

(49) 基礎入力を受ける群杭基礎構造物の応答特性

岡山大学工学部 竹宮 宏和

岡山大学大学院 ○湯川 保之

川田工業 編 敷下 二郎

I. まえがき

本研究は、軟弱成層地盤上の群杭基礎構造物の基礎入力に対する応答性状を把握するに際して、まず、杭-地盤-杭系の動的相互作用を Navier 式で支配される粘弾性体内の複数の梁の挙動として扱う。定式化は、地盤反力の算定を平面歪を仮定した、独立な薄層地盤について行ない、杭-地盤-杭の連成振動系を、固有値解析を通して独立な支配方程式へ導いている。多層地盤内の杭の挙動を解析するにあたって伝達マトリックス法を採用し、杭頭インピーダンス及び杭頭有効入力を評価した。つぎに、群杭基礎上の橋脚構造物の応答性状について、動的サブストラクチャ法から調べた。特に、杭-地盤-杭系の解析では3次元解析と併せて地盤剛性の対角化による近似解法及び、“リング杭”解析による簡略手法を提示している。また、有限要素法による解との比較も行なった。

II. 定式化 【3次元解析】

地盤応答の算定は地盤を成層構成の3次元粘弾性体と仮定し、円筒座標系において平面歪仮定のちとで、周方向へフーリエ級数展開し、各応答パターンに対する特定項を採用する。ここでは地盤-杭系の解析を容易にするため、地盤振動を水平と鉛直に独立させて考える。つまり、群杭基礎の鉛直並進に相当する地盤振動は、フーリエ級数項 $n=0$ の対称モード、そして水平並進及び回転の連成振動に対しては、 $n=1$ の対称及び逆対称モードを選ぶ(図1)。

$$\begin{Bmatrix} U(r, \theta, z) \\ V(r, \theta, z) \\ W(r, \theta, z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [H_1^{sa}(\theta)] & \\ & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{U}(r, z) \\ \hat{V}(r, z) \\ \hat{W}(r, z) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $[H_1^{sa}(\theta)]$ は対称変形モードに対して $\text{diag.}(\cos\theta, -\sin\theta)$ 、逆対称変形モードに対して $\text{diag.}(\sin\theta, \cos\theta)$ を用いる。式(1)と同様に応力をフーリエ振幅で表わし、未知係数を消去することによって、応力-変位関係が成り立つ。

$$\underline{U}(r_1, \theta, z_j) = \underline{H}(\theta) \underline{K}(r_1) \underline{J}^{-1}(r_2) \underline{\hat{U}}(r_2, z_j) \quad (2)$$

ここに

$$\underline{K}(r) = \begin{bmatrix} \partial K_1(qr)/\partial r & K_1(sr)/r & 0 \\ K_1(qr)/r & \partial K_1(sr)/\partial r & 0 \\ 0 & 0 & k_0(pr) \end{bmatrix}$$

$$\underline{J}(r) = \begin{bmatrix} (\lambda_j + 2\mu_j)q^2 K_1(qr) + 2\mu_j/r K_0(qr) + 4\mu_j/r^2 K_1(qr) & -2\mu_j\{s/r K_0(sr) + 2/r^2 K_1(sr)\} & 0 \\ -2\mu_j\{q/r K_0(qr) + 2/r^2 K_1(qr)\} & \mu_j(s^2 + 4/r^2)K_1(sr) + 2\mu_j/rs K_0(sr) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_j \partial K_0(pr)/\partial r \end{bmatrix}$$

$K_m(\)$ は m 次の第2種変形ベッセル関数

地盤のフレキシビリティ・マトリックスは単位加振による地盤応答の結果から直交座標において評価する。つまり任意の2点の杭キャビティ I, J において I 点の x, y 方向加振に対する J 点のそれぞれの応答から、地盤フレキシビリティ・マトリックスは

$$\underline{F}_{xyzj}^{JI} = \begin{bmatrix} U_{xx}^{JI} & U_{yx}^{JI} & 0 \\ U_{xy}^{JI} & U_{yy}^{JI} & 0 \\ 0 & 0 & U_z^{JI} \end{bmatrix} \quad (3)$$

そして、同一層内の総節点に関しては、式(3)を拡張して

$$\underline{F}_{xyzj} = \begin{bmatrix} F_{xyz}^{11} & F_{xyz}^{12} & \cdots & F_{xyz}^{1N} \\ F_{xyz}^{22} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{sym.} & & & F_{xyz}^{NN} \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} F_{xy} & 0 \\ 0 & F_z \end{bmatrix}_j \quad (4)$$

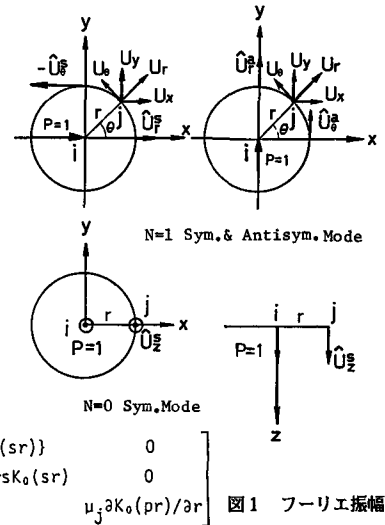


図1 フーリエ振幅

この逆マトリックスは地盤剛性マトリックスを定義する。式(4)を地盤-群杭系の運動方程式の地盤反力に導入して固有値解析を行なう場合マトリックス・サイズが大きくなると、計算にかなりの時間を要する。そこで、近似解法としてフレキシビリティ・マトリックスの対角化を各杭キャピティの相互相関をなくするに行ない、杭-地盤-杭の相互作用を地盤-杭の相互作用で近似的に評価すると、

$$F_{xyzj}^* = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N F_{xyz}^{1k} & & & 0 \\ & \sum_{k=1}^N F_{xyz}^{2k} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sum_{k=1}^N F_{xyz}^{Nk} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)を定義することにより単杭としての解析が可能となる。

基盤入力を受ける群杭の運動方程式は、直交座標系でその挙動を横振動と縦振動に分離して考える。

$$\text{横振動: } [M_p] \{\partial^2 u_{xy}^p / \partial t^2\} + [E_p I_p] \{\partial^4 u_{xy}^p / \partial z^4\} - K_{xy}^{soil} u_{xy}^p = -K_{xy}^{soil} u_{xy}^s \quad (6)$$

$$\text{縦振動: } [M_p] \{\partial^2 u_z^p / \partial t^2\} - [E_p A_p] \{\partial^2 u_z^p / \partial z^2\} - K_z^{soil} u_z^p = 0 \quad (7)$$

ここで $[M_p]$ は各杭の単位長さ当たりの質量から成る対角マトリックス、 $[E_p I_p]$ 、 $[E_p A_p]$ は同曲げ剛性及び軸力剛性から成る対角マトリックス、添字 s は地盤、 p は杭を示す。

上式の解は、固有値解析を適用して連成振動系を独立な支配方程式に置き換えて求める。

杭頭インピーダンス及び杭頭有効入力の評価は、梁の曲げ及び縦振動理論から求められる杭の変形及び断面力に関して、任意層の上面と下面の間に伝達マトリックス法を適用し、杭先端での境界条件に応じて行なう。

全体系の応答は動的サブストラクチャ法を適用する。つまり全体系の構造部分系である、上部構造系と下部構造系を、剛体フーチングの重心で変位の適合条件と断面力のつりあい条件より総合し全体系の応答として評価する。

上部構造系についてはフーチング天端より切断して有限要素法で多質点系へと置換し、固有モード・マトリックスを用いてモード分解を施し、運動方程式を作成する。

$$[M_t] \{\ddot{q}_t\} + [C_t] \{\dot{q}_t\} + [K_t] \{q_t\} = \{F_t\} \quad (8)$$

ここで $[M_t]$ 、 $[C_t]$ 、 $[K_t]$ は全体系の質量、減衰、剛性マトリックス、 $\{F_t\}$ は基盤入力によるフーチング重心での有効入力、 $\{q_t\}$ はモード座標での上部構造系並進及びフーチング重心の並進、回転より成る変位ベクトルである。上式の解を座標変換することにより一般座標での応答が求まる。

III. 定式化 【リング杭解析】

群杭がリング状に配置されている時、同一円周上の各杭の挙動は剛なリング変位として近似的に扱える。いま x 方向並進と y 軸まわりのロッキングの連成を対象にすると、リングの x 方向の変位は円筒座標上でフーリエ級数展開項 $n = 1$ の対称モードを採ればよい。半径 r_I リング加振による半径 r_j ($> r_I$) リングの力-変位関係は

$$u^s(r_j, z_j) = (1/r_I) \tilde{K}_1(r_j) \tilde{J}^{-1}(r_I) p(r_I, z_j) \quad (9)$$

ここで $\tilde{K}_1(r_j)$ 及び $\tilde{J}^{-1}(r_I)$ は、式(2)のマトリックスに対応し $n = 1$ のフーリエ振幅から決定される。上式を杭が配置されているすべてのリングに適用して、3次元解析と同じく地盤フレキシビリティを定める。

$$\begin{Bmatrix} u_1^s \\ u_2^s \\ \vdots \\ u_n^s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{K}_1(r_1)/r_I \tilde{J}^{-1}(r_I) & & & \\ \tilde{K}_1(r_2)/r_I \tilde{J}^{-1}(r_I) & \tilde{K}_1(r_2)/r_2 \tilde{J}^{-1}(r_2) & & \\ & & \ddots & \\ \tilde{K}_1(r_n)/r_I \tilde{J}^{-1}(r_I) & & & \tilde{K}_1(r_n)/r_n \tilde{J}^{-1}(r_n) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{Bmatrix} \quad (10)$$

symmetric

リング杭の運動方程式は、式(10)によって決定された地盤フレキシビリティの逆として地盤剛性を算出し、群杭の位置関係が軸対称であることを考慮にいと、円筒座標系で

$$\text{横振動: } [N_I M_p / 2] \{\partial^2 u_{r\theta}^p / \partial t^2\} + [N_I E_p I_p / 2] \{\partial^4 u_{r\theta}^p / \partial z^4\} - \pi K_{r\theta}^{soil} u_{r\theta}^p = -\pi \tilde{K}_{r\theta}^{soil} u_{r\theta}^s \quad (11)$$

$$\text{縦振動: } [N_I M_p / 2] \{\partial^2 u_z^p / \partial t^2\} - [N_I E_p A_p / 2] \{\partial^2 u_z^p / \partial z^2\} - \pi \tilde{K}_z^{soil} u_z^p = 0 \quad (12)$$

上式について、固有値解析を行ない独立な系として解を求める。

IV. 解析例及び考察

本研究の解析対象構造物として図2に示す橋脚基礎を用いた。群杭基礎の上部構造物との連成振動における動特性を把握するため、まず総杭頭インピーダンスをフーチング重心ととらえた(図3、4)。図3の3次元解との比較において、リング杭解はよく一致しており地震動の卓越振動数の帯域を考慮して耐震解析に使用することの妥当性が認められる。また有限要素法との差は地盤反力の算定にあり両者がかなりの高振動まで一致していることは、平面歪の有効性を示している。図4では群杭解析と単杭解析との比較から、杭-地盤-杭の相互作用の重要性が認められる。しかし、有効入力地盤と杭の相互作用よりも地盤振動に大きく支配されている(図5)。図6は単杭解析と群杭解析の比から群杭効果を評価したものである。同図より対象とする運動形態にもよるが、2 Hz以下の振動数領域では3次元解とリング杭解は一致して、1より小さいほぼ一定値を示す。よって、この低振動数領域では静的な計算による群杭効果を動的な問題にも使用可能であるとわかる。しかし、3 Hzより高い振動数領域になると、動的群杭効果は1より却って大きくなり、3次元解析では5~7 Hzにピークを呈している。リング杭解も群杭効果を増すものの、このピーク振動数付近でかなり3次元解とはずれて来ている。次に対象橋脚の代表箇所と自然地盤の伝達関数を調べた(図7、8、9)。全体系で応答のピークは1次、2次が地盤のピークと一致し上部構造系のみ固有振動数(4.91 Hz)ではピークを有しない。最後に杭の断面力分布を地盤振動を考慮にいたした場合と、上部構造物の慣性力のみを考慮した場合について、それぞれ杭先の境界条件を変化させて示した(図10)。これより現行の上部構造物の慣性力のみを考慮に入れた杭の設計が、今回のように地盤振動を考慮した場合に比べてかなり過小評価していると思われる。

《参考文献》

- 1) H. TAKEMURA, Y. YUKAWA: Dynamic Analysis of Grouped Pile Foundation in Layered Soils. The 2nd International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering 1985
- 2) 竹宮、湯川: 群杭基礎構造物の動特性、土木学会第39回年次学術講演会(1) 1984年10月
- 3) 竹宮、正木、小島、二宮: 動的サブストラクチャ法による地盤-基礎-上部構造物系の3次元地盤応答解析、第17回マトリックス解析シンポジウム 1983年
- 4) H. TAKEMURA, Y. YAMADA: Layered Soil-Pile-Structure Dynamic Interaction. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1981

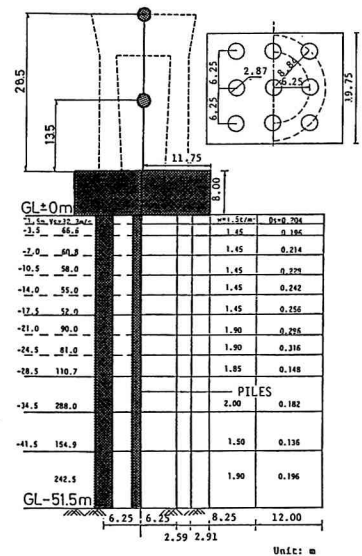


図2 解析対象モデル

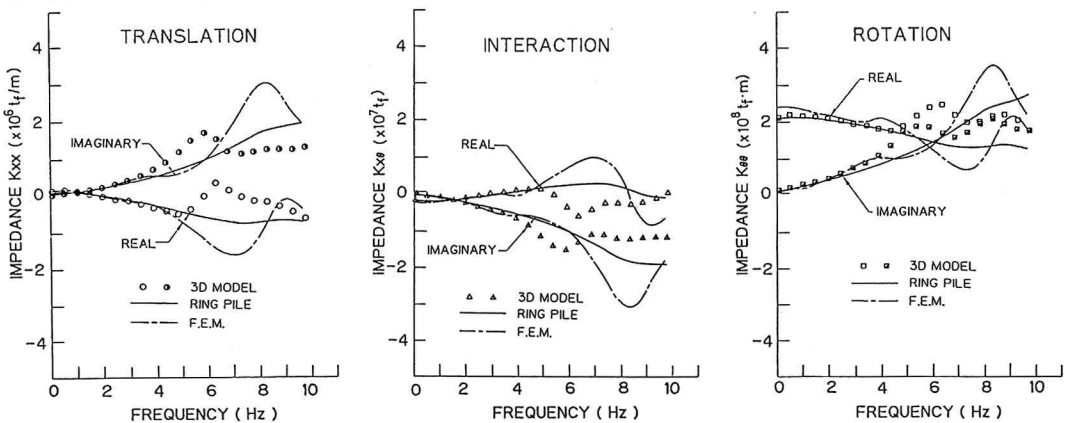


図3 杭頭インピーダンス関数

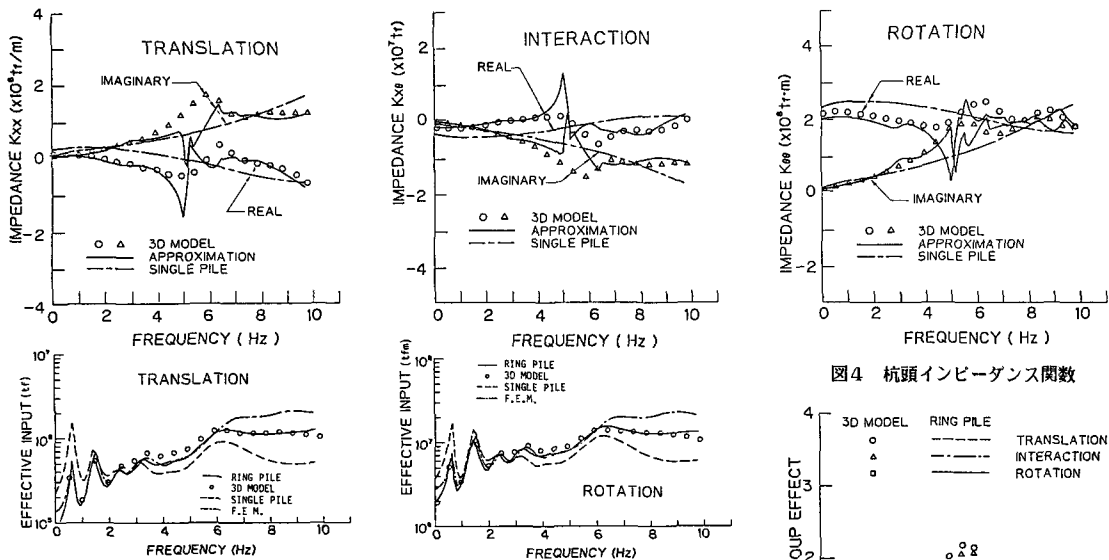


図5 杭頭有効入力

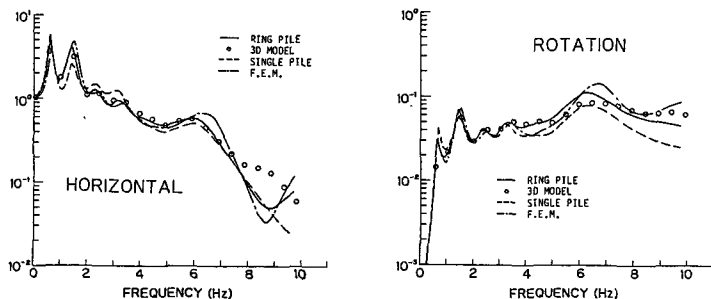


図7 伝達関数 (下部構造系)

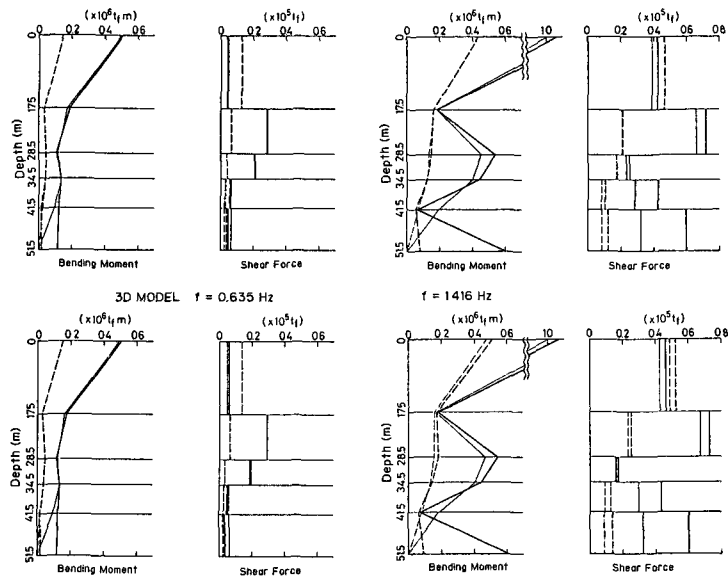


図10 断面力分布図

図8 伝達関数 (全体系)

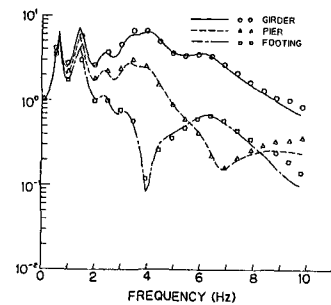


図9 自然地震伝達関数

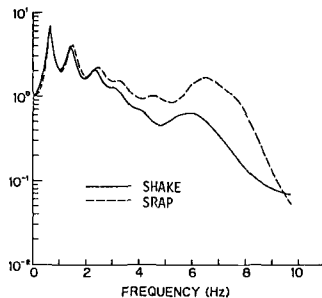


図10 断面力分布図