

# 水平挙動から見た最適な拡頭杭の設計法に関する研究

三浦 正悟\* 加藤 千博\* 谷岡 靖之\*

**要 約：** 一柱一杭の杭基礎形式の場合、地震時の水平力に抵抗させるため杭頭を拡頭する場合がある。しかし、解析上、偏断面の杭に加え地盤条件が複雑な場合に杭の水平挙動を評価し、その最適な拡頭仕様について詳細な検討を加えることは難しい。本研究では、最適な拡頭長さを決定する目的で軟弱地盤の大口径拡頭場所打ちコンクリート杭について解析を行い、種々の検討を行っている。本研究において適用した解析法では、地盤の非線形性状、杭の偏断面形状を考慮している。杭断面については、軸力に応じた曲げ剛性～曲げモーメント関係をあらかじめ求め、トリリニアモデルとして扱っている。本解析方法による検討の結果、効果的な拡頭杭とするためには変形、水平耐力の両面から判断する必要性が認められた。拡頭杭の設計において、拡頭長さは曲げモーメントの第一不動点近傍に設定すれば良いことを示した。

**キーワード：** 拡頭杭, Es-y 法, 最適設計

- |   |   |
|---|---|
| <p><b>目 次：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 研究目的</li> <li>2. 杭の水平挙動の解析方法</li> <li>3. 拡頭杭の解析モデル</li> <li>4. 杭の解析条件</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>5. 杭の断面性能</li> <li>6. 変形および曲げモーメントと拡頭長さ</li> <li>7. 許容水平荷重と杭径および曲げ耐力</li> <li>8. 結論</li> </ol> |
|---|---|

## 1. 研究目的

軟弱層が厚く堆積した地盤における基礎は長尺な杭基礎として設計されることが多い。このような場合、鉛直および水平挙動についての検討が重要である。筆者らは、軟弱地盤に実施された拡頭・拡底場所打ちコンクリート杭の鉛直挙動について既に検討<sup>1)2)</sup>してきた。

本研究では、上記の拡頭杭の耐震性を検討する目的に加えて効果的な拡頭杭を検討し設計に資する目的で、杭頭に水平荷重が作用した場合の水平挙動について、拡頭径および拡頭長さを変化させた理論解析を行い、同杭の水平挙動に与える拡頭長さ、拡頭径の効果を考察している。

## 2. 杭の水平挙動の解析方法

杭の解析には、地盤反力特性に非線形性状を導入した  $E_s - y$  法<sup>3)</sup>を適用している。本解析方法では、杭の深さ方向に変化する杭断面の曲げ剛性、地盤状態に応じた地盤の変形係数およびその非線形性状を導入するため、地盤および杭を多層に分割している。任意層( $i$ )の基本方程式を(1)式に示したが、杭の曲げ剛性( $EI_i$ )はコンクリートの引張り亀裂発生等による弾塑性性状を抵抗曲げモーメント( $M_i$ )の、また地盤の変形係数( $E_{si}$ )は(2)式に示す変形( $y_i$ )の関数で与えている。

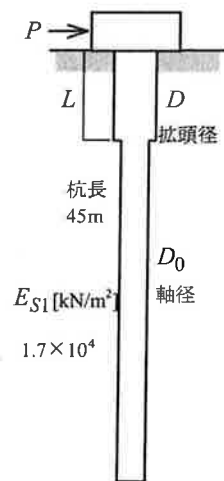
$$EI_i(M_i) \frac{d^4 y_i}{dx^4} + E_{si}(y_i) \cdot y_i = 0 \quad (1)$$

$$E_{si} = \frac{E_{sli}}{\sqrt{y_i}} \quad [E_{sli} : y_i = 1 \text{ cm 時の } E_{si} \text{ 値}] \quad (2)$$

## 3. 拡頭杭の解析モデル

図1に解析モデルおよび解析時の軟弱地盤を対象にした変形  $y = 1 \text{ cm}$  時の変形係数の  $E_{s1}$  値 ( $B = 2 \text{ m}$ ) を示した。

解析は、実施工された軸径 ( $D_0 = 2 \text{ m}$ )、拡頭径 ( $D = 2.6 \text{ m}$ ) の拡頭杭<sup>1)2)</sup>を参考にし、  
 ①軸径： $D_0 = 2 \text{ m}$ 、  
 ②拡頭径： $D = 2.2, 2.4, 2.6 \text{ m}$ 、  
 ③拡頭長さ、 $L = 0$  (ストレート杭)、 $2, 5, 10 \text{ m}$   
 の各組み合わせについて行っている。なお、杭長は  $45 \text{ m}$  としている。なお、杭長は  $45 \text{ m}$  としている。



## 4. 杭の解析条件

杭の断面性能の解析では、上記の各杭径に対して、材の  $\sigma \sim \epsilon$  関係を Bi-linear で与え、下記

図1 解析モデル

\* 建築研究室

の条件を適用している。

#### 4.1 想定軸力

軸力は、零、長期軸力に相当する 8000kN、地震時の変動軸力を想定した短期の引抜側に相当する 4000kN、押し込み側に相当する 12000kN を設定した。

#### 4.2 コンクリートに関する仮定

圧縮強度： $F_c = 27 \text{ MPa}$ 、引張り強度： $F_t = 0.15F_c$ 、ヤング率： $E_c = 2.1 \times 10^4 \text{ MPa}$

#### 4.3 鉄筋に関する仮定

鉄筋量： $P_t = 0.8\%$ 、圧縮・引張り強度： $f_s = 240 \text{ MPa}$ 、ヤング率： $E_{st} = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$

### 5. 杭の断面性能

図 2 に、杭径  $D=2 \text{ m}$  および  $D=2.6 \text{ m}$  の場合の  $EI \sim M$  関係を、軸力( $N$ )をパラメータとして示した。

曲げ剛性( $EI$ )は、軸力が小さくなるほど、コンクリートの引張り亀裂( $F_t$ )に伴い急激に減少し、また曲げモーメントの値も鉄筋降伏時の値( $f_s$ )に急激に近づく。圧縮側のコンクリートが  $F_c$  (破壊)に達する時点の曲げ耐力は、鉄筋降伏時の値の 1.15 倍程度で、鉄筋降伏後の曲げ剛性は弾性時の 1/3 程度であり、 $F_c$  にかけて急激

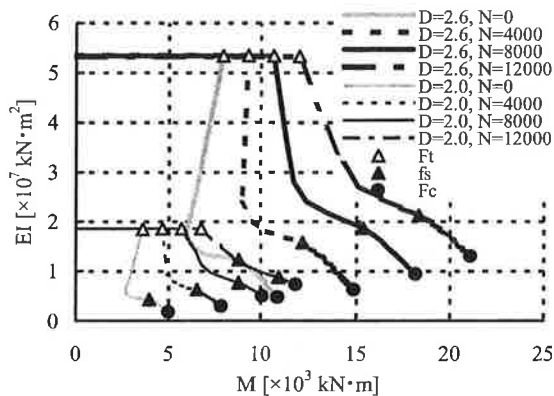


図 2  $EI \sim M$  曲線

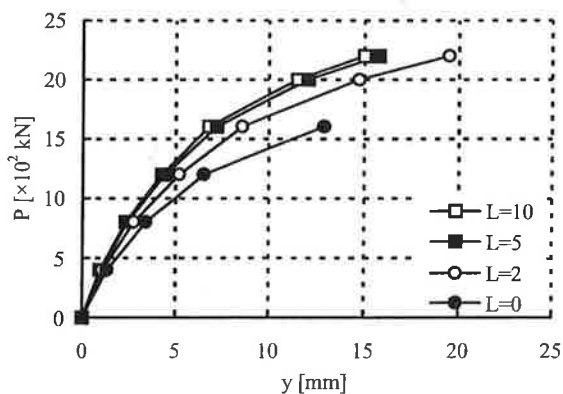


図 4 荷重～変位曲線 ( $D=2.6 \text{ m}$ ,  $N=4000 \text{ kN}$ )

に低下している。

そこで、以下の解析では、杭に発生する曲げモーメントが、上記の鉄筋降伏時の  $M_y$  に達するまでの荷重を対象としている。

図 3 に、鉄筋降伏時の曲げ耐力( $M_y$ )と軸力( $N$ )の関係を、杭頭径( $D$ )をパラメータとして示した。

杭頭径は、実施工を考え、2.6m を上限として検討を行った。

$M_y$  の値は軸力増加に伴い直線的に増大し、 $D=2 \text{ m}$  に対する  $D=2.6 \text{ m}$  の同比は 1.6~2.3 程度の値を示している。最も不利な地震時引抜側の杭軸力に相当する 4000kN の場合、軸径 2.0m に対して、杭頭径 2.2, 2.4, 2.6m の場合で、曲げ耐力比はそれぞれ約 1.2, 1.4, 1.8 となり、杭頭径 2.6m の場合の軸径に対して 1.3 倍程度径を拡大した場合の効果は高く、有効であると判断される。

### 6. 変形および曲げモーメントと杭頭長さ

図 4、図 5 に、杭頭径を  $D=2.6 \text{ m}$  とし、軸力を  $N=4000 \text{ (kN)}$  とした場合の、杭頭の荷重～変位および荷重～曲げモーメント曲線を、杭頭長さ [ $L=0$  (径 2m のストレート杭)、 $L=2, 5, 10 \text{ m}$ ] をパラメータとして示

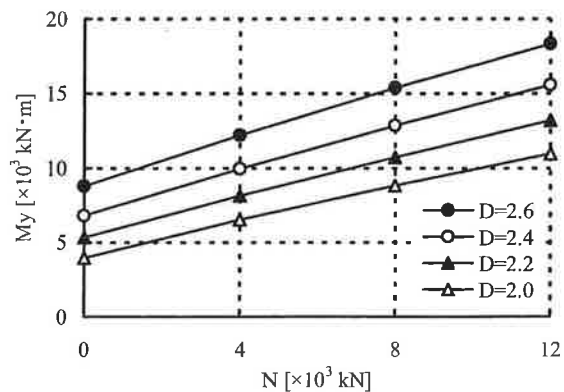


図 3 鉄筋降伏時のモーメントと軸力

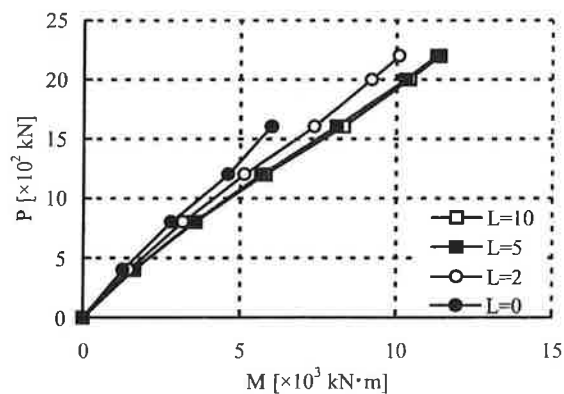


図 5 荷重～曲げモーメント曲線 ( $D=2.6 \text{ m}$ ,  $N=4000 \text{ kN}$ )

した。なお、同軸力は、地震時の建物の引張り側の、曲げ耐力が不利となる値を想定している。

同一荷重時の杭頭変形は  $L$  が長くなるにつれて減少するが、 $L \geq 5$  になると収束し、拡張長さの効果が認められない。一方、杭頭の曲げモーメントの値は  $L$  が長くなるにつれて増加する性状を示すが、その  $L$  による変動量は、上記の杭頭変形の場合に比してかなり小さい。また、同値は、変形の場合と同様に、 $L \geq 5\text{m}$  になるとほぼ収束する。

この結果、拡張長さは、5m 以下で十分であると言える。

図 6 に、上記の拡張杭の杭頭荷重  $P=1600(\text{kN})$  時の変形、曲げモーメント分布を示した。

変形曲線に現れる拡張長さ ( $L$ ) の効果をストレート杭 ( $L=0$ ) の曲線と比較すると、 $L$  の部分で相対変形が減少し、その結果、杭頭変形が  $L$  の増加とともに減少することが判る。

一方、曲げモーメント分布の拡張長さ ( $L$ ) による差異は、上記の変形曲線の場合ほど顕著に現れていないが、 $L$  が長くなるほど杭頭の曲げモーメントはわずかではあるが増加し、逆に地中部の最大曲げモーメントはかなり減少する。

また、拡張長さが極めて短い  $L=2\text{m}$  の場合、杭頭に対する軸部上端 (拡張下端) の曲げモーメントの比は約 0.67 となる。この値を図 3 の  $M_y$  と対照して見ると、各軸力の場合とも、軸部上端 (径 2m) の曲げモーメントは、杭頭 (径 2.6m) が  $M_y$  になる杭頭荷重よりも小さな荷重で  $M_y$  に達し、拡張の効果が認められない。

以上の如く、拡張長さは曲げモーメント分布と拡張部および軸部の曲げ耐力との関係で決定する必要があるが、上記の変形、曲げモーメントの解析結果を総合すると、曲げモーメントがほぼ零となる深さまで拡張することが望まれよう。

### 7. 許容水平荷重と杭径および曲げ耐力

図 7 には、上記の結果を踏まえて拡張長さを  $L=5\text{m}$  とした場合の鉄筋降伏時の曲げモーメント (図 3) に達する時点の許容水平荷重 ( $P_y$ ) と軸力 ( $N$ ) の関係を、拡張径をパラメータとして示した。なお、 $D=2.0\text{m}$  はストレート杭の場合である。

ストレート杭 ( $D=2.0\text{m}$ ) に対する拡張杭の拡張径の効果は、軸力が小さいほど大きく現れることが判る。地震時を対象にした杭基礎の水平耐力は、軸力が建物の引張り側の杭耐力で決定されると言えよう。本研究では、地震時の変動軸力を長期の軸力の 1/2 と設定しているが、この場合の引張り側の軸力 [ $N=4000(\text{kN})$ ] 時の  $D=2.0\text{m}$  に対する  $D=2.6\text{m}$  の  $P_y$  の比は約 1.47 であり、杭基礎の水平耐力には拡張の効果がかなり現れると言える。

また、許容水平荷重 ( $P_y$ ) と軸力 ( $N$ )、拡張径 ( $D$ ) の関係を図 3 の関係と対比してみると、前者と後者の関係は良い相関性を示している。この理由としては、杭頭の荷重～曲げモーメントの関係 (図 5) は、荷重～変位の関係 (図 4) に比較して、地盤反力非線形性状および杭断面の曲げ剛性の影響を大きく受けず、杭頭の水平荷重と曲げモーメントは比較的直線的性状を示すためである。

### 8. 結論

以上、杭頭に地震時の水平力が作用した場合の、拡張杭の水平挙動また水平耐力における拡張径および拡張長さの効果を明確にした。

最適拡張径については、軸径 2.0m の場合、施工の経済性を考慮した上限値である 2.6m 程度まで拡張するのが望ましい。ただし、一般的には、地震時の引抜軸力相当の曲げ剛性～曲げモーメント関係を踏まえて、拡張径を決定することが望ましいと言える。

最適拡張長さについては、ほぼ曲げモーメントの第一不動点深さ目安に設定すれば良いことを示した。

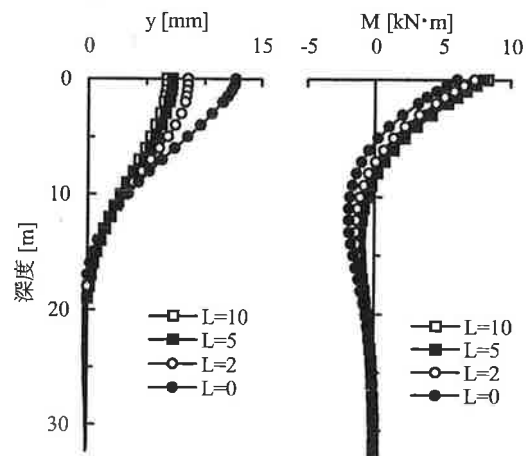


図 6 変形、曲げモーメント分布と拡張長さ ( $D=2.6\text{m}$ ,  $N=4000\text{kN}$ ,  $P=1600\text{kN}$ )

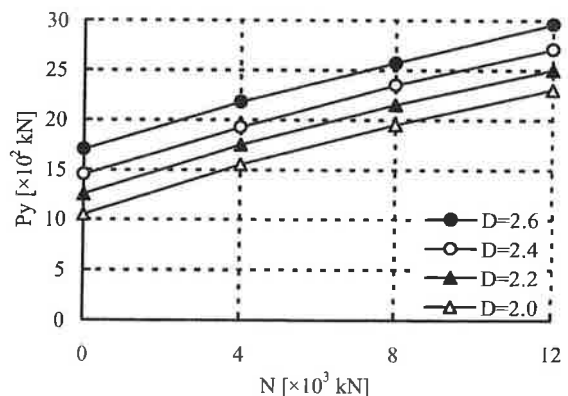


図 7 鉄筋降伏時の拡張水平荷重と軸力

## 謝 辞

本研究を進めるにあたりご指導いただきました、早稲田大学理工学総合研究センター教授風間了先生に心より謝意を表します。

## 参考文献

- 1)三浦正悟・風間了・柴崎富士夫：地盤変形を考慮した場所打ちコンクリート杭の鉛直挙動解析，第 33 回地盤工学研究発表会，pp.1411-1412，1998 年 7 月
- 2)三浦正悟・柴崎富士夫・沼上清：地盤変形を導入した場所打ちコンクリート杭の鉛直挙動解析，東急建設技術研究所報 第 24 号，pp.141-146，1998 年 10 月
- 3)古藤田喜久雄・風間了・中村義明：くい材の塑性性状を加味した解析法（その 1，2），第 12 回土質工学研究発表会，pp.801-808，1977 年 5 月

## A STUDY ON OPTIMAL DESIGN METHOD OF ENLARGED HEAD PILE IN LATERAL RESISTANCE

S.Miura, K.Katou and Y.Tanioka

In this paper, we are analyzing about an enlarged head cast-in-place concrete pile that was executed to soft ground. To decide optimum enlarged head length is the purpose. This analysis method can treat the non-linear nature of a ground and the form of a different section toward the depth of a pile. As a result of analysis and examination, we got the following conclusion. The effective enlarged head pile is designed by deformation and bending moment.