# 軸力変動下におけるPHC杭の非線形挙動に関する検討

麻生稔彦[1]・三浦房紀[2]・井上岳大[3]

[1]山口大学工学部社会建設工学科助教授 （〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1）
E-mail:aso@yamaguchi-u.ac.jp
[2]山口大学工学部知能情報システム工学科教授 （〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1）
E-mail:miura@earth.csse.yamaguchi-u.ac.jp
[3]川田工業（株）大阪技術部（〒550-0014 大阪市西区北堀江1-22-19）
E-mail:takehiro.inoue@kawada.co.jp

杭の非線形曲げ挙動を検討する際には、杭に作用する変動軸力が大きく影響する。変動軸力を考慮した杭の挙動についてはこれまでに多くの研究成果が発表されているものの、引張り力を作用させた場合の挙動を検討した例はあまりない。本報では圧縮および引張軸力作用下でのPHC杭の変形挙動を明らかにすることを目的とする。今回は軸力が作用する杭の曲げモーメント～曲率関係を解析的に求め、この関係を用いて曲げ解析を行う。解析結果と実験結果を比較した結果、解析で得られた軸力作用下での荷重～変位関係は解析値と実験値が対応し、引張り軸力作用時の曲げ挙動が再現できた。

***Key words:*** PHC pile, bending characteristics, axial load

## １．はじめに

橋梁をはじめとする構造物の耐震安全性を確保することは非常に重要な問題である。特に基礎構造物については、地震による被災状況の把握や被災した場合の速やかな対処が困難であるため、特に十分な耐震安全性に配慮しなければならない。一方、近年の道路橋の耐震設計は許容応力度法から、変形性能を考慮した限界状態設計法へと移行しつつある。限界状態設計法では部材に作用する力および部材の変形挙動をあらかじめ的確に把握する必要がある。

橋梁の基礎形式としては杭が最も一般的に用いられている。なかでも、PHC杭はRC杭に比べて許容応力が大きく確保できるため、現在では既製コンクリート杭の中でPHC杭が採用される割合が大きくなっている。PHC杭の非線形曲げ挙動については星隈らの研究により、曲げモーメント～曲率関係の設定法が提案されている[1)]。一方、杭は１本のみで用いられることはなく、複数の杭により杭基礎を構成する。この場合には、橋梁下部構造の回転により引張力を受ける杭と圧縮力を受ける杭が混在することとなる。したがって、杭の非線形曲げ挙動を検討する際には、杭に作用する変動軸力が大きく影響すると考えられる。この際、引張り軸力が作用した場合の変形挙動について検討した事例は少ない。

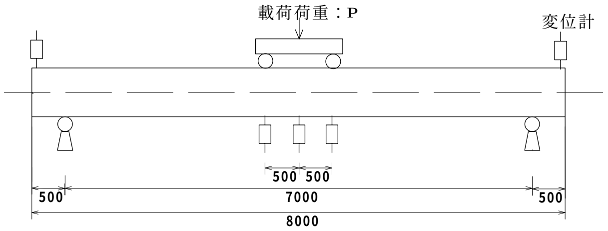
そこで、本研究では圧縮および引張軸力作用下でのPHC杭の変形挙動を明らかにすることを目的とする。変動軸力を考慮した杭の挙動についてはこれまでに多くの研究成果が発表されているものの、引張り力を作用させた場合の挙動を検討した例は少ないようである。これまでに、著者の一人は軸力を作用させたPHC杭の曲げ試験を実施している[2)]。この実験では引張力を作用させた場合の曲げ試験も行われており、本報では解析的に曲げモーメント～曲率関係を求め、この関係を用いた曲げ解析と実験結果を比較して曲げ挙動を検討する。

## ２．PHC杭の曲げ実験[2)]

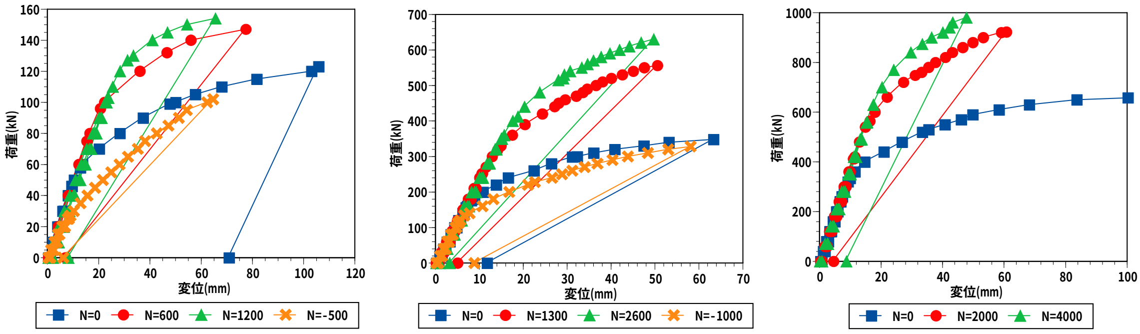
杭径400㎜,600㎜および800㎜のPHC杭について、軸力を変化させた曲げ破壊試験が実施されている。表－1に実験対象とした杭の諸元を示す。図－1は杭への載荷方法の概要である。杭は張り出し部を持つ単純支持とし, 中央部における曲げ破壊性状を観測するため

表－１　実験対象杭

| 実験No. | 杭径 (mm) | 杭長 (m) | 肉厚 (mm) | PC鋼棒 径 (mm) | PC鋼棒 本数 (本) | PC鋼棒 配置半径 (mm) | 軸力 (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 400 | 8 | 65 | 10 | 6 | 335 | -500 |
| 2 | | | | | | | 0 |
| 3 | | | | | | | 600 |
| 4 | | | | | | | 1180 |
| 5 | 600 | 8 | 90 | 10 | 19 | 520 | -1000 |
| 6 | | | | | | | 0 |
| 7 | | | | | | | 1300 |
| 8 | | | | | | | 2600 |
| 9 | 800 | 10 | 110 | 10 | 34 | 700 | 0 |
| 10 | | | | | | | 2000 |
| 11 | | | | | | | 4000 |




図－１　載荷方法(杭径 400mm, 600mm)

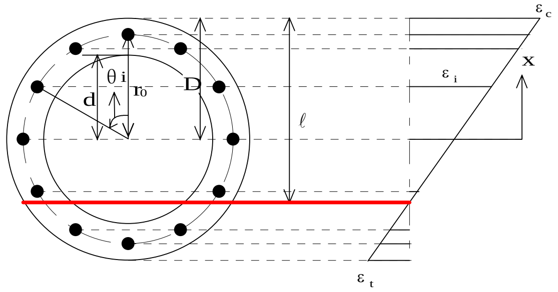



図－２　実験による荷重－変位関係

に2点載荷となっている。なお、杭に圧縮軸力を作用させる場合には、杭中空部にあらかじめ挿入した緊張材（テンションロッド）をジャッキにより緊張し、この反力を杭両端部に取り付けた支圧板を介して試験体に与える。なお、ジャッキは試験体に所定の荷重を与えた後、取り除く。一方、引張軸力の場合は杭両端部に取り付けた緊張材をジャッキにより緊張し、この反力を周辺に取り付けたフレームを介して試験体に与える。載荷荷重は、設計破壊曲げモーメントを与える荷重を杭径400mmは6等分以上、杭径600mmおよび800mmの場合は12等分以上とし、各荷重段階を1分間以上かけて連続的に破壊まで1方向に載荷する。以上の実験条件で実験を行った結果の一例として、載荷荷重の変動に伴う載荷中央点のたわみ量を各杭径ごとに図－2に示す。この図より、杭径400mmでは引張力作用時の最大たわみは圧縮力作用時より小さいのに対し、杭径600mmの場合には引張力作用時の最大たわみが大きくなっている。したがって、軸力が杭の変形性能に大きく影響することがわかる。

## 3．曲げモーメント～曲率関係の算定

図－3に曲げおよび初期プレストレス力、軸方向外力を考慮した時のPHC杭断面に生じるひずみの分布を示す。なお、解析にあたっては平面保持の法則を仮定している。図中、$\varepsilon_t$ は引張側最外縁のひずみ、$\varepsilon_c$ は




図－３　ひずみ分布

圧縮側最外縁のひずみ、$\varepsilon_i$ はPC鋼棒配置位置でのひずみとし、杭断面上端から中立軸までの距離を $\ell$ とする。この時、ひび割れ、降伏、終局の各段階におけるひずみ分布は次式となる。

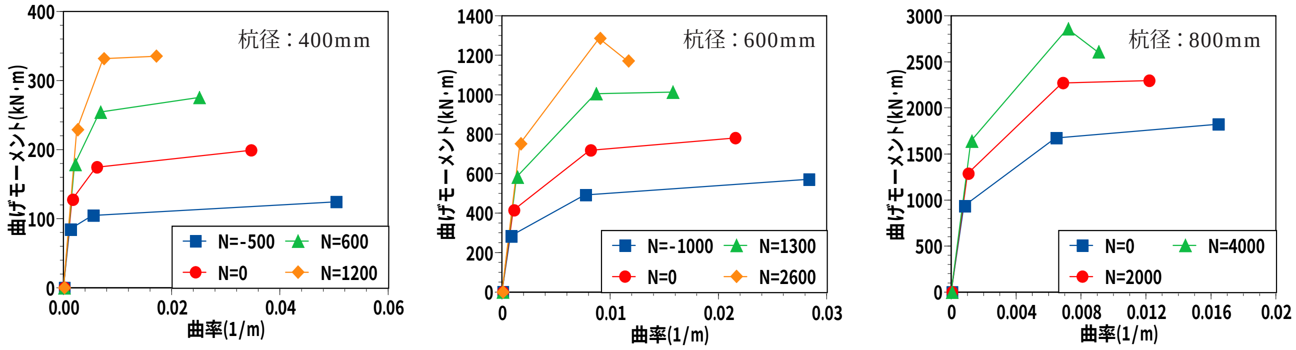
ひび割れ　$$\varepsilon = \varepsilon_{cc}(x+\ell-D)/(\ell-2D) \quad (1)$$

降伏　$$\varepsilon = (\varepsilon_{sy}-\varepsilon_{s0})(x+\ell-D)/(r_0+D-\ell) \quad (2)$$

終局　$$\varepsilon = -\varepsilon_{cu}(x+\ell-D)/\ell \quad (3)$$

ここで、$r_0$：PC鋼棒の配置半径、$\varepsilon_{cc}$：ひび割れが生じるひずみ、$\varepsilon_{sy}$：PC鋼棒降伏ひずみ、$\varepsilon_{s0}$：プレストレスにより生じるPC鋼棒のひずみ、$\varepsilon_{cu}$：終局ひずみ、$A_s$：PC鋼棒部総面積、$A_c$：コンクリート部総面積、$E_s$：PC鋼棒弾性係数、$\sigma_{ce}$ 有効プレストレス力

コンクリートおよびPC鋼棒に作用する力を求めるためには、これらの応力～ひずみ関係をあらかじめ定




図－４　曲げモーメント～曲率関係

める必要がある。本研究ではコンクリートについては式(5)の２次曲線を用い、PC 鋼棒については式(6)の完全弾塑性とした。

コンクリート

$$\sigma = \begin{cases} E_c \varepsilon & (0 \le \varepsilon \le \varepsilon_{cc}) \\ \sigma_{cu} \dfrac{\varepsilon}{0.002}\left(2 - \dfrac{\varepsilon}{0.002}\right) & (-0.002 \le \varepsilon < 0) \\ \sigma_{cu} & (-\varepsilon_{cu} \le \varepsilon < -0.002) \end{cases} \tag{5}$$

PC 鋼棒

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (0 \le \varepsilon \le \varepsilon_{sy}) \\ \sigma_{sy} & (\varepsilon_{sy} < \varepsilon) \end{cases} \tag{6}$$

これらの関係を用いて杭に生じる総圧縮力と総引張り力のつりあいより中立軸位置 $\ell$ を求める。ただし、ひび割れ以降はコンクリートに生じる引張力は無視する。これにより中立軸位置とひずみ分布が定まるので、内力による曲げモーメントを次式で求める。

$$M_C = \int_{A_{cD}} \sigma \cdot x dA - \int_{A_{cd}} \sigma \cdot x dA, \quad M_T = \int_{A_{tD}} \sigma \cdot x dA - \int_{A_{td}} \sigma \cdot x dA,$$

$$M_P = \sum_{i=1}^{n} E_s A_{si} (\varepsilon_i + \varepsilon_{s0}) r_0 \cos\theta_i \tag{7}$$

ここで、

$A_{cD}$：圧縮力が作用する外円の面積、$A_{cd}$：圧縮力が作用する内円の面積、$A_{tD}$：引張力が作用する外円の面積、$A_{td}$：引張力が作用する内円の面積、$A_{si}$：PC 鋼棒１本の面積、$n$：PC 鋼棒の本数。

ひび割れ発生時の　および $M_T$ の各項は次式となる。

$$\int_{A_{cD}} \sigma x dA = \sigma_{cu} \tilde{\eta} D^3 \{u_{1D} + u_{2D} \sin\beta + u_{3D} \sin 3\beta + u_{4D} \sin 4\beta + u_{5D} \sin 5\beta\}$$

$$\int_{A_{cd}} \sigma x dA = \sigma_{cu} \tilde{\eta} d^3 \{u_{1d} + u_{2d} \sin\lambda + u_{3d} \sin 3\lambda + u_{4d} \sin 4\lambda + u_{5d} \sin 5\lambda\}$$

(8)

$$\int_{A_{td}} \sigma x dA = \frac{1}{48} E_c \eta D^3 \{12D(\pi - \beta) - 24\ell \sin\beta + 8\ell \sin 3\beta + 3D \sin 4\beta\}$$

$$\int_{A_{td}} \sigma x dA = \frac{1}{48} E_c \eta d^3 \{12d(\pi - \lambda) - 24\ell \sin\lambda + 8\ell \sin 3\lambda + 3d \sin 4\lambda\}$$

一方、終局状態での $M_C$ の各項は次式となる。

$$\int_{A_{cD}} \sigma x dA = \sigma_{cu} \tilde{\eta} D^3 \{v_{1D} + v_{2D}(\sin\beta - \sin\varphi) + v_{3D}(\sin 3\beta - \sin 3\varphi) + v_{4D}(\sin 4\beta - \sin 4\varphi) + v_{5D}(\sin 5\beta - \sin 5\varphi)\ \}$$

表－２　解析諸元

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 外円半径（mm） | D | 200 | 300 | 400 |
| 内円半径（mm） | d | 135 | 210 | 290 |
| PC配置半径（mm） | $r_0$ | 167.5 | 255 | 350 |
| PC本数（本） | n | 6 | 19 | 34 |
| コンクリート弾性係数（N/mm$^2$） | $E_c$ | $3.8\times10^4$ | | |
| PC弾性係数（N/mm$^2$） | $E_s$ | $2.01\times10^5$ | | |
| 有効プレストレス（N/mm$^2$） | $\sigma_{ce}$ | 7.85 | | |
| ひび割れひずみ | $\varepsilon_{cc}$ | 0.000138 | | |
| 終局ひずみ | $\varepsilon_{cu}$ | 0.002500 | | |

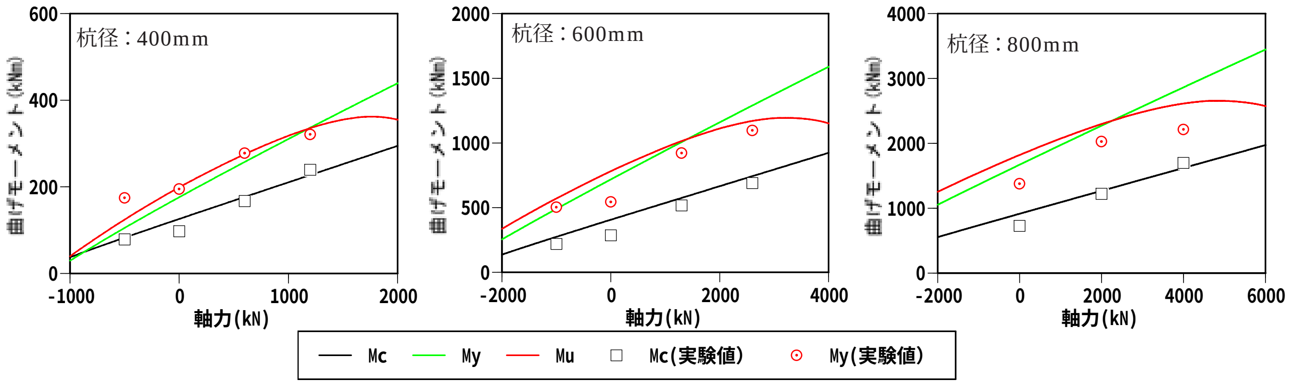
$$\int_{A_{cd}} \sigma x dA = \sigma_{cu} \tilde{\eta} d^3 (v_{1d} - v_{2d} \sin\lambda + v_{3d} \sin 3\lambda + v_{4d} \sin 4\lambda + v_{5d} \sin 5\lambda) \tag{9}$$

ここで、$u_{1D}$ ～ $v_{5d}$ は定数である。また、他の記号は $\eta = \varepsilon_{cu} / (\ell - 2D)$、$\tilde{\eta} = \eta / 0.002$、$\ell_c$ は上端から $\varepsilon = 0.002$ までMの距離であり、$\beta = \cos^{-1}((D - \ell)/D)$、$\varphi = \cos^{-1}(\ell_c / D)$ および $\lambda = \cos^{-1}(\ell / D)$ である。

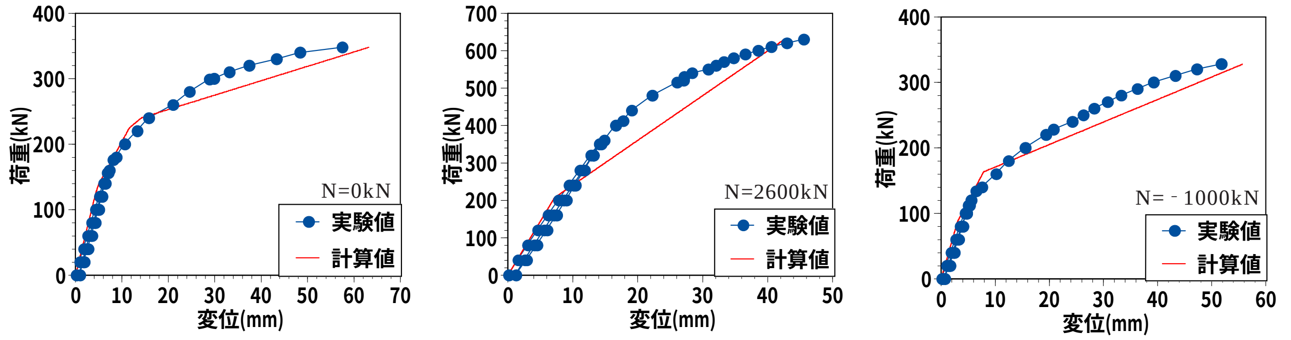
## ４．解析値と実験値の比較

上述の方法により、実験に用いたPHC杭の曲げモーメント～曲率関係を算定する。算定にあたっては表－２に示す諸元を使用した。

図－４に解析により得られた各杭径の曲げモーメント～曲率関係を、実験と同様の軸力作用時ついて示す。いずれの杭径においても軸力の増加により杭の耐力が増加していることがわかる。一方、軸引張り力が作用する場合には曲率が増加している。なお、杭径が600㎜および800㎜の高圧縮力作用時では $M_y$ が $M_u$ より大きな値となっている。これは、引張り側のコンクリートに亀裂が生じた後、PCが降伏する前に圧縮側コンクリートが終局状態となることを示す。図－５は軸力～曲げモーメントの関係である。これらの図には実験で得られたひび割れモーメントと終局モーメントを併せて示す。解析値と実験値は軸力によらずおおむね一致しており、解析値の有効性が確認できる。また、解析値が実験値と異なる場合であってもほとんどの場合には実験値を下回っており、安全側の評価となっている。今回求めた曲げモーメント～曲率関係の妥当性




図－５　曲げモーメント - 軸力関係




図－６　実験値との比較（荷重 - 変位関係）

を検討するために、有限要素法を用いて実験と同様の曲げ解析を行った。ただし、$M_y$ が $M_u$ より大きな値となる場合には、曲げモーメント～曲率関係をひび割れから終局に至るバイリニアとする。この解析により得られた杭径600㎜の場合の杭中央部における荷重～変位関係を図－６に示す。この結果より、軸力が作用していない N=0kN および軸引張り力が作用する N=-1000kN では解析値と実験値は良く一致している。一方、軸圧縮力が作用する N=2600kN の場合には降伏までは良く一致しているものの、降伏から終局に至る過程がやや実験値と異なる結果となっている。現時点ではこの理由は不明であるが解析値は終局状態での変位とほぼ一致しており、ほぼ実験時の挙動を再現していると考えられる。図－６から明らかなように、軸力変動が大きな杭基礎では、杭の曲げ挙動が軸力に応じて大きく異なり、設計にあたっては杭の変形特性を適切に設定する必要がある。

## ４．おわりに

今回の検討では引張り軸力を作用させたPHC杭の曲げ実験を再現することを主眼に、変動軸力下のPHC杭の曲げモーメント～曲率関係を解析的に求めた。この結果、解析で得られた曲げモーメント～曲率関係および曲げ荷重作用下での荷重～変位関係は解析値と実験値が対応し、引張り軸力作用時の曲げ挙動が再現できた。また、変動軸力作用下においては軸力により杭の曲げ挙動がが大きく変化することを示し、耐震設計では変動軸力を考慮することの必要性が確認された考える。

参考文献


1)　星隈順一，大塚久哲，津田和義，長屋和宏：高強度プレストレストコンクリート杭の変形性能とその評価法，土木学会論文集，No.570／Ⅰ-40，pp.239-248，1997.

2)　三浦房紀：圧縮および引っ張り軸力作用下におけるPHC杭の曲げ破壊特性，第１回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，pp.129-134，2000.


(2003. 9. 12 受付)

NON-LINEAR BENDING CHARACTERISTICS OF PHC PILES
UNDER VARYING AXIAL LOAD

Toshihiko ASO, Fusanori MIURA and Takehiro INOUE