

論文 PCa・PC 耐震壁の接合方法と破壊性状

望月洵^{*1}・小野里憲一^{*2}・鳥屋隆志^{*3}・清水大亮^{*4}

要旨: PCa・PC フレームに PCa パネルをいろいろな接合方法で組み込んだ PCa・PC 耐震壁について実験を行い、その破壊性状を捉えるとともに、簡略モデルによる最大強度の解析を試みている。試験体のパラメーターは、PCa パネルの水平接合部の接合方法、PCa パネルの分割とその接合方法、および出入口開口の有無である。実験結果は、いずれの試験体も予測した強度と変形性能をもつことを示している。最大強度の実験値と解析値との比較から強度式が十分妥当であることが認められた。

キーワード: PCa・PC 耐震壁、接合部の接合方法、簡略モデル、最大強度の強度式

1. はじめに

筆者らは、PCa・PC のフレームに PCa パネルを組み込んだ PCa・PC 耐震壁について実験と解析を行い、PCa・PC 耐震壁が耐震要素として十分有効であることを示した。^{1), 2)} これらの PCa・PC 耐震壁の PCa パネルは、PCa パネルを貫通する PC 鋼棒によって上・下梁に軽く圧着接合されている。この接合方法は、PCa パネルの転倒防止、および PCa・PC 耐震壁の曲げ補強を兼ねた目的で設けられたが、施工性の点で問題が残る。このため、既往の接合方法による PCa・PC 耐震壁の力学的性能の検討が必須な課題として求められている。

本研究は、これらの点を考慮して、PCa パネル水平接合部の接合方法、分割された PCa パネルの内部鉛直接合部のディテール、および出入口開口の有無をパラメーターにした PCa・PC 耐震壁の実験を行い、その破壊性状を捉えとともに、簡略モデルによる最大強度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、PCa パネルの水平接合部が鋼板接

合による 98PCWW の 2 体、コッターによる 98PCWC の 2 体、水平接合部は 98PCWW と同じであるが PCa パネルの内部鉛直接合部が PC 鋼棒によって圧着接合された 98PCWP の 1 体、および水平接合部は鋼板接合で、出入口開口をもつ 98PCWWO の 2 体の計 7 体である。PCa パネルは、柱との鉛直接合部で、目地モルタルの滑落を防ぐため、柱に深さ 10mm だけ貫入されているが、コッターや接合筋は使われていない。図-1 に 98PCWW-1, 2 と 98PCWWO-2 の形状と配筋を示す。他の試験体の形状と配筋も図-1 と変わらない。図-2 に各接合部の詳細を示す。配筋は、試験体が曲げまたは曲げ・せん断破壊モードで終わるように設計されている。モードの制御は主に柱の PC 鋼棒の断面積の選択によって行われた。表-1 に試験体の諸性質と実験結果を示す。

2.2 加力と計測の方法

加力は変位制御で漸増する正負繰返し力とし、その作用位置は上梁の中央高さである。加力サイクルは、最大強度または層間変形角 $R=10.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで $R=1.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ ごと 2 回、それ以降は $R=2.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ ごと 1 回とした。変位は、上・下梁の相対水平変位と柱脚側面の滑り変位が変位計で、また柱の PC 鋼棒の上下梁内端位置に

*1 工学院大学教授 工学部 建築学科 工博 (正会員)

*2 O.R.S 建築設計事務所 工修 (正会員)

*3 ドービー建設工業 (株) 技術部 技術課 工修 (正会員)

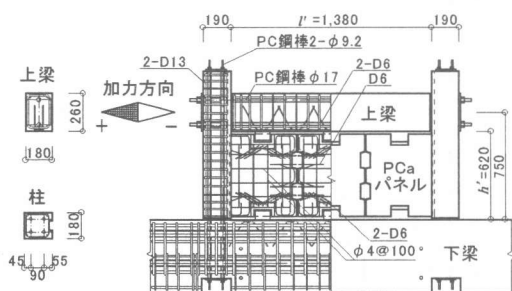
*4 工学院大学大学院 工学研究科 建築学専攻

3.1 破壞性状

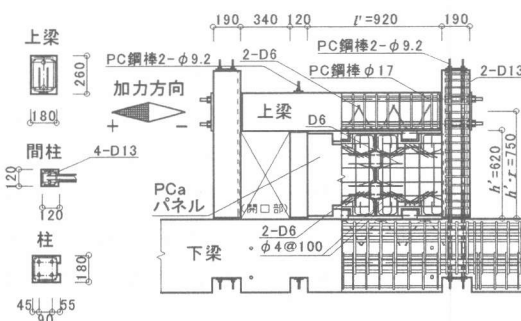
(1) 98PCWW-1, 2

PCa パネルの水平接合部に鋼板接合、内部鉛

3. 実験結果

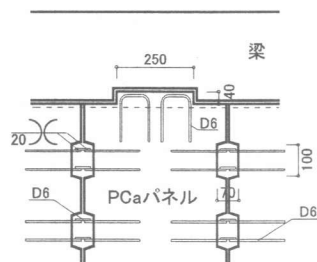


(a) 98PCWW-1, 2

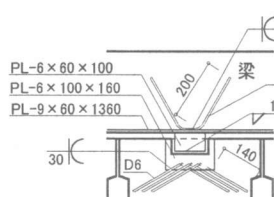


(b) 98PCWW0-2

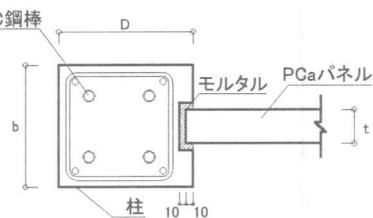
図-1 試験体の形状と配筋（単位：mm）



(a) 水平接合部と内部鉛直接合部
(コッター)



(b) 水平接合部
(鋼板接合)



(c) 鉛直接合部

図-2 各接合部の詳細（単位：mm）

表-1 試験体の諸性質と実験結果

試験体	柱										PCaパネル					Qexp		Rb	
	b	D	Pg(1)	Pg(2)	$\sigma_y(1)$	$\sigma_y(2)$	σ_B	Np	目地 σ_B	l'	h'	te	σ_B	目地 σ_B		+	-	+	-
	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[cm]	[cm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[kN]		[$\times 10^{-3}$ rad]	
98PCWW-1									51		62					504	496	20以上	6.8
98PCWW-2							45			138		5				469	451	12.5	9.0
98PCWC-1	18	19	2.26	0.78	329 (D13)	1334 ($\phi 9.2$)	43	196(4- $\phi 9.2$)	53		57		27			564	591	14.3	11.6
98PCWC-2																551	623	13.5	9.3
98PCWP*1							39			138		4				441	452	10.3	8.6
98PCWWO-1*2	18 18	19 12	2.26 2.97	0.78 0.62			53 37	196(4- $\phi 9.2$) 98(2- $\phi 9.2$)	51		62		37			359	363	20以上	20以上
98PCWWO-2*2	18 12	19 12	2.26 4.45	0.78 0.92			53 27	196(4- $\phi 9.2$) 98(2- $\phi 9.2$)		92		5	27			360	392	20以上	15.3

【記号】 b:柱幅 D:柱せい $P_g(1)$:柱全主筋比 $P_g(2)$:柱脚部の全主筋比 $\sigma_y(1)$:柱主筋の降伏点強度 $\sigma_y(2)$:PC鋼棒の降伏点強度 σ_c :コンクリート、モルタルの1軸圧縮強度 l :PCa パネル内法幅 h :PCa パネル内法高 t_e :有効厚 $t_e=t-\phi$ (t :PCa パネル厚) $-\phi$ (スース径) P_s :PCa パネルの補強筋比 N_p :部材の全圧着力 Q_{exp} :実験による最大強度 R_b :変形限界(0.8 Q_{exp} 時の層間変形角)

【共通】 PCa パネル:補強筋 タテヨコダブルφ4@100 σ_y :509 PCa パネル:定着筋, 周辺補強筋 D6 σ_y :280
柱, 間柱:せん断補強筋 D10@60 σ_y :367 上・下梁, PCa パネル内の定着筋 D6 σ_y :280

*1 98PCWP の 3 枚の PCa パネルは PC 鋼棒(2-D7.1, Np=78)によって横締めされている。

*2 98PCWWO は上段が柱, 下段が間柱を示す。

直接合部にコッターを用いた試験体である。98PCWW-2 は、 $R=1.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で PCa パネルに斜めひびわれ、鉛直接合部、接合鋼板の周辺にひびわれが生じた。 $R=2.0 \sim 3.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で PCa パネルの全域に斜めひびわれ、柱脚に曲げひびわれが生じ、 $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で最大強度に達した。その後、引張柱脚部の浮き、PCa パネルの滑り、PCa パネル隅角部に剥離が生じ、強度が緩やかに低下した。図-3 に最終ひびわれ状況とカー変形関係を示す。カー変形関係は曲げ・せん断破壊モードを示した。98PCWW-1 の破壊性状は、大要、98PCWW-2 と同じであった。

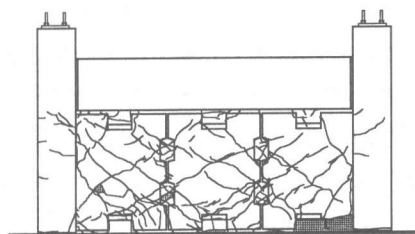
(2) 98PCWC-1, 2

水平接合部、内部鉛直接合部ともにコッターを用いた試験体である。 $R=1.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で PCa パネルに斜めひびわれ、鉛直接合部にひびわれが生じた。 $R=2.0 \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で PCa パネルの斜めひびわれが全域に広がり、柱の頭部、脚部に曲げひびわれが生じた。最大強度には $R=5.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で達した。その後、引張柱脚部の浮き、両側柱の全長に曲げひびわれが生じ、強度が徐々に低下した。図-4 に最終ひびわれ状況とカー変形関係を示す。カー変形関係は曲げ・せん断破壊モードであった。98PCWC-2 の破壊性状は、大要、98PCWC-1 と同じであった。

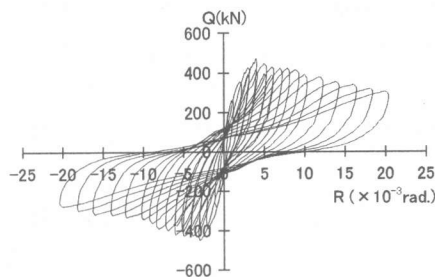
(3) 98PCWP

水平接合部に鋼板接合を用い、3枚の PCa パネルを PC 鋼棒で水平方向に圧着接合して一体化した試験体である。 $R=1.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で PCa パネルに斜めひびわれ、接合鋼板の周辺にひびわれが生じた。 $R=2.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で柱脚に曲げひびわれ、PCa パネルの水平 PC 鋼棒に沿って細かな斜めひびわれが生じた。 $R=6.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で最大強度に達した。その後、両柱の頭部に曲げひびわれ、引張柱脚部の浮き、さらに PCa パネルの滑りが生じ、強度が徐々に低下した。図-5 に最終ひびわれ状況とカー変形関係を示す。カー変形関係は曲げ・せん断破壊モードを示している。

(4) 98PCWWO-1, 2

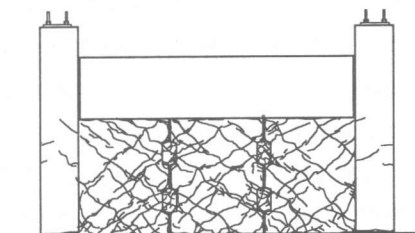


(a) 最終ひびわれ状況

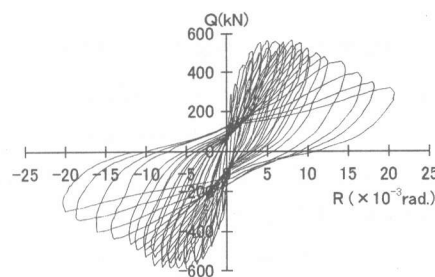


(b) カー変形関係

図-3 カー変形関係 (98PCWW-2)



(a) 最終ひびわれ状況



(b) カー変形関係

図-4 カー変形関係 (98PCWC-1)

出入口開口をもち、水平接合部に鋼板接合、内部鉛直接合部にコッターを用いた試験体である。また PCa パネルには $120 \times 180(\text{mm}^2)$ または $120 \times 120(\text{mm}^2)$ の間柱が一体打ちされ、間柱は $2\phi 9.2$ の PC 鋼棒で上・下梁に圧着接合されてい

る.98PCWWO-2 は, $R=1.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ でPCa パネルに斜めひびわれが,さらに接合鋼板の周辺と内部鉛直接合部にもひびわれが生じた. $R=2.0 \sim 5.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で引張柱,圧縮柱,間柱の頭部,脚部に曲げひびわれが生じ, $R=6.0 \times 10^{-3} \text{rad.}$ で最大強度に達した.その後,引張柱脚部の浮き,PCa パネルの滑り,および内部鉛直接合部に沿って PCa パネルに剥離が生じ,強度が緩やかに低下した.図-6 は最終ひびわれ状況とカー変形関係である.カー変形関係は曲げ破壊モードを示している.98PCWWO-1 の破壊性状は,大要,98PCWWO-2 と同じであった.

すべての試験体に共通して,鋼板接合部では帯板 (PL-9×60×1360) の少しの浮きが観察されたが,溶接部の破断はなく,またコッターの著しい破壊も生じなかった.上下梁の剛性が大きいいため,PCa パネルの分割とその鉛直接合部の接合方法の破壊性状への影響は明らかでなかった.無開口 PCa・PC 耐震壁の PC 鋼棒のひずみは,圧縮柱脚部で曲げ降伏に近い状態に,引張柱脚部で引張降伏に近い状態にあった.

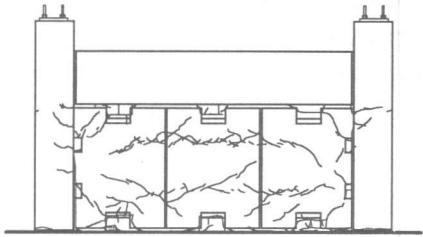
以上の破壊性状は,無開口および有開口 PCa・PC 耐震壁とも,PCa パネルと圧縮柱の滑りの発生を除いて RC 耐震壁と大きく変わらない.

4. 簡略モデルによる最大強度の解析

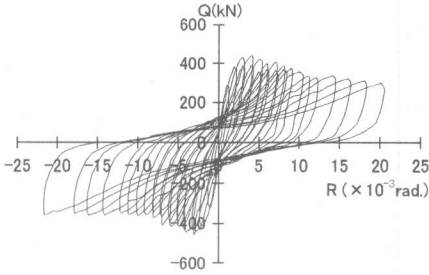
4.1 無開口 PCa・PC 耐震壁の解析

筆者らは,PCa パネルが PC 鋼棒で軽く圧着接合される PCa・PC 耐震壁の簡略モデルによる最大強度式を提案し,これが妥当であることを示した.ここでは他の接合方法にも対応できるように拡張した強度式の概要を示す.図-7 は最大強度時に仮定される静的許容応力場である.このとき,部材は次の状態にあると仮定される.

- 1) PCa パネルは傾斜角 θ の圧縮ストラット a, c を形成し,圧縮ストラット a は $0.63 \sigma_B$ の値で降伏している.圧縮ストラット c は有効でないと除去されるが,このストラット c の水平接合部に存在するコッターまたは鋼

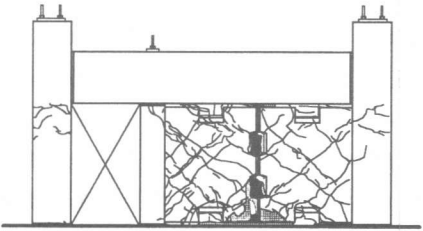


(a) 最終ひびわれ状況

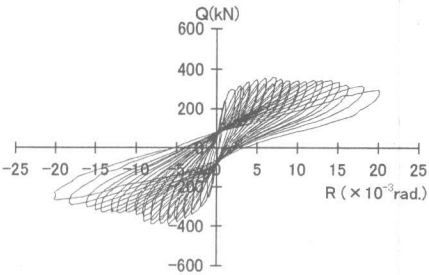


(b) カー変形関係

図-5 カー変形関係 (98PCWP)



(a) 最終ひびわれ状況



(b) カー変形関係

図-6 カー変形関係 (98PCWWO-2)

板接合のせん断抵抗は有効とする.

- 2) 引張柱は引張降伏し,圧縮柱は曲げ降伏している.
- 3) 水平接合部の定着筋は引張降伏している.
- 4) 水平接合部および鉛直接合部のせん断力と

接合部の滑り強度の差 ΔQ_{wh} および ΔQ_{wv} は、それぞれ圧縮柱および下梁によって抵抗される。

最大強度 Q_{cal} はこの静的許容応力場とつりあう荷重として求められる。最大強度式は表-2 のようにまとめられる。柱脚のせん断力および PCa パネルの水平接合部と鉛直接合部のせん断力は、接合部のディテールに応じて表-3 の滑り強度で限界づけられる。この結果、存在応力と滑り強度の大小関係に応じて表-4 の Case が生じる。Case 3 と 4 は水平方向の力のつりあいだけを満たしている。このため、 Q_{cal} は第 1 近似値として意味をもつ。他のつりあいを満たすために、圧縮ストラットの傾斜角を離散的に変えて、 $spQ_c \approx Q_c$ を満たすように解を修正する。傾斜角の初期値として、RC 耐震壁で得られた推定式³⁾による値を用いる。PCa パネルを 3 分割した影響は、試験体の上・下梁の剛性が大きいいため、これを省略し、1 枚パネルとして扱う。

4.2 出入口開口をもつ PCa・PC 耐震壁の解析

図-8 の (a) および (b) は、それぞれ正加力時と負加力時に仮定される簡略モデルの応力

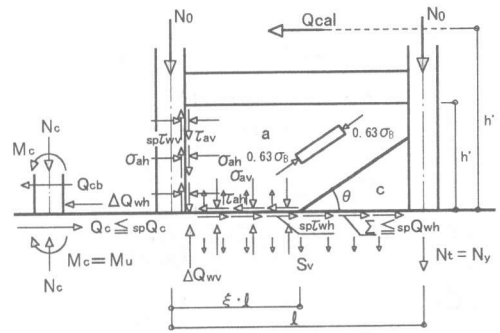


図-7 簡略モデル（無開口）

状態である。引張柱と PCa パネルに関する仮定は 4.1 のモデルと同じであるが、圧縮柱と間柱について次の仮定が付加される。

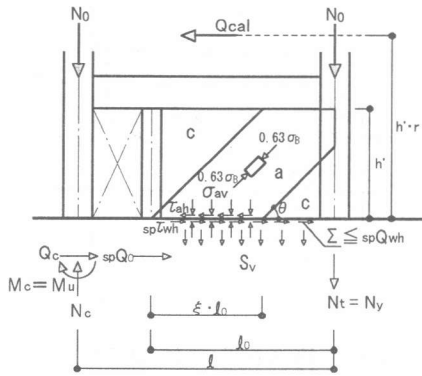
正加力時において、圧縮柱の上・下端は曲げ降伏している。間柱は圧縮軸力を負担しないが圧着力 N_{p0} に μ を乗じた $spQ_0 = \mu \cdot N_{p0}$ の滑り抵抗をもつ。負加力時において、間柱は N_{y0} の値で引張降伏している。

4.3 解析結果

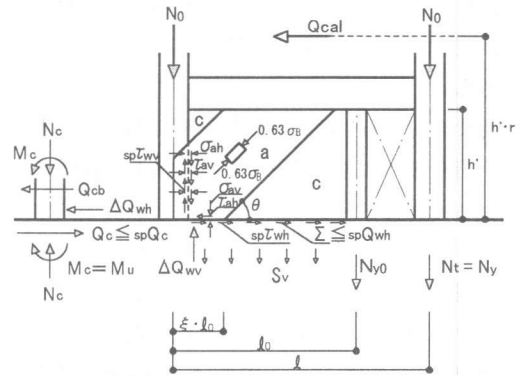
表-5 に解析結果を示す。表は簡略モデルによる最大強度の解析がほぼ妥当であることを示

表-2 無開口 PCa・PC 耐震壁の最大強度式

$Q_{cal} = Q_w + Q_{cb}$	…(1)	Q_{cal} : 最大強度
$Q_w = T_{ah} \cdot \xi \cdot \ell$	…(2)	Q_w : 圧縮ストラットのせん断力
$Q_{cb} = \sqrt{2M_u \cdot S_{ah}}$	…(3)	Q_{cb} : 圧縮柱脚部のせん断力
$\xi = \eta \left(\frac{T_{ah}}{S_{av}} \right) + \sqrt{\eta^2 \left(\frac{T_{ah}}{S_{av}} \right)^2 + \chi}$	…(4)	M_u : 圧縮柱下端の曲げ降伏強度
$\chi = \frac{2}{S_{av} \cdot \ell} \left[\left(\eta - \frac{(T_{av} - spT_{wv}) \cdot D}{2 \cdot S_{ah} \cdot \ell} \right) \sqrt{N_y \cdot D \cdot S_{ah} + \frac{S_v \cdot \ell}{2} + N_0 + N_y \left(1 + \frac{D}{2\ell} \right)} \right]$	…(5)	N_c : 圧縮柱下端の軸力、 N_0 : 定軸力
$\eta = -\frac{h' \cdot r}{\ell}$		N_y : 引張柱下端の軸降伏強度
式(4)で、 $\xi > 1.0$ の場合、 $\xi = 1.0$ とする。		ξ : 圧縮ストラットの水平有効係数
$M_c = M_u (N_c)$	…(6)	S_{ah} : $\sigma_{ah} \cdot t = 0.63 \sigma_B \cdot \cos \theta \cdot \cos \theta \cdot t$
$N_c = 2N_0 + N_y - S_{av} \cdot \xi \cdot \ell + S_v \cdot \ell - \frac{(T_{av} - spT_{wv})}{S_{ah}} \cdot \sqrt{N_y \cdot D \cdot S_{ah}}$	…(7)	S_{av} : $\sigma_{av} \cdot t = 0.63 \sigma_B \cdot \sin \theta \cdot \sin \theta \cdot t$
		T_{ah} : $\tau_{ah} \cdot t = 0.63 \sigma_B \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot t$
		T_{av} : $\tau_{av} \cdot t = 0.63 \sigma_B \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot t$
		S_v : 水平接合部接合筋の降伏強度の上・下方向成分
		$spT_{wv} = \mu \cdot S_{ah}$
		D : 柱せい



(a) 正加力時



(b) 負加力時

図-8 簡略モデル (有開口)

表-3 接合部の滑り強度

柱の滑り強度: $sp Q_c = \mu(N_c + \alpha \cdot N_y) + \frac{1}{2} \lambda \cdot N_y$
$\mu = 0.6, \lambda = 0.4, \alpha = N_p / N_y, N_p$: 柱の全圧着力, N_y : 降伏軸力
鉛直接合部の滑り強度: $sp T_{wv} = \mu \cdot S_{ah} \cdot \mu = 0.7$
水平接合部の滑り強度 (コッター):
$sp Q_{wh} = 0.10 \Sigma A_{sc} \cdot \sigma_B + \Sigma A_s \cdot \sigma_y + \mu \cdot S_{av} \cdot \xi \cdot \ell^{[4]}, \mu = 0.7$
水平接合部の滑り強度 (鋼板接合):
$sp Q_{wh} = \Sigma Q_s + \mu \cdot S_{av} \cdot \xi \cdot \ell$
$\mu = 0.7, \Sigma Q_s$: 鋼板接合部の滑り強度の和

表-4 最大強度 Q_{cal} の算定

Case 1
$Q_w < sp Q_{wh}, Q_c = Q_{cb} < sp Q_c: Q_{cal} = Q_w + Q_{cb}$
Case 2
$Q_w > sp Q_{wh}, Q_c = Q_{cb} + \Delta Q_{wh} < sp Q_c: Q_{cal} = Q_w + Q_{cb}$
Case 3
$Q_w < sp Q_{wh}, Q_c = Q_{cb} > sp Q_c: Q_{cal} = sp Q_c + Q_w$
Case 4
$Q_w > sp Q_{wh}, Q_c = Q_{cb} + \Delta Q_{wh} > sp Q_c: Q_{cal} = sp Q_c + sp Q_{wh}$

している。98PCWVO-1,2 はコンクリート強度に大きな差があるにも関わらず実験値、解析値とも同じ程度の値を示している。これは、最大強度が滑り強度に依存していることに起因している。

5. 結び

本研究の結びは次のようにまとめられる。

1) PCa・PC 耐震壁はいずれの接合方法において

表-5 解析結果

試験体名	Q_{exp} (kN)		Q_{cal} (kN)	Q_{exp} / Q_{cal}	
	+	-		+	-
98PCWW-1	504	496	488	1.03	1.02
98PCWW-2	469	451	488	0.96	0.93
98PCWC-1	564	591	576	0.98	1.03
98PCWC-2	551	623	576	0.96	1.08
98PCWP	441	452	504	0.88	0.90
98PCWVO-1	359	-	411	0.87	-
	-	363	449	-	0.81
98PCWVO-2	360	-	402	0.90	-
	-	392	358	-	1.10

も、有効な耐震性能をもっている。

2) 簡略モデルによる最大強度式は PCa・PC 耐震壁の最大強度を、大要、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
- 2) 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
- 3) 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, C-2, 構造IV, pp205-206, 1997.9
- 4) 日本建築センター: 壁式鉄筋コンクリート造設計施工指針, 1996