

(92) 群杭基礎の地盤との相互作用における

3次元動特性評価

岡山大学工学部 竹宮宏和
岡山大学大学院 谷口正昭
岡山大学大学院 日下部和宏

1. まえがき

最近、長大土木構造物がそれほど堅固でない地盤上にも、大口径の小数本からなる群杭基礎構造物をもって建設される傾向にあり、その耐震解析の重要性が指摘される。著者らは、これまでも群杭基礎の地盤との動的相互作用解析法を開発してきたが、本報告はグリーン関数法により群杭基礎の振動特性を3次元で捉えたものである。そして以前のリング杭解析法の精度の検討を行なった。

2. グリーン関数法による定式化

(1) 地盤フレキシビリティ

剛な基盤上の3次元軸対称な表層地盤を仮定する。杭の各節点位置でその自由度に対応した加振力 $\mathbf{P}^s$ に対する全節点の応答 $\mathbf{u}^s$ を求めて、杭の節点自由度の大きさの地盤の動的フレキシビリティ・マトリックス $\mathbf{F}^s$ を薄層要素法から評価することができる。その場合、加振力として円筒座標系で周方向のフーリエ展開モード(杭断面を剛体と仮定すれば $n=0,1$)に対応したリングあるいはディスク加振を考え、杭と地盤のインターフェイス上の離散節点における変位解を求める。杭を線要素で表現する場合、加振力として合力を採ることになる。そこで、周上に沿って一様な分布の加振力を想定する。それらの加振パターンに対する応答を円筒座標系において求めることは、各フーリエ級数展開項においてなされる。

$$\mathbf{u}_{xyz}^s = \mathbf{F}_{xyz}^s \mathbf{P}_{xyz}^s \quad (1)$$

これより地盤(上添字S)のフレキシビリティを定義することができる。

ここで上式の直交座標系のフレキシビリティを導くために、円筒座標系から直交座標系への変換式を求める。まず自然地盤内に地盤杭を仮想して、 i -地盤杭の節点に合力として x, y, z 各方向のリング加振を行ない、それに伴う j -地盤杭の節点応力を求める。解析は円筒座標系で変位、表面力共に周方向にフーリエ級数展開して行なう。

$$\mathbf{u}_{r\theta z} = \sum_n H(n\theta) \hat{\mathbf{u}}_{r\theta z}^n, \quad \mathbf{t}_{r\theta z} = \sum_n H(n\theta) \hat{\mathbf{t}}_{r\theta z}^n \quad (2)$$

加振力と応答変位の関係は、各フーリエ展開項において計算され、

$$\hat{\mathbf{u}}_{r\theta z}^n = \mathbf{F}_{r\theta z}^n \hat{\mathbf{P}}_{r\theta z}^n \quad (3)$$

3次元直交座標系においては、変換マトリックス $\mathbf{T}(\theta)$ を介して、

$$\mathbf{u}_{xyz}^s = [(\mathbf{TH}^0)^T \cdots (\mathbf{TH}^n)^T] \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{r\theta z}^s \\ \vdots \\ \mathbf{F}_{r\theta z}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{TH}^0 \\ \vdots \\ \mathbf{TH}^n \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_{xyz}^s = \mathbf{F}_{xyz}^s \mathbf{P}_{xyz}^s \quad (4)$$

ここで上添字 n はフーリエ次数を表す。

なお、この手法を用いた群杭の3次元解析では、マトリックスサイズは杭本数に比例して増える。

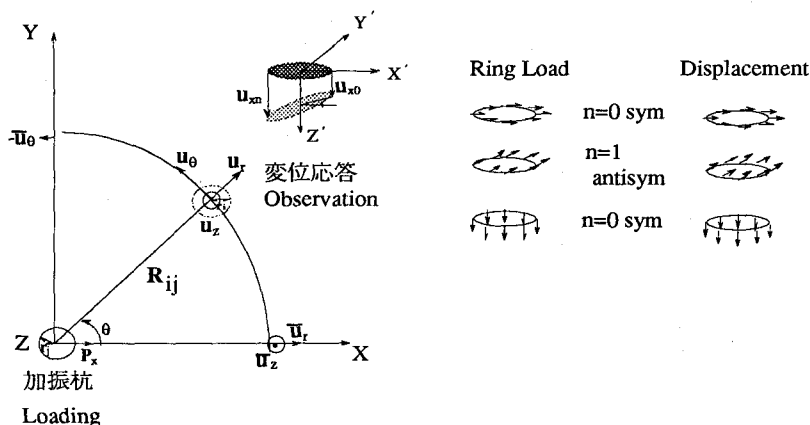


図1 リング加振パターン($n=0,1$)

(2) 杭のフレキシビリティ

杭は梁と仮定し、そのフレキシビリティの評価を行う。その場合、分布質量法を採り、梁の横振動と縦振動の方程式

横振動の場合

$$EI \frac{\partial^4 u^p}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 u^p}{\partial t^2} = P_x^s(z) e^{i\omega t}$$

縦振動の場合

$$m \frac{\partial^2 w^p}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 w^p}{\partial z^2} = P_z^s(z) e^{i\omega t} \quad (5)$$

を独立に解く。ただし、 EI は曲げ剛性、 EA は軸力剛性、 m は単位長さ当りの質量、 P_x^s, P_z^s はそれぞれ杭の横方向、縦方向の地盤反力分布である。杭が層状地盤中に打設されている場合は、セグメントに分解し、各セグメントごとにストリップ化された杭の自由振動解を求め、それらの境界面において伝達マトリックス法を適用していく。そのとき j セグメントに対して、横方向変位 $u^p(z)$ 、たわみ角 $\theta^p(z)$ 、曲げモーメント $M^p(z)$ 、せん断 $Q^p(z)$ 、縦方向変位 $w^p(z)$ 、軸力 $P^p(z)$ からなる状態ベクトル

横振動の場合

$$S(z) = \{ u^p(z) \ \theta^p(z) \ M^p(z) \ Q^p(z) \}^T,$$

縦振動の場合

$$\bar{S}(z) = \{ w^p(z) \ P^p(z) \}^T \quad (6)$$

を定義して

横振動の場合

$$S^{j-1}(h_j) = \begin{cases} T^j S^j(0) + P^j & \text{外力の作用があるとき} \\ T^j S^j(0) & \text{外力の作用がないとき} \end{cases} \quad (7)$$

$$T^j = C^j(0) [C^j(h^j)]^{-1}$$

縦振動の場合

$$\bar{S}^{j-1}(h_{j-1}) = \begin{cases} \bar{T}^j \bar{S}^j(0) + \bar{P}^j & \text{外力の作用があるとき} \\ \bar{T}^j \bar{S}^j(0) & \text{外力の作用がないとき} \end{cases} \quad (8)$$

$$\bar{T}^j = \bar{C}^j(0) [\bar{C}^j(h^j)]^{-1}$$

上式を杭体の全長にわたって適用した後、杭頭と杭先端の境界条件を課すと

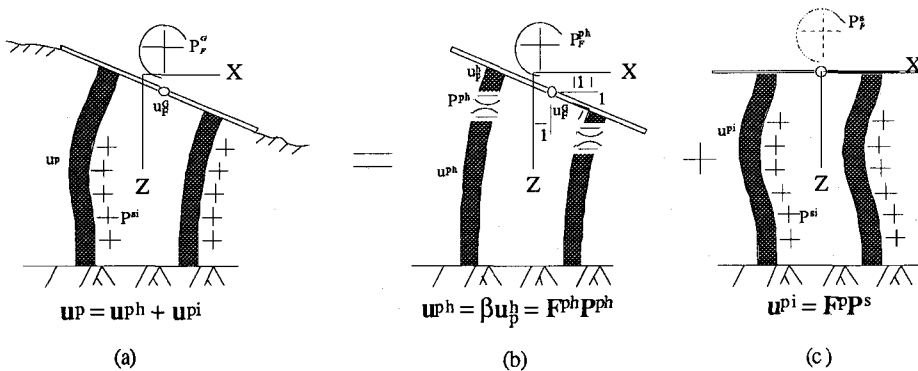
$$u^p = F^p P^p \quad (9)$$

と杭体のフレキシビリティ・マトリックス F^p を評価することができる。

(3) 地盤との相互作用における杭の応答

杭頭インピーダンスの評価に際して、次の線形重ね合わせを採る。

地盤との相互作用における杭の応答 u^p を、(b) 杭頭に強制変位 u_b^p を与えたときの応答 u^{ph} と、(c) 杭頭拘束系で地盤反力による応答 u^{pi} に分けて、



(b)では梁の変位影響関数 β と杭頭断面力 p^{ph} を用い、(c)では地盤反力 p^s を用いてフレキシビリティを求める。

図2 地盤—杭系の解析手順

3. フレキシビリティ法による地盤—杭系の定式化

杭頭に強制変位を与えたときの変位 u^{ph} は、杭頭変位 u_b^p と、フーチング中央変位 u_F とを結ぶ剛体結合マトリックス α を介して、

$$u^{ph} = \beta \alpha u_F \quad (10)$$

杭と地盤の連成振動に関する支配方程式は変位の適合条件と力の釣り合い条件から、

$$(F^p + F^s) p^s = \beta \alpha u_F \quad (11)$$

地盤反力 p^s と杭頭断面力 p^{ph} をそれぞれフーチング底面中央に変換

$$P_F^s = (\beta \alpha)^T p^s, \quad P_F^{ph} = \alpha^T p^{ph} \quad (12)$$

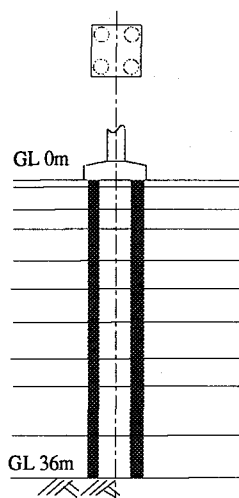
フーチング底面中央へ縮合した力 P_F は

$$P_F = P_F^s + P_F^{ph} = \alpha^T [K^{ph} + (\beta)^T (F^p + F^s)^{-1} \beta] \alpha u_F = K_F^* u_F \quad (13)$$

よって、インピーダンス関数 K_F^* が定義できる。

4. 数値解析例と考察

以上のフレキシビリティ法による解析を剛基盤を有する層状地盤中の4本杭の杭基礎について行なった。ステイフネス法と違いフレキシビリティ法では最初に地盤反力を求めることができる。杭と地盤との動的相互作用をフーチング下端中央でのインピーダンスにおいて評価した。ここで比較として各杭を単杭として求めたインピーダンスと、近似解法としてのリング杭解析によるインピーダンスを図4に示した。群杭結果は杭—地盤—杭の相互作用のため群杭効果を持ち、水平、回転成分において単杭結果の単純な重ね合わせより一般に小さい値となる。鉛直成分には低振動数帯域においてそれほど現われない。またリング杭解析の精度は低振動数帯域では妥当なものとなっている。



杭の物性値

ポアソン比	0.167
ヤング率 (tf/m ²)	2.70e06
断面積	7.0685
断面2次モーメント (m ⁴)	Ix 1.767
	Iy 1.767
	Iz 3.534
減衰定数	0.03
せん断弾性定数 (tf/m ²)	1.16e06

層状地盤の物性値

No.	層厚 (m)	S波速度 (m/sec)	単位体積重量 (γ/m ³)	ポアソン比	減衰率
1	2.00	128.0	1.5	0.49	0.048
2	2.00	128.0	1.5	0.49	0.048
3	2.50	154.0	1.8	0.49	0.185
4	2.50	154.0	1.8	0.49	0.185
5	2.50	154.0	1.8	0.49	0.185
6	2.25	217.0	1.8	0.49	0.050
7	2.25	217.0	1.8	0.49	0.050
8	6.00	242.0	2.0	0.49	0.142
9	6.00	171.0	1.6	0.49	0.039
10	8.00	224.0	1.6	0.49	0.040

図3 解析対象構造物

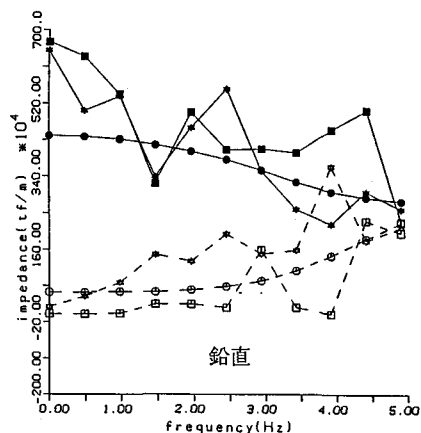
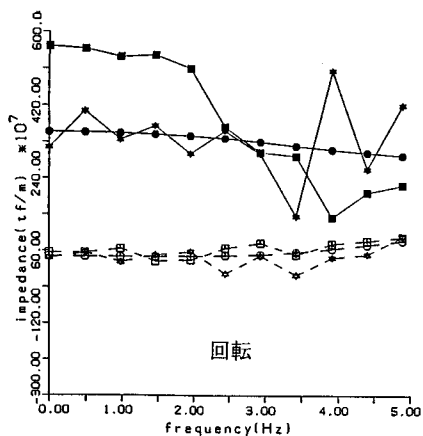
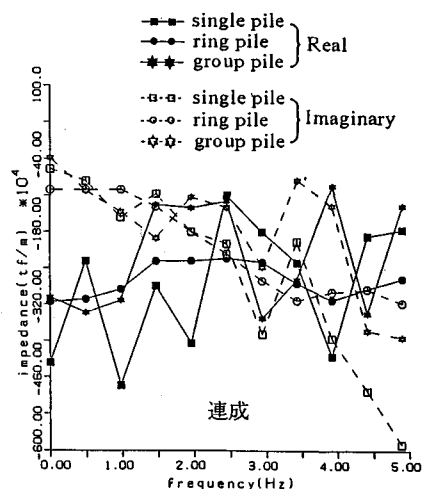
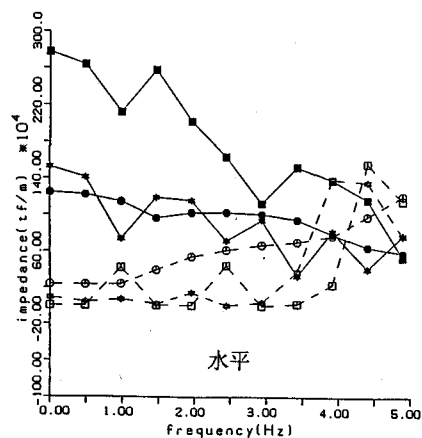


図4 総杭頭インピーダンス