

# スパイラル筋を有するPHC杭の耐震性能に関する研究

金子雄一<sup>1</sup>・佐藤 博<sup>2</sup>・鬼束俊一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 東電設計株式会社 第二土木本部火力土木部 (〒110 東京都台東区東上野3-3-3)

<sup>2</sup>正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所構造研究室 (〒230 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

<sup>3</sup>工修 東京電力株式会社 富津火力建設所第三土木課 (〒293 千葉県富津市新富25)

本報告は、PHC杭の耐震性能を向上させるため、従来は用いられていなかったスパイラル筋を配したPHC杭の耐震性能を実験に基づき検討したものである。せん断試験および正負交番曲げ試験からせん断耐力、靱性率を求めるとともに、それらの評価方法について考察を加えた。実験では中詰めコンクリートの有無を要因として取り上げ、正負交番曲げ試験では軸力の有無も併せて考慮した。

**Key Words :** *pretensioned spun high strength concrete pile, spiral reinforcement, filling concrete, ductility, flexure, shear*

## 1. はじめに

最近の土木構造物の耐震設計では、従来の設計では考慮しなかった大きな地震力に対しても構造物の耐震性能が照査されている。その際、大きな地震力が作用する荷重条件に対しても構造物が弾性域にあるように設計することは経済性などの面から不合理であると考えられ、部材の変形性能すなわち靱性も考慮した構造物全体の耐震性能を照査するようになってきた。PHC杭についても、そのように大きな地震力に対する耐震性能を確保するためには、部材の靱性を考慮した設計の考え方が有用であり、そのためには所要のスパイラル筋や中詰めコンクリートを配することが重要となる。本研究では、スパイラル筋を有するPHC杭のせん断耐力および靱性率について実験に基づき検討した。

## 2. 実験方法

PHC杭のせん断耐力と靱性率を把握するため、せん断試験および正負交番曲げ試験を実施した。その試験方法は次のとおりである。

### (1)せん断試験

供試体は、 $\phi 500$  (B種)、長さ4mのPHC杭

とした。用いた供試体は2体であり、中詰めコンクリートの有る供試体および無い供試体をそれぞれ1体試験に供した。杭体コンクリート、中詰めコンクリートの設計基準強度は、それぞれ  $850 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $240 \text{ kgf/cm}^2$  とし、また、材料試験による実強度はそれぞれおよそ  $915 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $290 \text{ kgf/cm}^2$  であった。本試験に用いたPHC杭は、図-1に示すようにSD345 D10のスパイラル筋を90mmピッチ(体積率<sup>5)</sup>:  $\rho_s = 0.73\%$ で配筋した。スパイラル筋の降伏点強度と体積率の積は25.4である。

載荷方法は図-1に併せて示すように2点単純支持の2点集中荷重による曲げ載荷とし、せん断スパンを60cmと小さくすることにより、せん断スパン内においてせん断破壊させることとした。なお、載

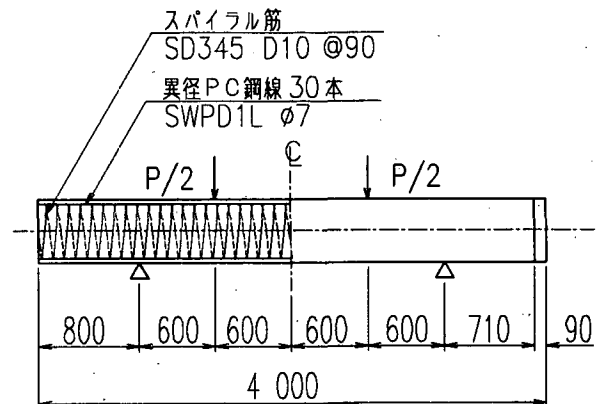


図-1 供試体および載荷方法(せん断試験)

表-1 正負交番曲げ試験ケース

試験ケース	中詰めの有無	軸力(tf)
PHC-C-0	有	0
PHC-C-40	有	40
PHC-N-40	無	40

荷は単調増加の静的荷重とし、軸力は作用させない状態で試験を実施した。

## (2)正負交番曲げ試験

供試体は、φ500 (B種)、長さ5mのPHC杭とし、せん断試験と同様にスパイラル筋を配筋したもの3体とした。試験で考慮する要因は、中詰めの有無および軸力の有無とし、表-1に示す組み合わせで試験を実施した。

荷重は図-2に示すように支間5mの2点単純支持の供試体に対する2点集中荷重とし、図に示すように2方向からの静的な曲げ荷重を交番で繰り返し作用させた。せん断スパンは、せん断破壊が生じないよう1m(杭径の2倍)とした。軸力は、杭の両端に配した軸力荷重用の治具をPC鋼棒で緊張する方法により導入した。荷重ステップは次のとおりとした。杭部材の降伏曲げモーメントの計算値に相当する荷重 $P_y$ に対し、最大荷重を $1/2P_y$ 、 $P_y$ とした交番荷重を正負それぞれ3回繰り返した。 $P_y$ 荷重時の杭中央のたわみ(6回の平均値)を、変位制御のための降伏変位 $\delta_y$ とし、それ以降は最大変位を $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、 $4\delta_y$ ……とした交番曲げ荷重を正負それぞれ3回作用させた。

## 3. 実験結果

### (1)せん断試験

試験結果をまとめて表-2に示す。中詰めが無い供試体では最大荷重150tf、中詰めのある供試体では120tfまで荷重し、コンクリート表面およびスパイラル筋のひずみから、ひび割れ発生、スパイラル筋の降伏荷重を求めた。なお、中詰め無しの供試体では、スパイラル筋の降伏ひずみを越えるひずみが測定されており、また、150tf荷重時において試験機のストロークの増加に対する荷重の低下が確認されている。しかしながら、中詰め有りの供試体では、120tf荷重時でもスパイラル筋のひずみは降伏ひずみに達しておらず、スパイラル筋の降伏荷重、最終的なせん断耐力は得られなかった。せん断ス

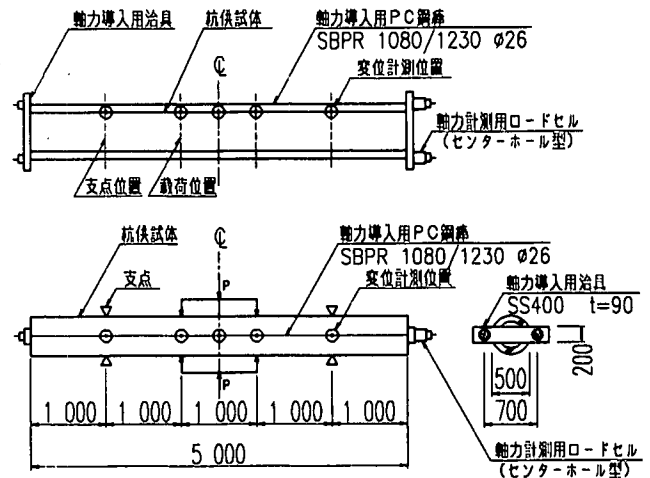


図-2 荷重方法 (正負交番曲げ試験)

表-2 せん断試験結果 (単位: tf)

荷重	中詰め無し	中詰め有り
ひび割れ発生荷重	73~84	94~100
スパイラル筋降伏荷重	125~140	-
最終的なせん断耐力時	150	-

-: 試験されていない (120tf以上)

表-3 せん断耐力

せん断耐力	実験値	計算値
$V_{c1}$ (tf)	36.5~42.0	38.1
$V_s$ (tf)	20.5~33.5	24.4
$V_{c2}$ (tf)	5.0~13.5	11.5

ンは左右2つあり、スパイラル筋については1つのせん断スパンで4箇所のひずみを測定したため、表中の値は幅を有している。

スパイラル筋を有するPHC杭のせん断耐力は以下のように評価する。PHC杭のせん断耐力 $V_y$ は、杭体コンクリートのせん断耐力 $V_{c1}$ 、スパイラル筋のせん断耐力 $V_s$ 、中詰めコンクリートのせん断耐力 $V_{c2}$ を用いて、次式とした。

$$V_y = V_{c1} + V_s + V_{c2} \quad (1)$$

試験結果から、これらのせん断耐力は以下のように求めた。

- $V_{c1}$ : 中詰め無しのひび割れ荷重から求めた。
- $V_s$ : 中詰め無しのスパイラル筋降伏荷重とひび割れ荷重の差から求めた。
- $V_{c2}$ : 中詰めの有無によるひび割れ荷重の差から求めた。

得られたせん断耐力をまとめて、後述する計算値と併せ表-3に示す。

表-4 靱性率

試験ケース	実験値	計算値1	計算値2
PHC-C-0	9.3	5.6	7.7
PHC-C-40	6.2	2.9	5.7
PHC-N-40	3.4	2.4	3.5

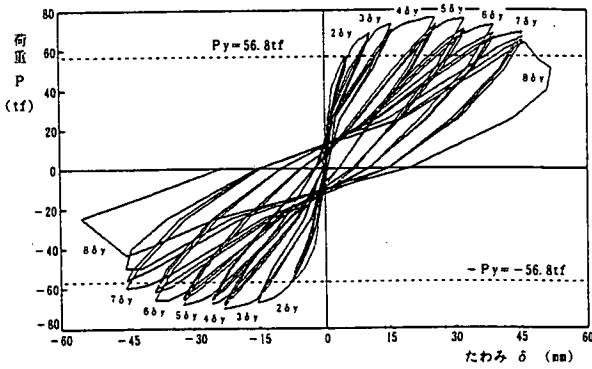


図-3 P～δ曲線 (PHC-C-0)

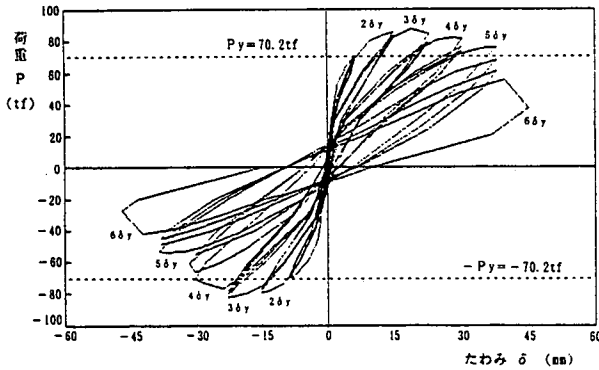


図-4 P～δ曲線 (PHC-C-40)

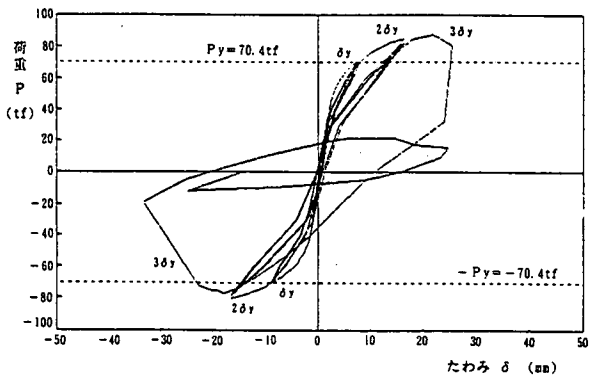


図-5 P～δ曲線 (PHC-N-40)

## (2)正負交番曲げ試験

試験で得られたP～δ曲線を、図-3～図-5にそれぞれ示す。これらの図より、軸力の無い場合、中詰めの有る場合に、より大きなたわみまで降伏荷重を下回ることなく試験されていることが判る。靱性率は、降伏変位と終局変位の比として求めた<sup>1)</sup>。なお、本試験では正曲げと負曲げで得られた靱性率に差が生じており、これは用いた試験機の支点の剛性が正曲げと負曲げで異なっていたためであると考えられる。支点の構造は、正曲げに対する支点の方が剛性が高く、供試体の変形が精度よく得られていると考えられるため、正曲げの結果から靱性率を求めることとした。得られた靱性率を後述する計算値と併せ表-4に示す。

## 4. PHC杭の性能評価

試験結果について、諸規準の設計式を参考に検討した結果を以下に示す。

### (1)せん断耐力

杭体コンクリートのせん断耐力  $V_{c1}$  は、(2)式で求めた<sup>2), 3)</sup>。

$$V_{c1} = \frac{b I}{2 S} \sqrt{(2 \phi \sigma_t + \sigma_x)^2 - \sigma_x^2} \quad (2)$$

ここで、 $V_{c1}$ : 杭体コンクリート断面のせん断耐力

$b$  : 重心軸位置における断面の幅

$S$  : 重心軸以上の断面の重心軸に対する断面1次モーメント

$I$  : 重心軸に対するコンクリートの断面2次モーメント

$\sigma_t$  : コンクリートの引張強度

$\sigma_x$  : 有効プレストレスを含む軸方向応力

$\phi$  :  $\sigma_t$  の低減係数 (=0.5)

本試験の条件では、 $\sigma_x = \sigma_{ce}$  ( $\sigma_{ce}$ : コンクリートの有効プレストレス) であり、コンクリートの引張強度  $\sigma_t$  はひび割れ発生時のコンクリートのひずみと材料試験で得られたコンクリートの弾性係数を参考とし、82 kgf/cm<sup>2</sup> と算定した。

スパイラル筋のせん断耐力  $V_s$  は、(3)式で求めた<sup>4)</sup>。

$$V_s = A_w \cdot f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) / (s_s \cdot z) \quad (3)$$

ここで、 $V_s$ : スパイラル筋のせん断耐力

$A_w$ : スパイラル筋の断面積

$f_y$ : スパイラル筋の降伏点強度

$\alpha$  : スパイラル筋が部材軸となす角度

$s_s$ : スパイラル筋の配置間隔

$z = d / 1.15$  ( $d$ : 有効高さ)

上式中  $z$  の算定に際しては、杭体の円管断面を面積の等しい箱型断面に換算した有効高さより求めた。

中詰めコンクリートのせん断耐力  $V_{c2}$  は、(4)式で求めた<sup>4)</sup>。

$$V_{c2} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_{vc} \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

ここで、 $V_{c2}$  : 中詰めコンクリートのせん断耐力  
 $\beta_d = (1/d)^{0.25}$  (dの単位: m)  
 $\beta_p = 1.5$   
 $f_{vc} = 0.20(f_{c'})^{1/3}$   
 (  $f_{vc}$ ,  $f_{c'}$  の単位: N/mm<sup>2</sup> )  
 $f_{c'}$  : コンクリートの圧縮強度  
 $b_w$  : 腹部の幅  
 $d$  : 有効高さ

$V_{c2}$  の算定に際しては、コンクリート圧縮強度を実強度とし、 $b_w$ ,  $d$  はともに中詰めコンクリートの円形断面と等しい面積の正方形の1辺の長さとした。

せん断耐力の算定結果は表-3に示したとおりである。計算値は、実験値のばらつきの範囲内の値となっており実験結果を再現できている。これより、ここで示した算定方法により、精度よくPHC杭のせん断耐力を評価することができると考えられる。

## (2) 靱性率

靱性率は、(5)式によって求めた<sup>1)</sup>。

$$\mu = \mu_0 + (1 - \mu_0) \cdot (\sigma_0 / \sigma_b) \quad (5)$$

ここで、 $\mu$  : 靱性率  
 $\mu_0 = 12(0.5V_c + V_s) / V_{mu} - 3$   
 $V_c = V_{c1} + V_{c2}$   
 $V_{mu}$  : 部材が曲げ耐力に達するときのせん断力  
 $\sigma_0$  : 有効プレストレスを含む軸方向応力  
 $\sigma_b$  : 釣合破壊時の軸方向応力  
 (有効プレストレスを含む)

上式中、 $\sigma_b$  は軸力をパラメータとし、この軸力を一定とした杭断面の解析から算定した。すなわち、杭断面のひずみ分布を直線分布と仮定し、任意の傾き $\phi$  (断面の曲率) に対し、ひずみ分布から求めた杭断面の軸力が一定とした軸力と等しくなるようにひずみ分布を求めた。そのように求めたひずみ分布から圧縮縁のコンクリートひずみおよびひずみ分布の引張側におけるPC鋼線の引張合力作用位置でのひずみを求め、これらのひずみがそれぞれ同時にコンクリートの限界ひずみ、PC鋼線の降伏ひずみとなる軸力を求め、それを杭の断面積で除すことにより $\sigma_b$  を算定した。その際、コンクリートの限界ひずみにより $\sigma_b$  が変化することから、次の2とおりの限界ひずみについて靱性率を計算した。

ケース1 : 杭体コンクリートおよび中詰めコンクリートの限界ひずみを 0.0025、

0.0035 とした<sup>4)</sup>。

ケース2 : スパイラル筋による拘束効果を考慮し、杭体コンクリートの限界ひずみを中詰め有りでは 0.0036、中詰め無しでは 0.0029 とし、中詰めコンクリートでは 0.0081 とした<sup>5)</sup>。

計算結果は表-4に示したとおりである。表中計算値1はケース1の限界ひずみによる計算結果を、また計算値2はケース2の計算結果をそれぞれ示している。計算値2は実験値と比較的一致していると考えられる。

## 5. まとめ

以上の結果より、スパイラル筋を有するPHC杭のせん断耐力、靱性率は、ここで示した評価式を用いて算定できると考えられる。ここでは、これらの式の精度の検証のため計算に用いる強度は実強度を用い、部材係数などはすべて1.0として検討したが、材料係数や部材係数などを適切に設定することにより実設計への適用も可能であると考えられる。

ここでの検討は、限られた実験結果に基づくものでありさらに検討すべき事項として以下が考えられる。せん断耐力は、軸力や荷重の繰返しに影響されることが考えられ、実験などによる定量的なデータの蓄積が必要である。また、せん断耐力および靱性率に対しては、せん断スパンの長さ、スパイラル筋の仕様(体積率、径、ピッチ、強度など、およびそれらの組み合わせ)、杭径などの影響が考えられ、これらについても実験などによる定量的なデータの蓄積が必要であると思われる。

謝辞 : 本研究の実施に際し、正負交番曲げ試験と材料試験については日本コンクリート工業(株)、せん断試験については清水建設(株)技術研究所に協力いただいた。ここに謹んで感謝の意を表す次第である。

## 参考文献

- 1) 土木学会 : コンクリート標準示方書[平成8年制定] 耐震設計編 1996.
- 2) 日本建築学会 : 建築基礎構造設計指針 1988.
- 3) 日本規格協会 : JIS A 5337 プレテンション方式遠心力高強度プレストレストコンクリート杭 1995.
- 4) 土木学会 : コンクリート標準示方書[平成8年制定] 設計編 1996.
- 5) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 1996.