

多層地盤中の群杭の 水平方向複素剛性簡易評価式とその適用性

勝川藤太¹・鈴木猛康²・小長井一男³

¹正会員 工修 (株)熊谷組 技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

²正会員 工博 (株)熊谷組 技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

³正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所第1部 (〒106-1558 東京都港区六本木7-22-1)

構造物・基礎・地盤系の動的相互作用のうち、構造物の慣性力による相互作用は複素剛性で評価することができる。複素剛性の評価方法としては様々な方法が提案されているが、設計等に動的相互作用を取り込むことを想定した場合には、より簡便な評価方法が必要と考えられる。そこで本稿では、水平成層地盤中の群杭の水平方向複素剛性に対する簡易評価式を提案し、さらに群杭の配置パターンと地層構造をパラメータとした適用性検討を実施し、提案した簡易評価式が一般的な群杭に対して実用上十分な近似解を与えることを示した。

Key Words : dynamic interaction, dynamic stiffness, simple expression

1. はじめに

地震時に構造物は基礎・地盤の影響を受けて振動し、基礎・地盤もこの構造物の振動による影響を受けて振動が変化する。このような構造物・基礎・地盤系における力のやり取りが動的相互作用である。また、動的相互作用は、地盤と基礎の剛性の差によって生じるキネマティック相互作用と、構造物の慣性力によって生じる慣性力相互作用の二つに分類される。このうち、慣性力相互作用は地盤の複素剛性で評価することができる。水平成層地盤における複素剛性は、小長井により開発された数値解析プログラムBASPIA¹⁾等を用いて精度良く評価することができるが、設計にこの効果を取り込むことを想定した場合、初期段階においてはより簡便な評価方法が必要と考えられる。既に単一層地盤の群杭の水平方向複素剛性に対しては、小長井により簡易評価式²⁾が提案されているが、より一般的な地盤と基礎構造を検討対象とする場合には、多層地盤に対応した簡易評価式が必要となる。

本稿は、水平成層地盤中の群杭の水平方向複素剛性に対する簡易評価式を提案するものである。水平成層地盤に対応した簡易評価式は、上述の単一層地盤に対する簡易評価式を拡張して求めることとした。まず、多層地盤へ拡張する目的でBASPIAを用いて実施したパラメトリックスタディと、その結果得られた簡易評価式について述べる。さらに、群杭の配置パターンと地層構造をパラメータとした、簡易評

価式の解と厳密解 (BASPIA) との比較による適用性検討について述べる。

2. 水平成層地盤中の群杭の水平方向複素剛性簡易評価式

(1) 単一層地盤の群杭の水平方向複素剛性簡易評価式

式(1)は単一層地盤の群杭の水平方向複素剛性に対する簡易評価式である。 μ は土のせん断弾性係数、 L_0 は杭と地盤の剛性比を示す定数で L_a/α 、 R_0 は群杭と等価な鉛直梁³⁾の半径である。ここで、 L_a はActive Pile Lengthと定義され、図-1に示すように実際に変形する群杭の長さである。なお、 α は地層構造により変化する係数である。また、 ω は円振動数、 V_s はせん断弾性波速度、 EI は杭の曲げ剛性である。

$$k_{xx} = \mu L_0 \left[\left\{ c_1 \frac{R_0}{L_0} + c_2 \right\} + i \cdot c_3 \cdot a - c_4 \cdot a^2 \right]$$

$$(c_1 = 2\pi, c_2 = \pi/2, c_3 = 2\pi, c_4 = \pi/4) \quad (1)$$

$$a = \frac{\omega R_0}{V_s}, \quad L_0 = \sqrt[4]{\frac{EI}{\mu}}, \quad L_a = \alpha L_0 \quad (2a) - (2c)$$

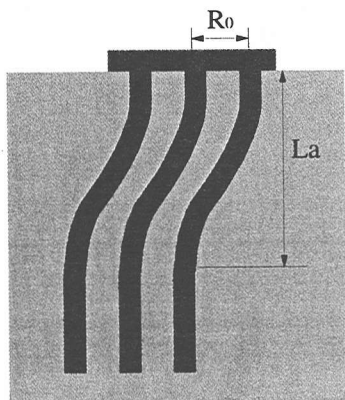


図-1 Active Pile Length

(2) 解析モデル

図-2は解析対象とした群杭を示したもので、杭径0.6m、厚さ0.0089m、杭長20mの4本の鋼管杭が1.5mの間隔で正方形に配置されているものとした。また、杭の弾性係数は $E_p=2.01 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$ 、密度は $\rho_p=0.801 \text{ t/m}^3$ である。図-3は解析対象とした水平成層地盤を示したもので、せん断弾性波速度が1番上の地層から基盤に向かって線形に変化するものとした。本解析では、このせん断弾性波速度の単位長さ当たりの変化率をパラメータ r_{VS} としており、図-3に示した5つの地層構造S1～S5を想定した。なお、土の密度は $\rho_s=0.153 \text{ t/m}^3$ 、ポアソン比は $\nu=0.49$ で、S1～S5で一定である。

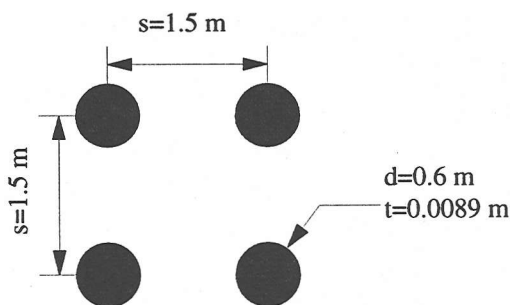


図-2 解析対象とした群杭

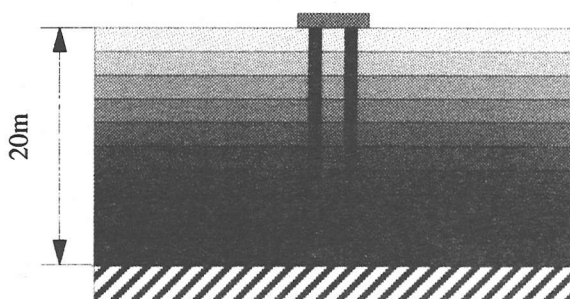


図-3 解析対象とした水平成層地盤パターン

(3) 水平成層地盤への拡張方法

単一層地盤に対する簡易評価式(1)中の係数 $C_1 \sim C_4$ に補正係数 $r_1 \sim r_4$ を乗ずることで、式(1)を水平成層地盤へ拡張することとした。

始めに、水平成層地盤S1～S5の基準となる単一層地盤を設定する必要があるため、第1層の物性値から成る地層構造を基準となる単一層地盤S0とした。さらに、 L_0 はこの第1層の物性値を用いて求まる値とし、各地層構造を代表するせん断弾性係数 μ は、深さ $2L_0$ までの平均値として求めることとした。

次に、係数 $C_1 \sim C_4$ は杭の振動モードを $\psi(z)$ とすると式(3a)-(3d)の関係があるので、あらかじめBASPIAを用いてS0～S5までの各地層構造における杭の振動モードを求めておき、それを用いて式(3a)-(3d)の右辺が単一層地盤S0の場合の値に対する水平成層地盤S1～S5の場合のそれぞれの値の比を取り、これを補正係数 $r_1 \sim r_4$ とすることとした。ただし、式(3a)-(3c)に含まれる μ としては上で定義した値を用いず、地表からActive Pile Lengthまでの杭の振動モードによる重み付き平均値を用いることとした。

$$C_1 \propto \int_0^{L_a} \mu(z)(\psi(z))^2 dz / \mu L_a \quad (3a)$$

$$C_2, C_3 \propto \int_0^{L_a} \mu(z)(\psi(z))^2 dz / \mu L_0 \quad (3b)-(3c)$$

$$C_4 \propto \int_0^{L_a} (\psi(z))^2 dz / L_0 \quad (3d)$$

最後に、最小2乗法により補正係数 $r_1 \sim r_4$ とせん断弾性波速度の変化率 r_{VS} の関係式を求め、係数 $C_1 \sim C_4$ にこの関係式を乗じて水平成層地盤の簡易評価式を求めることとした。

S1	S2	S3	S4	S5
80	80	80	80	80
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
120	160	200	240	280

unit : m/sec

(4) パラメトリックスタディによる解析結果

BASPIAを用いて地層構造S0～S5における杭の振動モード $\psi(z)$ を求めた。図-4は振動数約3.0Hzのときの杭の振動モードを示したものである。これより、杭の振動モードが地層構造によらずほぼ一定であることが分かる。また、無次元化した杭の変位が0.0となる時の地表面からの距離をActive Pile Length L_a とすると、杭の振動モード同様、地層構造によらずほぼ一定であることが分かる。この傾向は0.2～5.0Hzの範囲において同様であった。

図-5はこの振動モードを用いて求めた補正係数とせん断弾性波速度の変化率の関係をプロットしたものである。 $r_1 \sim r_3$ がほぼ直線的に変化していることと、 r_4 がせん断弾性波速度の変化率によりあまり変化しないことが分かる。そこで、すべての補正係数がせん断弾性波速度の変化率と線形関係にあるとして、最小2乗法を用いて求めた直線が図-5の点線である。

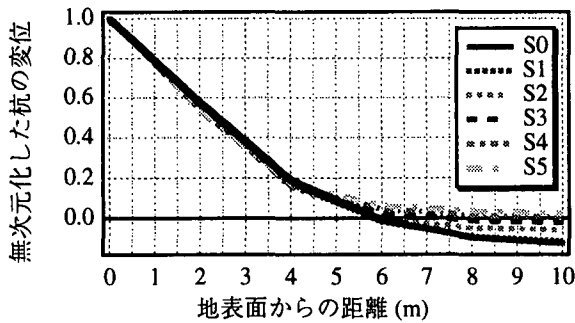


図-4 杭の振動モード

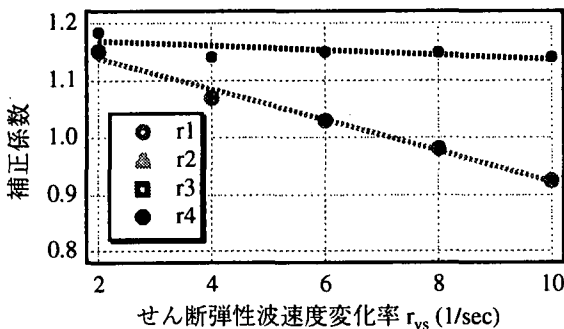


図-5 補正係数とせん断弾性波速度変化率の関係

(5) 水平成層地盤の群杭の水平方向複素剛性簡易評価式

以上の結果より、補正係数とせん断弾性波速度の変化率の関係式を式(1)の係数 $C_1 \sim C_4$ に乗じて求めた水平成層地盤における簡易評価式は式(4)のようになる。ここで、 μ 、 L_0 は式(1)と異なり、前述したように、 L_0 は第1層の物性値を用いて求まる値、 μ は深さ $2L_0$ までの平均値である。また、 R_0 は

$$k_{xx} \approx \mu L_0 \left[\left\{ r_1 c_1 \frac{R_0}{L_0} + r_2 c_2 \right\} + i \cdot r_3 c_3 \cdot a - r_4 c_4 \cdot a^2 \right]$$

$$(c_1 = 2\pi, c_2 = \pi/2, c_3 = 2\pi, c_4 = \pi/4) \quad (4)$$

$$r_1, r_2, r_3 = 1.193 - 0.027 r_{vs} \quad (5a) - (5c)$$

$$r_4 = 1.177 - 0.004 r_{vs} \quad (5d)$$

式(1)と同様で、群杭と等価な鉛直梁の半径である。式(4)による解と厳密解の比較結果は適用性検討の結果と重複するので省略するが、いずれのケースも良好な近似を示した。

3. 適用性検討

(1) 検討概要

水平成層地盤に対する簡易評価式は、図-2に示した2×2に配置された群杭パターンのみによって求めたが、一般的な群杭を対象とする為には、杭の本数が増えた場合等、杭の地盤に対する剛性比が高くなった場合への適用性を検討する必要がある。そこで、数パターンの群杭における簡易評価式の解と厳密解との比較を行い、その適用性を検討した。

(2) 解析モデル

図-6は解析対象とした群杭パターンを示したもので、鋼管杭が1.5mの間隔で正方形に2×2～5×5で配置されているものとした。杭の諸元は、2. (2)に前述した通りである。また、解析対象とした水平成層地盤も2. (2)に前述したものをを用いた。

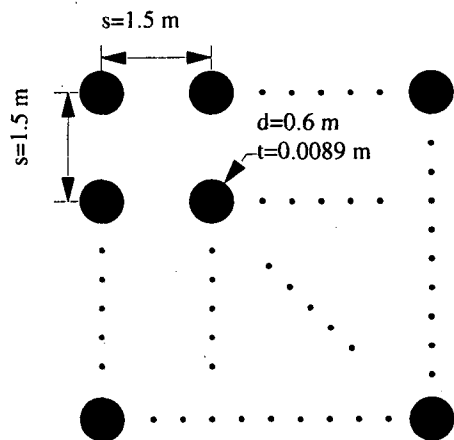


図-6 群杭の配置パターン

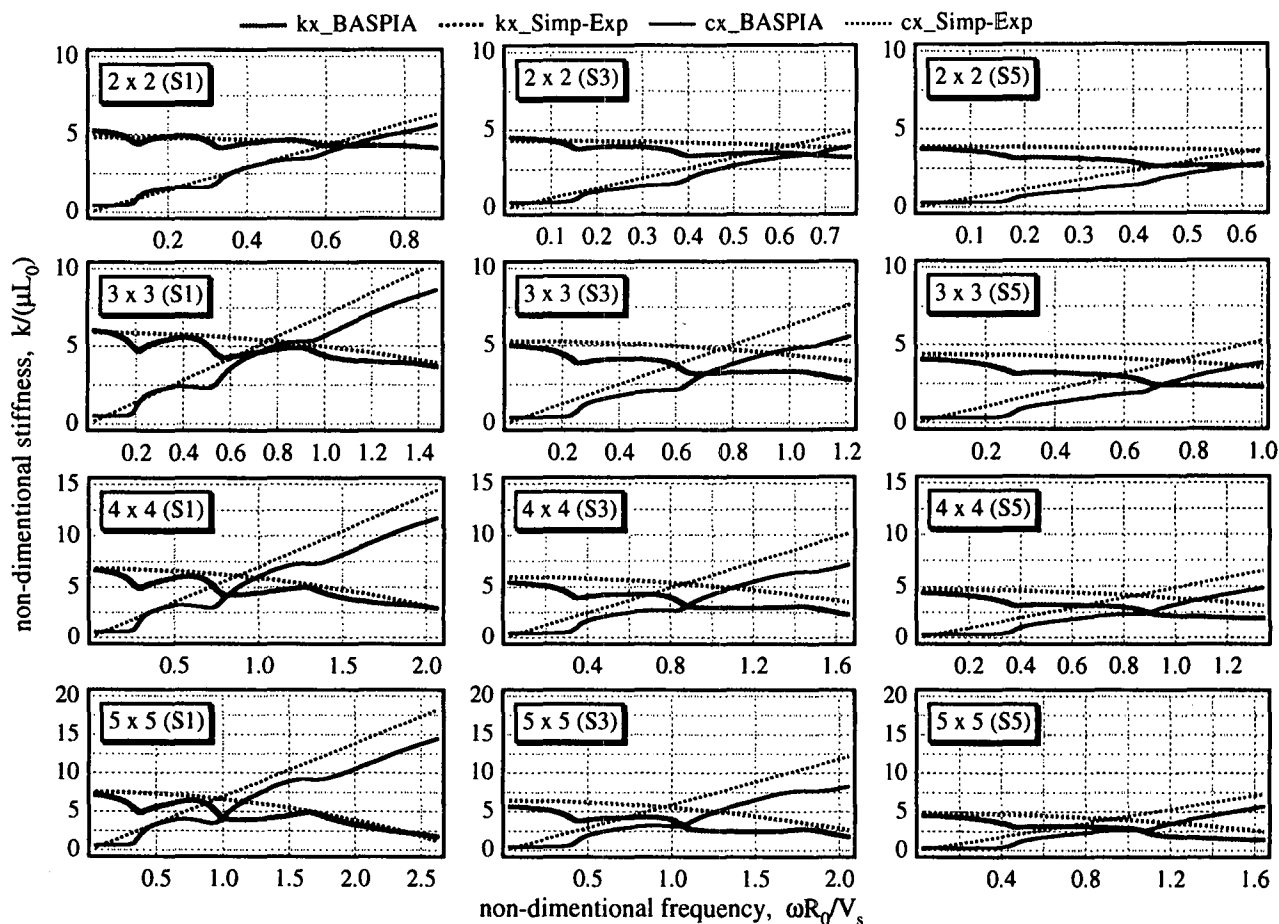


図-7 簡易評価式による解と厳密解の比較

(3) 解析結果

図-7は簡易評価式(4)による解と厳密解の比較を、群杭パターン $2 \times 2 \sim 5 \times 5$ それぞれに対して、地層構造S1, S3, S5の3ケースについてまとめて示したものである。図中の k_x, c_x はそれぞれ、複素剛性の実部と虚部を表している。一段目のグラフは群杭パターン 2×2 のケースの比較結果である。これは式(4)への拡張を行う際に用いた群杭パターンなので、いずれの地層構造においても提案式の近似が良好であることが分かる。2段目以降の群杭パターン $3 \times 3 \sim 5 \times 5$ のケースも 2×2 のケースと同様な傾向を示しているが、せん断弾性波速度の単位長さ当たりの変化率が大きくなるほど、実部、虚部共に高振動数側で厳密解との差が大きくなる傾向がある。次に地層構造別に見た場合、S1の実部については群杭の剛性によらず良好な近似を示しているが、虚部に関しては群杭の剛性が高くなるほど厳密解との差が大きくなる。S3の実部については群杭の剛性が高くなるほど若干近似が悪くなり、虚部についてはS1と同様である。S5については剛性による違いはあまり無く、むしろ地層構造の影響が大きいと考えられる。いずれのケースに関しても、実際に利用する振動数領域においては良好な近似を示している。

4. まとめ

単一層地盤の群杭の水平方向複素剛性に対する簡易評価式に補正係数を導入することで、水平成層地盤についても簡易評価式を得ることができた。さらに、群杭の配置パターンと地層構造をパラメータとして、この簡易評価式の適用性を検討した結果、群杭の剛性が高く、地層構造のせん断弾性波速度の単位長さ当たりの変化率が大きくなるほど高振動数側での近似が悪くなる傾向があるものの、実用上十分な近似解を与えることが確認できた。

参考文献

- 1) Konagai, K.: Guide to "BASPIA", Program Manual No. 6, Konagai Lab., IIS, Univ. of Tokyo, June, 1999.
- 2) 小長井, 勝川, AHSAN, 丸山: Simple Expression of the Dynamic Stiffness of Grouped Piles in Sway Motion, 生産研究, 投稿中.
- 3) 小長井: 群杭と等価な直立単純梁について, 生産研究, 第50巻, 第9号, 1998.