

III-136 多層系地盤の単杭の水平抵抗に関する一考察
 一 杭の曲げ剛性および地層の影響について 一

国土館大学 工学部 正会員 ○高田 清美
 同上 正会員 小野 勇

1. まえがき 多層系の地盤に打ち込まれた単杭の水平抵抗には、杭の形状・寸法や材質等の他に、地盤の条件が大きく影響すると考えられる。本報告は、杭の水平抵抗に関するパラメータのなかで、特に地盤条件に注目し、地盤反力係数および層厚の組合せの変化が単杭の水平抵抗にどのような影響を及ぼすかを解析的に検討したものである。結果の一部は既に報告¹⁾したが、今回は杭の曲げ剛性についての考察を加えた。

2. 水平抵抗の解析方法 地盤反力は弾性地盤反力法²⁾に基づくものとする、地盤反力 p は $p = k \cdot y$ と表される。 k は地盤反力係数、 y は杭のたわみである。

いま、図1に示すように、層数 n からなる成層地盤に鉛直に打ち込まれた単杭について考える。各地層では、地盤反力係数は一定とすると、第 i 層における杭の弾性曲線の式は次式で表される。

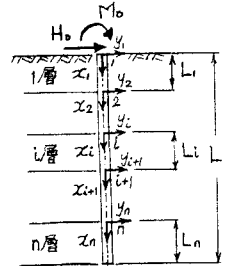


図-1 多層系地盤の単杭

$$(EI)_i \frac{d^4 y_i}{dx_i^4} + D_i k_i y_i = 0 \quad (0 \leq x_i \leq L_i, i=1 \sim n) \dots (1)$$

ここに、 D_i は杭の幅、 $(EI)_i$ は杭の曲げ剛性である。この式(1)の一般解は、

$$\begin{Bmatrix} y_i \\ y_i' \\ y_i'' \\ y_i''' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(\beta_i x_i) & F_2(\beta_i x_i) & G_1(\beta_i x_i) & G_2(\beta_i x_i) \\ \beta_i F_2(\beta_i x_i) & \beta_i F_4(\beta_i x_i) & -\beta_i G_2(\beta_i x_i) & \beta_i G_4(\beta_i x_i) \\ 2\beta_i^2 F_3(\beta_i x_i) & 2\beta_i^2 F_1(\beta_i x_i) & 2\beta_i^2 G_3(\beta_i x_i) & -2\beta_i^2 G_1(\beta_i x_i) \\ -2\beta_i^3 F_4(\beta_i x_i) & 2\beta_i^3 F_2(\beta_i x_i) & 2\beta_i^3 G_4(\beta_i x_i) & 2\beta_i^3 G_2(\beta_i x_i) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} C_{4i-3} \\ C_{4i-2} \\ C_{4i-1} \\ C_{4i} \end{Bmatrix} \dots (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} F_1(\beta_i, x_i) &= \exp\{\beta_i x_i\} \cos(\beta_i x_i), & G_1(\beta_i, x_i) &= \exp\{-\beta_i x_i\} \cos(\beta_i x_i) \\ F_2(\beta_i, x_i) &= \exp\{\beta_i x_i\} \{\cos(\beta_i x_i) - \sin(\beta_i x_i)\}, & G_2(\beta_i, x_i) &= \exp\{-\beta_i x_i\} \{\cos(\beta_i x_i) + \sin(\beta_i x_i)\} \\ F_3(\beta_i, x_i) &= \exp\{\beta_i x_i\} \cos(\beta_i x_i), & G_3(\beta_i, x_i) &= \exp\{-\beta_i x_i\} \cos(\beta_i x_i) \\ F_4(\beta_i, x_i) &= \exp\{\beta_i x_i\} \{\cos(\beta_i x_i) + \sin(\beta_i x_i)\}, & G_4(\beta_i, x_i) &= \exp\{-\beta_i x_i\} \{\cos(\beta_i x_i) - \sin(\beta_i x_i)\} \\ \beta_i &= \sqrt{D_i k_i / \{4(EI)_i\}} \end{aligned}$$

式(2)の積分定数 $C_{4i-3} \sim C_{4i}$ ($i=1, 2, \dots, n$)は杭頭および杭先端での境界条件と、地層の境界面における連続条件より決定することができる。

杭頭の曲げモーメントは M_0 で、せん断力は水平荷重 H_0 に等しいとする。また、杭は長杭と判定される場合に限定すれば、杭の先端では曲げモーメントとせん断力はともに0とみなすことができる。以上の境界条件と、各地層の境界面におけるたわみ、たわみ角および曲げモーメントに関する連続条件を適用すると、積分定数を決定するための連立方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C_2 - C_4 &= M_0 / \{2\beta_1^2 (EI)_1\} \\ -C_1 + C_2 + C_3 + C_4 &= H_0 / \{2\beta_1^3 (EI)_1\} \\ f_{1,1} C_{4i-3} + f_{2,1} C_{4i-2} + g_{3,1} C_{4i-1} + g_{4,1} C_{4i} - \alpha_i (C_{4i+1} + C_{4i-3}) &= 0 \\ f_{2,1} C_{4i-3} + f_{4,1} C_{4i-2} - g_{2,1} C_{4i-1} + g_{4,1} C_{4i} - \nu_i \alpha_i (C_{4i+1} + C_{4i-2} - C_{4i-3} + C_{4i+4}) &= 0 \\ -f_{3,1} C_{4i-3} + f_{1,1} C_{4i-2} - g_{3,1} C_{4i-1} - g_{4,1} C_{4i} - \nu_i^2 \mu_i \alpha_i (C_{4i+2} - C_{4i+4}) &= 0 \\ -f_{4,1} C_{4i-3} + f_{2,1} C_{4i-2} - g_{4,1} C_{4i-1} + g_{2,1} C_{4i} - \nu_i^3 \mu_i \alpha_i (-C_{4i+1} + C_{4i+2} + C_{4i-3} + C_{4i+4}) &= 0 \\ -f_{3,1} C_{4n-3} + f_{1,1} C_{4n-2} + g_{3,1} C_{4n-1} - g_{1,1} C_{4n} &= 0 \\ -f_{4,1} C_{4i-3} + f_{2,1} C_{4i-2} + g_{4,1} C_{4n-1} + g_{2,1} C_{4n} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここに、

$$\begin{aligned} f_{1,1} &= \cos(\beta_i L_i), & f_{2,1} &= \cos(\beta_i L_i) - \sin(\beta_i L_i), & f_{3,1} &= \sin(\beta_i L_i), & f_{4,1} &= \cos(\beta_i L_i) + \sin(\beta_i L_i) \\ g_{1,1} &= \cos(\beta_i L_i), & g_{2,1} &= \cos(\beta_i L_i) + \sin(\beta_i L_i), & g_{3,1} &= \sin(\beta_i L_i), & g_{4,1} &= \cos(\beta_i L_i) - \sin(\beta_i L_i) \\ \alpha_i &= \exp\{\beta_i L_i\}, & \nu_i &= \beta_{i+1} / \beta_i, & \mu_i &= (EI)_{i+1} / (EI)_i \end{aligned}$$

3. 計算結果および考察 計算モデルは図2に示すように、3層系の地盤に長さ $L = 15$ mの鋼管杭が打ち込まれた場合を想定したもので、外径 $D = 50$ cm、肉厚 10 mm (Type 1) と、外径 $D = 47$ cm肉厚

7 mm (Type 2) の2ケースである。両者の曲げ剛性の比は1 : 1/2である。地盤の条件は、第3層の地盤反力係数 ($k_3 = 10 \text{ kgf/cm}^2$) および層厚 ($L_3 = 3 \text{ m}$) は一定とし、第1層と2層の地盤をパラメトリックに変化させたものである。地盤反力係数については第1層を k_1 とし、第2層を k_2 とすると、 $n = k_1/k_2$ を地盤反力係数比と定義した。この n を 0.2 ~ 5.0 の範囲で変化させた。 $n < 1$ は、表層に軟弱な地層が存在するケースで、 $n > 1$ は、中間層に軟弱な地層がある場合に相当する。層厚については、1層と2層の境界を地表面から13 mまで10 cmピッチで変化させた。荷重は $H_0 = 10 \text{ tf}$ の水平荷重のみを作用させた。

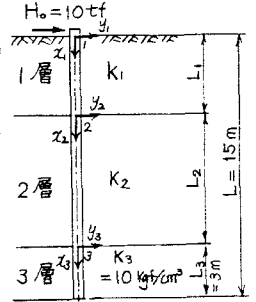


図-2 計算モデル

計算した項目は、変形についてはたわみとたわみ角、断面力に関しては曲げモーメントとせん断力である。これらの計算結果の一例を図3、4に示した。両図とも、横軸は第1と第2層の層厚 ($L_1 + L_2$) に対する第1層の層厚 (L_1) を百分率で表し、縦軸は杭頭たわみ (R_v)、杭頭たわみ角 (R_a)、最大曲げモーメント (R_{mm}) および最大曲げモーメントの発生深さ (R_{1m}) を無次元化して示した。無次元化は層厚比が100% ($L_1 = 12 \text{ m}$) のときのそれぞれの値を1としたものである。図3はType1、図4はType2の場合で、共に n が0.2と5.0の場合を示した。これらの図より、層厚比が0から約20%の範囲では、層厚の変化が杭の変形や断面力に大きな影響を及ぼしていることが認められる。層厚比がそれ以上になると、たわみおよび曲げモーメントは1に漸近する。Type1では n が0.2のとき61%で、5.0のとき43%でほぼ1となる。これに対し、Type2では57%と38%である。

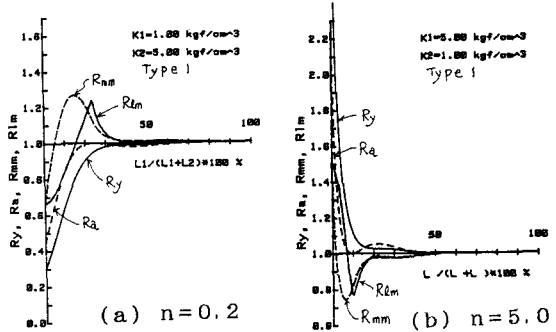


図-3 層厚比とたわみ、曲げモーメント (Type 1)

図5は、図3、4を基に各地盤反力係数比について1になる層厚比 (限界層厚比; D_{ert}) を示した。Type 1, 2ともに、 $n < 1$ の範囲では、 n の増加とともに D_{ert} は直線的に減少している。 $n > 1$ 場合には、 n が2以下の範囲では D_{ert} の変化がみられるが、 n が約2.5以上では D_{ert} はほぼ一定となっている。また、曲げ剛性が1/2に低下するのに対し、 D_{ert} は7~12%程度小さな値を示している。

4. むすび 以上の結果をまとめると、次のことが言える。

- a) 第1層の層厚が D_{ert} より大きな3層系地盤では、中間層を1層の地盤反力係数で置き換えて計算しうるものと考えられる。
- b) D_{ert} は、軟らかい層が表層にある場合は n の変化に敏感であり、中間層にある場合には n が2.5以上になるとほぼ一定となる。また、杭の曲げ剛性を小さくすると D_{ert} も僅かに小さくなることが確かめられた。

《参考文献》 1) 高田 「多層系地盤の単杭の水平抵抗に及ぼす地盤の影響についての一考察」第15回関東大会(土木学会)、2) 横山 著「くい構造物の計算法と計算実例」山海堂出版、pp.56~68、

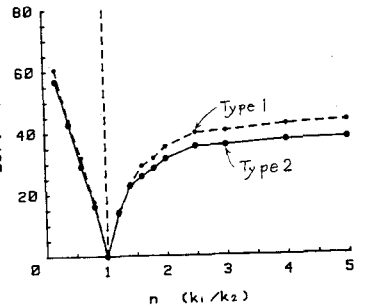


図-5 地盤反力係数比と限界層厚比