

I-398 群杭基礎構造物の動的解析法とその動特性評価

岡山大学 正会員 竹宮 宏和
岡山大学 学生会員 ○田中 宏明
日本道路公団 正会員 角谷 務
日本技術開発 KK 正会員 森 敦

1. まえがき

1)

本研究は、地盤と群杭基礎の動的相互作用解析を扱ったものである。これまで筆者らの開発した伝達マトリックス手法による解析システムでは、杭—地盤—杭の動的相互作用において地盤反力の算定段階で無限小の厚さの層を考え平面歪解を適用した。今回の報告は、地盤反力の算定段階で、より厳密な3次元波動論解析を採用した群杭解析システムを開発したので、これと前解との比較を行った。

2. 定式化

地盤と群杭の動的相互作用場は、Navierの式に支配される混合境界値問題である。弾性体としての杭には、物体力としての慣性力と周辺地盤からの反力としての表面力が作用する。よって、j 杭のつり合い式は、仮想仕事の表現を採れば、

$$\int_{V_j} \delta \epsilon_{ij}^T \sigma_{ij} dv_j = - \int_{V_j} \delta U_j^T (-\rho \omega^2) U_j dv + \int_{S_j} \delta U_j^T \tau_j ds_j \quad (1)$$

ここに、 ϵ_{ij} ；応力、 σ_{ij} ；歪み、 U_j ；変位、 τ_j ；表面力を定義している。

地盤—群杭系の解析に際してサブストラクチャ化を行う。単に群杭を地盤から引き抜いた状態では、杭の存在部分に空洞を持つ地盤とストリップ化された群杭となる。ただし両者の間には、変位と応力の

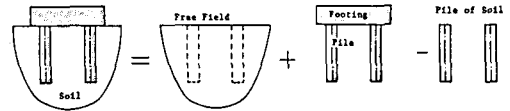


図1 サブストラクチャ化

連続性が杭の周面位置で保証されなければならない。空洞を持つ地盤の解析は困難であるため、サブストラクチャ化を、図1のように、地盤においては杭部分を土で埋め戻した、つまり自然地盤とする。この地盤内の杭部分に当たる土の挙動は、当然、杭としての挙動を課せられる訳で、地盤杭としての取り扱いを要する。したがって、ストリップ化された群杭の方は、原杭から地盤杭を差し引いたものとなる。

地盤—群杭系の支配方程式を導くに、境界要素法（間接法）の考え方の適用を試みる。杭は構造要素としてのはりの挙動として捉えることができ、有限要素化して多自由度系に置換することができる。このとき、応力よりも断面力が意味を持つ。したがって、式（1）の代りに、

$$-\omega^2 M U_j + K U_j = P_j \quad (2)$$

杭周面上の応力につき合う合力を、直交座標上で評価する。

$$\begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} = \int_0^{2\pi} \begin{Bmatrix} t_r \cos \theta - t_\theta \sin \theta \\ t_r \sin \theta + t_\theta \cos \theta \\ t_z \end{Bmatrix} r_0 d\theta, \quad \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \int_0^{2\pi} \begin{Bmatrix} t_z \sin \theta \\ t_z \cos \theta \\ t_\theta \end{Bmatrix} r_0^2 d\theta \quad (3)$$

杭の周面上の表面力を、フーリエ級数展開して表せば、

$$\tau_j = \sum_n H(n\theta) \hat{\tau}_j \quad (4)$$

式（4）のフーリエ級数展開を導入すると、 P_x, M_y には、 $n=1$ の対称フーリエ項、 P_y, M_x には $n=1$ の逆対称フーリエ項、 P_z には $n=0$ の対称フーリエ項、 M_z には $n=0$ の逆対称フーリエ項が対応する。自然地盤内で与える加振パターン（図2参照）として、杭のはりの自由度に応じた応力分布となるが、杭の周辺で積分すれば、杭の断面力につきあうものであればよい。したがって、動的サブストラクチャ法から、自然

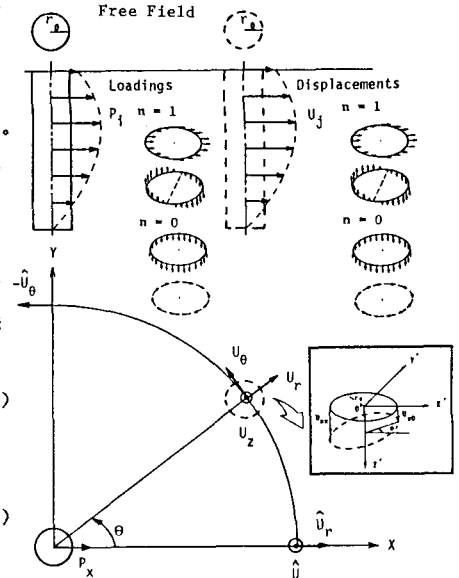


図2 加振パターン

地盤に外力として、一様なリング加振を採る。Kauselは、これに対する応答（準解析解）を導いているので、本研究ではこれを利用する。

群杭基礎を対象とするため、i 杭位置での加振に対して j 杭位置の応答を計算する操作を、順次、杭の全本数にわたって行う。したがって、直交座標系における並進自由度の応答 U_{xyz} は、

$$U_{xyz} = T \hat{U}_{r\theta z} H(n\theta) \quad (5)$$

となる。ただし、 $\hat{u}_{r\theta z}$ はフーリエ振幅、 $\mathbf{T}$ は座標変換マトリックス、 $\mathbf{H}(n\theta)$ はフーリエ級数係数である。また、回転自由度の評価には次式を用いている。

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{U_{z\pi} - U_{z0}}{2r_0} \right) = \frac{U_{z\pi} - U_{z0}}{2r_0} \quad (6)$$

加振杭と応答杭が一致する場合は、表1にまとめておく。以上から、全杭軸節点に関するフレキシビリティ・マトリックス $\mathbf{IG}$ が定義でき、その逆行列を求めることによって、動的地盤剛性マトリックス $\mathbf{K}_{s_0}$ を得る。

$$\mathbf{K}_{s_0} = \mathbf{IG}^{-1} \quad (7)$$

先に述べたサブストラクチャ化に従い、地盤一群杭系の動的剛性マトリックス $\mathbf{K}$ は、

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_{s_0} + (\mathbf{K}_{pile} - \mathbf{K}_{soil}^{pile}) \quad (8)$$

となる。但し、 $\mathbf{K}_{pile}$ は有限要素化された杭基礎の動的剛性マトリックス、 $\mathbf{K}_{soil}^{pile}$ は地盤杭の同マトリックスである。最終的には、地盤一群杭系の動的剛性マトリックスを縮合操作により杭頭位置で評価する。そして、剛結されたフーチング底面へ剛体結合条件から統合し、地盤一群杭系の動的剛性とする。このとき、基礎面入力動も、当然、同位置において有効入力動として評価される。

3. 解析例及び考察

本研究の解析対象構造物として、図3に示す群杭基礎構造物（4本杭，9本杭）を用いた。地盤は、成層地盤、下方境界は、剛基盤を仮定した。フーチング底面でのインピーダンス関数を伝達マトリックス法による解と比較し図4，5に示す。伝達マトリックス法による解は、波動の伝播において平面歪の仮定を設けているが、本解との対応は、概ね良好と言える。群杭効率の程度を明らかにするため、図4，5には単杭解析結果も併せて描いておいた。謝辞：数値解析の一部で岡山大学学生、山田直樹、鈴木伸幸両君の助力を得たことを付記する。

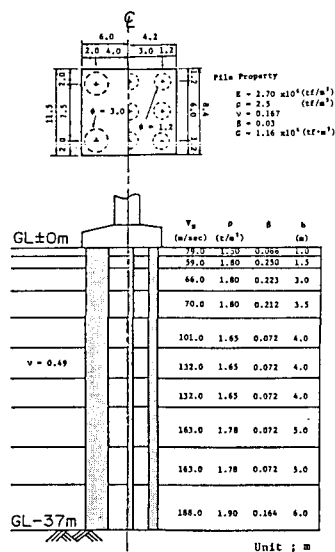


図3 解析対象構造物（ケース1）

表1 応答の評価

load pattern displacement	P_x	P_y	P_z	M_x	M_y	M_z
U_x	$\frac{1}{2}(\hat{U}_x + \hat{U}_0)$				$\frac{1}{2}(\hat{U}_y + \hat{U}_0)$	
U_y		$\frac{1}{2}(\hat{U}_y + \hat{U}_0)$			$\frac{1}{2}(\hat{U}_x + \hat{U}_0)$	
U_z			$\hat{U}_z$			
θ_x		$\frac{1}{2}(\hat{U}_x + \hat{U}_0)$		$\tan^{-1}(\hat{U}_x/R)$		
θ_y		$\frac{1}{2}(\hat{U}_y + \hat{U}_0)$			$\tan^{-1}(\hat{U}_y/R)$	
θ_z						$\tan^{-1}(\hat{U}_z/R)$

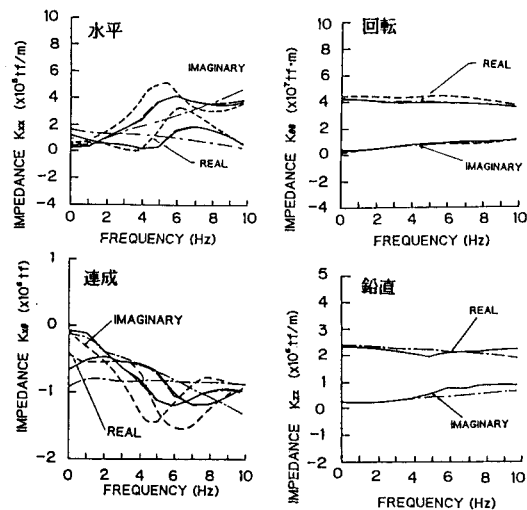


図4 フーチング底面におけるインピーダンス関数（ケース1、4本杭）

＜参考文献＞

- 1) Takemiya, H. and Yukawa, Y.: Dynamic Analysis of Grouped Pile Foundation in Layered Soils, Earthq. Eng. & Vol. 3, No. 1, pp. 183-193, 1986.
- 2) E. Kausel and R. Peek: Dynamic Loads The Interior of a Layered Stratum, Bulletin of the Seismological Society of America, pp. 1459-1481, 1982.

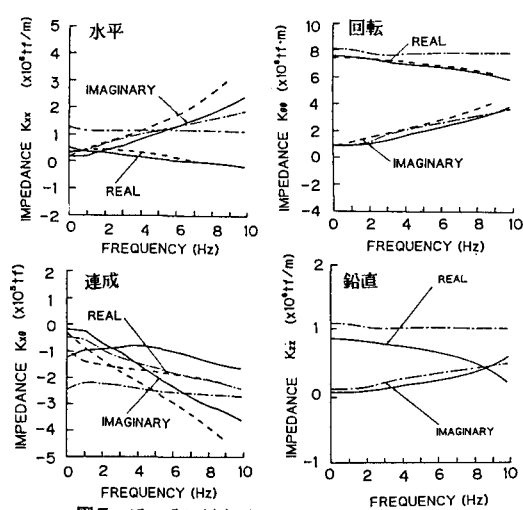


図5 フーチング底面におけるインピーダンス関数（ケース1、9本杭）

—— Green Function
 - - - 単杭解析
 - - - 伝達マトリックス法