

PS I - 25 群杭基礎の地盤との相互作用における動特性の効率的評価法

岡山大学 正会員 竹宮 宏和
 岡山大学 学生員 ○小松 洋海
 岡山大学 学生員 菅野 由人

1. まえがき 本研究は、群杭基礎構造物の地盤との連成における動特性評価を三次元軸対称モデル下で行ったものである。解析手法としては、サブストラクチャ法により、杭は梁の振動問題として扱い、地盤はリング加振状態においてフレキシビリティを算定し、連続条件より連成させている。特に、群杭解析の実用的な解析手法としてリング杭解析を適用している。同手法は、同一半径上の杭の応答は、円筒座標系において周方向にフーリエ級数展開して、フーリエ次数(n=0, 1)に従うと仮定して行うものである。そして解析上の主眼を群杭基礎構造物の杭頭インピーダンスの評価に置き、杭の定式化を通常のマトリックス解析を用いて行ったものと比較している。ただし群杭の挙動の解析のためリング杭解析法を採用している。(Fig.1参照)

2. 定式化 杭と地盤の解析を動的サブストラクチャ法(接触体モデル)を適用して行っている。

【地盤のフレキシビリティ】 地盤は剛基礎を有する層状地盤とし、深さ方向に離散化を行った。地中加振外力としてフーリエモード (n = 0, 1) に対応したリング加振を採用した。各加振パターンによるフレキシビリティの評価を、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ことにより行った。手法は有限要素法を適用した。これより地盤(下添字s)のフレキシビリティ F_s を定義し、

$$U_s^1(r, \theta, z) = F_s(r, \theta, z) F_s^1(r, \theta, z) \quad (1)$$

ここで、上添字1は地中の任意断面を示す。変数rは同径上のリング杭の中心からの半径である。

【杭-地盤系の定式化】

(1) スティフネス法 弾性体としての杭には、物体力としての慣性力と、地盤からの反力として表面力が作用する。いま杭を構造要素としての梁で表し、その離散化を有限要素法から施し、離散節点変位(変位と回転角より成る) \hat{u} から近似すると、多自由度系としての運動方程式を得て、

$$-\omega^2 M \hat{u} + K \hat{u} = P \quad (2)$$

ただし、 K, M はそれぞれ地盤の物性を減じて得られる剛性マトリックス、質量マトリックスである。

杭は梁要素として1節点6自由度を有するが、地盤部において回転自由度は並進自由度に比較して無視できる程度のものであるので、並進のみの1節点3自由度に縮小できる。動的剛性マトリックス $D = K - \omega^2 M$ を導入すると、離散化された杭-地盤系の支配方程式は、

$$\begin{bmatrix} D_{aa} & D_{as} \\ D_{sa} & D_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a^1 \\ u_s^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa}^1 \\ P_{as}^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{sa}^1 \\ P_{ss}^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_a^1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\{P_{sa}^1, P_{ss}^1\}^T$ は相互作用における地盤反力、 $\{P_{aa}^1, 0\}^T$ は頂版からの作用力、 $\{P_{aa}^1, P_{as}^1\}^T$ は有効入力である。杭と地盤の連成振動を変位の適合性と力のつり合い条件から導くに当って、杭の配置は離散的であり、一方、地盤は連続体であるので、リング上の一周における仮想仕事を等値する規範を採用している。杭頭の自由度のみ残して他の自由度を縮小操作から消去すると、

$$\hat{D}_{aa} u_a^1 = P_a^1 + P_{sa}^1 \quad (4)$$

と表現できる。ただし、 $\hat{D}_{aa} = D_{aa} - D_{aa} (D_{aa} + F_s^{-1})^{-1} D_{as}$ 、 $P_a^1 = P_a^1 - D_{as} (D_{aa} + F_s^{-1})^{-1} P_{sa}^1$ であり、 \hat{D}_{aa} は杭頭インピーダンスを、 P_a^1 は同有効入力を定義している。よって、群杭総体としてインピーダンスと同有効入力がそれぞれ

$$K_p = \beta^T \hat{D}_{aa} \beta \quad P_p^0 = \beta^T P_a^1 \quad (5), (6)$$

と定義される。

(2) フレキシビリティ法 杭(下添字p)のフレキシビリティ F_p の評価を行う。その場合、横振動と縦振動の方程式を独立に解く³⁾。層状地盤中に打設されている場合は各層毎に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る。地盤との相互作用における杭の応答を、線形重ね合わせの法則から、地盤との相互作用力によるものと杭頭(上添字h)に単位変位 U_p^1 を与えた時のものと考える。

$$U_p(r, \theta, z) = U_p^1(r, \theta, z) + U_p^0(r, \theta, z) \quad (7)$$

ここに、 U_p^1 は杭頭拘束の状態での梁のフレキシビリティを介して

$$U_p^1(r, \theta, z) = \alpha U_p^0(r, \theta, z) \quad (8)$$

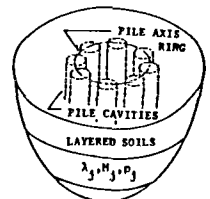


Fig.1 群杭のリング杭配置

一方、 α は杭頭に単位変位を生じさせる条件下で解くことによって求められる。ただし、各杭頭変位は杭頂版の重心(上添字G)で規定されるので、

$$U_p^1(r, \theta, z) = \alpha \beta U_p^0(z, y, x) \quad (9)$$

β は各杭頭と頂版の底面中央とを結ぶ剛体結合マトリックスである。

リング杭と地盤との連成振動に関する支配式は

$$(F_p + F_s) \dot{r}_p^1(r, \theta, z) = \alpha \beta U_p^0(z, y, x) \quad (10)$$

式(10)を未知作用力 \dot{r}_p^1 について解くと、杭に作用する地盤反力が得られる。ここで杭の任意断面(上添字1)での地盤反力 \dot{r}_p^1 を杭頭での断面力 \dot{r}_p^0 へ変換し、さらに杭頭での断面力を杭頂版重心への合力に変換して表わす。また杭頭変位による杭頭断面力 \dot{r}_p^0 も同様に表わすと、リング杭の仮定から

$$\dot{r}_p^0(z, y, x) = \int_0^{2\pi} \beta^T \alpha^T \dot{r}_p^1(r, \theta, z) R d\theta \quad \dot{r}_p^0(z, y, x) = \int_0^{2\pi} \beta^T \dot{r}_p^0(r, \theta, z) R d\theta \quad (11), (12)$$

ただし、 \dot{r}_p^0 は杭に強制変位として U_p^0 を与えた時に生じる杭頭断面力を示すので

$$\dot{r}_p^0(r, \theta, z) = \gamma U_p^0(r, \theta, z) = \gamma \beta U_p^0(z, y, x) \quad (13)$$

したがって、杭頭版重心への総合した力 F_p^0 は

$$F_p^0 = \dot{r}_p^0 + \dot{r}_p^0 = \int_0^{2\pi} \{\beta^T \alpha^T (F_p + F_s) \alpha \beta + \beta^T \gamma \beta\} R d\theta U_p^0 = K_p^0 U_p^0 \quad (14)$$

よってインピーダンス関数 K_p^0 が定義できる。

3. 数値解析例及び考察 表1に示す地盤に打設された杭基礎構造物(4本杭)を解析対象とした。(Fig.2参照)解析結果を杭頭インピーダンスに関してスティフネス法(三次元マトリックス法)とフレキシビリティ法を比較した。杭の諸元については、表2に示す。表3は振動数 $\omega = 0$, $\omega = \omega_g$ (地盤の卓越振動数)での両手法によって求められた値である。低振動における群杭基礎構造物の動特性をよく捉えているものと思われる。また、インピーダンス算定の際に静的に求めたものを代用することも考えられる。

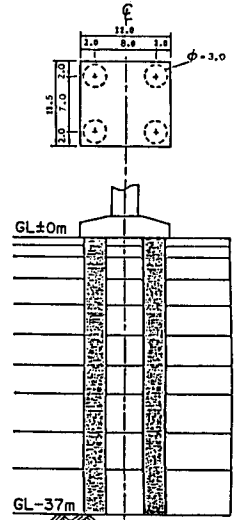


Fig.2 解析対象構造物

参考文献

1. Takeniya, H and Yukawa, Y Dynamic Analysis of Grouped Pile Foundation in Layered Soils 2. 竹倉勉, 群杭基礎構造物の動的解析法とその実務耐震設計法の開発, 第19回 地質研究発表会 JSCE Struc. Eng./Earth. Eng. Vol. 3 No. 1 1835-1835 (1986) (71) (1987)
3. Sen, R et. al, Dynamic Analysis of Piles and Pile Groups Embedded in Non-Homogeneous Soils, Int. J. Num Anal. Meth. Geomech. 9, 507-524 (1985)

表1 地盤の諸元¹⁾

NO.	THICKNESS (m)	SHEAR VELOCITY (m/sec)	UNIT WEIGHT (t/m ³)	POISSON'S RATIO	DAMPING FACTOR
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	0.103
4	2.50	154.0	1.8	0.49	0.103
5	2.50	154.0	1.8	0.49	0.103
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

表2 杭の諸元

ポアソン比	0.167	
ヤング率 (tf/m ²)	2.70 x 10 ⁶	
断面積	7.685	
単位重量 (tf/m ³)	2.5	
断面二次モーメント (m ⁴)	I _x	1.767
	I _y	1.767
	I _z	3.534
減衰定数	0.03	
せん断弾性定数 (tf/m ²)	1.16 x 10 ⁶	

表3 杭頭インピーダンス

(表3の値は静的 U_p^0 を用いたものである。)

手法	リング杭		3次元マトリックス		リング杭		3次元マトリックス	
	REAL	IMAGINARY	REAL	IMAGINARY	REAL	IMAGINARY	REAL	IMAGINARY
並進 (tf/m)	0.2919x10 ⁶	0.5278x10 ⁵	0.2831x10 ⁶	0.5352x10 ⁵	0.2554x10 ⁶	0.5364x10 ⁵	0.2449x10 ⁶	0.8123x10 ⁵
回転 (tf/rad)	-0.1271x10 ⁷	-0.1575x10 ⁶	-0.1103x10 ⁷	-0.1613x10 ⁶	-0.1115x10 ⁷	-0.1609x10 ⁶	-0.9919x10 ⁶	-0.2603x10 ⁶
回転 (tf.m/rad)	0.4587x10 ⁸	0.2701x10 ⁷	0.5289x10 ⁸	0.5339x10 ⁷	0.4480x10 ⁸	0.2767x10 ⁷	0.5221x10 ⁸	0.5705x10 ⁷

($\omega = 0$)

($\omega = \omega_g$)