

(Ⅲ-10)

多層系地盤の単杭の水平抵抗に及ぼす地層の影響についての一考察

国土館大学 工学部 正会員 高田 清美

1 まえがき 多層地盤に打ち込まれた単杭の水平抵抗には、杭自身の形状・寸法や材料等の他に、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。なお、地盤反力の取り扱いには比較的簡単な弾性地盤反力法に基づいている。

2 水平抵抗の解析方法 弾性地盤反力法¹⁾に基づく、地盤反力 p は、 $p = k \cdot y$ と表される。 k は地盤反力係数、 y は杭の変位である。

いま、図1に示すように、層数 n からなる地盤に鉛直に打ち込まれた単杭について考える。杭の根入れ部分を地盤反力係数が異なるごとに分割する。分割した区間では地盤反力係数は一定とすると、杭の弾性曲線の式は第 i 層において次式で表される。

$$(EI) \cdot \frac{d^4 y_i}{dx^4} + B \cdot k_i \cdot y_i = 0 \quad (0 \leq x_i \leq L_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 B は杭の幅である。この式(1)の一般解は、

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

ただし、

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

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、地層の境界における連続条件より決定することができる。この積分定数の決定法には $4n$ 元の連立方程式を解く方法と、第一層より順次計算する伝達マトリックス法とがあるが、ここでは計算精度を考慮して前者の手法で解く。

杭頭の曲げモーメントは M_0 で、せん断力は水平荷重 H に等しいとする。また、杭は長杭と判定される場合についてのみに限定すれば、杭の先端では地盤からの拘束は受けないものとする、曲げモーメントとせん断力は共に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。

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

ここに、

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

3 計算結果および考察 計算モデルは図2に示すような3層系の地盤に、外径 $B=50\text{cm}$ 、内径 45cm 、長さ $L=15\text{m}$ の鋼管杭が打ち込まれた場合を想定した。地盤の条件は、地盤反力係数については第1層の地

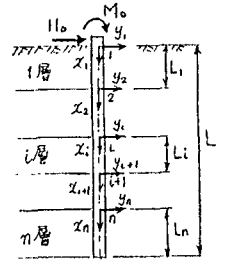


図-1

盤反力係数を k_1 とし、第2層の地盤反力係数を k_2 とすると、 $n = k_1/k_2$ を地盤反力係数比と定義し、 n を 0.2～5.0 まで14段階変化させた。 $n < 1$ 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。荷重は $H_0 = 10$ tf の水平荷重のみを作用させた。

計算より得られたたわみと曲げモーメントの一例を図3、4に示す。両図とも $n = 0.2$ ($k_1 = 1$ kgf/cm³, $k_2 = 5$ kgf/cm³) の場合で、第一層の層厚を 0.5, 1, 2, 4, 6m と変化させたときのものである。第一層の軟らかい地層が2m程度までは、層厚がたわみや曲げモーメントに及ぼす影響は顕著であるが、約4m以上になるとその影響はほとんど認められなくなることを示している。このことは、 $n > 1$ の場合にも確認できる。

図5、6は層厚の影響範囲をみるために示したもので、横軸は第1と第2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 (層厚比)、縦軸は杭頭の変位 (R_y) とたわみ角 (R_a)、最大曲げモーメント (R_{mm}) と、その発生深さ (R_{lm}) を無次元化して示した。なお、無次元化は第1層が100% ($L_1 = 12m$) の値で割った。図5は $n = 0.2$ の場合で、図6は $n = 5$ ($k_1 = 5$ kgf/cm³, $k_2 = 1$ kgf/cm³) の場合である。 $n = 0.2$ では層厚比が約60%以上になると杭の変位や断面力は変化しないことがわかる。 $n = 5$ の場合には約40%以上で同様のことがいえる。

各地盤反力係数比において、第1層の層厚の変化に対して、 R_y , R_a , R_{mm} および R_{lm} のすべてが $\pm 3\%$ 以内で1に近似する層厚比 (限界層厚比; D_{ert}) を求めて示したのが図7である。同図より、 $n < 1$ の範囲では、 n の増加に伴って D_{ert} は直線的に減少し、 $n = 1$ で $D_{ert} = 0$ になっていることがわかる。また、 $n > 1$ の場合には、 n の増加とともに、 D_{ert} も増加するが、 n が2.5を境にそれ以上になっても D_{ert} の変化はほとんどみられなくなる。

すなわち、地層の組合わせとして、表層に軟かな層がある場合には地盤反力係数比の変化に敏感であり、中間に軟かな層がある場合には第1層の拘束効果が利いていると考えられる。

4 むすび 以上の結果をまとめると、つぎのことが言える。

ある地盤反力係数比のもとで、第1層の層厚が増加すると、次第に多層系地盤としての効果は無くなり、単一層で近似し得る。また、地盤反力係数比との関係については、 $n < 1$ の場合には、 n の増加に対して変形や断面力に与える影響度は高く、 $n > 1$ の場合には比較的影響度が小さい。特に、第1層の層厚比が40%を越えるとほぼ単一層として取り扱いうるものと考えられる。

<参考文献> 1) 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、2) 土質工学会編「杭基礎の設計法とその解説」、土質工学会、pp.394～521

