

754 埋込み節杭の荷重-沈下解析 (その3: 杭頭ばね定数の簡便計算法)

(株)ジオトップ 正会員 ○ 平山 英喜  
(株)ジオトップ 正会員 金井 重夫  
(株)ジオトップ 正会員 木原 律子

1. まえがき

(その2)の線形解析は1次元FEMによるものであるが、本稿では実用的な観点から、杭頭ばね定数 $K_v$ を手計算で求める方法について検討する。まず、周面抵抗が均質な場合の理論解と、3種類の簡易なばねモデルによる $K_v$ の計算値を、1次元FEMによる計算値と比較する。その結果、理論解を利用する方法と、ばねモデルの1つが、実用の可能性があることを示す。誤差の要因として、周面抵抗の非均質性の影響と、ばねモデルではさらに簡易モデルと実際との差の影響がある。そこで、それらに対する簡単な修正法を提案する。両修正解は、ともに平均精度99%で、FEM解と一致することを示す。

2. 計算法

(その2)では、図-1(a)に示した荷重伝達法で解析している。この方法では、分割された要素ごとに異なる $k_f$ を与えることにより、地盤の非均質性が考慮できる。本稿では、手計算で可能な方法として図-1(b)(c)に示した4つのモデルを用いる。これらの解は、次の3つのパラメータの関数として与えられる。

$$K_f = k_f(\pi D)L \quad (= \text{周面抵抗ばね定数}) \quad (1)$$

$$K_b = k_b A \quad (= \text{先端抵抗ばね定数}) \quad (2)$$

$$K_p = AE/L \quad (= \text{基準ばね定数}) \quad (3)$$

ここに、 $D$  = 杭径、 $L$  = 杭長、 $A = \pi D^2/4$ 、

$k_f$  = 周面せん断地盤反力係数、

$k_b$  = 先端地盤反力係数、 $E$  = 杭体のヤング率

(b)の理論解は、 $k_f = \text{constant}$ の条件で、基礎方程式の2階線形微分方程式の解として得られるものであり、杭頭ばね定数 $K_{TH}$ は次のようになる<sup>1)</sup>。

$$K_{TH} = \frac{\lambda \tanh \lambda + \gamma}{\gamma \tanh \lambda + \lambda} \lambda K_p \quad (4)$$

ここに、 $\gamma = K_b/K_p$ 、 $\lambda = (K_f/K_p)^{1/2}$

(c)のばねモデルは、杭と地盤の抵抗を分離し、直列ばねで連結したものである。モデル①は、杭体の圧縮を無視したものである。モデル②は、逆に杭体の最大圧縮量を想定して、杭のばね定数を(3)式の基準ばね定数 $K_p$ ( $K_f=0$ 、 $K_b=\infty$ の場合の杭体圧縮量に対応するばね定数)としたものである。モデル③では、①②の中間的な杭体圧縮量を想定し、軸力の平均値レベルでの圧縮量を考慮する。そこで、 $k_f = \text{constant}$ の条件での杭中央での軸力と杭頭軸力の比、

$$r = (K_b + 0.5K_f)/(K_b + K_f) \quad (5)$$

を導入し、杭のばね定数を $K_p/r$ とする。

ばねモデル①②③による杭頭ばね定数 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$

は、次式で与えられる。

$$K_1 = K_b + K_f = aK_p \quad (6)$$

$$K_2 = aK_p/(1+a) \quad (7)$$

$$K_3 = aK_p/(1+ra) \quad (8)$$

ここに、

$$a = (K_b + K_f)/K_p \quad (= K_1/K_p) \quad (9)$$

(その2)で解析した17件の鉛直載荷試験を対象に、図-1(b)(c)の4モデル、すなわち、(4)(6)(7)(8)式で杭頭ばね定数を計算する。

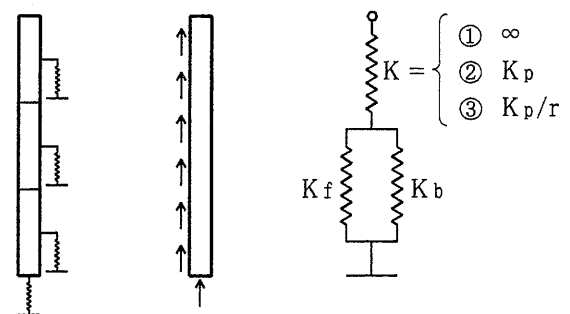
計算のためのインプットは、(1)~(3)式で計算する。 $K_f$ は、(その2)の表-1の算定式を用いて区間平均 $N$ 値から $k_f$ を計算し、それに区間長さを乗じ、杭全体でそれらを合計した値に、 $\pi D$ を乗じて計算する。しかし、砂質土と粘性土の $k_f$ の算定式が共通なので、杭全長の平均 $N$ 値から直接 $k_f$ の平均値を求め、それを(1)式に代入すればよい。先端平均 $N$ 値から $k_b$ を計算し、(2)式で $K_b$ を求める。杭の条件から(3)式で $K_p$ を決める。

3. 計算結果とその考察

(その2)の線形解析による杭頭ばね定数を $K_{FEM}$ と表記し、基準値とする。 $K_{TH}/K_{FEM}$ 、 $K_1/K_{FEM}$ 、 $K_2/K_{FEM}$ 、 $K_3/K_{FEM}$ と、(9)式の $a$ の関係を図-2に示す。

この図から、次のようなことが分かる。

- ①  $K_{TH}$ は最も精度が良いが、全般的に危険側の値を与える。 $K_{TH}$ の誤差の原因は、理論式の仮定から、地盤の非均質性の影響である。
- ②  $K_1$ の危険側、 $K_2$ の安全側の程度は、 $a$ が大きくなるにつれて増大し、計算法としては適切でないと判断される。
- ③  $K_3$ は、常に安全側の値を与える。その程度は、 $a$ が大きくなると増加する。地盤の非均質性の影響は、 $K_{TH}$ と同程度になっている。



(a) 荷重伝達法 (b) 理論解 (c) ばねモデル①②③

図-1 計算法のモデル

<sup>1)</sup>Load-settlement analysis of bored precast nodular piles (Part 3: simplified methods for calculating spring constants at pile head)", H. Hirayama, S. Kanai & R. Kihara (GEOTOP Corp.)

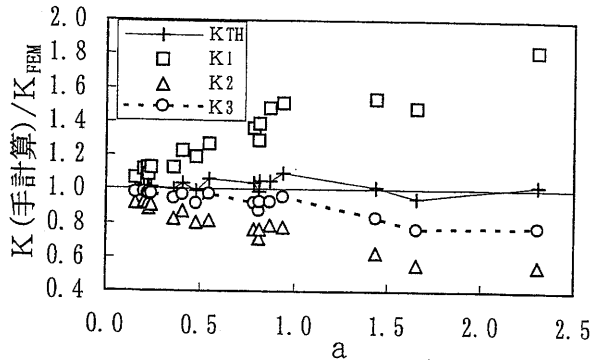


図-2 K(手計算)/K<sub>FEM</sub>-a 関係

以上のことから、杭頭ばね定数の手計算の方法として、理論解による $K_{TH}$ と、ばねモデル③による $K_3$ が、実用の可能性があると考えられる。しかし、 $K_{TH}$ には地盤の非均質性の影響、 $K_3$ にはそれに加えて、杭と地盤を分離した簡易モデルと実際との差の影響がある。そこで、次章でこれらの影響を修正する方法を考察する。

#### 4. 修正計算法

##### 4.1 地盤の非均質性の影響に対する修正

周面抵抗は、図-3(a)のB-B線のように深さとともに増加するのが一般的である。しかも、実際にはかなり不規則である。 $K_{TH}$ と $K_3$ では、A-A線のように一定と仮定している。 $K_{TH}$ と $K_3$ における地盤の非均質性の影響は、図-2の実線と破線の形から分かるように、非常に相関性が良く、しかも同程度であるので、簡潔なばねモデル③でその影響を修正する方法を検討してみる。

A-A型、B-B型の軸力分布は、図-3(b)のようになる。ばねモデル③では、A-A型の分布を仮定して軸力の平均値を決め、(5)式の $r$ を定義している。B-B型の場合の軸力の平均値の安全側の値として杭中央での軸力値を用い、 $r$ を定義し直したものを $r_{mod}$ とすると、次式のようになる。

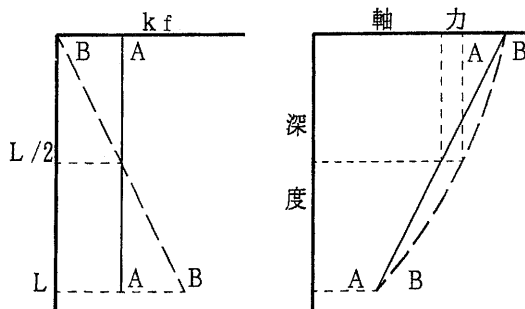
$$r_{mod} = (K_b + K_f - K_{fu}) / (K_b + K_f) \quad (10)$$

ここに、 $K_{fu}$ =杭頭から杭中央までの $K_f$

$r$ の代わりに $r_{mod}$ を用いて、(8)式の $K_3$ を修正したものを $K_{3r}$ とすると、次式のように表される。

$$K_{3r} = a K_p / (1 + r_{mod} a) = R_{mod} K_3 \quad (11)$$

ここに、 $R_{mod}$ は、非均質性の影響に対する修正減少係数に相当するもので、次式で表される。



(a) 周面抵抗の分布タイプ (b) 軸力の分布

図-3 非均質地盤のモデル

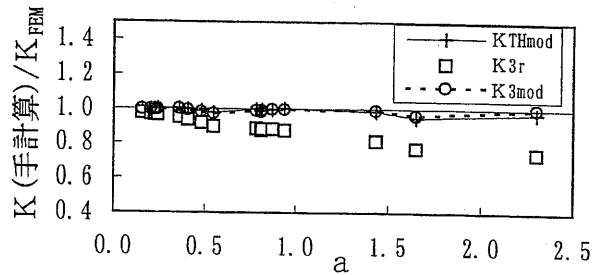


図-4 K(修正手計算)/K<sub>FEM</sub>-a 関係

$$R_{mod} = (1 + r a) / (1 + r_{mod} a) \quad (12)$$

なお、 $R_{mod} > 1.0$  の場合は、安全のために $R_{mod} = 1.0$ とする。

ばねモデル③に対して考察した $R_{mod}$ を、理論解にも適用して、(4)式の $K_{TH}$ を修正したものを $K_{THmod}$ とする。

$$K_{THmod} = R_{mod} K_{TH} \quad (13)$$

$K_{THmod}/K_{FEM} \cdot K_{3r}/K_{FEM}$ と、(9)式の $a$ の関係を図-4に示す。図-2と比較すると、 $K_{TH}$ における非均質性の影響は、 $R_{mod}$ を乗じることにより、非常に良い精度で安全側に修正されることが分かる。また、 $K_{3r}$ の分布も、滑らかなものになることが分かる。

##### 4.2 ばねモデル③の実際との差に対する修正

図-4において、 $K_{3r}/K_{FEM}$ の値は全体に $K_{3r}/K_{FEM} = 1 - 0.13a$ の線よりも下にあるが、 $a$ の大きい場合はこの線よりも上にある。そこで、逆数 $K_{FEM}/K_{3r}$ と $a$ の関係をしてみると、分布がより直線状になり全体に $K_{FEM}/K_{3r} = 1 + 0.15a$ よりも上に位置するようになる。この近似式は、(4)式と(8)式の比較によって、 $K_f > K_b$ ならば妥当なものであることが、理論的にも説明できる<sup>2)</sup>。

そこで、ばねモデル③の実際との差に対する修正増加係数として、

$$I_{mod} = 1 + 0.15a \quad (14)$$

を導入して $K_{3r}$ を補正し、次式で $K_{3mod}$ を計算する。

$$K_{3mod} = I_{mod} K_{3r} = I_{mod} R_{mod} K_3 \\ = (1 + 0.15a) a K_p / (1 + r_{mod} a) \quad (15)$$

$K_{3mod}/K_{FEM}$ の値も図-4に示したが、 $K_{3mod}$ は $K_{THmod}$ とほとんど一致する。 $K_{THmod}/K_{FEM} = 0.95 \sim 1.00$ (平均0.99)、 $K_{3mod}/K_{FEM} = 0.96 \sim 1.00$ (平均0.99)となり、高精度でかつ安全側のものとなっている。

したがって、 $K_{THmod}$ 、 $K_{3mod}$ と実際との対応は、(その2)の図-2(b)の線形解析とほとんど同じになり、両者は $(0.8 \pm 0.2) K_v$ (実測)の範囲の値を与える。

#### 5. まとめ

理論解を修正した(13)式と、ばねモデル③を修正した(15)式は、高精度の解を与える。(13)式では関数電卓が必要であるが、簡便であるので、両方で計算すれば検算も兼ねられる。

##### 参考文献

- 1) 例えば、横山幸満：くい構造物の計算法と計算例，山海堂，pp.147-152，1977。
- 2) 平山英喜：杭頭鉛直ばね定数の簡便計算法，土木学会第52回年講III，1997(投稿予定)