

論文 大口径 PRC 杭の耐震性能に及ぼす横補強筋量の影響

長江拓也<sup>\*1</sup>・岸田慎司<sup>\*2</sup>・柳瀬高仁<sup>\*3</sup>・林静雄<sup>\*4</sup>

要旨:耐震設計法は限界状態に基づく性能規定型の設計法に移行していく趨勢にあり,杭においても終局性状はもとより,地震経過後における機能維持,補修の可能性などを視野に入れた資料の蓄積が望まれる。プレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)杭は,軸方向に異形PC鋼棒と異形鉄筋を併用することにより,従来のPHC杭に対して曲げ耐力および靱性能を高めることを目的としている。本研究では,その使用頻度が高くなっている大口径杭を対象としており,杭径600mmのPRC杭に関して長期軸力作用下における曲げせん断実験を行った。結果として,適当な横補強筋量を確保することにより,せん断ひび割れ幅の抑制および変形性能の増大が期待できることを明らかにし,その値を示した。

キーワード:PRC杭,大口径,横補強筋量,せん断ひび割れ幅,変形性能

1. はじめに

耐震設計法は限界状態に基づく性能規定型の設計法に移行していく趨勢にあり,杭においても終局に対する安全性はもとより,機能維持,補修の可能性などを視野に入れた資料の蓄積が望まれる。

プレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)杭は,軸方向に異形PC鋼棒と異形鉄筋を併用しており,従来のPHC杭に対して曲げ耐力および変形性能の向上が期待できる。筆者らは,昨年,杭径300mmのPRC杭を対象に曲げせん断実験を行い,変形性能のみでなくせん断ひび割れ幅にも検討を加えた。<sup>1)</sup>

一方,近年においては建物の大型化に伴い大口径杭の使用頻度が高くなってきており,絶対値が問題となるせん断ひび割れ幅の資料などは依然として非

常に不足しているのが現状である。そこで本研究では杭径600mmの実大PRC杭を対象に曲げせん断実験を行い,せん断ひび割れ幅および変形性能に横補強筋量が及ぼす影響を調べた。

2. 実験概要

表-1に試験体一覧を示す。表-1の脚注に異形鉄筋全主筋比 $P_{g1}$ ,異形PC鋼棒全主筋比 $P_{g2}$ ,横補強筋容積比 $\rho_s$ を定義している。試験体の立面および杭体断面を図-1に示す。

試験体として,肉厚比 $t/D$ がJIS規格にあるPHC杭と等しい杭径600mm( $t/D=0.15$ )の実大PRC杭3体を計画した。曲げ耐力は従来のPHC杭C種の1.5倍程度である。

表-1 試験体一覧

| 試験体名      | D (mm) | t (mm) | M/QD | 杭種  | 異形鉄筋   | $P_{g1}$ (%) | 異形PC鋼棒 | $P_{g2}$ (%) | 横補強筋           | $\rho_s$ (%) | $w\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_e$ (N/mm <sup>2</sup> ) | N (kN) |
|-----------|--------|--------|------|-----|--------|--------------|--------|--------------|----------------|--------------|----------------------------------|---------------------------------|--------|
| 6IV-44-P  | 600    | 90     | 3    | IV種 | 16-D22 | 4.29         | 16-U10 | 0.87         | $\phi 6.5@50$  | 0.44         | 615                              | 5.4                             | 1372   |
| 6IV-95-P  | 600    | 90     | 3    | IV種 | 16-D22 | 4.29         | 16-U10 | 0.87         | $\phi 9.5@50$  | 0.95         | 593                              | 5.4                             | 1372   |
| 6IV-151-P | 600    | 90     | 3    | IV種 | 16-D22 | 4.29         | 16-U10 | 0.87         | $\phi 12.0@50$ | 1.51         | 635                              | 5.4                             | 1372   |

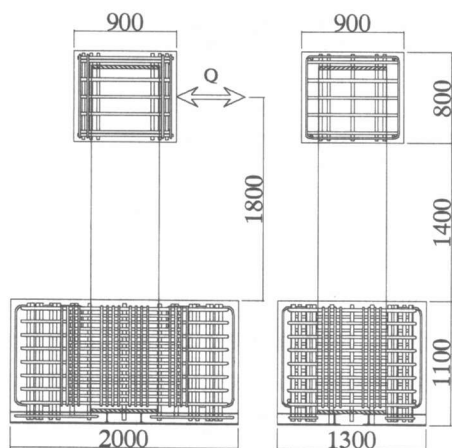
D:杭径 t:肉厚  $P_{g1}$ :異形鉄筋全主筋比= $A_{s1}/A_p$   $P_{g2}$ :異形PC鋼棒全主筋比= $A_{s2}/A_p$   $A_{s1}$ :異形鉄筋全断面積  $A_{s2}$ :異形PC鋼棒全断面積  $A_p$ :杭体断面積  $\rho_s$ :横補強筋体積比= $4A_w/(D \cdot s)$   $A_w$ :横補強筋一本の断面積 s:横補強筋のピッチ  $w\sigma_y$ :横補強筋の降伏強度  $\sigma_e$ :有効プレストレス N:軸力

\*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 修士(工学) (正会員)

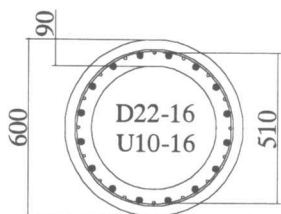
\*2 東京都立大学助手 建築学科 博士(工学) (正会員)

\*3 佐藤工業 技術研究所 工修

\*4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)



立面図

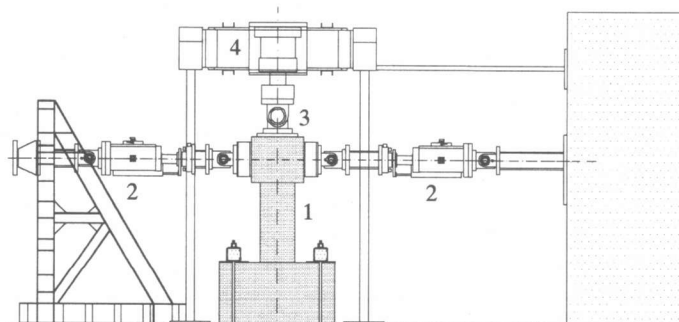


断面図

図-1 試験体

横補強筋は降伏強度 $w\sigma_y=600\text{N/mm}^2$ 程度とし、量を3段階に変化させたが、ピッチは50mmで統一した。

試験体は杭頭部を想定しており、下スタブがパイルキャップに相当する。今後、施工段階において杭頭の杭体中空部分に対するコンクリートの中詰が一般化することを前提に、全試験体の杭体中空部分全域には普通強度コンクリートを充填し、パイ



1: 試験体 2: 980kNアクチュエーター(両端ピン支持) 3: 2940kNアクチュエーター(先端ピン支持) 4: リニアローラーウェイ

図-2 加力装置図

表-2 材料特性(鋼材)

| 種別          | $\sigma_y$<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | $\sigma_t$<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | $E_s$<br>( $\text{kN/mm}^2$ ) |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| D22         | 352                               | 538                               | 182                           |
| U10         | 1375                              | 1433                              | 210                           |
| $\phi 6.5$  | 615                               | 723                               | 217                           |
| $\phi 9.5$  | 593                               | 709                               | 209                           |
| $\phi 12.0$ | 635                               | 791                               | 211                           |

$\sigma_y$ :降伏強度  $\sigma_t$ :引張強度  $E_s$ :ヤング係数

ブレーターで十分締め固めた。下スタブへの埋め込み長さは杭径の1.6倍程度であり、せん断スパン比(M/QD)は杭頭固定とした時の杭頭部におけるせん断力とモーメントの関係を検討して3.0を採用した。

試験体に作用させる軸力は、標準的と考えられるN値50程度の支持地盤を想定し、長期許容支持力(長期軸力)に相当する1372kNとした。

杭体に使用したコンクリートは、遠心成形後オートクレーブ養生した圧縮強度90.1~97.6  $\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートである。中詰に使用したコンクリートの圧縮強度は23.9  $\text{N/mm}^2$ である。杭体に使用した鋼材の力学的性質を表-2に示す。軸方向の異形鉄筋には竹節のSD345を用いた。横補強筋は鉄線を熱処理して降伏強度を調整したものである。

## 2.2加力および変位測定

加力装置は図-2に示す片持ち梁形式とし、試験体に一定軸力を加えた状態で、下スタブ固定端から1800mm上方の自由端に水平力を加えた。水平力

は、図に示すように両端ピン支持のアクチュエーターにより左右から1/2づつ加えた。水平変位および軸方向変位を上スタブの中心(水平加力位置)において測定しており、水平変位を下スタブ固定端から加力点までの高さで除した値を部材角とする。加力は正負交番漸増繰り返し加力とし、部材角 $R=\pm 1/400\text{rad}$ で1回繰り返した後、 $R=\pm 1/200\text{rad}$ ,  $\pm 1/100\text{rad}$ ,  $\pm 1/67\text{rad}$ ,  $\pm 1/50\text{rad}$ ,  $\pm 1/33\text{rad}$ ,  $\pm 1/25\text{rad}$ お

よび  $\pm 1/20\text{rad}$  で各2回繰り返した。

### 2.3 せん断ひび割れ幅測定

試験体表面に想定した測定範囲(図-3の網掛け部分)内に生じたせん断ひび割れについて、そのひび割れ幅をひび割れに沿って60mm間隔で測定した。ひび割れ幅はひび割れに対して直交方向に測定した値であり、曲げひび割れから斜めに進展したひび割れも測定範囲内においてはせん断ひび割れとみなして検討の対象とした。測定にはマイクロスコープ(最小目盛:0.02mm)を用いた。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊過程および最終破壊状況

表-3に実験結果及び計算値一覧を示す。最大耐力時のひび割れ状況および最終破壊状況を図-3、図-4に示す。水平荷重と水平変位の関係および軸方向変位と水平変位の関係を図-5、図-6に示す。水平荷重-水平変位関係には、平面保持を仮定した曲げ解析より求めた最大耐力計算値を付記した。なお、各試験体とも下スタブと杭体との接合状態に緩みなど部材角に影響する状態は生じなかった。

まず固定端付近から曲げひび割れが発生し、上

部に向かって分散していった。圧縮側のかぶりコンクリートは $R=1/67\text{rad}$ のサイクルで圧壊が始まり、荷重がピークに達した。最大耐力は、平面保持を仮定した曲げ解析値を15%程度上回った。

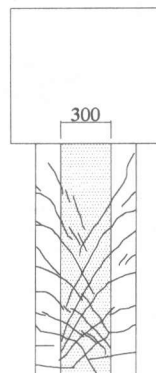
横補強筋体積比 $\rho_s=0.44\%$ の試験体6IV-44-Pは最大耐力に達する前にせん断ひび割れ幅が拡大する傾向にあり、その後コンクリートの圧縮破壊と軸方向筋の座屈を伴い図-6に示すように軸縮み方向に変位が増大し、水平耐力の低下に至った。

横補強筋体積比 $\rho_s=0.95\%$ および $\rho_s=1.51\%$ の試験体(6IV-95-Pおよび6IV-151-P)は実験終了時の部材角 $R=\pm 1/20\text{rad}$ まで目立った耐力低下はなく、図-6においても軸縮み方向の変位の増大は認められない。中空部を普通強度コンクリートにより中詰することで横補強筋による拘束力が効果的にコアコンクリートに働いていることがわかる。また、軸方向に配した異形鉄筋の働きにより従来のPHC杭に比べ紡錘形で安定した履歴性状を示した。

表-3 実験結果および計算値

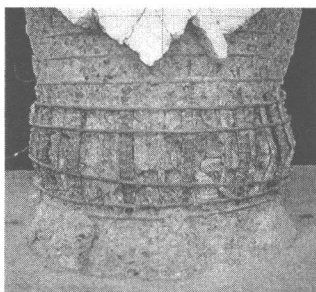
| 試験体名      | $Q_{bc}$<br>(kN) | $Q_{sc}$<br>(kN) | $Q_{max}$<br>(kN) | $R_u$<br>(rad) | $Q_a$<br>(kN) | cal $Q_{max}$<br>(kN) |
|-----------|------------------|------------------|-------------------|----------------|---------------|-----------------------|
| 6IV-44-P  | 291              | 425              | 698               | 0.028          | 399           | 611                   |
| 6IV-95-P  | 286              | 429              | 710               | 0.048          | 399           | 611                   |
| 6IV-151-P | 304              | 428              | 692               | 0.044          | 399           | 611                   |

$Q_{bc}$ :曲げひび割れ強度  $Q_{sc}$ :せん断ひび割れ強度  $Q_{max}$ :最大耐力  
 $R_u$ :限界変形角(最大耐力の90%まで耐力低下した時点の部材角)  $Q_a$ :短期許容せん断力<sup>(付録2)</sup> cal $Q_{max}$ :曲げ解析による最大耐力計算値

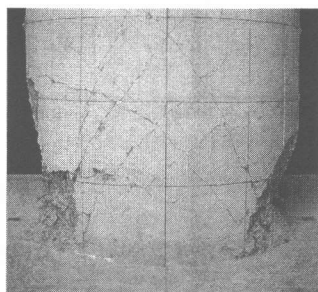


(6IV-44-P,  $R=1/67$ )

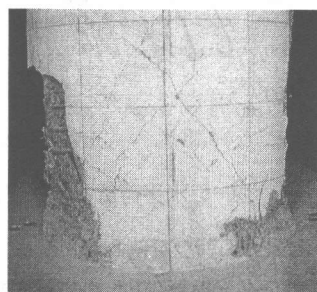
図-3 ひび割れ状況



6IV-44-P



6IV-95-P



6IV-151-P

図-4 最終破壊状況

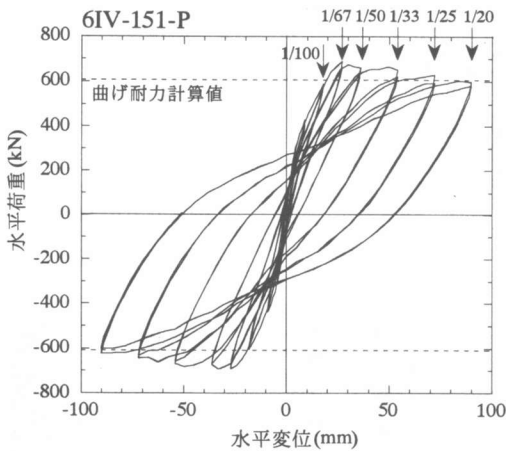
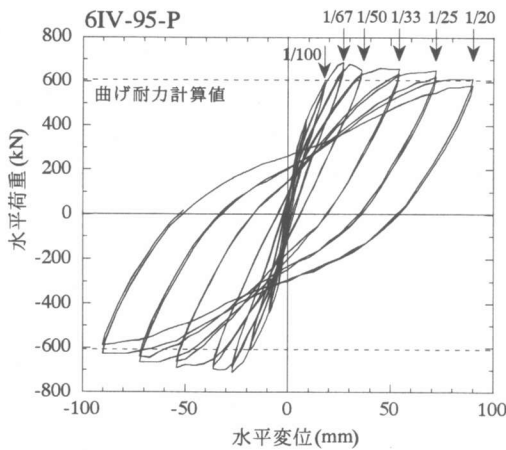
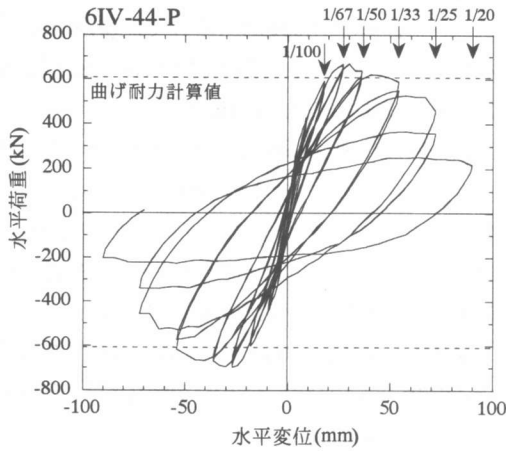


図-5 水平荷重と水平変位の関係

### 3.2 せん断ひび割れ幅

センター指針<sup>2)</sup>では、PHC杭に対する設計において短期許容せん断力<sup>(付録1)</sup>を示している。この式は肉厚および軸方向応力度の影響を考慮した

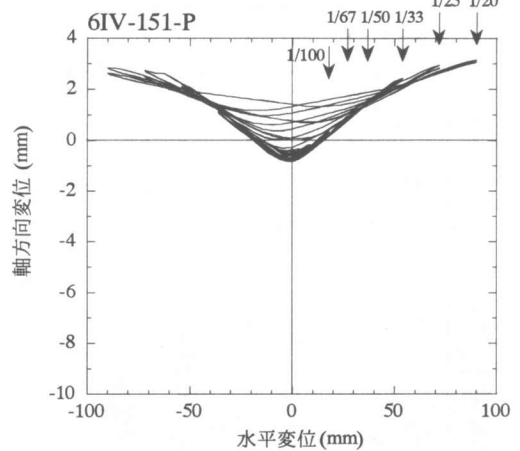
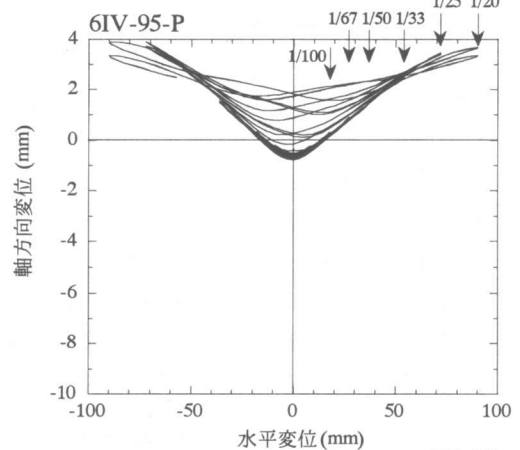
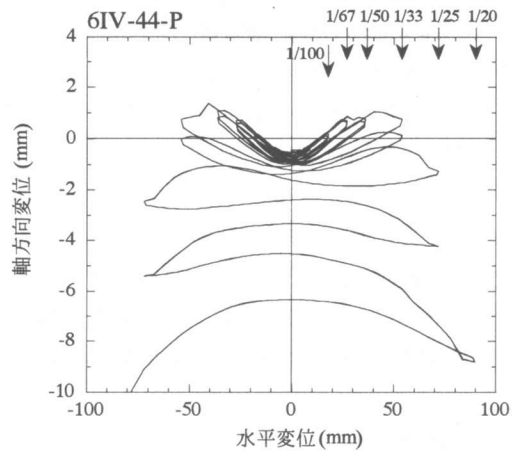


図-6 軸方向変形と水平変位の関係

せん断ひび割れ強度式にコンクリートの許容斜張応力度を適用したものであり、中小地震時においてPHC杭のせん断ひび割れ発生を防ぐことが目的となっている。

表-3に示すように $Q_a$ はせん断ひび割れ発生荷重をある安全率をもって評価できるが、プレストレス量をPHC杭のB種とA種の間程度( $\sigma_e=5.4\text{N/mm}^2$ )に抑えたとて、異形鉄筋により曲げ耐力を増大させたPRC杭においては、せん断ひび割れを許容して、その幅を制御することにより合理的な設計になる場合がある。

図-7は除荷時せん断ひび割れ幅の最大値 $W_{max}$ とピーク時水平変位の関係を示しているが、6IV-44-Pはピーク時水平変位の増大に伴い、急激に $W_{max}$ が増大している。これに対し、6IV-95-Pおよび6IV-151-Pは $R=1/100$ 以降も $W_{max}$ の増大を抑制していることがわかる。ピーク時せん断力 $Q_p$ が $Q_a$ のほぼ1.5倍に達するピーク時部材角 $R_p=1/100$ における $W_{max}$ と横補強筋体積比の関係を図-8に示す。横補強筋量の増大に伴い $W_{max}$ が抑制されており、今回の横補強筋量の場合においては、その絶対値が $0.12\text{mm} \sim 0.06\text{mm}$ の間に収まっている。

### 3.3 限界変形角

限界変形角 $R_u$ は包絡線上で耐力が最大耐力の90%まで低下した時点の部材角と定義する。正負の両方について求め、そのうち小さいほうを採用した。図-9に限界変形角と横補強筋体積比の関係を示す。横補強筋量の増大により変形性能が向上しており、6IV-95-Pおよび6IV-151-Pにおいては限界変形角にして、 $1/25$ 以上の変形性能を有している。

### 3.4 変形性能評価

6IV-44-Pも最終的な耐力低下はコンクリートの圧壊が支配的であったため、ここでは単調曲げ解析を用いて変形性能の評価を試みる。実験値においては(1)式により塑性回転曲率 $exp\phi_y$ を求める。

$$exp\phi_y = (R_u - R_f) / 0.75D \quad (1)$$

$R_f$ : 降伏時変形角

降伏時変形角は最大耐力の90%に達した時点の部材角とする。ヒンジ長さについては、圧縮コンクリートに注目し、その破壊性状から杭径 $D$ の0.75倍とした。

解析では、平面の保持を仮定し、付録2)に示すコンクリートモデル<sup>3)</sup>において杭体コンクリートおよび中詰コンクリートに横補強筋による拘束効果を

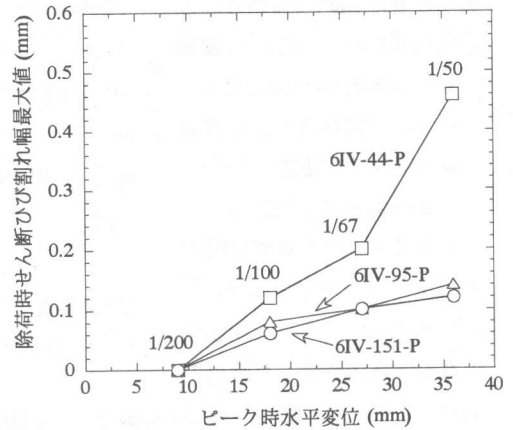


図-7 除荷時せん断ひび割れ幅最大値とピーク時水平変位の関係

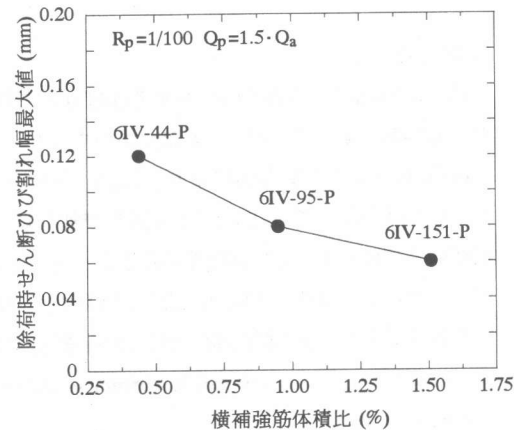


図-8 除荷時せん断ひび割れ幅最大値と横補強筋体積比の関係

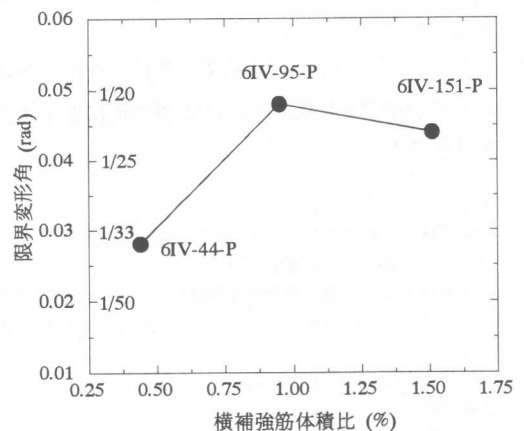


図-9 限界変形角と横補強筋体積比の関係

反映させた(図-10)。軸方向の鉄筋は異形鉄筋, 異形PC鋼棒とも完全弾塑性とした。コンクリートの初期応力として有効プレストレスを考慮しており, 文献4)を参考に圧縮側のコアコンクリートの歪が強度時歪の2倍になった時点の曲率を限界曲率とした。この値と引張側の異形鉄筋が降伏した時点の

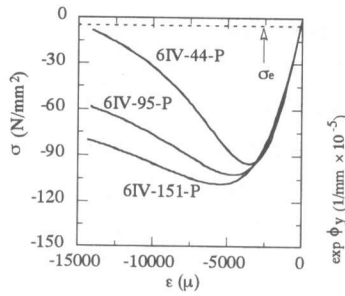


図-10 杭体コアコンクリートの応力-歪関係

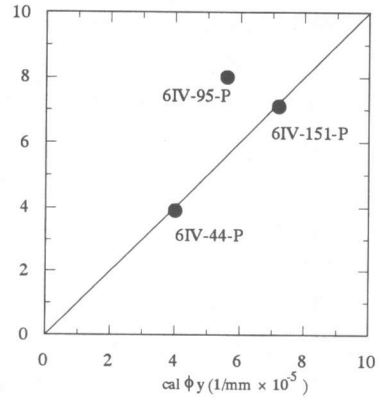


図-11 expφ<sub>y</sub>とcalφ<sub>y</sub>の関係

曲率の差を塑性回転曲率解析値 calφ<sub>y</sub>とした。図-11に expφ<sub>y</sub>と calφ<sub>y</sub>との関係を示す。簡易的な方法ではあるが, おおむね変形性能を評価できている。

#### 4. まとめ

杭径600mmの実大PRC杭に対する曲げせん断繰返し実験において, 下に示す知見が得られた。

(1)短期許容せん断力Q<sub>a</sub>により, せん断ひび割れ発生荷重は予測でき, 発生後のせん断ひび割れ幅は横補強筋を増やすことで抑制することができる。短期許容せん断力Q<sub>a</sub>の1.5倍のせん断力を経験した直後の除荷時せん断ひび割れ幅最大値は横補強筋体積比ρ<sub>s</sub>=0.44%で0.12mm, ρ<sub>s</sub>=0.95%で0.08mm, ρ<sub>s</sub>=1.51%で0.06mmであった。

(2)横補強筋は, コアコンクリートの拘束および主筋の座屈防止に効果があり, ρ<sub>s</sub>=0.95% および ρ<sub>s</sub>=1.51%の場合には限界変形角にして1/25以上の変形性能を有していた。

(3)コンクリートの拘束効果を反映した曲げ解析により限界曲率を求めることで, 簡易的に変形性能を評価できる。

#### 謝辞

本実験を行うにあたって, 佐藤工業技術研究所 長縄裕行氏, 同 小林恒一氏にご助言頂きました。

本研究は, 東京工業大学建築物理研究センター-全国共同研究の一貫として行われたものであり, COPITAとの共同研究です。

付して感謝の意を表します。

#### 参考文献

1)長江他:PRC杭の耐震性能に及ぼす軸方向異形鉄筋と横補強筋の影響, 日本建築学会構造系論文集, NO.538, pp.123-129, 2000, 12

2)地震力に対する基礎の設計指針:日本建築センター, 1984  
3)平成5年コンクリートファインドWG研究成果報告書:崎野ほか

1)芝他:変動軸力を考慮したRC柱の最大強度以降の挙動の評価(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.195-198, 1996

#### 付録1 短期許容せん断力

$$Q_a = \frac{2tI}{S_0} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_g + 2\sigma_d)^2 - \sigma_g^2}$$

t:肉厚

I:中立軸に対する断面2次モーメント

S<sub>0</sub>:杭の中立軸より片側にある杭断面の

中立軸に対する断面1次モーメント

σ<sub>g</sub>:軸方向応力度

σ<sub>d</sub>:コンクリートの許容斜張応力度 (1.76MPa)

#### 付録2 コンクリートモデル

$$\frac{\sigma_c}{c\sigma_{cB}} = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2}$$

$$c\sigma_{cB} = \sigma_p + \kappa\rho_h'w\sigma_y$$

$$\sigma_p = 1.0\sigma_B$$

$$\kappa = 2.09 \left(1 - \frac{s}{2D_c}\right)^2$$

$$X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}, \quad A = \frac{E_c \varepsilon_{co}}{c\sigma_{cB}}, \quad K = \frac{c\sigma_{cB}}{\sigma_p}$$

$$\varepsilon_{co} = \varepsilon_o \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 1.5 \\ 3.35 + 20(K-1.5), & K > 1.5 \end{cases}$$

$$\varepsilon_o = 0.93(c\sigma_B)^{1/4} \times 10^{-3}$$

$$D = \alpha + \beta_c \sigma_{cB} + \gamma \sqrt{(K-1)_c} \sigma_B / 23$$

$$\alpha = 1.5 \quad \beta = -1.71 \times 10^{-2} \quad \gamma = 1.6$$

σ<sub>c</sub>, ε<sub>c</sub>:コンクリートの応力および歪

ρ<sub>h</sub>:コアコンクリートに対する横補強筋体積比

D<sub>c</sub>:スパイラルに囲まれる径

cσ<sub>cB</sub>:コアコンクリートの強度

ε<sub>co</sub>:コアコンクリートの強度時歪