

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

1. まえがき 著者等は前論⁽¹⁾において、各杭の直径がそれぞれ異なり、しかも、その配置が不規則であるような多柱基礎に対する横方向群杭効果を、見通しよく求め得る理論的解析法を提案した。しかし、多柱基礎を構成する各杭が、図-1に示すように地表面から突き出した空中部分を有しているような場合に対しては、上述の解析法を直ちにこれに適用することはできない。本論は杭の変形曲線について、次節に示すような仮定を採用することによって、前論の解析法をそのまま生かして、空中部分を有する多柱基礎に対する横方向群杭効果を理論的に求める方法について論じた。さらに、本論の方法に従って、図-1に示す多柱基礎において、空中部分の長さとの比(H_0/H)の変化が群杭効果に及ぼす影響及び H_0/H と各杭の荷重分担率との関係等を求めた。

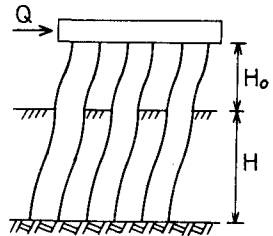


図-1 多柱基礎

2. 解析理論 図-1に示す多柱基礎がその頭部に水平荷重を受けたとき、その群杭効果を厳密に計算する式を導くことは非常に煩雑であるから、本論では群杭を構成する各杭の変形曲線について、次のような仮定を設けて、多柱基礎の横方向群杭効果を近似的に求めた。すなわち、各杭の変形曲線は地表面において、その接線が地表面に対して垂直である。このような仮定を採用すれば、図-1に示すような多柱基礎に対する群杭効果は、前論の結果を利用することによって、これを容易に求めることができる。なお、このようにして得られた群杭効果の値 ϵ は、一般に厳密解に比べて小さい。換言すれば、本論の仮定に従えば一般に多柱基礎の群杭効果が過大に見積ることになるといえよう。

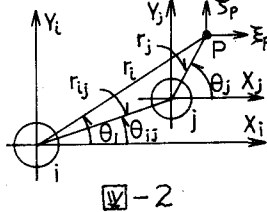


図-2

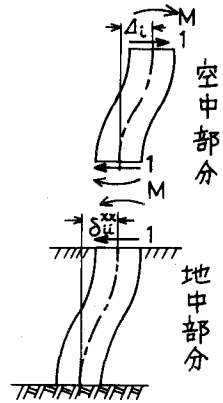


図-3

2. 1. 杭の変形の影響係数 図-1に示す多柱基礎に対して、各杭間の連結を断ち、しかし杭頭は回転拘束状態のまま杭の頭部に X 方向単位水平荷重を加える。このとき j ($j=i, j, k, \dots$) 杭の X 方向の杭頭水平変位を δ_{ji}^{xx} 等と表わす。このとき、杭の変形曲線についての上述の仮定から、 i 杭以外の杭に対する杭頭水平変位 δ_{ij}^{xy} ($i \neq j$) 等は、空中部分を有しない杭のそれと全く同じ値になる(前論の δ_{ij}^{xx} 等に等しい)が、 i 杭の X 方向杭頭変位については、図-3を参照して $\delta_{ii}^{xx} = \delta_{ii}^{xx} + \Delta_i$ となる。 δ_{ii}^{xx} は前論からこれを求めることができる。空中部分の変位 Δ_i については、図-3を参照すれば、これは一端固定、他端回転拘束梁の頭部に単位の水平力を加えたときの頭部の水平変位であるから、杭の曲げ剛性を $E_i I_i$ とすれば $\Delta_i = H_0^3 / 12 E_i I_i$ となる。このようにして変位の影響係数が求められれば、多柱基礎の群杭効果は容易に求めることができる。すなわち、 n 本から構成される多柱基礎の各杭の杭頭に、それぞれ X 及び Y 方向の水平荷重を加えて、各杭の X 方向の杭頭変位を1、 Y 方向のそれを0にするのに必要な荷重をそれぞれ Q_i^x, Q_i^y ($i=1, 2, \dots, n$) とおけば、 Q_i^x, Q_i^y 等は次の連立方程式の解として求めることができる。

したがって、単杭の杭頭を1だけ変位させるのに必要な水平荷重を Q_{i0} とすれば、多柱基礎の群杭効果は次式から

$$\begin{bmatrix} \delta_{11}^{xx} + \Delta_1 & \delta_{11}^{xy} & \dots & \delta_{1n}^{xx} & \delta_{1n}^{xy} \\ \delta_{21}^{xx} & \delta_{21}^{xy} + \Delta_1 & \dots & \delta_{2n}^{xx} & \delta_{2n}^{xy} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \delta_{m1}^{xx} & \delta_{m1}^{xy} & \dots & \delta_{mn}^{xx} + \Delta_n & \delta_{mn}^{xy} \\ \delta_{n1}^{xx} & \delta_{n1}^{xy} & \dots & \delta_{nn}^{xx} & \delta_{nn}^{xy} + \Delta_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_1^x \\ Q_1^y \\ \vdots \\ Q_m^x \\ Q_m^y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots (1)$$

得られる。 $e_n^x = \sum_{i=1}^n Q_i^x / \sum_{i=1}^n Q_{i0} \cdots (2)$ また、杭頭抵抗力の比 f_i は $f_i^x = Q_i^x / Q_{i0}$, $f_i^y = Q_i^y / Q_{i0}$ ($i=1, 2, \dots, n$) $\cdots (3)$

各杭の荷重分担率 v_i は $v_i^x = f_i^x / \sum_{i=1}^n f_i^x = Q_i^x / \sum_{i=1}^n Q_i^x$ ($i=1, 2, \dots, n$) $\cdots (4)$ によって与えられる。ここに、 Q_{i0} は次のようにして求めることができる。すなわち、単杭の杭頭に単位水平力を加えたときの地中部分の地表面における変位を δ_{i0} とすれば、空中部分の変位は前述の通り Δ_i であるから、 $Q_{i0}\delta_{i0} + Q_{i0}\Delta_i = 1$ が成り立つ。 δ_{i0} は前論における単杭の変形曲線 $w_i(z)$ から $\delta_{i0} = w_i(H)$ として求められるから、結局 Q_{i0} は $Q_{i0} = 1 / \{w_i(H) + \Delta_i\}$ $\cdots (5)$

2.2. 地盤反力係数 k の群杭効果 杭基礎の横方向変形を求めるのに、地盤反力係数 k を用いた計算法が広く用いられている。そこで以下に、多柱基礎に対して、 k 値の群杭効果の表式を導くことにする。いま、杭が無限に長いとすれば、単杭の頭部に水平荷重 Q_{i0} を加えたとき、地中部の杭の変形曲線は、Changの式を用いれば $y_i = \delta_{i0} e^{-\beta_{i0} z} (\cos \beta_{i0} z + \sin \beta_{i0} z)$ $\cdots (6)$ と表わされる。ここに、 z は地表面からの距離、 δ_{i0} は杭の地表面での水平変位、 $\beta_{i0} = (k_{i0} r_i / 2 E_i I_i)^{1/4}$ $\cdots (7)$ 、 r_i は杭半径である。これより杭頭水平力 Q_{i0} と δ_{i0} との関係性を求めれば $Q_{i0} = E_i I_i y_i'''|_{z=0} = 4 E_i I_i \beta_{i0}^3 \delta_{i0}$ $\cdots (8)$ 一方、多柱基礎を構成する各杭（例えば i 杭）に対しては、その地表面における変位 δ_i^x は、式(1)より

$$\delta_i^x = \delta_{i0}^x Q_i^x + \delta_{i0}^{xy} Q_i^y + \cdots + \delta_{i0}^{xm} Q_i^m + \delta_{i0}^{ym} Q_i^y = 1 - \Delta_i Q_i^x \cdots (9)$$

i 杭の杭頭には Q_i^x の水平力が働いているので、式(8)を参照して

$$Q_i^x = 4 E_i I_i \beta_{i0}^3 \delta_i^x = 4 E_i I_i \beta_{i0}^3 (1 - \Delta_i Q_i^x) \cdots (10) \quad \text{ここに、} \beta_{i0} = (k_{i0} r_i / 2 E_i I_i)^{1/4} \cdots (11)$$

したがって、多柱基礎を構成する i 杭の地盤反力係数 k_{i0} は $k_{i0} = (2 E_i I_i / r_i) [Q_{i0}^x / \{4 E_i I_i (1 - \Delta_i Q_{i0}^x)\}]^{4/3} \cdots (12)$ 単杭に対する k 値との比で表わせば、式(8)において $\delta_{i0} = w_i(H) = 1 / Q_{i0} - \Delta_i$ (式(5)より)として、式(10)との比をとって $k_i / k_{i0} = \{ (1 / Q_i^x - \Delta_i) / (1 / Q_{i0}^x - \Delta_i) \}^{4/3} \cdots (13)$

さらに、多柱基礎を構成する各杭の直径がすべて等しい場合には、単杭の k 値に対する多柱基礎の各杭の k 値の比は、群杭効果 e_n^x を用いて $k / k_{i0} = \{ (1 / Q_0 - \Delta_0) / (1 / e_n^x Q_0 - \Delta_0) \}^{4/3} \cdots (14)$

3. 数値計算結果 数値計算結果の一例を図-4、5に示した。図において、 d は杭直径、 l は杭中心突間距離、 $\alpha_0 = \frac{\pi}{64} d^4 \mu / E_p I_p$ で、 $E_p I_p$ は杭の曲げ剛性、 μ は地盤のせん断弾性定数、 H は杭の地中部分の長さ、 H_0 は空中部分の長さである。図-4は、図中に示すような配置を有する9本杭に対して、 l/d をパラメータとして H_0/H と横方向群杭効果 e_g との関係をプロットしたものである。同図から $H_0/H > 0.5$ に対しては、群杭効果 $e_g \approx 1$ すなわち、群杭効果はほとんど無視してもよいといえる。これは空中部分の変形が地中部分のそれに比べて大きくなるために、各杭の地中部分の変形量のわずかな差がほとんど結果にきいてこないことによるものである。図-5は多柱基礎を構成する各杭の荷重分担率 v_i と H_0/H との関係を9本杭に対して、 $l/d = 2.5$ の場合についてプロットしたものである。図-4から容易に推定されるように、各杭の v_i は $H_0/H > 0.5$ に対しては $v_i = 1/9$ となっている。いろいろの H/d 、 α_0 及び l/d に対しても得られた結果は図-5とほとんど同様な傾向を示している。 k 値の群杭効果は H_0/H には無関係であって、 l/d に対してほぼ群杭効果 e_n の $4/3$ 乗に比例して変わる。

(1) 小坪・高西：横方向群杭効果に関する理論的解析法，土木学会西部支部研究発表会講演論文集，昭.52.2.

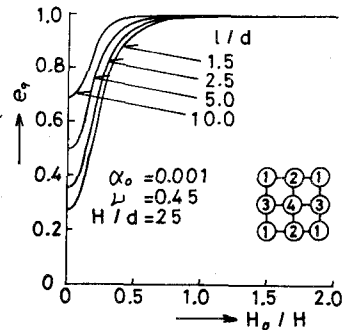


図-4 H_0/H と群杭効果の関係(9本杭)

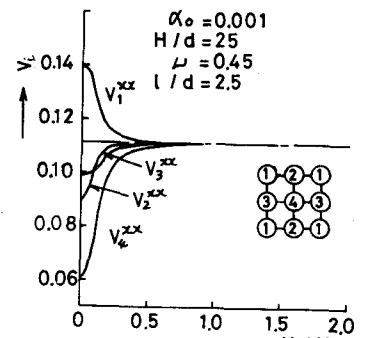


図-5 各杭の荷重分担率 v_i (9本杭)