

## 論文

## [2146] PC+PCa 耐震壁に関する実験的研究

正会員○望月 洵 (工学院大学工学部)

正会員 小野里憲一 (O. R. S 事務所)

中村 勝 (工学院大学大学院)

倉持春夫 (ドーピー建設工業)

## 1. はじめに

本研究でいうPC+PCa耐震壁とは、PC接合されたPCaフレームに、壁板としてPCaパネルを適当な接合方法で組み込んだ耐震壁をいう。このような耐震壁は、PC構造の高層化に伴い、構造の保有耐力を確保する上で必要な耐震要素であり、施工上および省力上、要請される構造方式でもある。さらに、強度、剛性、および破壊モードの制御が容易である特長をもっている。PCa耐震壁については多くの実験的研究および実施例があるが、PC+PCa耐震壁については望月(重)による先駆的研究[1]の他にあまり見あたらない。PC+PCa耐震壁での問題は、PCaパネルの分割とPCaフレームとの接合方法によってどのような抵抗機構が形成されるかを捉え、そしてその強度と変形の評価方法を確立することである。

本研究は、曲げ破壊モードで終るPC+PCa耐震壁に限定して、これらの問題を縮小試験体による実験およびマクロモデルによる解析から、解明することを目的としている。

## 2. 実験計画

## 2.1 試験体

試験体のパラメータは、PCaパネルの分割とその接合方法である。図-1の左半分にPCaフレーム(試験体名 PCF-1, 2)の形状と配筋を、右半分にPCaパネルの圧着方法を示す。試験体PCWA-1, 2は、図-1のPCaフレームに図-2(a)のPCaパネルを組み込み、水平・鉛直目地でコッター筋をビード溶接している。試験体PCWB-1, 2は図-1のPCaフレームに図-2(b)のPCaパネルを組み込み、PC鋼棒 $\phi 11$ によって圧着接合している。試験体PCWC-1, 2は、図-1のPCaフレームに図-2(c)のPCaパネル

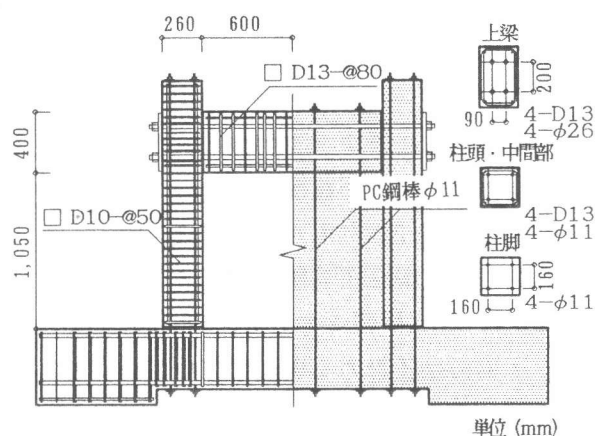


図-1 試験体(PCF-1, 2)とPCaパネルの圧着方法

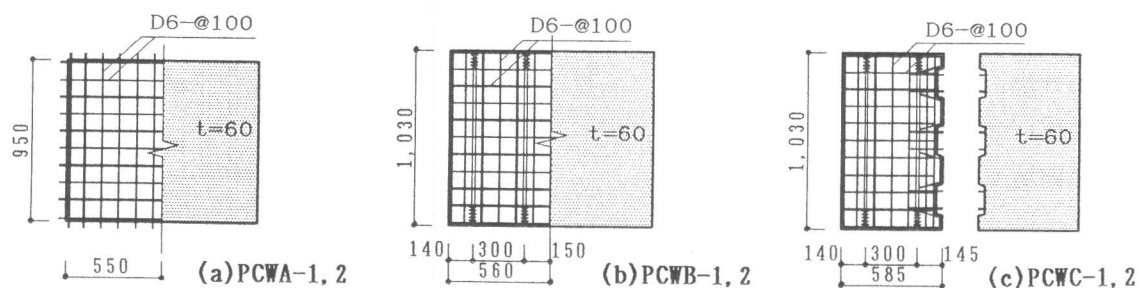


図-2 PCaパネル 単位(mm)

表-1 試験体の諸性質と実験結果

| 試験体    | PCaパネル        |                                      |                                      | 側柱                   |                                |                                      |                                      | 実験結果              |                                   | $\xi$ | 破壊モード<br>(結果)   |
|--------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------|-----------------|
|        | $P_s$<br>(%)  | $\sigma_y$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_B$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{Pg}$<br>(%) | $\tau_{Pg}$<br>(%)             | $\sigma_y$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_B$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | $Q_{exp}$<br>(tf) | $R_b$<br>( $\times 10^{-3}$ rad.) |       |                 |
| PCF-1  | —             | —                                    | —                                    | 1.34<br>4- $\phi$ 17 | 2.10<br>4- $\phi$ 17<br>4- D13 | ( $\phi$ 17)                         | 494                                  | 39.2              | 25.0以上                            | —     | 曲げ<br>破壊<br>モード |
| PCF-2  | —             | —                                    | —                                    | 0.56<br>4- $\phi$ 11 | 1.31<br>4- $\phi$ 11<br>4- D13 | 10124<br>( $\phi$ 11)                | 541                                  | 22.4              |                                   | 0.26  |                 |
| PCWA-1 | 0.53          | 3568                                 | 270                                  |                      |                                | 11314<br>(D13)                       | 445                                  | 51.3              |                                   | 0.24  |                 |
| PCWA-2 | D6- $\phi$ 10 |                                      | 271                                  |                      |                                | 467                                  | 515                                  | 53.2              | 18.0                              | 0.28  |                 |
| PCWB-1 | 0.53          | 11314                                | 300                                  | 0.56<br>4- $\phi$ 11 | 1.31<br>4- $\phi$ 11<br>4- D13 | 3871                                 | 465                                  | 74.8              |                                   | 0.28  |                 |
| PCWB-2 |               |                                      |                                      |                      |                                | 469                                  | 465                                  | 69.6              | 25.0以上                            | 0.34  |                 |
| PCWC-1 |               |                                      |                                      |                      |                                | 468                                  | 469                                  | 69.6              |                                   | 0.32  |                 |
| PCWC-2 |               |                                      |                                      |                      |                                | 468                                  | 468                                  | 72.3              |                                   | 0.32  |                 |

【共通】 PCaパネル内法寸法:  $L' \times h' = 120(\text{cm}) \times 105(\text{cm})$ , 壁厚:  $t = 6(\text{cm})$ , 反曲点高さ:  $h' \cdot r = 125(\text{cm})$   
 側柱寸法:  $b \times D = 26(\text{cm}) \times 26(\text{cm})$ , 側柱帯筋:  $P_w = 1.09(\%)$   $\sigma_y = 3792(\text{kgf/cm}^2)$

を組み込み、PC鋼棒4-11 $\phi$ によって圧着接合している。圧着力の大きさはPCaフレーム、パネルともPC規準による0.85Pyである。PCWB, CのPCaフレームとPCaパネルとの水平・鉛直目地にはモルタルを注入しているが、コッター筋は省略されている。なお、PCWCのPCaパネルの中央目地は、2枚のパネルの一体化を計るため、図のようなシャー・コッターを設け、さらにコッター筋をビード溶接している。

表-2 材料強度と圧着力

| 試験体    | モルタル<br>の $\sigma_B$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 圧着力(tf) = 0.85Py |      |       |  |
|--------|------------------------------------------------|------------------|------|-------|--|
|        |                                                | PCaパネル           | 側柱   | 上梁    |  |
| PCF-1  | 262                                            | —————            | 69.0 | 161.4 |  |
| PCF-2  | 239                                            |                  | 27.4 |       |  |
| PCWA-1 | 425                                            |                  |      |       |  |
| PCWA-2 | 448                                            |                  |      |       |  |
| PCWB-1 | 339                                            | 27.4             | 27.4 |       |  |
| PCWB-2 | 558                                            |                  |      |       |  |
| PCWC-1 | 416                                            |                  |      |       |  |
| PCWC-2 | 442                                            |                  |      |       |  |

PCWAのPCaパネルのコッター筋による接合は一体打ち耐震壁に準じたものであり、PCWB, CのPCaパネルのPC鋼棒による接合は、目地モルタルの剝離防止、耐震壁の曲げ強度の制御、およびPCaパネルの横倒れ防止を意図したもので、圧着接合による摩擦抵抗は二次的なものと考えている。PCaパネルの分割は、運搬上、2ないし3分割が必要とされることから、これを考慮したものである。耐震壁の組立ては次の手順によった。

- ① PCaフレームおよびPCaパネルを設置し、PC鋼棒で仮締めする。
- ② 接合目地にモルタル(マスターフロー)を注入する(養生1日)。
- ③ 側柱と下梁を圧着接合する。
- ④ 上・下梁とPCaパネルを圧着接合する。
- ⑤ 側柱と上梁を圧着接合する。
- ⑥ グラウト(早強セメント、GF-630)をシースに注入する(養生7日以上)。

なを、下梁には圧着力を導入していない。これは、下梁の断面が極めて大きく、また上梁の長さが小さいことを考慮したためである。

表-1に試験体の諸性質を、表-2にモルタルの強度、PC鋼棒の圧着力を示す。表の破壊モードの指標値 $\xi$ は、試験体の寸法、材料の強度、および加力方法を用いて一体打ちとして扱い、筆者らの破壊モードの判別式[2]によった。

## 2.2 加力と計測の方法

図-3に加力装置および歪計測位置を

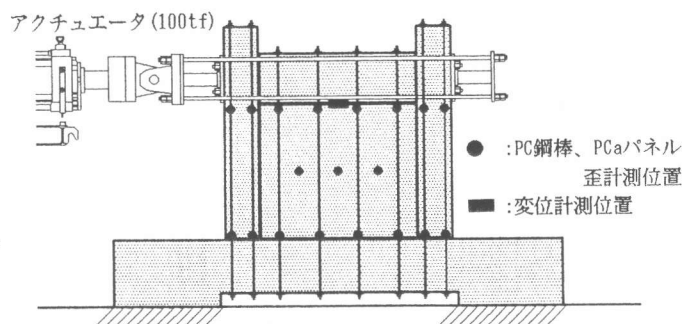


図-3 加力装置と計測位置

示す。加力は変位制御の方法とし、最大能力100tfのアクチュエータを用いた上梁位置に作用する水平(正負)交番力とした。ただし、引き加力の場合に60tfを超えると、押し加力のための交番力に変更した。加力のサイクルは、原則として、層間変形角 $R=1.0 \times 10^{-3}$ rad.ごとに2回とした。計測は、変位計による層間変形角、歪ゲージによるPC鋼棒における上・下梁の各内端位置の歪、およびPCaパネルの中央位置における上下方向の歪の計測である。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 破壊経過

a)PCF-1,2 両試験体ともPC接合されたPCaフレームの典型的な破壊経過を示した。図-4はその力-変形曲線である。側柱下端の曲げ降伏が先行し、その後、側柱上端に大きな曲げ亀裂が生じて安定な平滑域を形成した。最大層間変形角は $R_b=25.0 \times 10^{-3}$ rad.以上であった。

b)PCWA-1,2 両試験体とも側柱のPC鋼棒の下梁部分に意図的にグラウトを注入しなかったため、最大荷重時に側柱下端に滑りが生じ、急激に荷重が低下したが、その後 $Q=52$ tf前後の値を保持し、正負の滑り変形を繰り返した。最大滑り変形は、15mm程度で最大層間変形角は $R_b=25.0 \times 10^{-3}$ rad.以上であった。亀裂の発生状態は、一体打ち耐震壁の既往の実験で観察されたものとほぼ同じで、側柱上端および中間部の曲げ亀裂、PCaパネルの対角領域にはほぼ $45^\circ$ 方向に傾斜角をもつ斜め引張亀裂、下梁上端近傍の滑りに伴うPCaパネルの破壊である。最終的にはPCaパネルの対角領域の上・下隅角部の圧壊で破壊に達した。

c)PCWB-1,2 図-5 (a), (b)に最終時亀裂状況と力-変形曲線を示す。最大強度が $Q=60$ tfを超えたため、以降を押し加力のための交番力とした。両試験体とも典型的な曲げ破壊モードを示し、 $R_b=18.0 \times 10^{-3}$ rad.までは安定な平滑域を形成した。亀裂の発生状態は、側柱上端および中間部の曲げ亀裂、引張側柱下端目地の水平亀裂およびPCaパネルの対角領域のほぼ $45^\circ$ 方向の傾斜角をもつ斜め引張亀裂

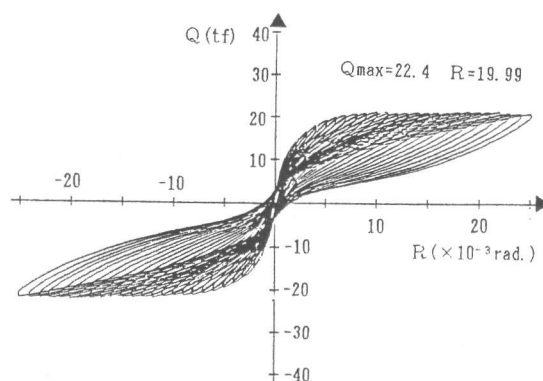
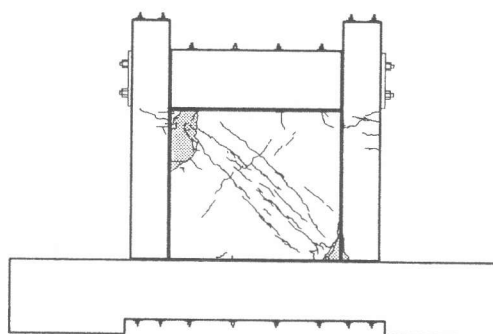
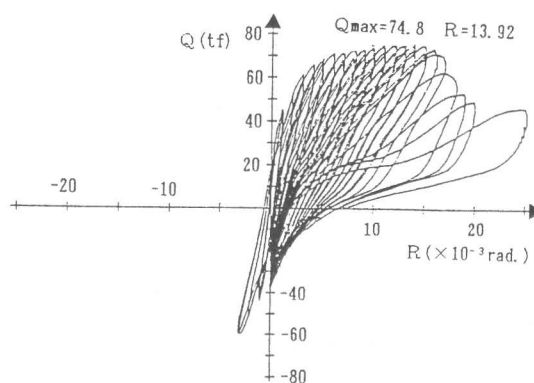


図-4 力-変形曲線(PCF-2)



(a)最終時亀裂状況

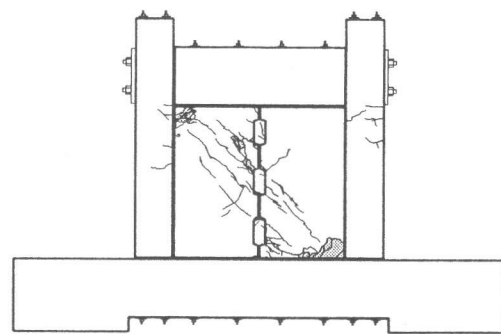


(b)力-変形曲線

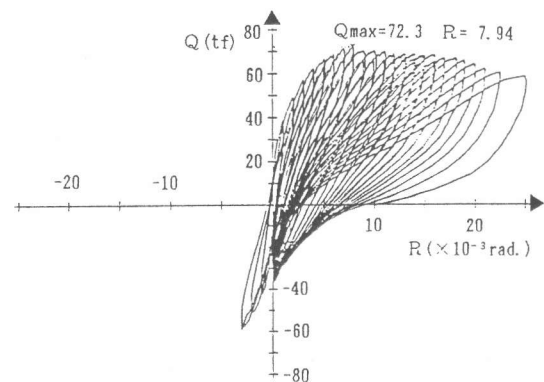
図-5 PCWB-1の結果

である。側柱の曲げ変形にもとづく肌すきが、圧縮の対角領域と交差する対角領域の上・下隅角部の鉛直目地に生じたが、モルタルの滑落は最終時以前にはなかった。下梁上端の水平目地には曲げによる肌すきが多少生じたが、上梁下端の水平目地にはほとんど生じなかった。全体的に圧縮側柱のせん断抵抗とPCaパネルの対角領域をストラットとするアーチ作用で抵抗していると観察された。最終的には、PCWAと同様、PCaパネルの圧壊で破壊に達した。最終時に2mm程度の側柱下端、および3～5mm程度のPCaパネルの滑りが観察されたが、力-変形曲線に荷重の急激な低下などは見られなかった。

d)PCWC-1, 2 図6-(a), (b)に最終時亀裂状況と力-変形曲線を示す。両試験体ともPCWBと同じ破壊性状を示した。PCaパネル中央接合部にはこれに起因する亀裂は生ぜず、一枚パネルとして機能したと観察された。



(a)最終時亀裂状況



(b)力-変形曲線

図-6 PCWC-2の結果

### 3. 2 PC鋼棒の歪

図-7はPCWB-1のPC鋼棒で計測された伸歪の分布と層間変形角の関係である。 $R=5.0 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ で引張側柱下端はほぼ降伏歪に達した。その後の層間変形角の増大に対応して、PCaパネルの引張側柱サイドのPC鋼棒も降伏歪に達し、引張側柱のPC鋼棒の降伏域が上方に進展している。ここで、PC鋼棒の降伏歪は残留歪0.2%から決まる応力に対する歪である。図-7の歪分布はPCWCの試験体についても、大要、共通している。PCaパネルで計測された歪( $\epsilon = -144.5 \times 10^{-6}$ )は、PC鋼棒の圧着力がコンクリートに導入されていることを示していた。力-変形曲線の $R=1.0 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ に対応する割線剛性は、PCWAおよびPCWB, Cについて

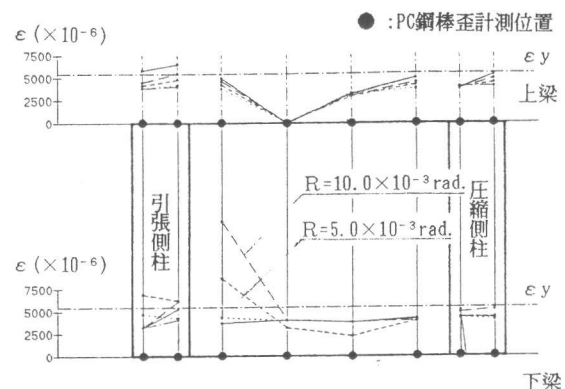


図-7 PC鋼棒の歪分布(PCWB-1)

について平均値で、それぞれ $K_s=343.2 \text{ (tf/cm)}$ および $K_s=323.6 \text{ (tf/cm)}$ であった。これから、PC鋼棒によるPCaパネルの圧着接合は、コッター筋による接合とほぼ同じ程度の剛性を与えているといえる。表-1に最大強度、および最大層間変形角等の実験結果を示す。表中の $\delta$ の値は破壊モードを表す指標で、筆者らは $\delta \leq 0.4$ をもって曲げ破壊モードと規定している。

#### 4. 最大せん断強度の解析

実験で観察された破壊性状は、PC+PCa耐震壁が一体打ち耐震壁の既往の実験で観察されたものと同様な抵抗機構を形成していることを示している。このため、解析方法として筆者らが提案している次の方法を用いて、最大せん断強度の解析を行う。

a) マクロモデルによる強度解析[3]

b) マクロモデルによる弾塑性解析[4]

解析方法a)は、図-8のモデルⅠを次の仮定のもとで極限解析の下界定理にもとづき、反復計算を行うものである。

1) 上・下梁は剛体で破壊しない。

2) 側柱の上・下端は降伏している。その中間部は降伏しているか、弾性である。

3) PCaパネルは圧縮ストラット①、②および③と縦・横補強筋に置換される。

ストラット①は、降伏しており、その降伏応力は $0.63\sigma_B$ である。ストラット②は、交差する側柱の領域が曲げ降伏しているため、横補強筋とつりあう応力状態にある。ストラット③は、交差する側柱の領域が引張降伏しているため除かれる。

4) 縦・横の補強筋はすべて降伏している。ただし、ストラット③と側柱位置で交差する横補強筋は除かれる。

一方、解析方法b)は図-9のマクロモデルⅡを、次の仮定のもとで増分解析するものである。

1) 上・下梁は、剛体で破壊しない。

2) 側柱は剛体+バネの要素に分割される。

3) PCaパネルは傾斜角 $45^\circ$ をもつ圧縮ストラットと縦・横補強筋に置換される。圧縮ストラットは図-10(a)の構成則をもち、軸力バネおよび補強筋は図-10(b), (c)の構成則をもち。

解析にあたって、PCWAについては縦・横補強筋としてコッター筋を用い、PCWB, Cについては横補強筋は省略し、縦補強筋としてPC鋼棒4-11φを考慮した。側柱の降伏強度の評価には、PC鋼棒を降伏強度をもつ完全弾塑性として扱い、圧着力にもとづくコンクリートの元圧縮応力およびPC鋼棒の元引張応力を考慮している。なお、PCFの解析は、側柱上・下端に曲げ降伏を仮定し、作用軸力および降伏強度を反復計算で修正する方法で行った。

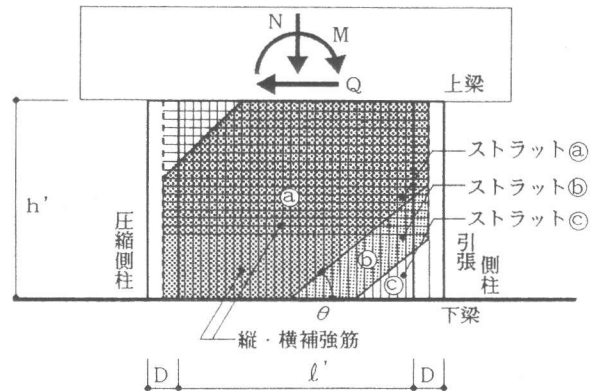


図-8 マクロモデルⅠ

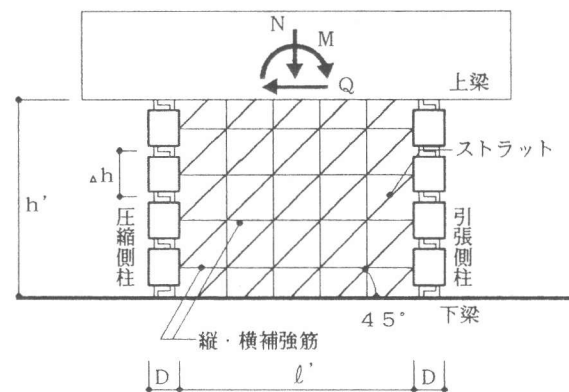


図-9 マクロモデルⅡ

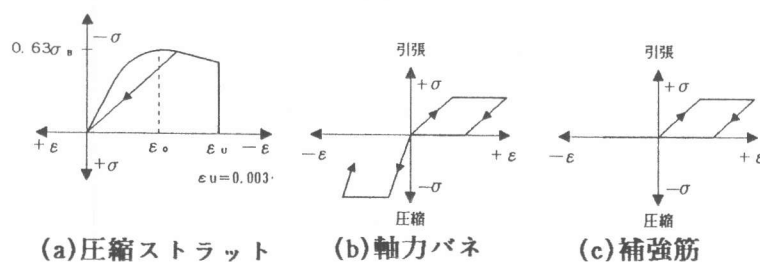


図-10 構成則

表-3 に解析値および実験値/解析値の比を示す。

図-1 1 は解析方法a)による応力状態の例である。

図-1 2 は解析方法b)による最大強度時の応力状態と変形図である。PC鋼棒の降伏状態は実験結果とよく対応している。また、図-1 3 は力-変形曲線の例である。最大強度近傍までは的確に捉えている。以上の結果は、解析方法a)およびb)で仮定した抵抗機構にもとづくモデルが、極めて妥当であることを示している。ただし、試験体の破壊モードが曲げ破壊モードと限定されており、また試験体数も少ないため、上の結論を一般化するためには、せん断破壊モードの試験体を含む多くの実験が必要である。

## 5. 結び

本研究で、曲げ破壊モードで終るPC+PCa耐震壁について、PCaパネルの分割と接合方法をパラメータにして実験および解析を試みた。これらの結果は、次のようにまとめられる。

- 1) PC+PCa耐震壁はいずれも十分な靱性と強度をもつ耐震壁として機能した。
- 2) PC+PCa耐震壁の強度は、一体打ち耐震壁のマクロモデルを修正したモデルによつて的確に捉えることができる。
- 3) PC鋼棒によつて圧着接合されたPCaパネルをもつ耐震壁は構造的に有効なものと判断されるが、その性状は正負交番加力のもとで再確認する必要がある。

| 記号                        |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| B Pg: 側柱下端主筋比             | R b: $0.8 Q_{exp}$ と包絡線の |
| T Pg: 側柱上端および             | 交点に対応する R                |
| 中間部主筋比                    | $\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度  |
| P s: 壁補強筋比                | $\sigma_y$ : 鉄筋およびPC鋼棒の  |
| P y: PC鋼棒規格降伏点強度          | 降伏点強度                    |
| $Q_{cal}$ : モデル I による解析値  | $\xi$ : 圧縮ストラットの         |
| $Q_{ana}$ : モデル II による解析値 | 有効幅係数                    |
| $Q_{exp}$ : 実験値           |                          |

## 参考文献

- [1] 望月重: P・Sプレファブ耐震壁のせん断抵抗、地震工学国内シンポジウム、1966
- [2] 望月洵・小野里憲一: 連層耐震壁の破壊モードの判別式、コンクリート工学論文集、Vol113、No2、pp559-564、1991.4
- [3] 望月洵・小野里憲一: 連層耐震壁のマクロモデルとその解析法、コンクリート工学工次論文集、Vol1.1、No1、pp121-132、1990.1
- [4] 鈴木章司・望月洵・小野里憲一: 連層耐震壁のスケルトンカーブの解析 その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、C、構造II、pp397-398、1991.9

表-3 解析結果

| 試験体    | $Q_{exp}$<br>(tf) | $Q_{cal}$<br>(tf) | $\frac{Q_{exp}}{Q_{cal}}$ | $Q_{ana}$<br>(tf) | $\frac{Q_{exp}}{Q_{ana}}$ |
|--------|-------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| PCF-1  | 39.2              | 39.1              | 1.00                      | —                 | —                         |
| PCF-2  | 22.4              | 21.5              | 1.04                      | —                 | —                         |
| PCWA-1 | 51.3              | 63.4              | 0.81                      | 60.0              | 0.86                      |
| PCWA-2 | 53.2              | 63.8              | 0.83                      | 60.1              | 0.89                      |
| PCWB-1 | 74.8              | 78.6              | 0.95                      | 72.4              | 1.03                      |
| PCWB-2 | 69.6              | 78.5              | 0.89                      | 72.4              | 0.96                      |
| PCWC-1 | 69.6              | 77.2              | 0.90                      | 70.7              | 0.98                      |
| PCWC-2 | 72.3              | 77.6              | 0.93                      | 70.8              | 1.02                      |

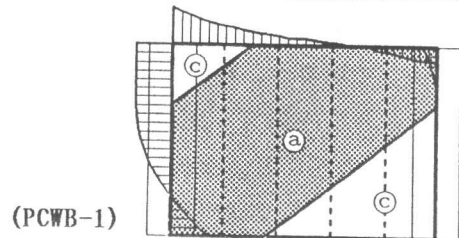


図-1 1 モデル I による応力状態

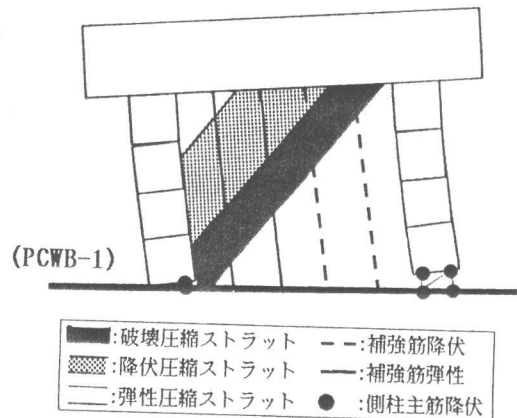


図-1 2 モデル II による応力状態

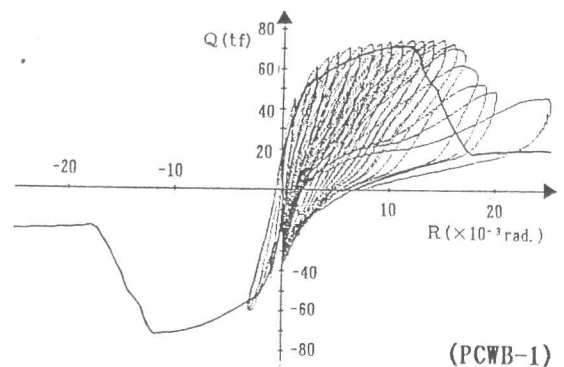


図-1 3 モデル II による力-変形曲線