

九州大学 工学部 正員 小 坪 清 真
 九州工業大学 正員 ○高 西 照 彦
 九州大学 工学部 正員 成 富 勝
 九州工業大学 多 田 浩

1. まえがき 著者は前論⁽¹⁾において、脚付きケーソン基礎に対する鉛直方向群杭効率の3次元弾性論に基づく理論的解析法について述べ、2, 3の計算例を示したが、そこでは、杭と周辺地盤とは完全に密着しているという仮定がなされていた。しかし、実際の杭基礎が比較的大きな鉛直変位を生ずるようなときには、杭周面において土のせん断力が杭と土との間の摩擦より大きくなり、そのためその部分にすべりが発生するであろうと考えられる。本論は、上記のような杭周面のすべりを考慮したときの脚付きケーソン基礎の鉛直方向群杭効率と各杭の荷重分担率とを求める理論的解析法について考察を行ったものである。

2. 解析理論 (1) 解析上の仮定 (a) 地盤は弾性上層地盤と基盤とから成っている。

(b) 上層地盤における水平変位は鉛直変位に比べて小さい。(c) 杭は鉛直で、円形断面を有する弾性体であり、下端は基盤に剛に支持されており、上端は剛なケーソンに結合されている。(2) 上層地盤の変形曲線 上層地盤の変形曲線は、3次元弾性方程式を満たす素解を重ね合わせることによって次式のように表されると仮定する。

$$w_p = \sum_{i=1}^{\infty} (1/\lambda_i) A_i K_0(\lambda_i \eta_i^r) \sin(\lambda_i \pi z/H) + F_i z + \sum_{m=1}^{\infty} (1/\lambda_m) A_m K_0(\lambda_m \eta_m^r) \sin(\lambda_m \pi z/H) \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 w_p : 上層地盤中任意点Pにおける鉛直変位、 A_m , F_m : 杭mに関する未定係数、 $K_0(\)$: 第2種第0次変形ベッセル関数、 $\lambda_m = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)} \lambda_m \pi / H$, ν : 上層地盤のポアソン比、 H : 上層地盤の厚さ (= 杭長)、 a_m : 杭mの半径、 $\eta_m^r = r_m / a_m$, r_m : 杭mの中心軸から点Pまでの水平距離である。さて、 λ , μ をラーメの定数とすれば、地盤中の鉛直応力とせん断応力は $\sigma_z = (\lambda + 2\mu) \partial w_p / \partial z$, $\tau_{rz} = \mu \partial w_p / \partial r$ によって得られる。いま式(1)を用いて、地表面における両応力を求めると

$\sigma_z|_{z=H} = 0$, $\tau_{rz}|_{z=H} = 0$ となり、式(1)は地表面における鉛直応力 = 0という境界条件を満足していないことがわかる。本論では $\sigma_z|_{r_i=a_i} = 0$ という条件を採用することによって上記の境界条件を近似的に満たすようにした。式(1)を用いれば、それは $\sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i (\pi/H) A_i K_0(\lambda_i \eta_i^r) + F_i z + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m (\pi/H) A_m K_0(\lambda_m \eta_m^r) = 0$ --- (2) と書ける。ここに、 $\eta_i^r = r_{im} / a_i$, r_{im} : 杭mと杭iとの中心軸間距離である。

(3) 杭周面に作用する土圧 杭周面に作用する土圧は $Q_i(z) = \int_{-\pi}^{\pi} \tau_{rz}|_{r_i=a_i} a_i d\theta_i$ --- (3) によって求めることができる。

(4) 杭の軸力 杭iの杭頭荷重を P_i とすれば、杭iの軸力は $N_i(z) = P_i + \int_z^H Q_i(z) dz$ --- (4) によって得られる。

(5) 杭の軸方向変位 杭iの伸び剛性を $E_i A_i$ とすれば、杭iの軸方向変位は次式によって求めることができる。 $\eta_i(z) = \int_0^z N_i(z) / E_i A_i dz$ --- (5)

(6) 境界条件 各杭が杭頭荷重 P_i をうけて、上層地盤中で h_{is} (= $H - h_{if}$, h_{if} : 密着区間の長さ) 区間にすべりを生じており、そのときの杭頭の鉛直変位がすべての杭で等しく δ であるとすれば、このとき杭と周辺地盤との間に成り立つ境界条件式は次の通りである。(a) 密着区間 ($0 \leq z \leq h_{if}$) において：密着区間においては杭と杭周面地盤との鉛直変位は等しい。この条件式は式(1)と式(5)を用いて次式のように表される。

$$\frac{E_i A_i}{\mu H^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_i} \frac{A_i}{H} K_0(\lambda_i \eta_i^r) \sin \frac{\lambda_i \pi z}{H} + \frac{E_i A_i}{\mu H^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \frac{A_m}{H} K_0(\lambda_m \eta_m^r) \sin \frac{\lambda_m \pi z}{H} - 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_i} \frac{A_i}{H} K_1(\lambda_i \eta_i^r) \left\{ (-1)^i \frac{z_i}{H} - \frac{1}{\lambda_i \pi} \sin \frac{\lambda_i \pi z}{H} \right\} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \frac{A_m}{H} K_1(\lambda_m \eta_m^r) \left\{ (-1)^m \frac{z}{H} - \frac{1}{\lambda_m \pi} \sin \frac{\lambda_m \pi z}{H} \right\} - \frac{P_i}{\mu H^2} + \frac{E_i A_i}{\mu H^2} F_i \frac{z}{H} = 0$$

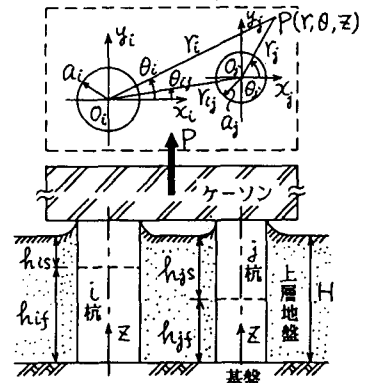


図-1 脚付きケーソン基礎-地盤系

($0 \leq z \leq h_{if}$), ($i=1,2,\dots,N$), N : 杭本数 $\dots\dots\dots$ (6)

(b) すべり区間 ($h_{if} \leq z \leq H$) において: 基盤から z の位置における地盤の鉛直応力は、地盤の密度を γ とすれば $\gamma g (H-z)$ である。ここに、 g は重力の加速度。いま静止土圧係数を K_0 とすれば、地盤中の水平方向の応力は $K_0 \gamma g (H-z)$ と表される。また杭と杭周面の地盤との間の摩擦係数を f とすれば、杭周面に作用する鉛直方向のすべり抵抗力は、杭の単位長さ当たり $\bar{Q}_i(z) = \int_0^{2\pi} f K_0 \gamma g (H-z) \alpha_i d\theta \dots\dots\dots (7)$ となる。さて式 (3) で表される杭周面のせん断力が式 (7) のすべり抵抗より大きくなれば、杭と周辺地盤との間にはすべりが生じることになる。このとき杭周面に対する地盤の鉛直方向の抵抗力は $\bar{Q}_i(z)$ となる。したがって式 (3) と式 (7) から次式を得る。
($h_{if} \leq z \leq H$), ($i=1,2,\dots,N$)

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i} \eta_i \frac{A_i}{H} K_i(\eta_i) \sin \frac{\pi z}{H} - \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{E_i} \eta_i \frac{A_m}{H} K_0(\eta_i \eta_m^{im}) I_i(\eta_i) \sin \frac{\pi z}{H} = \frac{2\pi \alpha_i f K_0 \gamma g}{2\pi \mu} (1 - \frac{z}{H}) \dots\dots\dots (8)$$

(c) 杭頭 ($z=H$) において: 脚付きケーソンが鉛直荷重 P をうけて δ の鉛直変位を生じたとすれば、各杭の杭頭変位は δ に等しくなければならない。したがって式 (5) において $z=H$ として次式を得る。

$$2 \sum_{i=1}^N (-1)^i \frac{1}{E_i} \eta_i \frac{A_i}{H} K_i(\eta_i) - 2 \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^i \frac{1}{E_i} \eta_i \frac{A_m}{H} K_0(\eta_i \eta_m^{im}) I_i(\eta_i) + \frac{P_i}{\mu H^2} = \frac{E_i A_i}{\mu H^2} \frac{\delta}{H} \dots\dots\dots (9)$$

(7) 未定係数の決定 未定係数 A_m , F_m , P_m は式 (2), (6), (8), (9) で表される連立方程式を解けばこれらの値を定めることができる。しかし、上記の連立方程式を解くためには各杭のすべり区間の長さ h_{is} が既知でなければならない。他方 h_{is} は杭周面地盤のせん断力が既知でなければこれを定めることができないので、結局未定係数と h_{is} を定めるためには、まず h_{is} を仮定して未定係数を求め、これを用いて h_{is} を算出し、その値が最初に仮定した h_{is} に等しいかどうかを確かめ、もし両者が異なっていれば、改めて h_{is} を仮定して同様な計算を繰り返すという繰り返し計算が必要となる。なお h_{is} の決定には、 $z=h_{is}$ において杭周面地盤のせん断力の分布曲線がなめらかであるかどうかを判断の基準として採用した。また上記の連立方程式を z の連続関数として解くことは困難であるので、本論では選点法の概念を用いて有限個の z の点において方程式を満足するように未定係数と h_{is} とを定めた。(8) 群杭効率及び荷重分担率 単杭と群杭とで同一の杭頭変位を生じさせるような鉛直荷重をそれぞれ P_0 , P とすれば、群杭効率は $e_N^P = P / (N \cdot P_0)$ と表される。また各杭の杭頭荷重を P_m とすれば各杭の荷重分担率は $R_m = P_m / P$ によって求めることができる。

3. 数値計算例 2. で述べた理論に従って、以下に示すような諸元及び諸定数値を有する脚付きケーソン

基礎について数値計算を行った。杭本数 $N=9$ 本、杭径 $2a=0.6\text{m}$ 、杭長 $H=20\text{m}$ 、杭の伸び剛性 $EA=3.5 \times 10^7 \text{ kN}$ 、地盤のポアソン比 $\nu=0.49$ 、せん断弾性定数 $\mu=5.6 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 、密度 $\gamma=1.33 \text{ t/m}^3$ 、静止土圧係数 $K_0=0.5$ 、杭と地盤との間の摩擦係数 $f=0.4$ 。杭頭の鉛直変位が $\delta=0.5\text{mm}$ の場合について杭の中心軸間距離と杭径の比 l/d をいろいろ変えて、そのときの群杭効率と各杭の荷重分担率及び杭の軸方向変位、杭周面地盤のせん断力並びに杭の軸力分布を求めた。なお、 z 方向の分割数は 30 等分とした。得られた結果の一例を図-2 に示した。群杭効率は $l/d=2\sim 7$ に対して $e_N^P=0.85\sim 0.99$ であった。各杭の荷重分担率は $0.108\sim 0.111$ (等分担率) であった。

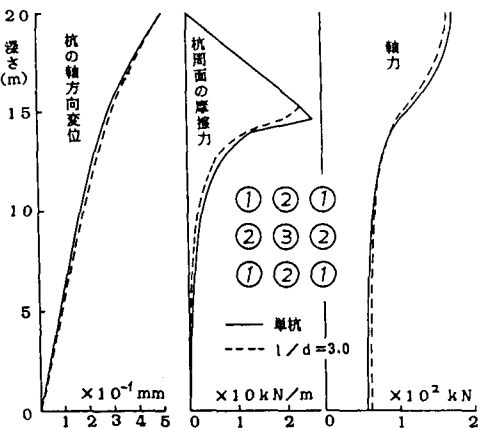


図-2 各杭の軸方向変位、軸力、杭周面摩擦力の分布 (杭頭変位 0.5mm)

(1) 小坪・高西・成富: 脚付きケーソン基礎の群杭効率および荷重分担率, 土木学会論文集 N o. 356,