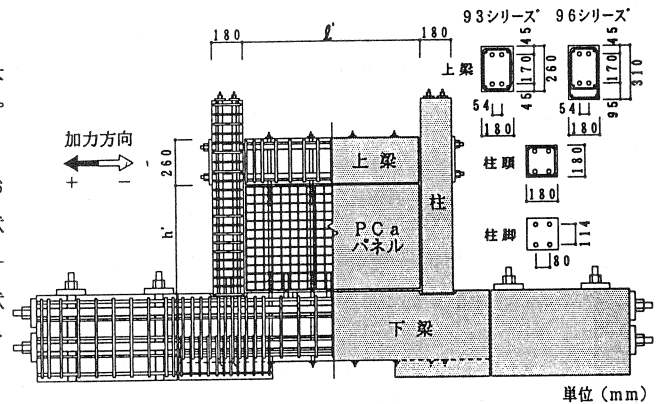


図-1 修復試験体(93シリーズ)の形状寸法および配筋

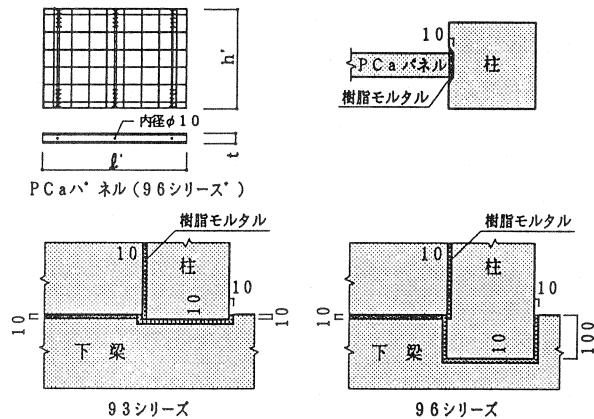


図-2 PCa パネルと接合部のディテール

表-1 修復試験体の諸性質

試験体名	PCa パネル					柱						元試験体 Q _{exp}		修復試験体 Q _{exp}				
	l'×h'	P _s	t _e	σ _B	目地 σ _B	柱頭 P _g	柱脚 P _g	PC 鋼棒 σ _y	σ _B	ΣPi	目地 σ _B	+	-	+	-			
																+	-	+
93PCAR-1	100×60	0.45	3.5	551	—	2.06	0.49	13780	538	13.2(4-D7.2)	594	46.3	48.3	30.7	32.7			
93PCAR-3					—	2.39	0.82	14340	496	25.2(4-φ9.2)	685	57.1	57.6	33.0	33.9			
93PCAR-4					—	—	—	—	523	665	55.0	52.0	30.2	34.7				
93PCAR-5					—	2.74	1.17	13720	520	36.4(4-φ11)	689	—	68.5	34.7	38.3			
93PCBR-1					—	2.06	0.49	13780	545	14.0(4-D7.2)	606	27.1	28.7	20.1	21.3			
93PCBR-2	80×110	0.56	3.5	439	—	2.39	0.82	14430	474	25.6(4-φ9.2)	699	33.5	34.9	25.5	28.4			
93PCBR-3					—	2.74	1.17	13720	520	36.8(4-φ11)	467	42.4	43.4	29.0	30.0			
96PCWR-1					0.60	4.2	327	287	1.35	0.47	14192'	632	16.0(4-D7.2)	460	47.8	46.6	32.4	32.6
96PCWR-2					0.61	4.1	327	271	1.70	0.82	13363	580	20.0(4-φ9.2)	460	51.8	50.6	37.9	37.4
96PCWR-3					0.60	4.1	347	295	2.05	1.17	13910	550	32.0(4-φ11)	419	58.4	58.3	41.4	41.0
96PCWR-4	80×105	0.61	4.2	327	275	1.70	0.82	13363	61	20.0(4-D7.2)	410	34.1	35.8	29.9	30.4			

【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-φ=(壁厚)-(φ×径)

σ_B(kgf/cm²):コンクリート, 目地モルタル(樹脂系)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, ΣPi(tf):部材の全圧着力, Q_{exp}(tf):実験による最大強度

(93type) PCa パネル:補強筋 タテφ D6#50 グ#R, σ_y=3857(kgf/cm²), 柱:主筋 4-D13, σ_y=3518(kgf/cm²), 帯筋 D6#50, σ_y=3857(kgf/cm²)

(96type) PCa パネル:補強筋 タテφ 4#100 グ#R, σ_y=4295(kgf/cm²), 柱:主筋 4-D10, σ_y=3743(kgf/cm²), 帯筋 D6#40, σ_y=3924(kgf/cm²)

(共通) 柱:b×D=18(cm)×18(cm), 上 梁:ΣPi=68.0(tf), PC 鋼棒 4-φ17, 主筋 4-D13, 下 梁:ΣPi=240.0(tf), PC 鋼棒 4-φ32, 主筋 6-D16

図-1 に 93 シリーズ修復試験体の形状寸法と配筋を示す。96 シリーズの修復試験体の形状寸法と配筋方法は柱脚と PCa パネルのディテールを除いて 93 シリーズと変わらない。図-2 に柱脚と PC パネルの形状とディテールを示す。93 シリーズの修復試験体は、柱脚に 10mm の浅い根入れをもち、PCa パネルは接合 PC 鋼棒で手締めされている。このシリーズの修復試験体は、PCa パネルのホゾ筋が省略されたことを除いて、元試験体と同じ状態に修復されている。96 シリーズの元試験体は、柱脚に 100mm の深い根入れと PCa パネルの上・下水平接合部にホゾ筋の代わりにコッターをもち、さらに PC 鋼棒で手締めされていたが、修復試験体の PCa パネルはコッター、ホゾ筋、および接合 PC 鋼棒をもたない。なお、鉛直接合部に深さ 10mm の溝が柱に設けてあり、これによって目地モルタルの脱落は防止されている。表-1 に修復試験体の諸性質および元試験体と修復試験体の最大強度を示す。

加力と計測の方法： 加力は変位制御の方法とし、アクチュエーターを用いた上梁位置に作用する正負繰返し力とした。加力サイクルは、最大強度までは層間変形角 R=1.0×10⁻³rad.ごとに 2 回、それ以降は 1 回とした。変形計測は、層間水平変位を変位計によって計測した。

元試験体の破壊性状の特徴： 元試験体の破壊性状については、93 シリーズは文献[3]に、96 シリーズは文献[2]に述べてある。ここでは、修復試験体と比較するために、破壊性状の特徴を簡単に記す。

93 シリーズ：タイプ A の試験体は形状比 κ=h'/l'=0.6 の扁平な耐震壁である。ひびわれの発生状況は一体打ち RC 耐震壁と、大要、同じであったが、浅い根入れとホゾ筋まわりのコンクリートの破壊のため滑りが生じ、その力-変形関係は原点近傍でふくらみのあるものであった。一方、タイプ B の試験体は κ=1.4 の背高な耐震壁である。このため、水平せん断力に比べてモーメントによる圧縮力にもとづく摩擦抵抗力が大きく、滑りが生じなかった。また、力-変形関係は原点で絞られた PC 構造特有の性状を示した。

96 シリーズ：試験体は、柱と PCa パネルの滑りが深い根入れとコッターによって完全に拘束されているため、一体打ち RC 耐震壁と同じ破壊性状を示し、また力-変形関係は原点で絞られたものであった。

3. 実験結果

破壊性状は、大要、次のようである。

93PCAR-1, 3, 4, 5：各試験体とも破壊性状は、大要、同じであった。ここでは 93PCAR-1 について述べ

る。R=1.0($\times 10^{-3}$ rad.)までに、引張柱脚部の引張ひびわれと圧縮柱下端の曲げひびわれが先行し、その後、R=1.0~3.0($\times 10^{-3}$ rad.)にかけて PCa パネルに斜めひびわれと柱の上端・中間部の曲げひびわれの拡幅が生じた。PCa パネル接合目地に樹脂モルタルを充填したことにより付着力が増し、柱・梁フレームと PCa パネルとの一体性がある程度確保されたが、変形の増大に対応して接合目地に目開きが生じた。柱の上端・中間部のひびわれの拡幅によるフレームの拘束力の低下に起因してか PCa パネルのひびわれの進展は観察されなかった。R=10.0($\times 10^{-3}$ rad.)以降で PCa パネルに滑りが観察され、力-変形関係の包絡線は平滑域を形成した。その後、さらに変形が進むと柱・梁フレームと PCa パネルが接触し、再び強度の微増を示したが、R=10.0($\times 10^{-3}$ rad.)以降の平滑域をもって最大強度とした。最大強度は、各試験体とも元試験体の 55~67%の値を保持した。

93PCBR-1~5: 各試験体とも、93PCAR の試験体と同様の破壊性状を示したが、PCa パネル接合目地の目開きが生じた後も PCa パネルの斜めひびわれは進展した。これは、試験体の形状が背高であることに起因して、曲げ変形が卓越しているためと思われる。最大強度は、各試験体とも元試験体の 68~81%の値を保持した。図-3 に 93PCBR-3 の最終ひびわれ状況と力-変形関係を示す。93PCAR, 93PCBR のすべての試験体に共通して、その力-変形関係は、典型的な曲げ破壊モードの性状を示した。図には比較のため、元試験体の力-変形関係を重ねて描いてある。

96PCWR-1, 2, 3: 破壊経過は 93 シリーズの試験体と、大要、同じであった。図-4 に 96PCWR-1 の最終ひびわれ状況と力-変形関係を示す。すべての試験体の力-変形関係は典型的な曲げ破壊モードであ

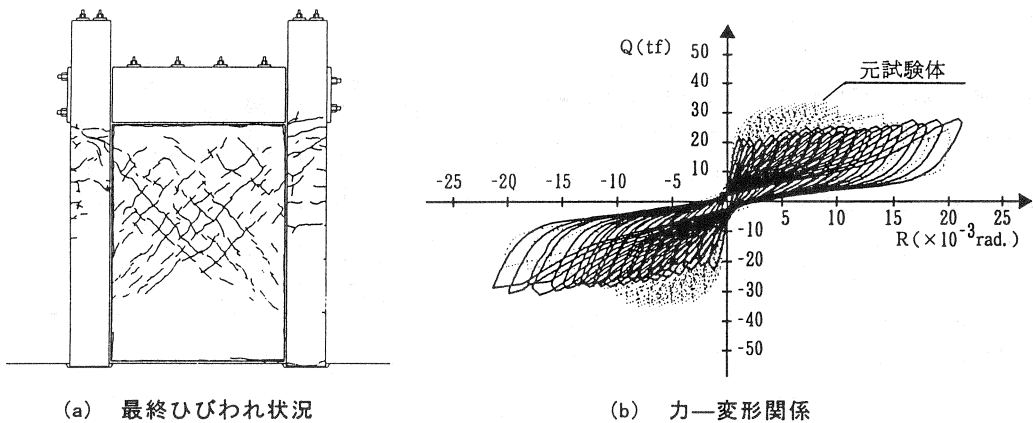


図-3 修復試験体 93PCBR-3

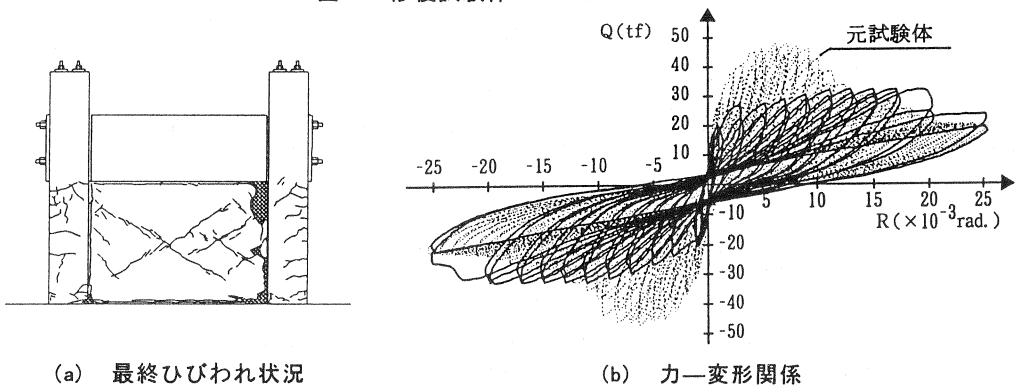


図-4 修復試験体 96PCWR-1

ったが、修復前の元試験体のように原点で絞られた履歴を示さなかった。最大強度は元試験体の68~81%の値を保持した。

96PCWR-4：破壊経過は 93PCBR シリーズと同じで、PCa パネル接合部目地に目開きが生じた後も、PCa パネルの斜めひびわれは進展した。また、パネルの滑りによる隅角部の剥離も観察されなかった。

図-5 に元試験体の最大強度に対する修復試験体の最大強度の比を示す。比は 0.55~

0.85 の値にあり、その平均は 0.71 である。修復の方法、特に接合部の目地モルタルの脱落防止または PCa パネルの滑りの拘束が十分であれば、修復試験体の最大強度は元試験体の 70%程度は確保できると考えられる。以上の破壊経過から、修復 PCa・PC 耐震壁の抵抗機構は次のようにまとめられる。

修復 PCa・PC 耐震壁は、変形の小さい範囲では一体性を保持し、引張柱と PCa パネルのアーチ作用および圧縮柱のせん断力で水平力を伝達している。変形の増大にともない、柱・梁フレームの拘束力の低下と PCa パネル下端の滑りにより、アーチ作用の働きが減じ、力-変形関係の包絡線は平滑域を形成する。さらに変形が進むと、柱・梁フレームと PCa パネルの接触が生じ、再びアーチ作用が働き抵抗力が増する。このような抵抗機構は、滑りの発生を除けば元 PCa・PC 耐震壁の抵抗機構と同じである。

4. 最大強度の簡略化マクロモデルによる解析

筆者らは、すでに PCa・PC 耐震壁の簡略化マクロモデルによる最大強度の評価式として、滑りを考慮した評価式A [4]、浅い根入れをもつ場合の評価式B [3]、および滑りを完全に拘束した場合の評価式C [2]を提案している。ここでは、評価式BおよびCを用い、修復 PCa・PC 耐震壁の性状を考慮した最大強度の解析を行う。評価式BおよびCの簡略化マクロモデルは共通して図-6 で表される。2つのモデルの基本的な相違点は、柱脚と PCa パネル水平接合部の滑り抵抗の扱いである。

評価式Bでは、柱脚のせん断力は式(1)で表される滑り強度 spQ_c と式(2)で表される浅い根入れのボゾ抵抗 sR_c の和として与えられる。

$$spQ_c = \mu \cdot N_c + \lambda \cdot N_y / 2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$sR_c = 0.85 \sigma_B \cdot b \cdot h_s \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 N_c ：圧縮柱下端の軸力、 N_y ：柱下端の PC 鋼棒の全降伏強度、 μ ：摩擦係数、 λ ：PC 鋼棒のボゾ効果を表す係数、 σ_B ：コンクリートの圧縮強度、 b ：柱の幅、および h_s ：根入れ深さである。一方、評価式Cでは、深い根入れのため柱脚のせん断力は滑りで限界づけられないとしている。

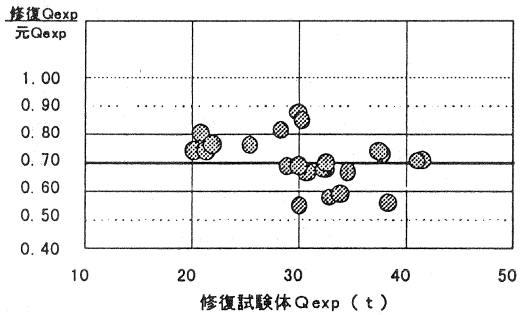


図-5 元試験体と修復試験体の最大強度の比較

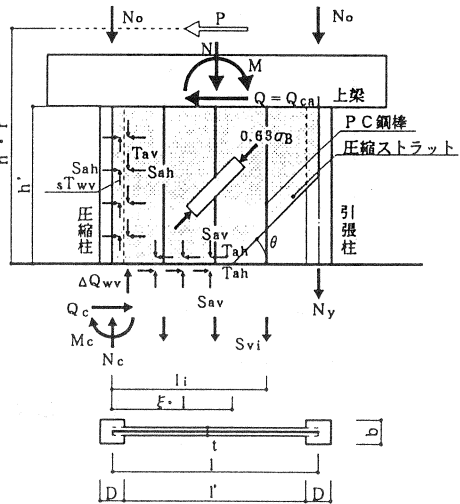


図-6 PCa・PC 耐震壁の簡略化マクロモデル

PCa パネルの水平接合部の滑り強度 spQ_w は、評価式 B, C ともに次の式で表される。

$$spQ_w = (\mu \cdot Sav + \lambda \cdot Sv) \xi \cdot l \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 Sav および Sv はそれぞれ圧縮ストラットの降伏軸力 $0.63\sigma_g$ の鉛直方向成分および接合 PC 鋼棒の降伏強度の均し応力に有効壁厚 t_e を乗じたもの、また $\xi \cdot l$ は圧縮ストラットの水平有効幅である。

解析にあたって、各シリーズについて次のように扱った。

93 シリーズ：評価式 B を適用する。ただし、式(1)の spQ_c の算定には PC 鋼棒のホヅ効果を省略して $\lambda=0$ とする。これは繰返し加力によって生じた PC 鋼棒まわりのコンクリートの局所的破壊を考慮したものである。同じ理由で式(2)の sR_c も省略する。また、PCa パネルの PC 鋼棒のシースにはグラウトされていないため、式(3)において $\lambda=0$ とする。

96 シリーズ：評価式 C を適用する。ただし、式(2)と式(3)において $\lambda=0$ とする。

式(1)と(2)の係数 μ, λ について、文献[5]で実験結果とよく対応する組合せとして、 $(\mu, \lambda) = (0.6, 0.4)$ を提案した。ここでは、さきに述べた理由により、 $\lambda=0$ とし、 $\mu=0.6$ はそのまま用いる。評価式の圧縮ストラットの傾斜角 θ の選定方法として、次の方法がある。

- 1) θ を変数として、解が最小値となる値を選ぶ。
- 2) 実験で観察された主対角域のひびわれの傾斜角を選ぶ。
- 3) 一体打ち RC 耐震壁の解析から得られた推定式[6]による値を選ぶ。

ここでは、方法 2) と 3) の傾斜角を用いて解析する。推定式は PCa パネルの形状比 $\kappa = h'/l'$ の関数として、次のように与えられている。

$$\left. \begin{array}{ll} \kappa < 0.8 \text{ のとき} & \theta = 25^\circ \cdot \kappa + 25^\circ \\ 0.8 \leq \kappa \leq 1.2 & \theta = 45^\circ \\ 1.2 < \kappa < 1.8 & \theta = 25^\circ \cdot \kappa + 15^\circ \\ \kappa \geq 1.8 & \theta = 60^\circ \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

表-2 に解析結果を示す。表は、解析値が実験値を大要捉えており、PCa・PC 耐震壁の簡略化マクロ

表-2 解析結果

試験体	Q _{exp}		Q _{cal I}	Q _{cal II}	Q _{exp} /Q _{cal I}		Q _{exp} /Q _{cal II}		θ _{exp}	θ _{cal}
	+	-			+	-	+	-		
93PCAR-1	30.7	32.7	23.96	23.91	1.28	1.36	1.28	1.37	40	40.2
93PCAR-3	33.0	33.9	31.89	32.86	1.03	1.06	1.00	1.03	43	
93PCAR-4	30.2	34.7	31.89	32.86	0.95	1.09	0.92	1.06	43	
93PCAR-5	34.7	38.3	39.53	40.66	0.88	0.97	0.85	0.94	43	
93PCBR-1	20.1	21.3	23.05	22.05	0.87	0.92	0.91	0.97	45	49.4
93PCBR-2	20.9	21.9	22.59	22.05	0.93	0.97	0.95	0.99	47	
93PCBR-3	25.5	28.4	31.12	30.40	0.82	0.91	0.84	0.93	47	
93PCBR-5	29.0	30.0	37.39	37.76	0.78	0.80	0.77	0.79	48	
96PCWR-1	32.4	32.6	25.08	25.33	1.29	1.30	1.28	1.29	45	42.4
96PCWR-2	37.9	37.4	32.26	32.25	1.17	1.16	1.18	1.16	40	
96PCWR-3	41.4	41.0	41.15	40.84	1.01	1.00	1.01	1.00	45	
96PCWR-4	29.9	30.4	26.61	26.59	1.12	1.14	1.12	1.14	55	
平均値					1.03		1.03			
標準偏差					0.17		0.16			
変動係数					0.16		0.17			

Q_{exp} : 実験の最大強度 (tf)
 Q_{cal I} : 圧縮ストラットに傾斜角 θ_{exp} を用いた簡略化モデルによる最大強度 (tf)
 Q_{cal II} : 圧縮ストラットに傾斜角 θ_{cal} を用いた簡略化モデルによる最大強度 (tf)
 θ_{exp} : 実験で観測されたひびわれの傾斜角 (deg.)
 θ_{cal} : 式(4)で推定した圧縮ストラットの傾斜角 (deg.)

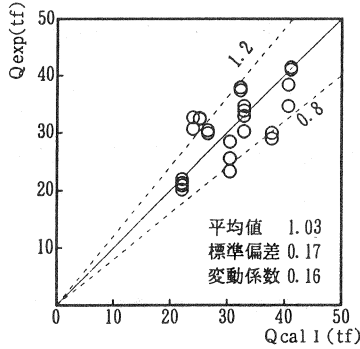


図-7 圧縮ストラットの傾斜角に θ_{exp} を用いた Q_{cal} と Q_{exp} の比較

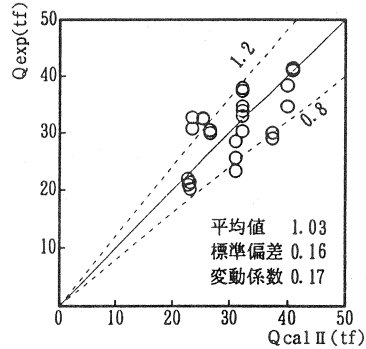


図-8 圧縮ストラットの傾斜角に θ_{cal} を用いた Q_{cal} と Q_{exp} の比較

モデルに修復状況を考慮することで、修復 PCa・PC 耐震壁の最大強度を評価できることを示している。式(4)で推定した圧縮ストラットの傾斜角は、形状比によって変化する PCa パネルの斜めひびわれの傾斜角を大要捉えており、またこの値を用いた最大強度の解析値は実験値とよく対応していることから、式(4)の妥当性が確かめられたといえる。図-7と8に修復 PCa・PC 耐震壁の実験値と解析値の比較を示す。図-7は圧縮ストラットの傾斜角に観察されたひびわれの傾斜角を、図-8は式(4)より推定した傾斜角を用いたものである。

5. おわりに

本研究では、PCa・PC 耐震壁の実験後、破損した PCa パネルを新規に交換した修復 PCa・PC 耐震壁の実験を行い、その破壊性状を捉えるとともにマクロモデルを用いた最大強度の解析を行った。その結果は、次のようにまとめられる。

- 1) 修復 PCa・PC 耐震壁の最大強度は元 PCa・PC 耐震壁の 55%～88%程度に低下する。
- 2) 修復 PCa・PC 耐震壁は曲げ破壊モードの靱性がある破壊性状を示す。そして、柱・梁フレームの損傷の状況に左右されるが、接合目地モルタルの脱落が防止できるように補修することで、耐震要素として有効になる。
- 3) 修復 PCa・PC 耐震壁の最大強度は、簡略化マクロモデルに修復の状況を考慮した解析により評価できる。

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・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
- [3]鳥屋隆志・望月洵・倉持春夫・小野里憲一：滑りを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，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，pp.139-144，1994.10
- [4]望月洵・小野里憲一・中村勝・倉持春夫・八木沼宏己：プレキャスト・プレストレス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
- [5]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
- [6]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 体の最大強度の解析精度，日本建築学会大会学術講演梗概集，1997.9