

軟弱地盤—杭基礎—構造物系の動的相互作用に関する研究

京都大学 正員 山田善一

岡山大学 正員 竹宮宏和

日本鋼管 正員 〇片桐一成

1. まえがき 本論文の目的は以下の2点である。1つは層状地盤における杭—地盤系の解析である。地盤を連続体として解析する方法は地盤が均一であるという制約をうけ、このことが実際の地盤に適用することを困難にしている。そこで伝達マトリックスを用いて層状地盤中の杭の解析を試みた。今1つは、杭基礎に等価な周波数依存のスティフネス、ダンピングが動的相互作用にいかなる影響を与えるかを調べた。

2. 杭と地盤の解析 深さ方向に地盤反力が変化する三次元波動方程式による解析と、深さ方向に地盤反力が変化しない平面歪解による解析を以下に示す。また群杭を考えるため杭の水平振動と鉛直振動の2つを考える。

1) 三次元波動方程式による解析 地盤を粘弾性体と仮定すると、水平振動について、 j 層の水平地盤反力係数 $\alpha_j(z) = \sum_{ij} \alpha_{ij} U_{ij} Z_{ij}(z)$ (1) と表わされる。 α_{ij} は地盤の i 次モード $Z_{ij}(z)$ に対する反力係数であり、その詳細については文献1)を参照された。ここで $Z_{ij}(z)$ は(2)式を満たしている。

$$\partial^2 Z_{ij}(z) / \partial z^2 + h_{ij}^2 Z_{ij}(z) = 0 \quad (2) \quad h_{ij} \text{ は層ごとの伝達マトリックス } [T_{ij}]$$

$$[T_{ij}] = \begin{bmatrix} \cosh h_{ij} H_j & -\frac{1}{h_{ij}} \sinh h_{ij} H_j \\ \frac{1}{h_{ij}} \sinh h_{ij} H_j & \cosh h_{ij} H_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

を使、て基礎での境界条件により求められる。また $Z_{ij}(z)$ は正規化したものを求めておく。杭の運動方程式

$$M_p \partial^2 u(z, t) / \partial t^2 + E_p I \partial^4 u(z, t) / \partial z^4 = -p(z, t) \quad (4)$$

となり調和振動を仮定すると(4)の解は、 $\lambda_j = \sqrt[4]{M_p \omega^2 / E_p I}$ を使って齊次解+特解の形で、次式のように求められる。

$$u(z) = (\sinh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z)) A + (\cosh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z)) B + (\sinh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z)) C + (\cosh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z)) \quad (5)$$

ここで f_{ij} は三角関数を $Z_{ij}(z)$ に展開するための係数であり、この際、先の正規化の性質を用いており、(5)式より杭のたわみ角 $\phi(z)$ 、モーメント $M(z)$ 、せん断力 $S(z)$ は次式のようなになる。

$$\{u(z) \quad \phi(z) H_j \quad M(z) H_j^2 / E_p I \quad S(z) H_j^3 / E_p I\}^T = [\bar{S}(z)] \{A \quad B \quad C \quad D\}^T \quad (6)$$

$$[\bar{S}(z)] = \begin{bmatrix} \sinh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \cosh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \sinh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \cosh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) \\ \lambda_j H_j \cosh \lambda_j z - H_j Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & -\lambda_j H_j \sinh \lambda_j z - H_j Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \lambda_j H_j \cosh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \lambda_j H_j \sinh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) \\ -\lambda_j^2 H_j \sinh \lambda_j z - H_j^2 Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & -\lambda_j^2 H_j \cosh \lambda_j z - H_j^2 Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \lambda_j^2 H_j \sinh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \lambda_j^2 H_j \cosh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) \\ -\lambda_j^3 H_j \cosh \lambda_j z - H_j^3 Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \lambda_j^3 H_j \sinh \lambda_j z - H_j^3 Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \lambda_j^3 H_j \cosh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) & \lambda_j^3 H_j \sinh \lambda_j z - Y \sum_{ij} f_{ij} Z_{ij}(z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

したが、て杭の j 層中の要素の伝達マトリックス $[T_j]$ は $H_j = H_0$ とおくと次式で表わされる。

$$[T_j] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\bar{S}(0)] [\bar{S}(H_j)]^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8) \quad \text{また } [T^N] = [T_1] [T_2] \cdots [T_j] \cdots [T_N] \text{ とおくと } N \text{ 層の地盤中の杭}$$

の杭頭と杭端の変位と応力の関係は、次式のように求まる。

$$\{U_0 \quad \phi_0 H_0 \quad M_0 H_0^2 / E_p I \quad S_0 H_0^3 / E_p I\}^T = [T^N] \{U_N \quad \phi_N H_0 \quad M_N H_0^2 / E_p I \quad S_N H_0^3 / E_p I\}^T \quad (9)$$

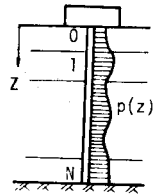


Fig. 1

(9)式で杭端の境界条件を決めることにより、(9)式は変形されて、次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} M_0 H_0^2 / \zeta_{PI} \\ Q_0 H_0^2 / \zeta_{PI} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ F' \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} U_0 \\ H_0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F \\ F' \end{Bmatrix} U_n \dots\dots (10) \text{ここで、マトリックス } [F] \text{ の要素の実部と虚部がそれ}$$

ぞれ杭基礎に等価なスティフネスとダンピングを表わしている。鉛直振動についても同様にして伝達マトリックスを用いて定式化できる。

2) 平面歪解による解析 1)の解析法に3つの仮定を導入して簡単な形で解析を考える。

①地盤は無限遠方に続く無限に薄い層とする。②地盤は慣性と遠散減衰のみをもち内部減衰は無視する。③地盤反力は1層中では変化しない。水平振動において Novak は地盤反力を平面歪解より求め、 $G_j (\Delta u_{ij} + i \Delta u_{vj}) U(z, t) / \Delta z$ と表わした。杭の運動方程式の解は、(5)式で省次解のみとなる。ただし $\lambda_j = \sqrt{\frac{1}{G_j I} [m_j \omega^2 - G_j \Delta u_{ij} - i G_j \Delta u_{vj}]}$ である。地盤の影響をすべて λ_j の中に入れておくことに注目したい。以下は1)と同様の手法で伝達マトリックスを作ってスティフネスとダンピングを求める。鉛直振動についても全く同様である。

3. 全体系モデル 上部構造物の対象としては高橋脚を考えた。Fig.1 のような杭頭にフーチングをつけたモデルと、高橋脚をマス質点でおきかえたモデルの2つを考えた。

4. 計算結果および考察 Fig.2.3 は1),2)の両解析法による杭基礎に等価なスティフネスとダンピングの比較である。スティフネスのおちこんでいる所が地盤の固有振動数を示している。このため杭長30mの30本の群杭を持つフーチングを加振すると Fig.4 のように地盤の固有振動数のところでピークを生じている。したがってマス質点系の上部構造の固有振動数がこの値と一致すると応答値が大きくなる。Fig.6 は現場実験と、2)の解法による多層地盤モデルの解析との比較である。また Fig.7 は、多層モデルで地盤の剛性を順々に高めていった時のスティフネスの値であり、上層の影響が大きいことを示している。

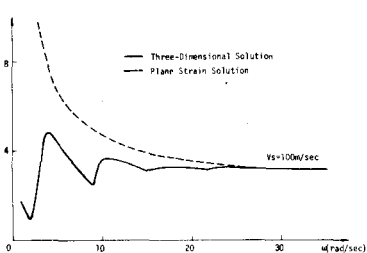


Fig. 2 Damping $F_d/w \times 10^{-3}$ (Horizontal)

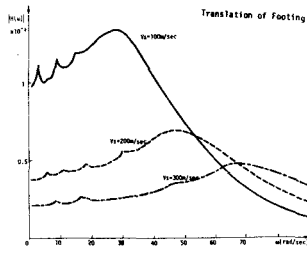


Fig. 4 Frequency Response Curve

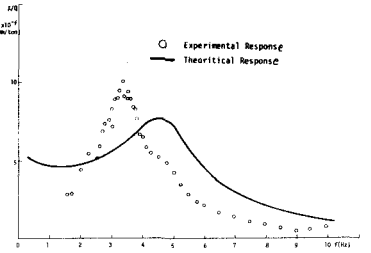


Fig. 6 Frequency Response Curve of Footing

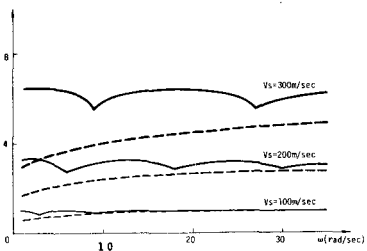


Fig. 3 Stiffness $F_s \times 10^{-3}$ (Horizontal)

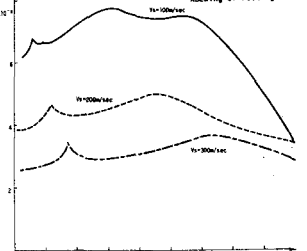


Fig. 5 Frequency Response Curve

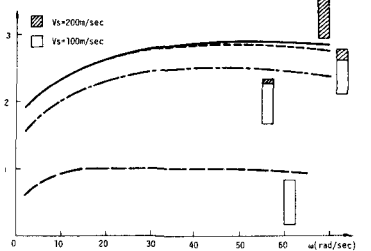


Fig. 7 Stiffness $F_s \times 10^{-3}$ (Horizontal)

Reference. 1)Nogami, T., and Novak, M., "Resistance of Soil to a Horizontal Vibration", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.15, 1977, pp249-261.