

プレキャストプレストレストコンクリート耐震壁 による耐震補強工法の提案と予備実験

鳥屋 隆志*1・倉持 春夫*2・奈良 純*3・望月 洵*4

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以来、既存RCフレーム構造の耐震補強が積極的に行われ、その有効な方法として現場打ちRC耐震壁および鉄骨ブレースによる方法が多用されている。しかし、これらの方法は次のような構造上および施工上の問題点を含んでいる。

- ① あと施工アンカーのボルト接合による既存RCフレーム構造（以下、既存構造という）の損傷
- ② 耐震壁が組み込まれたフレームの側柱のせん断破壊
- ③ 長期の補強工事とその間の建物機能の停止
- ④ 施工時の騒音と粉塵

本報告は、これらの問題点を解決する耐震補強工法の一つとして、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）を既存構造に圧着接合する耐震補強工法を提案している。この工法は、適用部位が限定されるが、上に述べた問題点がある程度は解決できる可能性をもっている。

ここでは、この提案する耐震補強工法の内容を示すとともに、予備実験として行った施工実験と加力実験について述べる。

2. PCa PC耐震壁による耐震補強工法

2.1 耐震補強工法の概要と特長

図-1(a)に既存構造の外構面に圧着接合されたPCa PC耐震壁の立面を示す。このPCa PC耐震壁は、PCa PCフレームにPCaパネル（普通コンクリートまたは超軽量コンクリートを使用）を組み込んだもので、PCaパネルはその上下水平接合部のみシヤコッターをもち、鉛直接合部は平滑目地である。接合部の目地には全周にわたって無収縮高強度モルタルが圧入される。このPCa PC耐震壁と既存構造との一体化は、各層の梁側面に貫入するPC鋼棒による圧着接合で図られる。このとき、PCa PC耐震壁と既存構造の柱および接

合部との接合は行わない。これは、一般に既存構造の柱と接合部の配筋が過密であること、および既存構造の柱のせん断破壊を避けるためである。図-1(b)に圧着接合部の縦断面を、図-1(c)に横断面を示す。

PCa PC耐震壁の力学的挙動については、筆者等の実験的および解析的研究^{1)~3)}によって検討されている。これらの研究は、PCa PC耐震壁のPCaパネル接合目地に十分に目地モルタルが圧入され、破壊経過において滑落が著しく生じないとき、および側柱の滑りが拘束されているとき、横補強筋が側柱に定着されていない一体打ちRC耐震壁と同じ挙動を示し、その最大強度と力-変形関係はマクロモデルによって、おおむね評価できることを示している。

これらの研究成果をもとに、ここで提案している耐震補強工法の特長を、1項で述べた問題点との関係でまとめると次のようにいえる。

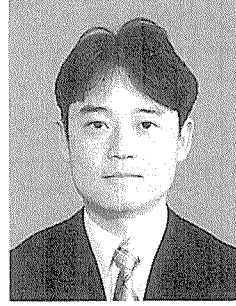
- ① 既存構造の損傷：PCa PC耐震壁の接合は、PC鋼棒による圧着接合であり、その数は、1つの梁で5または6箇所程度である。このため、既存構造の損傷は極めて少ない。
- ② 側柱のせん断破壊：既存構造の柱とPCa PC耐震壁の側柱との接合は行わないため、壁パネルの拘束反力に基づく既存構造の柱のせん断破壊は生じない。また、PCa PC耐震壁の側柱には十分なせん断補強が可能であるため、そのせん断破壊を制御できる。
- ③ 長期の補強工事と建物の機能停止：プレキャスト工法であるため、工事期間は現場打ちRC耐震壁などの工法に比べて格段に短いといえる。当面、この耐震補強工法は外構面の補強に限定されるため、建物機能を停止させる期間を短くすることができる。
- ④ 施工時の騒音と粉塵：接合PC鋼棒の貫入孔の施工時のみ騒音と粉塵が生じるが、あと施工アンカーによる現場打ちRC耐震壁などの工法に比べて格段と少ない。



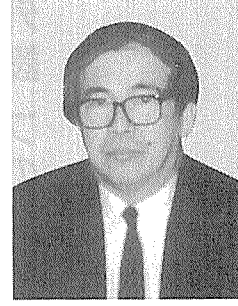
*1 Takashi TORIYA
ドービー建設工業(株)
技術部 技術課



*2 Haruo KURAMOCHI
ドービー建設工業(株)
技術営業部



*3 Atsushi NARA
工学院大学 大学院
工学研究科 建築学専攻



*4 Makoto MOCHIZUKI
工学院大学 建築学科 教授

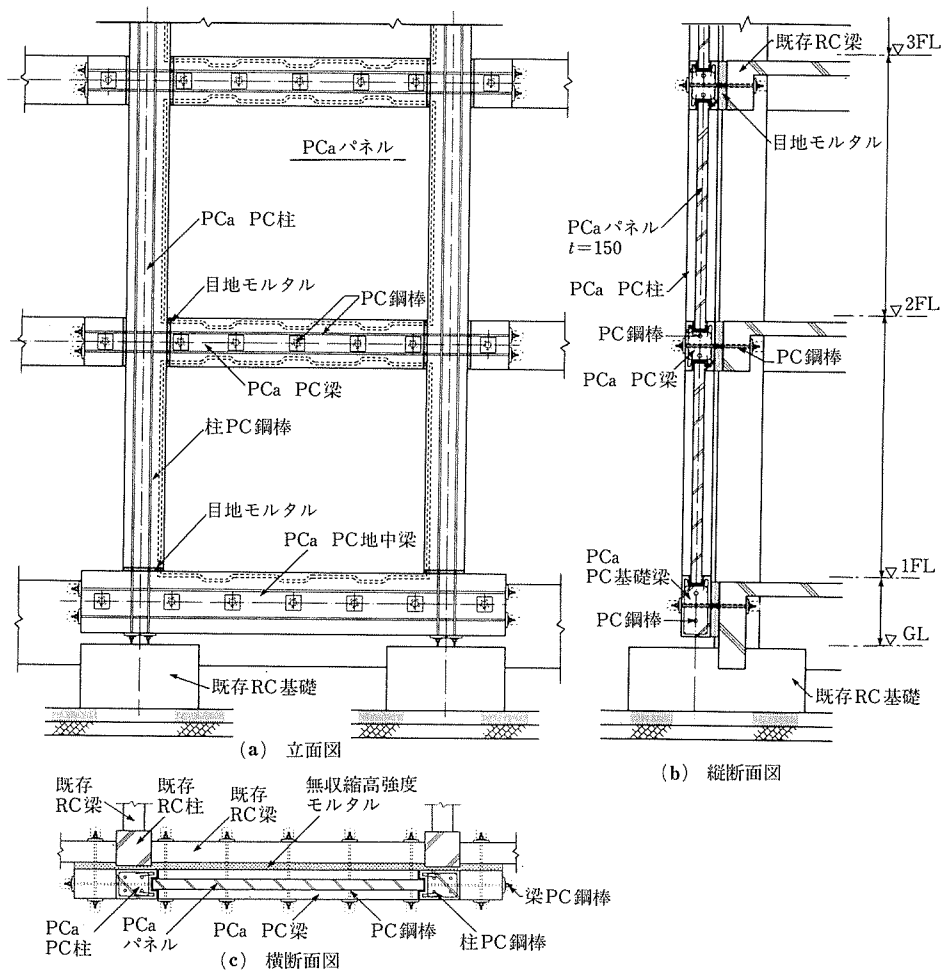


図-1 PCa PC耐震壁による耐震補強工法

これらに加えて、次の点をこの耐震補強工法の力学上および構造上の特長として加えることができる。

- ⑤ 既存構造とは独立してPCa PC耐震壁の剛性と強度、さらに靱性を意図的に設定し、確保することができる。これによって、既存構造の補強に加えて剛性の偏在の調整が可能となる。
 - ⑥ PCaパネルのコンクリート強度、板厚、配筋、および開口の大きさなどを調整することによって、PCa PC耐震壁の先行降伏を促し、地震入力エネルギーを吸収することが可能となる。
- ③で述べたように、この耐震補強工法は外構面に限定している。これは、ある意味で負の要因である。この工法を内構面に用いるには、ディテールの再検討が必要であり、①～⑥の特長のうち、いくつかは修整されることは否めない。

2.2 耐震補強工法の施工手順と力の伝達

図-2に施工手順のフローチャートを示す。この施工手順は一般的なPC構造の施工手順と大きく変わらない。

PC鋼棒によって圧着接合されたPCa PC耐震壁における力の流れは、次のように予測できる。

- ① 地震時の水平せん断力は既存構造から、剛性比に応じて梁の接合PC鋼棒の摩擦力によってPCa PC耐震壁に流れる。

- ② ①のせん断力は、主にPCaパネルの中を流れ、下層のPCa PC耐震壁へ伝わる。PCaパネルに斜めひび割れが生じた場合、このせん断力はひび割れによって形成された圧縮ストラットの中を圧縮力となって伝わる。
- ③ 水平せん断力によって引き起こされるモーメントは、側柱の引張力と圧縮力に置換される。これらの軸力の一部は下層のPCa PC耐震壁の側柱に、残りは接合部の両側にある接合PC鋼棒の摩擦力によって既存構造

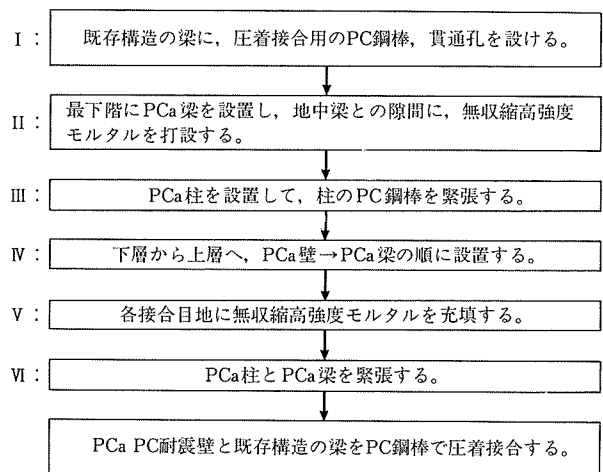


図-2 施工手順のフローチャート

の柱に流れる。

- ④ PCa PC耐震壁の水平せん断力は、最終的には最下階の梁を介して既存構造に流れ、地盤に伝わる。同様に、側柱の軸力も既存構造に流すことが可能であるから、強いて基礎盤に側柱を定着させることは要しない。

3. 施工実験

ここでは、試験的に行った施工実験の概要を述べる。施工実験は、稼動している工場の狭隘な敷地で実施され、施工手順と作業上の安全性を確かめることを目的とした。

施工実験に用いた試験体は、1層1スパンのPCa PC耐震壁の実大モデルである。図-3に試験体の形状と断面を示す。この工場の場合、1Fの外構面に移動できない機械設備があり、室内1F下部の施工が困難であった。このため、PCa PC耐震壁の下梁は、新たに設けた基礎梁に定着され、既存構造の基礎梁とは圧着接合されていない。

施工は、図-2のフローチャートに基づいて行われた。施工状況の概略を以下に述べる。

- ① 準備工：建物前面の植栽などを撤去する。写真-1に補強前の建物の状況を示す。
- ② 地中梁工事：前述のように室内1F下部の施工が困難であるため、PCa PC耐震壁の下梁を支持する基礎梁を増設する。
- ③ 足場組立て
- ④ コア抜き工事：既存構造の2階中央高さ位置に、コアボーリングにより、4箇所の貫通孔を設ける（写真-2）。
- ⑤ 組立て工事：増設した基礎梁とPCa PC耐震壁の下梁部分をPC鋼棒で圧着接合した後、柱・壁パネル・上梁の順にプレキャスト部材を組み立てる（写真-3）。
- ⑥ 目地型枠の取付けと無収縮高強度モルタルの打設：



写真-1 補強前の状況

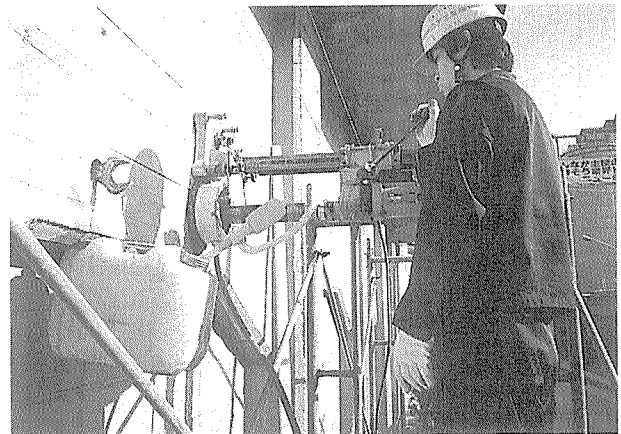


写真-2 コア抜き作業

プレキャスト部材の各接合目地に型枠を設け、無収縮高強度モルタルを注入する。

- ⑦ 緊張工事：無収縮高強度モルタルを1日養生した後、PC鋼棒の緊張を行う（写真-4）。

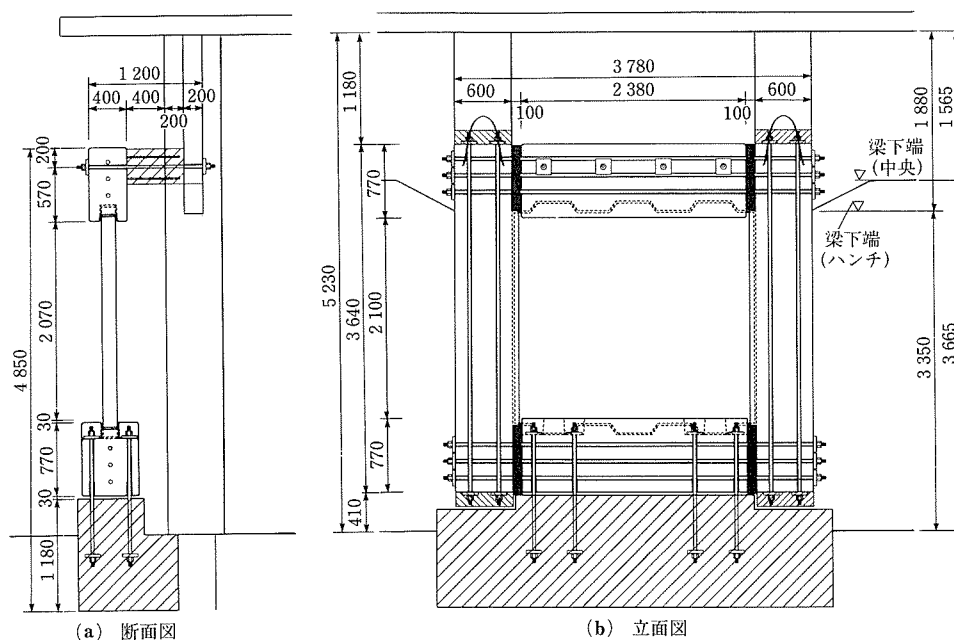


図-3 PCa PC耐震壁の実大モデル



写真-3 組立て状況

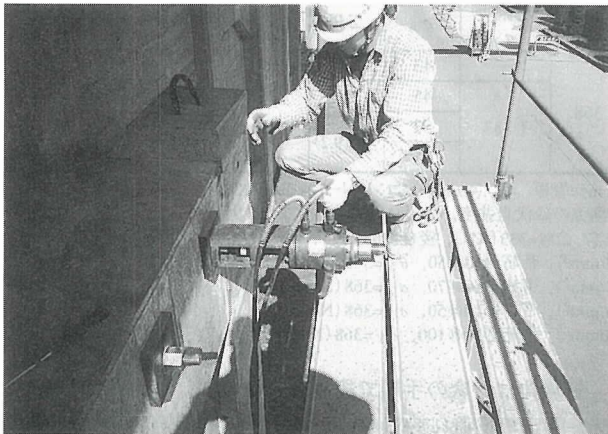


写真-4 緊張作業

- ⑧ グラウト工事
- ⑨ 仕上げ
- ⑩ 足場撤去・片付け

写真-5に補強後の建物の状況を、表-1に施工工程を示す。表は横軸に日数を示してある。

この施工実験において、施工手順に大きな問題が生じないこと、および施工性と安全性に大きな支障がないことが確認された。また、この施工手順で、連層または多スパンの場合でも、既往のあと施工アンカーによる一体打ち耐震壁の補強工法に比べて、施工期間が短縮されると予測できる。

4. 加力実験

ここでは、予備実験として行った加力実験の結果から、特にPCa PC耐震壁で耐震補強された試験体の破壊性状とその最大強度の評価と累加則についての検討を述べる。

4.1 試験体

試験体はRCフレームの試験体97FAの1体、およびRCフレームにPCa PC耐震壁をPC接合した試験体97PCWB-1,2の2体と97PCWCの1体である。図-4に試験体97FAと97PCWB-1,2の形状、配筋、および加力方法を示す。PCa PC耐震壁は、剛強な上下梁、せん断補強規準を満たす補強筋をもつ側柱、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、その上下梁の中心高さ位置で97FAに圧着接合される。試験体97PCWB-1,2は、柱・梁フレームとPCaパネルには普通コンクリートが使用されている。試験体97PCWCは試験体97PCWB-1,2と形状、配筋とも同じであるが、PCaパネルにのみ超軽量コンクリートが使用されている。この超軽量コンクリートの基本特性の概略については



写真-5 補強後の状況

表-1 施工工程

工程表	(日数)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
① 準備工	●	●												
② 地中梁工事		●	●	●	●									
③ 足場組立て			●	●	●									
④ コア抜き工事				●	●	●								
⑤ 組立て工事					●	●	●							
⑥ 目地型枠取付け・無収縮高強度モルタル打設									●	●	●			
⑦ 緊張工事										●	●			
⑧ グラウト工事											●	●		
⑨ 仕上げ												●	●	
⑩ 足場撤去・片付け													●	●

表-2 試験体の諸性質

試験体名	PCaパネル					柱						接合目地 σ_B	Q_{exp}				
	$l' \times h'$	P_s	t	σ_B	目地 σ_B	柱頭 P_g	柱脚 P_g	鉄筋 σ_y	PC鋼棒 σ_y	σ_B	ΣPi		目地 σ_B	+	-		
97FA	-	-	-	-	-	1.64	1.64		-	43	-	-	-	87	83		
97PCWB-1	124.0			47	22			368		45	196 (4- ϕ 9.2)	80	59	442	470		
97PCWB-2	×	0.5	5.0			1.67	1.24		1 333	52					45	460	430
97PCWC	107.0			30	24					45					70	520	419

【記号】 $l' \times h'$ (cm): PCaパネルの寸法, P_s (%): PCaパネルの補強筋比, t (cm): 壁厚, σ_B (N/mm²): コンクリート, ΣPi (KN): 部材の全圧着力
 モルタルの1軸圧縮強度, P_g (%): 柱の全主筋比, σ_y (N/mm²): 鉄筋, PC鋼棒の降伏点強度, Q_{exp} (KN): 実験による最大強度
 【共通】 PCaパネル: 補強筋 タテヨコダブル ϕ 4@100, $\sigma_y=402$ (N/mm²), 上梁: 4- ϕ 17, $\Sigma Pi=333$ (KN), 接合部分(上・下梁): 12- ϕ 17, $\Sigma Pi=2\ 000$ (KN)
 柱(PCa造): $b \times D=15$ (cm) \times 22 (cm), 主筋4-D10, $\sigma_y=368$ (N/mm²), 帯筋 D10@50, $\sigma_y=368$ (N/mm²)
 梁(PCa造): $b \times D=15$ (cm) \times 31 (cm), 主筋4-D13, $\sigma_y=345$ (N/mm²), 帯筋 D10@70, $\sigma_y=368$ (N/mm²)
 柱(RC造): $b \times D=22$ (cm) \times 22 (cm), 主筋4-D16, $\sigma_y=338$ (N/mm²), 帯筋 D10@50, $\sigma_y=368$ (N/mm²)
 梁(RC造): $b \times D=22$ (cm) \times 26 (cm), 主筋4-D16, $\sigma_y=338$ (N/mm²), 帯筋 D10@100, $\sigma_y=368$ (N/mm²)

文献⁴⁾に述べられている。表-2に試験体の諸性質と実験結果を示す。

試験体は、次の手順で組み立てられる。はじめに、各部材を所定の位置に設置し、柱と上下梁の接合目地に無収縮高強度モルタルを充填する。1日の養生後、柱と梁のPC鋼棒を圧着接合し、そのシーにグラウトする。最後にPCaパネル接合目地に無収縮高強度モルタルを充填する。いずれの試験体も、PC鋼棒の圧着力は、PC設計施工規準に基づき、その値はひずみゲージの計測で制御される。PCa PC耐震壁の圧着のためのPC鋼棒は、上下梁にそれぞれ6- ϕ 17でその圧着力は1 000KNである。

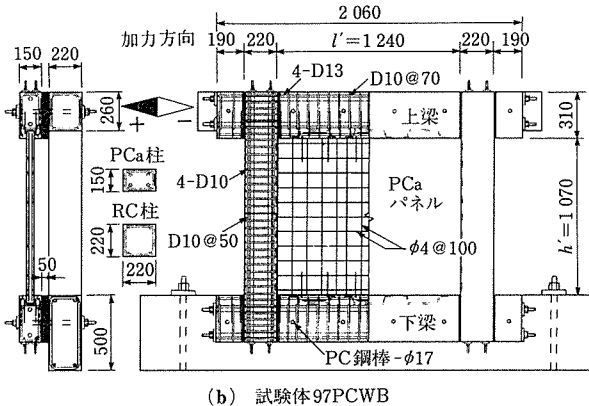
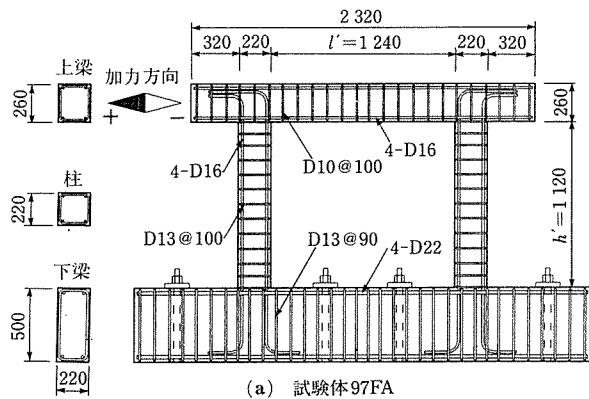


図-4 試験体の形状および配筋

4.2 加力と計測

加力は、RCフレームの上梁に作用するアクチュエーター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 $R = 1.0 \times 10^{-3}$ rad. までは $R = 0.5 \times 10^{-3}$ rad. ごとに1回、以降 $R = 20 \times 10^{-3}$ rad. まで 1.0×10^{-3} rad. ごとに1回である。変形の計測には、RCフレームの上下梁の相対変位および側柱のPC鋼棒とRCフレームの柱上下内端位置における主筋のひずみを、それぞれ変位計およびひずみゲージを用いている。

4.3 実験結果

(1) 試験体97FAの破壊性状

層間変形角 $R = 1.0 \sim 3.0 \times 10^{-3}$ rad. で引張柱の頭部と脚部に曲げひび割れが生じ、 $R = 3.0 \sim 5.0 \times 10^{-3}$ rad. で曲げひび割れが貫通した。その後、層間変形角 $R = 7.0 \times 10^{-3}$ rad. で最大強度に達した。最大強度以降もその強度を保持し、力-変形関係は安定な平滑域をもつ典型的な曲げ破壊モードを示した。また、 $R = 9.0 \times 10^{-3}$ rad. から脚部に浮上がりが生じるようになり、 $R = 20.0 \times 10^{-3}$ rad. では、浮上がりは4mmに達した。図-5に97FAの力-変形関係を示す。

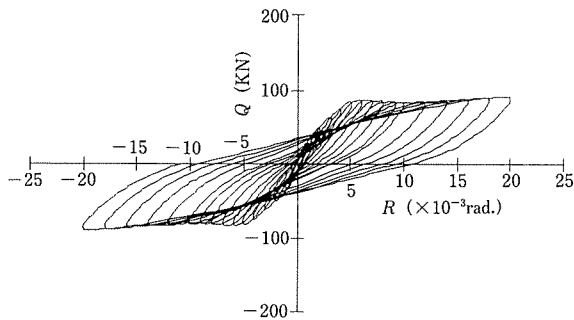


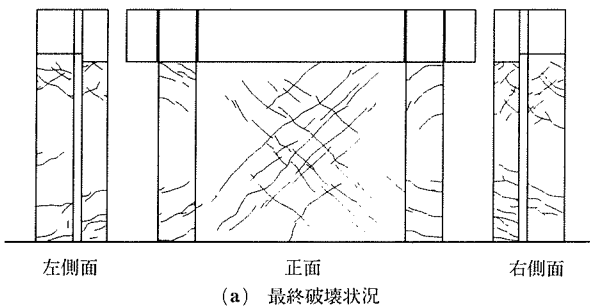
図-5 試験体97FAの力-変形関係

(2) 試験体97PCWB-1の破壊性状

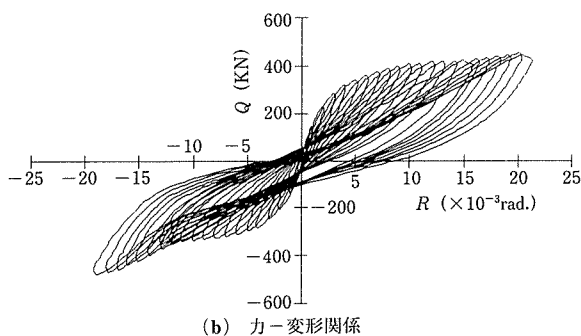
層間変形角 $R = 1.0 \sim 3.0 \times 10^{-3}$ rad. でRCフレームの柱頭、柱脚に曲げひび割れが生じ、 $R = 3.0 \sim 5.0 \times 10^{-3}$ rad. でPCa PC耐震壁の側柱の頭部と脚部に曲げひび割れが生じた。この段階前後から押し加力(負加力域)のとき、剛性の偏心によるねじり変形が生じた。PCaパネルには $R = 4.0 \times 10^{-3}$ rad. で斜めひび割れが生じたが、既往の実験で観察されたPCa PC耐震壁だけの試験体に比べて、ひび割れの数が多くなく、変形が進んでもひび割れの状況に著しい変化は見られなかった。図-6に試験体97PCWB-1の最終破壊状況と力-変形関係を示す。図は靱性ある曲げ破壊モードを示しているが、偏心のため負加力域の最大強度は小さくなった。

(3) 試験体97PCWB-2の破壊性状

試験体97PCWB-1と全く同じ試験体である。しかし、試験体97PCWB-1については、ねじれを全く拘束しなかったが、試験体97PCWB-2では拘束を試みた。 $R = 1.0 \sim 3.0 \times 10^{-3}$ rad. でRCフレームの柱脚に曲げひび割れ、PCaパネルに斜めひび割れが生じた。 $R = 4.0 \sim 7.0 \times 10^{-3}$ rad. で、PCa PC耐震壁の側柱の頭部と脚部に曲げひび割れが生じた。 $R = 7.0 \sim 10.0 \times 10^{-3}$ rad. でPCaパネルに多くの斜めひび割れが生



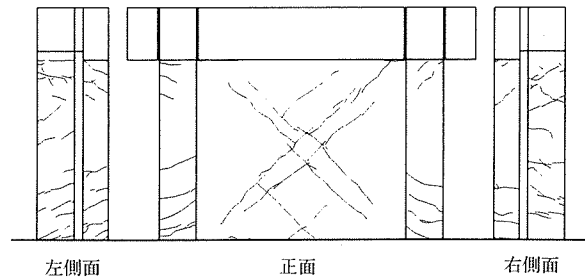
(a) 最終破壊状況



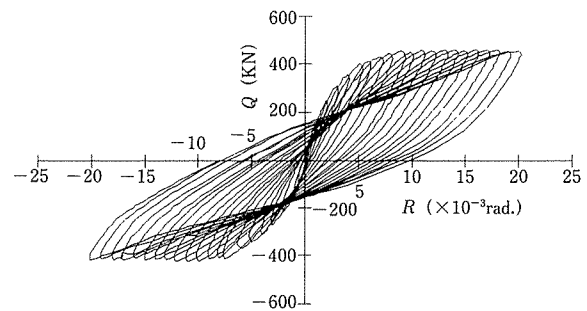
(b) 力-変形関係

図-6 試験体97PCWB-1

じ、続いてさらに上下水平接合部に水平ひび割れが生じた。 $R = 11.0 \times 10^{-3}$ rad. から正負両方向ともに強度が安定し、 $R = 20.0 \times 10^{-3}$ rad.まで靱性ある性状を示した。試験体97PCWB-1と同じように、PCaパネルの著しい破壊は生じなかった。図-7に試験体97PCWB-2の最終破壊状況と力-変形関係を示す。ねじれを拘束したため、正負の各加力域で同じ力-変形関係を示している。



(a) 最終破壊状況



(b) 力-変形関係

図-7 試験体97PCWB-2

(4) 試験体97PCWCの破壊性状

この試験体は試験体97PCWB-1, 2と形状、配筋は同じであるが、PCaパネルには超軽量コンクリートを使用している。最大強度に達するまでの破壊性状は、試験体97PCWB-1, 2とおおむね同じであった。最大強度には、 $R = 11.0 \times 10^{-3}$ rad. で達し、 $R = 13.0 \times 10^{-3}$ rad. までその強度を保持した。その後、さらに変形が進むと、PCaパネルの圧壊が生じ、強度が著しく低下した。これは、PCaパネルに用いた超軽量コンクリートの最大強度以降の脆性的性質によるもので、力-変形関係にその性状が反映している。図-8に試験体97PCWCの最終破壊状況と力-変形関係を示す。図は平滑域の狭い曲げ・せん断破壊モードを示している。また、ねじれの拘束が不十分であったためか、正負加力域の最大強度の差が大きい。

5. 最大強度の評価と累加則

PCa PC耐震壁の最大強度の評価は、マクロモデルを用いた極限解析に基づく方法、および弾塑性解析の方法などが用いられ、工学的に十分な解析精度が得られている。本研究における合成された試験体の解析は、そのモデル化が未決のため現時点で実行できていない。ここでは、本研究に先立って行われたPCa PC耐震壁の実験と解析の結果から最大強度とその累加則について考察を試みる。表-3は、本実

験の試験体と文献⁴⁾から引用した PCa PC耐震壁の試験体 97PCWA, 97PCWDの最大強度の解析値と実験値である。図-9は、各試験体の最大強度の解析値と実験値の比較である。試験体97PCWAおよび97PCWDは、下梁を除いてそれぞれ試験体97PCWBおよび97PCWCと全く同じである。図-10に試験体97PCWAと97PCWDの形状を示す。試験体97FAの解析値は柱の上下端降伏を仮定して求めた。試験体97PCWAと97PCWDの解析値は図-11のマクロモデルを用いて力のつりあい条件だけを考慮して求めたものである。結

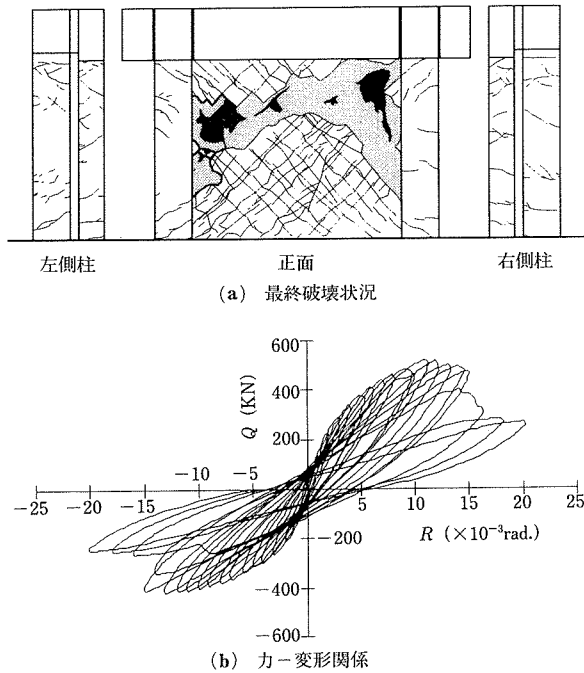


図-8 試験体97PCWC

表-3 解析結果

試験体名	Q_{exp} (KN)		Q_{cal} (KN)	Q_{exp}/Q_{cal}	
	+	-		+	-
97FA	87	83	86	1.01	0.97
97PCWB-1	442	470	542	0.82	0.87
97PCWB-2	460	430	542	0.85	0.79
97PCWC	520	419	521	1.00	0.80
97PCWA*	449	447	456	0.98	0.98
97PCWD*	415	428	435	0.95	0.98

*は単独PCa PC耐震壁:文献⁴⁾から引用

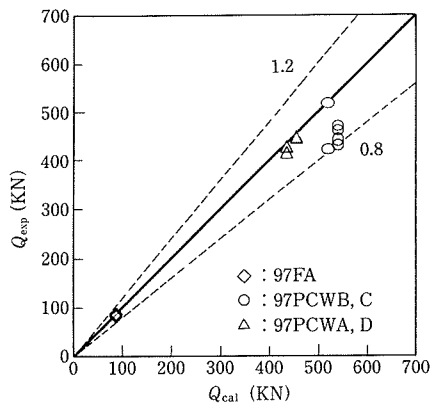


図-9 解析値-実験値

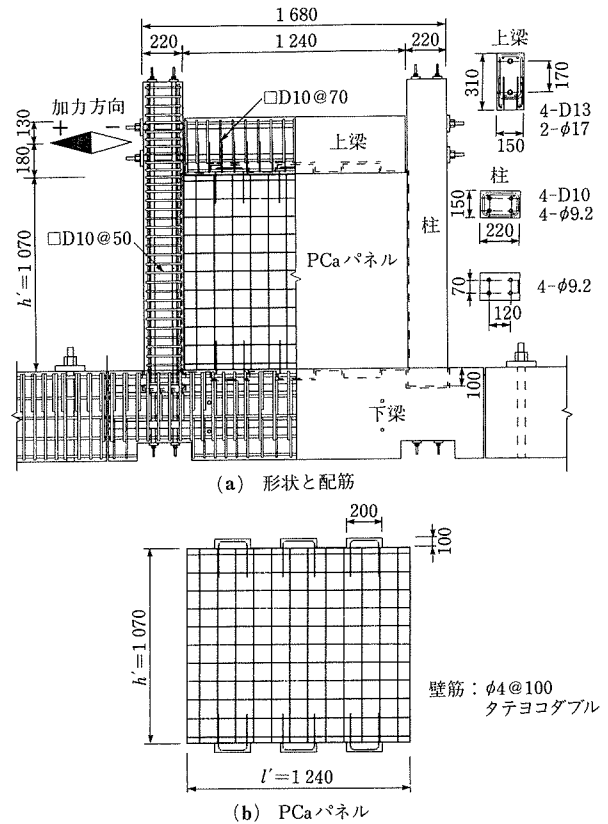


図-10 試験体97PCWA, D

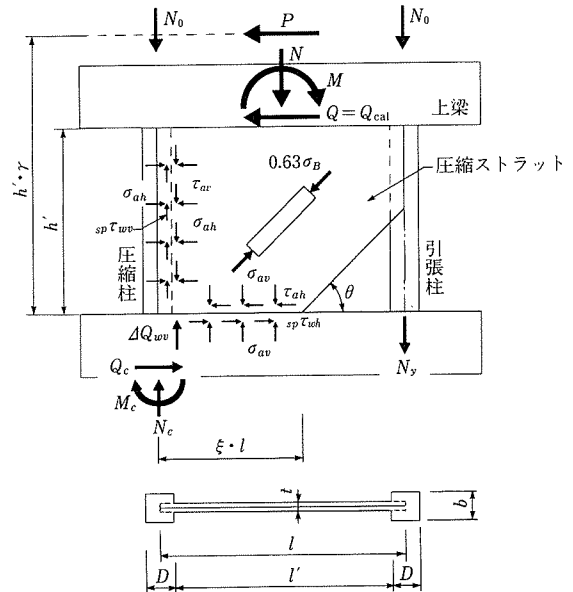


図-11 簡略化モデル

果は、解析値が実験値をよく捉えていることを示している。

表-3の試験体97PCWB-1, 2および97PCWCの最大強度は、それぞれ試験体97PCWAおよび97PCWDの最大強度と試験体97FAの最大強度の和として求めた値である。解析値は実験値を大きめに評価しており、ここで行った強度の累加の方法は必ずしも妥当とはいえない。その要因の一つは、PCa PC耐震壁の下梁の条件の違いにある。また、試験体97PCWAと97PCWDの力-変形関係が平滑域の大きい曲

げ破壊モードでなく、曲げ・せん断破壊モードであったことも要因に加えられる。しかし、4項で示した試験体97FAおよび試験体97PCWB-1, 2の力-変形関係は、ともに最大強度に達した後、その強度を保持して大きな平滑域を形成する曲げ破壊モードを示している。また試験体97PCWCは最大強度に達した後、ある程度の平滑域を形成する曲げ・せん断破壊モードであった。これらのことから、PCa PC耐震壁の力-変形関係は曲げ破壊モードであり、合成された試験体の最大強度はRCフレームとPCa PC耐震壁の最大強度との累加によって求められることが推論できる。次の機会に、予定している本実験の結果と最大強度に関する検討について報告したい。

6. む す び

既存RCフレーム構造の耐震補強の一つとして、PCa PC耐震壁をPC鋼棒で圧着接合する工法を提案するとともに、予備実験として行った施工実験と加力実験の概要を述べた。これらの結果は次のようにまとめられる。

- ① 提案する耐震補強工法は、1項で指摘した既往の一体打ち耐震壁による耐震補強工法のもつ問題点①～④をある程度解決できる。

- ② 施工実験では、本工法の施工手順および作業上の安全性に問題がないことが確かめられた。
- ③ 加力実験では、RCフレームにPCa PC耐震壁を圧着接合した試験体が、ほぼ累加の最大強度と、特にPCaパネルが普通コンクリートの場合、靱性ある曲げ破壊モードで終わる十分な耐震性能をもつことが確かめられた。しかし、PCaパネルが超軽量コンクリートの場合、いくぶん靱性に欠ける曲げ・せん断破壊モードで終わった。

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
- 2) 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
- 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
- 4) 鳥屋隆志・柴田辰正・奈良 純・望月 洵：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.559～564，1998

【1998年4月10日受付】

刊行物案内

フレッシュマンのためのPC講座

—プレストレストコンクリートの世界—

頒布価格：3 000円(送料400円)

体 裁：A4判，140頁

内容紹介

＝基 礎 編＝

- 基礎 編1 PCとは何か
- 基礎 編2 PCはどんなものに利用できるか
- 基礎 編3 プレストレスの与え方について考えてみよう
- 基礎 編4 プレストレスは変化する
- 基礎 編5 荷重と断面力について考えてみよう
- 基礎 編6 部材に生じる応力度について考えてみよう
- 基礎 編7 プレストレス量の決め方について考えてみよう
- 基礎 編8 PCに命を与えるには(プレストレッシングとその管理)
- 基礎 編9 PCを長生きさせよう

○申込み先：

(社)プレストレストコンクリート技術協会 事務局
〒162-0821 東京都新宿区津久戸町4番6号 第3都ビル5F
TEL：03-3260-2521 FAX：03-3235-3370

＝PC 橋 編＝

- PC 橋 編1 PC橋にはどんなものがあるか
- PC 橋 編2 PC橋を計画してみよう
- PC 橋 編3 PC橋を設計してみよう
- PC 橋 編4 現場を見てみよう

＝PC 建築 編＝

- PC 建築 編1 PC建築とは
- PC 建築 編2 PC建築にはどんなものがあるか
- PC 建築 編3 プレキャストPC建築の設計について考えてみよう
- PC 建築 編4 PC建築でオフィスを設計してみよう

資 料 PCを勉強するときの参考図書
索 引