

プレキャストコンクリートパネルを内蔵する 鉄筋コンクリート耐震壁の実験的研究（その1）

武田 寿一 吉岡 研三

Experimental Study on Structural Behaviors of Precast Concrete Shear Walls (Part 1)

Toshikazu Takeda Kenzoh Yoshioka

Abstract

This report describes experimental behaviors of shear walls composed of frames and precast concrete panels. Two series of tests were carried out. In Series I, sliding surfaces were provided at the boundary planes between columns and beams and experiments were conducted on specimens without transfer of shear forces to these parts. The experimental results showed that the method of column-precast concrete panel joints did not greatly affect the behaviors of the shear walls. Specimens in Series II were composed of rigid frames and precast concrete panels, but no transverse steel bars were provided at the boundaries of columns and precast concrete panels. The main test variable was the amount of reinforcing steel in girders which were expected to resist diagonal tension forces. Under horizontal loading, precast concrete panels produced rotation and side shifting along with which there was room for deformation of girders and columns with little restraint by panels. Therefore, precast concrete walls showed remarkable ductility as compared with ordinary reinforced concrete shear walls.

概 要

本報は、鉄筋コンクリートフレーム内にプレキャストコンクリート製パネル（PC パネル）を組み込んで構成した耐震壁架構の実験に関するものである。実験は2シリーズよりなり、まずIシリーズでは、柱とはりの境界面にすべり面を設けこの部分のせん断力伝達のない試験体について実験を行なった。その結果、PCパネル内蔵の耐震壁の挙動は、柱はり境界部のせん断伝達能力に大きく影響されることが判明した。IIシリーズでは、周辺のフレームを一体とし、PCパネルと柱の境界面には水平方向の接合筋を配筋せず、更に耐震壁中間ばりの主筋のせん断補強効果を期待してこれを変数とした試験体について実験を行なった。PCパネル内蔵壁では、パネルと柱が一種のルーズ接合となっているため、パネルの回転、横ずれと共にフレーム自体が変形する余地が生じ、せん断破壊が生じてもきわめて大きな変形能を示す。また、中間ばりの主筋量が十分であれば、計算で予測したせん断終局強度とほぼ同程度のせん断耐力を保持することが判明した。

1. 序

大規模な建築構造物では施工の合理化をはかり経済性を高めるため、組立鉄筋工法、各種型枠工法、部材のPC化工法などの部分的工業化手法を取り入れることが多い。RC耐震壁のPC化もそのような手法の一つで、在来工法における壁面の施工のやりにくさを補う方法である。一般に、壁面は他の部材に比べて断面が薄く、しかも鉛直方向の平面的ひろがり大きいいため、入念にコ

ンクリートを打ち込まなければならない。そのためには比較的軟練りのコンクリートを使う必要があり、建築構造物に硬練りコンクリートを打設し得ない一つの原因ともなっている。耐震壁のPC化は、このような施工上の難点を緩和し、建物の品質向上、工期短縮をはかろうとするもので、大規模なRC構造物のみならず、高層住宅の戸境壁に用いることを考えている。

このような背景のもとに、RCフレームにPCパネルを組み込んで構成した耐震壁架構の弾塑性挙動を実験的に

検討・把握することを目的として2シリーズの試験を行ったので以下に報告する。

2. シリーズ I の実験

2.1. 試験体

このシリーズでは、PCパネルと柱との接合方法が耐震壁架構の挙動におよぼす影響を検討することを目的として実験を計画した。一般に耐震壁では、柱と壁および柱とはりの境界面で鉛直方向のせん断力伝達が行なわれる。特に柱とはりの境界面のせん断力伝達は全体の中で大きな割合を占めるものと予想される。柱と壁の接合方法の影響をみるためには、この部分のせん断力伝達を除く必要があり、そのため、このシリーズの試験体はすべてはりの両端にすべり面を設けることにした。

表一に、試験体の一覧を、図一にB-1試験体を示す。独立耐震壁の3層分を対象とし、実大の約1/3の大きさである。上述したはりの影響を避けるため、2階、3階の床部分にはりをつくらず、最上部にのみはりがある。このはりの両端にそれぞれ2枚の鉄板を挿入し、その間に摩擦係数の小さいグラファイトグリースを貼付しすべり面とした。壁は1枚のPCパネルで3層分である。PCパネルと柱の接合方法の違いを図二に示す。試験体B-1とB-2のPCパネル～柱の接合筋の形状は同じであるが、試験体B-2では接合筋の間隔がB-1の2倍である。試験体B-3はこの接合筋を配筋せず、柱との境界面のシャコッターのみでせん断力を伝達する。試験体Aは、壁面にPCパネルを用いず従来のRC壁と同じである。但し、この試験体もはりの両端にすべり面があるのは他の試験体と同様である。

試験体の製作は、まず最初にPCパネルを作成し、これを試験体の所定の位置にねかせ、はり、柱、基礎などの配筋をした後、コンクリートを横打ちした。

コンクリートと鉄筋の性質を表二、表三に示す。

2.2. 実験方法

実験方法を図三に示す。最上層はりの中心位置に正負水平力を加えた。表四に示すように、部材角（加力高さにおける相対変位を基礎より上部からの高さで除した値）1, 2, 4, 6, $\times 10^{-3}$ で各2回くり返した後破壊させた。

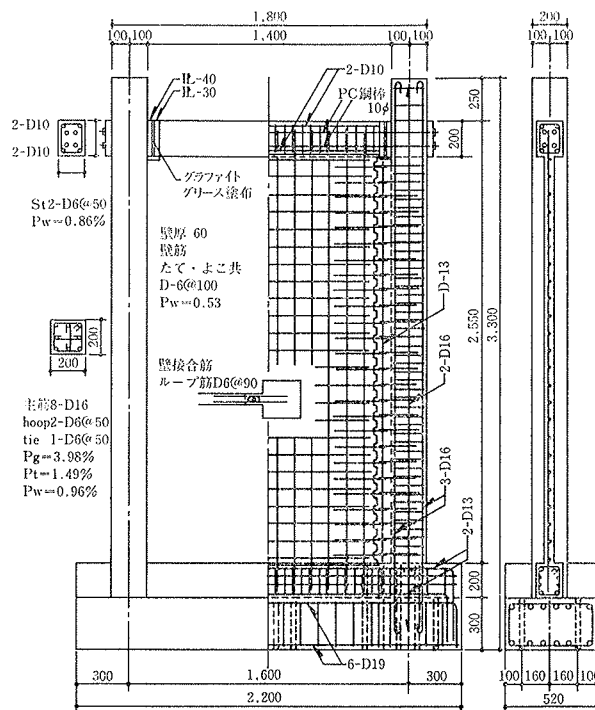
最上層はりの中心位置における水平変位は摺動型変位計(1mm 200 μ)を用いて測定した。また各部の鉄筋のひずみ度は検長1mmの箔ゲージを用いて測定した。

2.3. 破壊状況と荷重～変位曲線

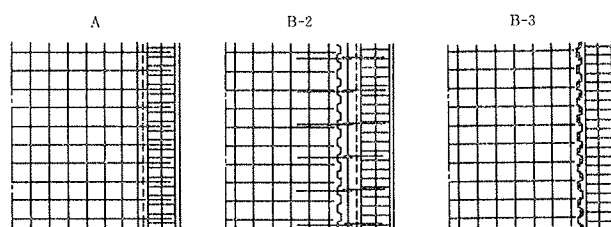
写真一に破壊状況を、図四に荷重～変位曲線を示す。破壊経過はどの試験体もほぼ同じで、引張側柱に曲げひび割れが発生した後、壁全面にせん断ひび割れが発

シリーズ	試験体	壁	壁・柱ジョイント	壁・はりジョイント	備考
I	A	一体壁	(D6@100)	(D6@100)	中間ばりなし 最上層はりの せん断力負担 なし
	B-1	PC壁	シャコッター ループ筋D6@90	D6@100	
	B-2	〃	シャコッター ループ筋D6@180	D6@100	
	B-3	〃	シャコッター ジョイント筋なし	D6@100	

表一 シリーズ I 試験体一覧



図一 試験体 B-1



図二 PC パネルと柱の境界の接合筋

呼び名	σ_m (kg/cm ²)	σ_y (kg/cm ²)	E (10 ⁶ kg/cm ²)	備考
D16	6310	4710	1.83	SD40
D13	6090	4560	1.79	SD40
D6	5450	3720	1.83	SD35

表二 シリーズ I コンクリートの性質

部 位	Fc (kg/cm ²)	$eE_{1/4}$ (10 ⁵ kg/cm ²)	σ_t (kg/cm ²)
柱・はり、一体壁	261	2.14	21.7
PC版	273	2.20	22.7

表三 シリーズ II 鉄筋の性質

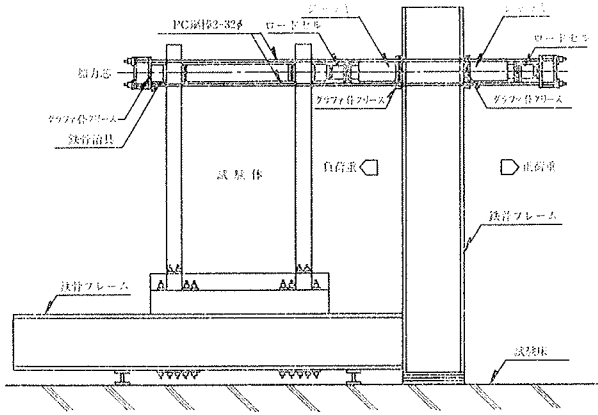


図-3 載荷方法

部材角(10 ⁻³)	1.0	2.0	4.0	6.0	最終破壊
サイクル番号	±1, ±2	±3, ±4	±5, ±6	±7, ±8	+9

表-4 加力サイクル

生した。R=±6×10⁻³のくり返しを行なう途中 R=4.6~5.6×10⁻³程度で正負両方向共、壁面と柱の境界部分のコンクリートが鉛直方向に破壊し、最上部ばりのすべり面のより側プレートが上向にすべり移動した。この時、試験体は最大耐力を示し、その後急激に耐力を喪失する。図-4の荷重～変位曲線包絡線にもみられるように、壁、柱境界面に破壊が生ずる時の変形は各試験体でほぼ同じであるが、壁・柱の接合方法によって耐力が異なる。但し、壁・柱境界面の接合筋量と耐力との間には相関性が認められない。すなわち、接合筋量の最も多いB-1の耐力が最も高いが、接合筋のないB-3の方がRC壁や、B-1の半分の接合筋量のB-2より耐力が大きい。このB-3が、AやB-1、B-2と大差ない挙動を示しているの

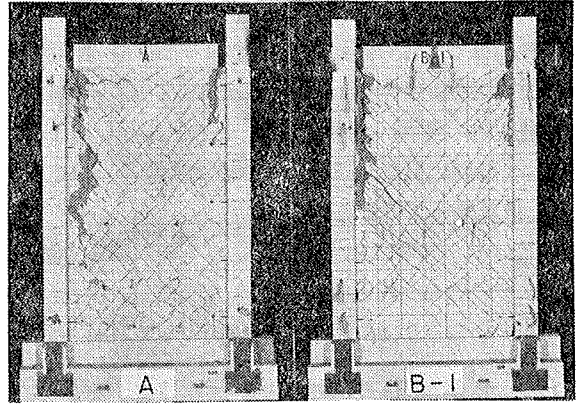


写真-1 シリーズI 破壊状況

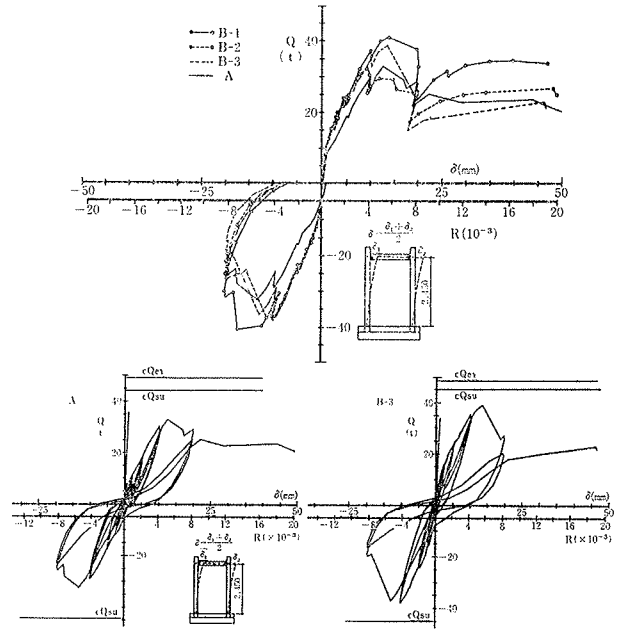


図-4 荷重～変位曲線

が注目される。なお、Aの剛性が低いのは、壁面水平方向に収縮ひび割れが生じていた影響と考えられる。

2.4. ひび割れ荷重、終局荷重

曲げおよびせん断ひび割れ荷重、最大荷重の実験値、およびせん断終局強度、曲げ終局強度の計算値を表-5に示す。計算式は同表中に示す。PC壁にもこの式を適

試験体	実験値			計算値		実験値/計算値	
	τQbc (t)	τQsc (t)	τQm (t)	cQsu (t)	cQev (t)	τQm / cQsu	τQm / cQev
A	8.0(8.3)	9.0(9.4)	33.0(31.4)	44.3	48.9	0.74	0.67
B-1	7.5(7.8)	12.0(12.5)	41.4(43.1)	45.2	47.9	0.92	0.87
B-2	7.1(7.4)	12.1(12.6)	35.1(36.6)	45.2	47.9	0.75	0.71
B-3	7.0(7.3)	12.0(12.5)	37.9(39.5)	45.2	48.6	0.84	0.78

() 内 τ=τQ/(t·lw) (kg/cm)

τQbc: 曲げひび割れ荷重実験値 (正, 負荷重時の平均)
 τQsc: せん断ひび割れ荷重実験値 (正, 負荷重時の平均)
 τQm: 実験最大荷重 (正, 負荷重時の平均)
 cQev: e函数法による降伏荷重

$$cQsu = \left\{ \frac{0.068Pte^{0.23}(Fc+180)}{\sqrt{M/QD+0.12}} + 2.7\sqrt{hPw \cdot h\sigma_{wy} + 0.1\sigma_o} \right\} be \cdot j$$

 ここに be : ΣA/D hPw : hAw/be
 D : 壁の全長 hAw : 壁横筋断面積
 ΣA : 壁と柱のコンクリート断面積の和 hσwy : 壁横筋の降伏点強度
 d : D-Dc/2 Fc : コンクリート圧縮強度
 Pc : 柱のせい σo : 壁に作用する軸方向応力度=0
 j : 7d/8 M : 壁に作用する最大モーメント
 Pte : at/bed Q : 壁に作用するせん断力
 at : 引張側柱の主筋全断面積 t : 壁厚
 lw : 壁両側の柱の中心間距離

表-5 ひび割れ荷重、終局荷重

シリーズ	試験体	壁	壁・柱ジョイント	壁・はりジョイント	はり配筋	Phe (%)	備考
II	RCW	一体壁	(D6@100)	(D6@100)	2-D13 2-D13	1.06	ra g, Ac
	PCW-1	PC壁	シヤコッター ジョイント筋なし	D6@100	3-D16 3-D16	1.73	
	PCW-2	*	シヤコッター ジョイント筋なし	D6@100	3-D13 3-D13	1.10	
	PCW-3	*	シヤコッター ジョイント筋なし	D6@100	2-D10 2-D10	0.41	
	PCW-4	*	シヤコッターなし ジョイント筋なし	D6@100	3-D13 3-D13	1.10	Phe = $\frac{ra g + ra w}{Ac + Aw}$

ra g : はり筋断面積 Ac : はり断面積
 ra w : 壁水平筋全断面積 Aw : 壁鉛直方向断面積
 PCW壁は、aw=0

表-6 シリーズII 試験体一覧

用した。最大荷重実験値はせん断終局強度計算値より 8~26%小さく、はり端に設けたすべり面の影響で通常の RC 壁より、やや低いせん断耐力となっている。なお、最大荷重時の平均せん断応力度 $\tau(=\tau Q_m/(t \cdot l_w))$ 、 t : 壁厚、 l_w : 柱間の長さ) は 34~43 kg/cm² であった。

2.5. I シリーズのまとめ

以上から、水平力をうける PC パネル内蔵壁の挙動は柱とはりのせん断伝達能力に大きく依存し、壁と柱の接合方法の影響は小さいことが明らかとなった。

3. シリーズ II の実験

3.1. 実験計画と試験体

シリーズ I の実験結果を参照して、シリーズ II では柱とはりのコンクリートを一体とするが、PC 壁と柱の境界面における水平方向の接合筋の配筋を行なわない試験体について実験を行なった。柱、はり境界面のせん断力伝達を十分なものにするため、2階、3階の床ばりを復活し、最上部はりにはスラブ付きである。試験体の形状と大きさはシリーズ I とほぼ同じである。

試験体一覧と試験体 PCW-2 を表-6、図-5 に示す。このシリーズでは中間ばりの主筋が耐震壁のせん断補強の役割をはたすものと考えられるためこれを主な実験変数としている。すなわち、表-6 に示すように1層分のはりとはりに含まれる横筋の全断面積をはりと壁のコンクリート断面積で除した値 p_{he} を試験体ごとに変化させている。PC 壁では、はり主筋面積をはりと壁のコンクリート断面積で除した値となる。RCW は通常の耐震壁である。PCW-1, PCW-2, PCW-3は PC パネルの両側にシャコッターを設けたもので、 p_{he} はそれぞれ、1.73, 1.10, 0.41%である。PCW-2 の p_{he} は RCW の $p_{he}=1.06\%$ にほぼ対応する。PCW-4 は、PC パネルの両側にシャコッターのない試験体で、 p_{he} は PCW-2 と同じである。試験体はすべてせん断破壊形になるように設計した。

使用材料の性質を表-7、表-8 に示す。試験体の作成はシリーズ I と同様の手順で行ないコンクリートも横打ちした。

3.2. 実験方法

加力方法はシリーズ I の図-3 と同じである。加力サイクルを表-9 に示す、部材角 R・最上層より中央の相対水平変位をベース上端からの高さで除した値) が 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20×10⁻³ で各 2 サイクルくり返した後破壊させた。

壁の水平変位を感度 1mm 200μ の変位計で、PC パネルのすべり、柱の軸方向変形、壁のせん断変形等は 1mm 500μ, 1000μ の高感度変位計で測定した。各部のひずみ

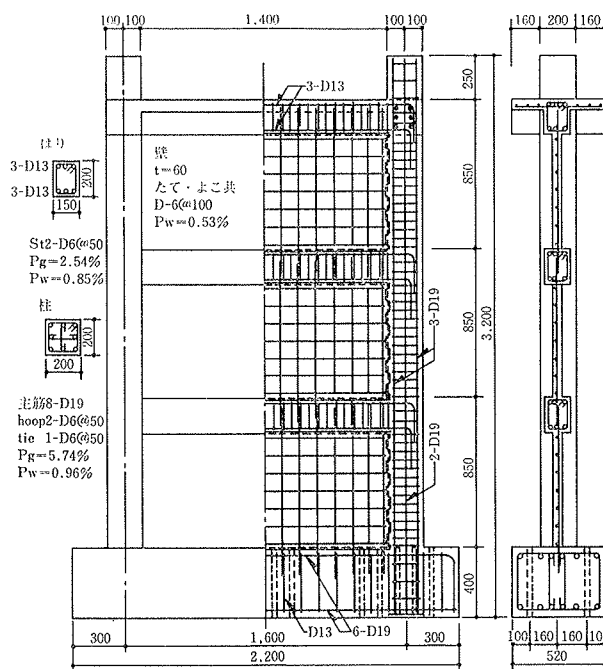


図-5 試験体 PCW-2

部 位	Fc (kg/cm ²)	cE _{1/4} (10 ⁵ kg/cm ²)	σ _t (kg/cm ²)
柱・はり、一体壁	241	1.85	23.7
PC版	268	2.09	22.8

表-7 コンクリートの性質

呼び名	σ _m (kg/cm ²)	σ _y (kg/cm ²)	E (10 ⁹ kg/cm ²)	備 考
D19	5630	3600	1.82	SD35
D16	5640	3520	1.78	SD35
D13	5400	3440	1.85	SD30
D10	4650	2990	1.78	SD30
D6	5580	3650	1.82	SD30

表-8 鉄筋の性質

部材角 R (10 ⁻³)	1.0	2.0	4.0	8.0	12.0	16.0	20.0	最終破壊
サイクル番号	±1	±3	±5	±7	±9	±11	±13	+15
	±2	±4	±6	±8	±10	±12	±14	

表-9 加力サイクル

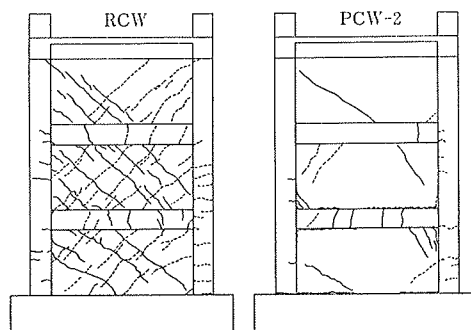


図-6 RCW, PCW-2 R=2×10⁻³におけるひび割れ状況

は箔ゲージを用いて測定した。

3.3. 実験結果と検討

破壊状況

RCW とPCW-2 の $R=2 \times 10^{-3}$ のくり返しにおけるひび割れ発生状況を図-6 に示す。この段階ですでにRCW に多数のせん断ひび割れが発生しているのに対し、PCW-2 では壁に生じたせん断ひび割れはきわめて少ない。他の PC 壁もこれと同様であり、RC 壁に比べ壁面に伝わるせん断力が小さいことを物語っている。RCW, PCW-1, 3, 4 の破壊状況を写真-2 に示す。RCW は-7 サイクル、 $Q=-55.0t$, $R=-7.4 \times 10^{-3}$ rad で最上階壁がせん断すべり破壊した。この時の平均せん断応力度は $\tau=57.3 \text{ kg/cm}^2$ であった。PC 壁では部材角に対応した破壊状況が RCW より軽微で、 $R=12 \times 10^{-3}$ ではせん断ひび割れの拡大部分、コンクリートの剝落部分などはみられない。最終破壊状況は、 p_{he} の相違、シャコッターの有無によって異なる。 p_{he} の大きい PCW-1, PCW-2 では2階の柱部分がせん断破壊し、 p_{he} の小さい PCW-3 では2階床ばりと同様に1階壁面が破壊した。この相違は、中間ばり主筋の伸びに原因するものと考えられる。すなわち、図-7 にみられるように、はり主筋の多い PCW-1 では、主筋の少ない PCW-3 に比べて、はり主筋のひずみが相対的に小さい。従って、中間ばりの軸方向変形も小さいから、その直上の PC パネルの水平移動が大きくなる終局時には柱部分がパネルにおされて強制せん断変形し、最終的にせん断破壊したものと考えられる。これに対し、はり主筋の少ない PCW-3 では、はり主筋が降伏するため、はりの軸方向変形が大きくなり、これにつられて壁の斜めひび割れの増幅が強制され破壊に至っている。シャコッターのない PCW-4 では p_{he} が PCW-2 と同じにもかかわらず PCW-3 に似た破壊を起し、柱のせん断破壊が生じていない。この PCW-2 と PCW-4 の破壊パターンの相違の原因は明らかではないが、PC パネルと柱間の鉛直方向すべりの測定結果が PCW-4 の方がやや大きいことを考慮すると、シャコッターのない方がフレーム内における PC パネルの滑動が生

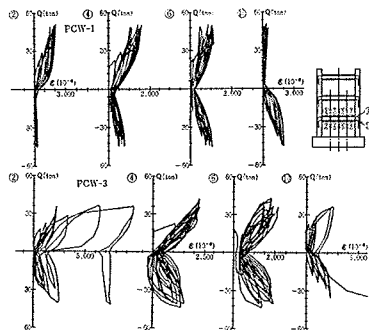


図-7 中間ばり主筋のひずみ分布

じやすく、これが破壊パターンの相違に影響を与えたものと思われる。

ひび割れ荷重、せん断終局強度柱に生ずる曲げひび割れ荷重、壁に生ずるせん断ひび割れ荷重、およ

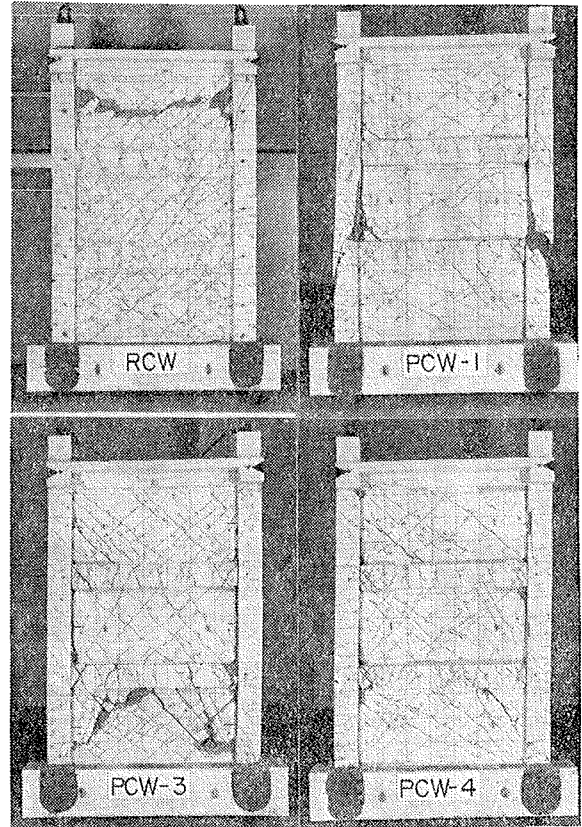


写真-2 破壊状況

試験体	実験値			計算値			実験値/計算値		
	τ_{Qsc} (t)	τ_{Qsc} (t)	τ_{Qm} (t)	c_{Qsu1} (t)	c_{Qsu2} (t)	c_{Qbu} (t)	τ_{Qm} c_{Qsu1}	τ_{Qm} c_{Qsu2}	τ_{Qm} c_{Qbu}
RCW	6.0(6.3)	16.3(17.0)	54.4(56.7)	47.8	57.0	59.7	1.14	0.95	0.91
PCW-1	10.0(10.4)	21.0(21.9)	47.8(49.8)	48.8	64.3	59.7	0.98	0.74	0.80
PCW-2	10.0(10.4)	24.6(25.6)	47.5(49.5)	48.8	58.3	59.7	0.97	0.82	0.80
PCW-3	6.0(6.3)	18.0(18.8)	43.3(45.1)	48.8	48.5	59.7	0.89	0.89	0.73
PCW-4	6.0(6.3)	16.8(17.5)	52.4(54.6)	48.8	58.3	59.7	1.07	0.90	0.88

()内 $\tau = \tau_{Qc} / (t \cdot lw)$ (kg/cm²)

計算式

$$c_{Qsu1} = \left\{ \frac{0.068Pte^{0.23}(Fc+180)}{\sqrt{M/QD+0.12}} + 2.7\sqrt{hPw \cdot h\sigma_{wy} + 0.1\sigma_o} \right\} be \cdot j$$

$$c_{Qsu2} = \left\{ \frac{0.068Pte^{0.23}(Fc+180)}{\sqrt{M/QD+0.12}} + 2.7\sqrt{Phe \cdot \sigma_{hey} + 0.1\sigma_o} \right\} be \cdot j$$

$$c_{Mbu} = at \sigma_{ylw} + 0.5 \Sigma v_{aw} \cdot v_{\sigma_{wy}} \cdot lw + 0.5Nlw$$

記号は以下のものを除き表-5に同じ

Phe : 表-6の値

v_{aw} : 壁のたて筋1本の断面積

σ_{hey} : Phe 算出に用いた鉄筋の降伏点強度

$v_{\sigma_{wy}}$: 壁のたて筋の降伏点応力度

σ_y : 柱主筋の降伏点応力度

N : 壁に作用する軸方向力=0

表-10 ひび割れ荷重、終局強度

び最大荷重の実験値とせん断終局強度、曲げ終局強度の計算値を表-10に示す。同表に示した c_{Qsu1} 式は表-5のIシリーズと同じで、壁のせん断終局強度式である。 c_{Qsu2} 式は、 c_{Qsu1} 式と同じ式であるが、せん断補強筋比として表-6の p_{he} を用いる。

PC 壁の実験最大荷重 τ_{Qm} は RCW の τ_{Qm} よりやや小さい傾向がみられる。PC 壁のなかでははり主筋の少ない PCW-3 の τ_{Qm} が最も小さい。せん断終局強度 c_{Qsu1} は、RC 壁、PC 壁の τ_{Qm} とほぼ対応する。 c_{Qsu2}

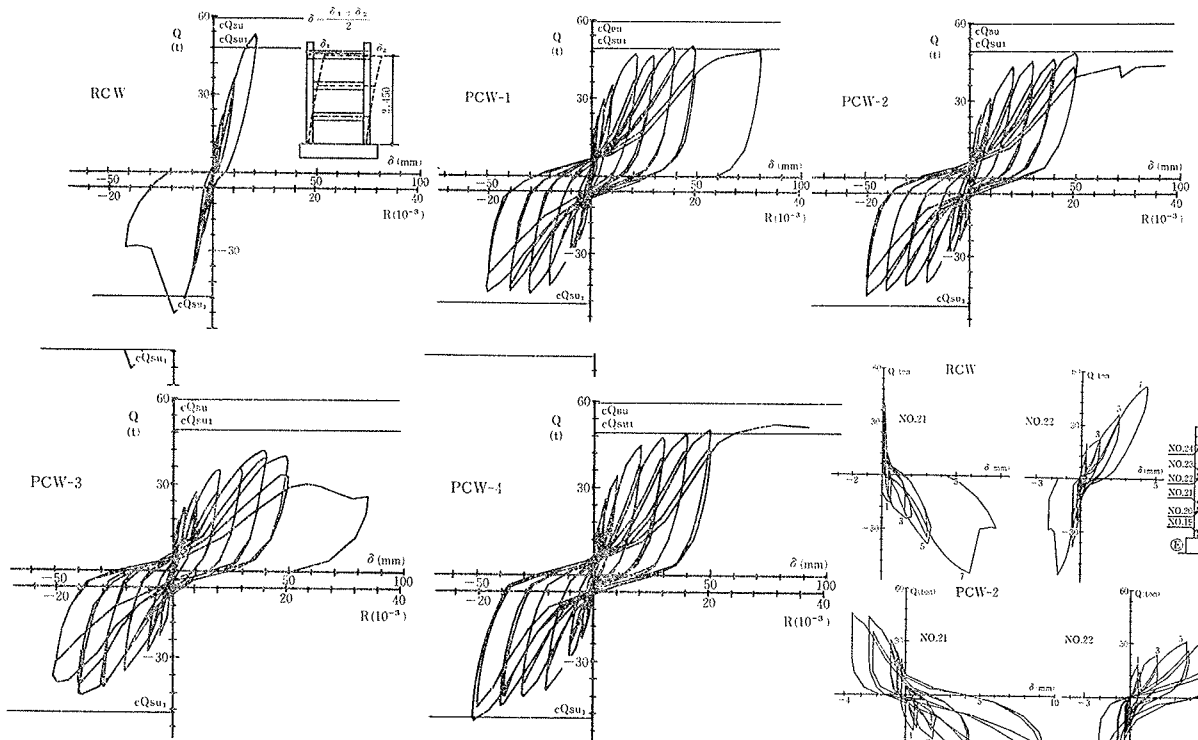


図-8 シリーズII 荷重～変位曲線

図-9 壁のせん断変形

は p_{he} が大きい試験体では実験最大荷重よりかなり大きな値となり、せん断終局強度を予測するには不適當である。 cQ_{su1} と cQ_{su2} を比べると、PCW-3 では両者がほぼ同じであるが、他の PC 壁では cQ_{su1} より cQ_{su2} の方が大きい。PC 壁のなかで PCW-3 がやや強度、変形性状に劣る状況にあることを勘案すると、PC 壁と柱との水平接合筋がない場合は、少なくとも cQ_{su2} が cQ_{su1} を上回る程度にはり主筋を決定する必要がある。

荷重～変位曲線

図-8 に各試験体の荷重～変位曲線を示す。RC 壁に比べて PC 壁の変形性能が優れていることが明らかである。PC 壁のなかでは、はり主筋の多い PCW-1、シャコッターのない PCW-4 の強度、変形性状が良好である。はり主筋の少ない PCW-3 は、強度、変形性状ともやや劣る。先に述べた破壊形との組合せを考えると、強度変形性状が良く、柱がせん断破壊しない PCW-4 が最も理想的ということになる。この点に関しては今後更に検討する必要がある。

なお、各試験体の弾性剛性は試験体を一体として計算した剛性とほぼ等しい。

せん断変形

RCW, PCW-2 の 2 階部分対角線方向変位の測定結果を図-9 に示す。全体曲げの影響が少なければ、せん断変形とみなせるものである。図中の数字はサイクル数であるが、RCW に比べ PCW-2 の変形が大きい。これは、

PCW-2 では PC パネルがフレーム内で回転・横移動するため、柱・はり部分がフレーム型変形するのに対し、RCW ではフレーム部分の変形が壁面のせん断変形に制約されるためである。PC 壁と RC 壁の変形性能の相違は壁とフレームのルーズ接合が、フレーム変形を許容することに原因がある。

4. まとめ

以上の結果から次のことが指摘される。

- (1) 柱とはり境界面におけるせん断力伝達能力が、耐震壁の強度、変形性状に大きな影響をおよぼす。
- (2) PC パネルをフレーム内に組み込み、パネルと柱の接合筋がない耐震壁架構は、通常の RC 壁よりやや低いせん断終局強度を示すが、変形能が非常に大きい。
- (3) PC パネルと柱とは一種のルーズ接合であるため、PC パネルの回転・横移動が可能で、柱・はりにフレーム変形する余地を与える。従って、通常の耐震壁に比べきわめて大きな変形能を示すことになる。
- (4) PC パネル内蔵の耐震壁は $cQ_{su1} \leq cQ_{su2}$ となるようにはり主筋を配筋すれば cQ_{su1} とほぼ同程度以上のせん断強度を有し、かつ変形能に優れた挙動を示す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形能、(昭和56)