

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 学生員 河島 正治

1. まえがき 著者等は前論⁽¹⁾において、杭頭回転拘束の場合に対して、弾性論を用いた横方向群杭効果の解析法を提案し、著者等の解と王置等の実験結果⁽²⁾との比較検討を行った。王置等の実験においては、杭頭の変位が比較的大きく、そのため杭周辺の砂地盤の変形が非線型領域にはいつていると推定されたので、その後著者等は、同じく砂地盤を用いて、線型範囲における群杭効果を求める実験を行い、理論解と実験値とが実験の精度内でよく一致することを確かめて、著者等の解の有用性を示した⁽³⁾。本論においては、杭頭回転自由の場合に対する横方向群杭効果の理論解を導き、数値計算を行って、実験値^{(2),(4)}と理論値とを対比して、本理論の妥当性を示した。

2. 群杭効果の理論 本論の基本的な考え方は、前論における杭頭回転拘束の場合の理論とほとんど同様である。ただ、本論が前論と異なるところは、杭頭回転自由の条件式の数式的表式に関する部分である。弾性論を用いて厳密にこの条件の数式的表現を得ることは困難であるので、本論では以下に述べる(V)のようにしてこれを求めた。群杭効果を求める手順は(i)例えば図-1(A)に示すように、頭部回転自由な本杭 i 、 j からなる群杭が、その頭部に杭中心を結ぶ軸方向（以下杭軸方向という）に水平荷重 Q をうけた場合を考える。いま図-1(B)に示すように、両杭の頭部回転自由の条件を保つまま両杭の連結を断ち、いましばらく j 杭を取除いたのち i 杭の杭頭に単位水平荷重を加える。このときの i 杭の変形曲線と j 杭の中心軸上の地盤の変形曲線を(V)に従って求める。(ii)以後は全く前論と同じ手順に従えばよいのであるが、ここで簡単に再説すれば次の通りである。すなわち j 杭に適当な外力 $p_j^{(1)}$ を加えて、 j 杭に j 点の地盤の変形曲線と等しい変形を与えてこれを j 点に設置する。(iii)実際には j 杭には $p_j^{(1)}$ は加わっていないので、図-1(C)に示すように、いま i 杭を取除いて j 点に設置された j 杭に先の $p_j^{(1)}$ と逆方向に水平外力 $p_j^{(1)}$ を加える。このとき j 杭は弾性変形を生じて図-1(C)に示す位置すなわち、杭の曲げ力と地盤の反力とか等しい位置まで変位する。この場合の j 杭の変形曲線及び i 点の地盤の変形曲線は前論の所論を用いてこれを求めることができる。(iv)以下は図-1(D)を参照して、前論と全く同様な操作を繰返し行って、両杭の変位の補正量が十分小さくなったところでやめる。(v)さてここで、(i)の操作における i 杭及び j 点の地盤の変形曲線は次のように考えてこれを求めた。すなわち、まず i 杭の変形曲線は地盤反力係数 k （その定め方は後述する）を一定として、次に示すChangの式を、杭頭せん断力 $Q=1$ 、杭頭回転自由の条件の下で解いて得ることができる。

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + ky = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

y : 杭の水平変位, k : 地盤反力係数
 EI : 杭の曲げ剛性, z : 深さ方向の座標

また地盤の変形曲線は弾性論の基礎式を解いて、次のように得られる。

$$u = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[A_n \left\{ \frac{1}{r} I_1 \left(\frac{nu}{r} \right) - \frac{nu}{r} I_0 \left(\frac{nu}{r} \right) \right\} + B_n \left\{ \frac{1}{r} K_1 \left(\frac{nu}{r} \right) + \frac{nu}{r} K_0 \left(\frac{nu}{r} \right) \right\} + \frac{C_n}{r} I_1 \left(\frac{nu}{r} \right) + \frac{D_n}{r} K_1 \left(\frac{nu}{r} \right) \right] \times \sin \frac{n\pi z}{2H} \cos \theta \quad (2)$$

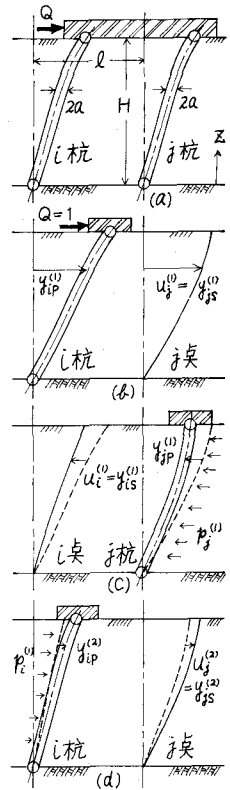


図-1

$$v = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[\frac{A_n}{r} I_n\left(\frac{n\omega_g}{v_g} r\right) + \frac{B_n}{r} K_n\left(\frac{n\omega_g}{v_g} r\right) + C_n \left\{ \frac{1}{r} I_n\left(\frac{n\omega_g}{v_g} r\right) - \frac{n\omega_g}{v_g} I_0\left(\frac{n\omega_g}{v_g} r\right) \right\} + D_n \left\{ \frac{1}{r} K_n\left(\frac{n\omega_g}{v_g} r\right) + \frac{n\omega_g}{v_g} K_0\left(\frac{n\omega_g}{v_g} r\right) \right\} \right] \times \sin \frac{n\pi z}{2H} \sin \theta \quad (3)$$

ここに、 u 、 v は地盤の半径方向、円周方向の変位、 $I_n(r)$ 、 $K_n(r)$ は n 次の変形Bessel函数、 v_g 、 v_g は縦波、横波の速度、 ω_g は厚さ H の地盤の n 次固有円振動数、 A_n 等は未定係数である。さて未定係数 A_n 等は杭と地盤の連続条件及び杭の円形外側境界における地盤の変位=0の条件からこれを定めることができる。その際(1)式から求めた杭の変位 y をFourier級数展開して $\sin(n\pi z/2H)$ の項で表わすことが必要である。次に、地盤反力係数 k の値は、杭周面において杭が地盤から受ける土圧と杭の地盤反力が等しいという条件を用いて定めた。すなわち、 $\int_0^H k y dz = - \int_0^H p(z) dz \dots\dots\dots (4)$ $p(z)$: 杭周面の単位長さ当りの全土圧

以上の所論に従えば、杭頭回転自由の場合に対する群杭効果の解析解を求めることができる。一例として、2本杭の杭軸方向の群杭効果の理論解とその結果のみを述べ、次の通りである。頭部の連結を断たれた2本杭において、 i 杭が杭軸方向に水平荷重を受けたときの、 j 両杭の杭頭変位は

$$y_i = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[C_n - C_n h_n U_n \frac{1 - Y_n}{1 - U_n^2} \right], \quad y_j = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} C_n h_n \frac{1 - Y_n}{1 - U_n^2} \quad (5)$$

ここに、 U_n 、 Y_n は前論と全く同じ意味の記号である。 C_n 、 h_n は(4)において杭及び地盤の変位を

$$\bar{y}_i = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} (-1)^{\frac{n-1}{2}} C_n \sin \frac{n\pi z}{2H}, \quad \bar{y}_j = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} (-1)^{\frac{n-1}{2}} C_n h_n(r) \sin \frac{n\pi z}{2H} \dots\dots\dots (6)$$

と表わしたときのFourier係数である。単杭の杭頭変位は $y_0 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} C_n$ と表わされるから、群杭効果は $e_{2p} = y_0 / (y_i + y_j)$ によって求めることができる。

3. 数値計算及び実験値との対比 図-2は横軸に杭中心間隔と杭径の比 $l/2a$ をとり、縦軸に群杭効果 e_2 をとって、2本杭の場合に対する理論解の数値計算結果を示したものである。実線は杭軸方向、点線は杭軸直角方向の群杭効果を表わす。計算には王置等の実験における諸元、諸数値を採用した。また、同図中には、砂地盤を用いた王置等の実験値⁽²⁾(○印)及び参考のため粘性土地盤を用いた長谷川等の実験値⁽⁴⁾(●印及び×印)が同時にプロットされている。王置等の実験値と理論値とは $l/2a$ が小さいところではよく一致しているといえるが、 $l/2a$ が大きいところでは後者は群杭効果を過大に見積る結果を与えている。それは杭頭回転拘束の場合の結果と同じ傾向を示すもので、その主な原因は砂地盤の非線形的な挙動にあると考えられる。即ち、図-1(ハ)において、 i 杭の変位にもとづく j 杭の地盤の変位が、 $l/2a$ が大きくなるに従って弾性論で予測する量よりはるかに早く小さくなるためであろう。粘性土地盤に対する実験値に関してはデータ数が少ないので、理論値と比較して一般的結論を出すことは難かしい。

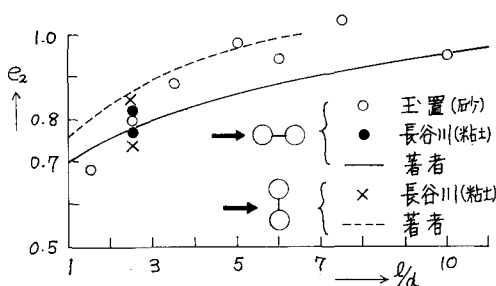


図-2 2本杭

- (1) 小坪・高西・河島:「横方向群杭効果の理論的考察」第29回土木学会講演概要集, 昭49.10.
- (2) 王置・三橋・今井:「水平抗杭における群杭効果の研究」土木学会論文集, NO.192, 1971-8.
- (3) 小坪・高西・鳥野・河島:「群杭効果の理論的実験的研究」昭和49年度土木学会西部支部研究発表会論文集, 昭50.2.
- (4) 長谷川・河原:「粘性土地盤の水平方向群杭模型試験」第7回土質工学研究発表会, 昭47.6.