

群杭基礎の地盤との連成における動特性評価

岡山大学 正会員 竹宮 宏和

岡山大学 学生員 王 燦雲

○ 岡山大学 学生員 小松 洋海

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、杭ははり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、両者を連続の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（図2-1参照）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いている。

2. 定式化 杭と地盤の解析には動的サブストラクチャ法を適用して、図2-2のように杭の建設前の自然地盤を対象にし、同地盤中に地盤杭の存在を考る。したがって、杭はその地盤杭の物性だけを低減した低減杭として扱う。

【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（図2-3参照）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。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、

$$U_s^i(r, \theta, z) = F_s(r, \theta, z) F_p^i(r, \theta, z) \quad (2-1)$$

ここで、上添字 i は地中の任意断面を示す。

【杭のフレキシビリティ】 杭（下添字p）のフレキシビリティ F_p の評価は、杭の挙動をはりの振動問題として扱う。その場合、横振動と縦振動の微分方程式を独立に解く。（図2-4 a, 2-4 b参照）

$$EI \frac{\partial^4 u_x}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = P_x \delta(z-a) \quad (2-2a)$$

$$m \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = P_z \delta(z-a) \quad (2-2b)$$

ここで、mは単位長さ当たりの質量、Eはヤング率、IはX軸回りの断面二次モーメント、Aは断面積、 u_x, P_x, u_z, P_z は、それぞれX, Y方向の変位と作用力を示す。また、 δ はディラックのデルタ関数である。

また、サブストラクチャ化を行っているため、地盤の層毎に杭の自由振動解を求め、その境界面において伝達マトリックス法を適用している。

$$U_p^i(r, \theta, z) = F_p(r, \theta, z) F_p^i(r, \theta, z) \quad (2-3)$$

つぎに、杭頭（上添字h）に単位変位 U_p^h を与えた時の杭の応答を考える。このとき杭の運動方程式は、

$$U_p(r, \theta, z) = U_p^i(r, \theta, z) + U_p^b(r, \theta, z) \quad (2-4)$$

ただし、 U_p^b は杭が地盤による拘束を受けないとき、杭頭に単位変位を与えた際の杭の応答を表す。

$$U_p^b(r, \theta, z) = \alpha U_p^h(r, \theta, z) \quad (2-5)$$

α は F_p と同様にはりの微分方程式を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。また、 U_p^h を杭頂版の重心（上添字G）での変位 U_p^G で表すと、

$$U_p^h(r, \theta, z) = \beta U_p^G(x, y, z) \quad (2-6)$$

β は座標変換マトリックスである。

【杭-地盤の連成】 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たって、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いての仮想仕事を等値する規範を採用している。

$$U_p^i = U_s^i \quad (2-7)$$

$$F_p^i = F_s^i \quad (2-8)$$

式(2-6), (2-7)より、

$$(F_p + F_s) F_s^i(r, \theta, z) = \alpha \beta U_p^G(x, y, z) \quad (2-9)$$

式(2-8)を未知作用力 F_s^i 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 i）での地盤反力 F_p^i を

杭頭での断面力 $\mathbf{f}_p^h$ で表すと、

$$\mathbf{f}_p^h(r, \theta, z) = \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{f}_p^i(r, \theta, z) \quad (2-10)$$

杭頭での断面力を杭頂版重心に縮合して表すと、リング杭の仮定から、

$$\mathbf{f}_p^{G1}(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \boldsymbol{\beta}^T \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{f}_p^i(r, \theta, z) R d\theta \quad (2-11)$$

$$\mathbf{f}_p^{G2}(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{f}_p^b(r, \theta, z) R d\theta \quad (2-12)$$

ここで $\mathbf{f}_p^b$ は杭に強制変位として $\mathbf{U}_p^h$ を与えた時に生じる杭頭断面力を示す。

$$\mathbf{f}_p^b(r, \theta, z) = \boldsymbol{\gamma} \mathbf{U}_p^h(r, \theta, z) = \boldsymbol{\gamma} \boldsymbol{\beta} \mathbf{U}_p(x, y, z) \quad (2-13)$$

杭頭断面力を杭頂版重心へ縮合した力 $\mathbf{P}_p^G$ で表すと、

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_p^G &= \mathbf{f}_p^{G1} + \mathbf{f}_p^{G2} = \int_0^{2\pi} \{ \boldsymbol{\beta}^T \boldsymbol{\alpha}^T (\mathbf{F}_p + \mathbf{F}_s) \boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}^T \boldsymbol{\gamma} \boldsymbol{\beta} \} R d\theta \mathbf{U}_p \\ &= \mathbf{K}_{pp}^G \mathbf{U}_p^G \end{aligned} \quad (2-14)$$

よってインピーダンス関数 $\mathbf{K}_{pp}^G$ 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4本杭を有する杭基礎構造物を解析対象(図3-1)とした際の杭頭インピーダンスを、群杭解析に通常の三次元マトリックス手法を用いて解析したものと比較した。杭の諸元については、表2に示す。表3, 4は振動数 $\omega = 0$, $\omega = \omega_g$ (地盤の卓越振動数) での各手法によって求められた杭頭インピーダンスを比較したものである。また、インピーダンス算定の際に $\mathbf{U}_p^b$ を静的に求めたものを代用することも考えられる。(表3, 4の値は静的な $\mathbf{U}_p^b$ を用いたものである) よって、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。

参考文献 1) R. Sen, T. G. Davies & P. K. Banerjee: DYNAMIC BEHAVIOR OF AXIALLY AND Laterally LOADED PILES AND PILES AND PILE GROUPS

EMBEDDED IN INHOMOGENEOUS SOIL, Department of Civil Engineering, State University of New York at Buffalo

2) Van Can Yun: DYNAMIC SOIL-STRUCTURE-FOUNDATION INTERACTION ANALYSIS BY BOUNDARY ELEMENT METHODS, 岡山大学大学院工学研究科

土木工学専攻修士論文, 1987

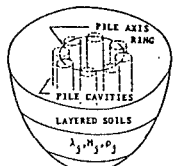


図2-1 群杭のリング杭配置

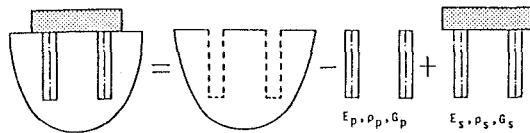


図2-2 地盤-杭系のサブストラクチャ化

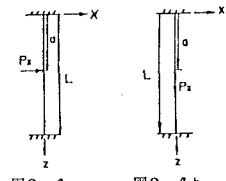


図2-4 a ばりの横振動
図2-4 b ばりの縦振動

表1 地盤の諸元

NO.	THICKNESS (m)	SEAR VELOCITY (m/sec)	UNIT WEIGHT (t/m ³)	POISSON'S RATIO	DAMPING FACTOR
1	2.00	178.0	1.5	0.49	0.048
2	2.00	150.0	1.5	0.49	0.048
3	2.50	151.0	1.8	0.49	0.155
4	2.50	151.0	1.8	0.49	0.185
5	2.50	151.0	1.8	0.49	0.185
6	2.55	217.0	1.8	0.49	0.050
7	2.55	217.0	1.8	0.49	0.050
8	6.00	217.0	2.0	0.49	0.112
9	6.00	171.0	1.6	0.49	0.039
10	8.00	221.0	1.6	0.49	0.050

表2 杭の諸元

スアソソ比	0.147
ヤング率 (tf/m ²)	2.70 × 10 ⁵
断面積	7.865
単位重量 (tf/m ³)	2.5
断面二次モーメント (m ⁴)	1.767
断面二次モーメント (m ⁴)	1.767
断面二次モーメント (m ⁴)	2.555
自重支分	0.21
せん断係数支持 (tf/m ²)	1.16 × 10 ⁴

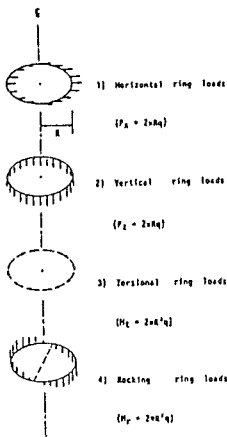


図2-3 リング加振状態

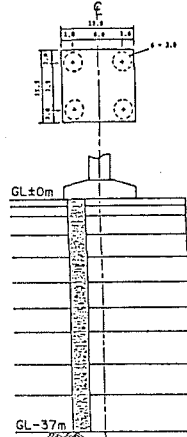


図3-1 解析対象構造物

表3 杭頭インピーダンス ($\omega = 0$)

手法	リング杭		3次元マトリックス	
	REAL	IMAGINARY	REAL	IMAGINARY
変位 (tf/m)	0.2919 × 10 ⁴	0.5278 × 10 ⁴	0.2831 × 10 ⁴	0.5352 × 10 ⁴
速度 (tf/rad)	-0.1271 × 10 ⁴	-0.1575 × 10 ⁴	-0.1103 × 10 ⁴	-0.1613 × 10 ⁴
回転 (tf.m/rad)	0.4587 × 10 ⁴	0.2701 × 10 ⁴	0.5289 × 10 ⁴	0.5339 × 10 ⁴

表4 杭頭インピーダンス ($\omega = \omega_g$)

手法	リング杭		3次元マトリックス	
	REAL	IMAGINARY	REAL	IMAGINARY
変位 (tf/m)	0.2554 × 10 ⁴	0.5364 × 10 ⁴	0.2449 × 10 ⁴	0.8123 × 10 ⁴
速度 (tf/rad)	-0.1115 × 10 ⁴	-0.1609 × 10 ⁴	-0.9919 × 10 ⁴	-0.2603 × 10 ⁴
回転 (tf.m/rad)	0.4480 × 10 ⁴	0.2767 × 10 ⁴	0.5221 × 10 ⁴	0.5705 × 10 ⁴