

I-400

水平加振を受ける杭基礎の時刻歴応答解析

(株) 福田組

正員 小泉 善弘

Univ. of California, San Diego

野上 仁昭

東京大学 生産技術研究所

正員 小長井一男

1. はじめに

杭と地盤の相互作用を解析する場合、杭周面での滑動や剥離を含む非線形性および波動の地下遠方への逸散性を考慮する必要があるが、このような非線形性は時間領域で解析されることが望ましい。野上、小長井ら^{1), 2)}は、Winkler 地盤の仮定を用いて波動逸散と境界面での滑りを同時に考慮した実用性のある杭基礎の鉛直応答解析手法を提唱し、滑動の進行しやすい周波数の存在など興味ある知見を得ている。

しかし、杭基礎は水平方向により可撓性を持つため水平加振時に生じる杭と地盤の剥離、杭周辺地盤での非線形性の発現が工学的に問題とされることが多い。著者らは、野上、小長井らの提唱した手法を拡張し水平加振を受ける杭基礎の時刻歴応答解析手法を開発した。本報告はこの概要について述べるものである。

2. 定式化

杭および地盤は有限個数の水平な層に分割される。加振力の時刻歴は、等間隔の時刻刻み Δt で離散化され、 Δt 間の加振力の変化は直線的であるとする。分割された杭要素の時刻 t_i での水平動を支配する方程式は以下になる。

$$E_p I \frac{d^4 U_{p,i}}{dz^4} + m_p \ddot{U}_{p,i} = -p_{p,i} \quad (1)$$

ここで、 $U_{p,i}$, $\ddot{U}_{p,i}$ は杭の水平方向変位、加速度であり、 $E_p I$, m_p は杭のヤング係数、断面一次モーメントおよび単位長さあたりの質量、そして $p_{p,i}$ は杭・地盤間の相互作用力である。

地盤は杭の周りの非線形領域とその外側に広がる線形地盤に分割され、Winkler 地盤の仮定を用いることにより分割された水平層内の地盤反力はその層の変位応答のみに支配される。このモデルを図1に示す。

非線形領域の運動方程式は以下になる。

$$k_{r,i} (U_{p,i} - U_{s,i}) + \delta_{r,i} + m_{11} \ddot{U}_{p,i} + m_{12} \ddot{U}_{s,i} = p_{p,i} \quad (2-1)$$

$$- \{ k_{r,i} (U_{p,i} - U_{s,i}) + \delta_{r,i} \} + m_{11} \ddot{U}_{p,i} + m_{12} \ddot{U}_{s,i} = -p_{s,i} \quad (2-2)$$

ここで、 $k_{r,i}$, $\delta_{r,i}$ は非線形領域内の非線形パネの勾配および切片、 $p_{s,i}$ は非線形領域と線形地盤の間の相互作用力、 $U_{s,i}$, $\ddot{U}_{s,i}$ は非線形領域外側での水平変位および加速度、 m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} は整合質量であり非線形領域内の変形状が直線的であると仮定して算定する。剥離が生じた場合には再び杭と土が接触するまで非線形領域はその形状が変化しないと仮定する。

線形地盤からの反力 $p_{s,i}$ は、Novakら³⁾により誘導された平面ひずみ状態の無限薄層内の剛体円盤の剛性を等価な力学モデルで近似することで以下の形で表現される。

$$p_{s,i} = k U_{s,i} + d_i \quad (3)$$

ここで k は時間に依存しない定数である。杭間距離が Δt 間に伝播する距離以上であれば、他の杭からの影響は時刻 t_i での既知量として d_i に含まれる。

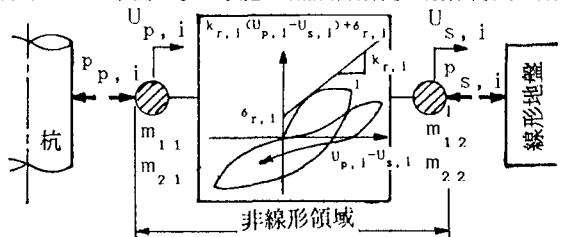


図1 地盤のモデル

さらに、時刻 t_{i-1} より t_i までの加速度の変化が $t^\alpha(t$ の原点は t_{i-1} にとる)に比例するとすれば加速度 $\ddot{U}_{p,i}, \ddot{U}_{s,i}$ は時刻 t_i で勾配と切片が既知な以下に示す変位 $U_{p,i}, U_{s,i}$ の一次式で表すことができる。

$$\ddot{U}_{p,i} = \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} U_{p,i} - \left\{ \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} U_{p,i-1} + \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t} \dot{U}_{p,i-1} + \frac{\alpha(\alpha+3)}{2} \ddot{U}_{p,i-1} \right\} \quad (4-1)$$

$$\ddot{U}_{s,i} = \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} U_{s,i} - \left\{ \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} U_{s,i-1} + \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t} \dot{U}_{s,i-1} + \frac{\alpha(\alpha+3)}{2} \ddot{U}_{s,i-1} \right\} \quad (4-2)$$

次に、式(4-1)、(4-2) および式(3) を式(2-2) に代入することにより変位 $U_{s,i}$ は $U_{p,i}$ の一次式

$$U_{s,i} = A_1 U_{p,i} + A_2 \quad (5)$$

で表現される。式(5) を式(2-1) に代入した結果をさらに式(1) に代入することで以下に示す式を得る。

$$\frac{d^4 U_{p,i}}{dz^4} = -\lambda_i^4 U_{p,i} - \gamma_i \quad (6)$$

ここで $U_{p,i}$ の形状が時刻 t_i において深さ z 方向に5次曲線(式(7))で表現できるとすると、この式(7)

$$U_{p,i} = C_{1i} z^5 + C_{2i} z^4 + C_{3i} z^3 + C_{4i} z^2 + C_{5i} z + C_{6i} \quad (7)$$

未定係数は分割された杭要素の境界条件より定められ、式(7)の4階微分が式(6)を満足しなければならないことから杭要素の両端の応答は次の関係式で表現される。

$$\begin{Bmatrix} U_{p,i} \\ \theta_{p,i} \\ S_{p,i} \\ M_{p,i} \end{Bmatrix}_{z=0} = \begin{bmatrix} t_i \\ \\ \\ \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{p,i} \\ \theta_{p,i} \\ S_{p,i} \\ M_{p,i} \end{Bmatrix}_{z=l} + \begin{bmatrix} q_i \\ \\ \\ \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_i(0) \\ \gamma_i(l) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここで $(U_{p,i}, \theta_{p,i}, S_{p,i}, M_{p,i})|_{z=0}$ および $(U_{p,i}, \theta_{p,i}, S_{p,i}, M_{p,i})|_{z=l}$ はそれぞれ杭要素の両端での変位、たわみ角、せん断力および曲げモーメントであり、 $(t_i), (q_i)$ は $E_p I, \lambda_i$ および杭要素長 l で表現される 4×4 および 2×4 のマトリックスである。したがって、杭の応答はその両端の境界条件より伝達マトリックス法で計算される。

3. 数値計算例

正弦加振を受ける2本杭の杭頭剛性を評価したものを図2に示す。非線形化は線形解析で剛性が高くなる周波数で著しく進行しこの帯域で剛性は大きく低下する(---●---)。しかし、非線形領域が線形の範囲内にとどまっている場合は線形地盤を想定した厳密解とほぼ一致した結果を得た(---○---)。

参考文献

- 1) Nogami, T. and Konagai, K.; Dynamic Response of Vertically Loaded Nonlinear Pile Foundations, Jour., Geotechnical Div., ASCE, Vol. 113, No. 2, pp. 147~160, 1987.
- 2) Nogami, T., Konagai, K. and Ohtani, J.; Time Domain Response Analysis of Nonlinear Deep Foundations Subjected to Axial Dynamic Load, Proc., 2nd US Symposium on Geotechnical Engineering, South Carolina, 1986.
- 3) Novak, M., Nogami, T. and Aboul-Elia, F.; Dynamic Soil Reactions for Plane Strain Case, Jour., Engineering Mechanics Div., ASCE, Vol. 104, No. EM4, pp. 953~959, 1978.

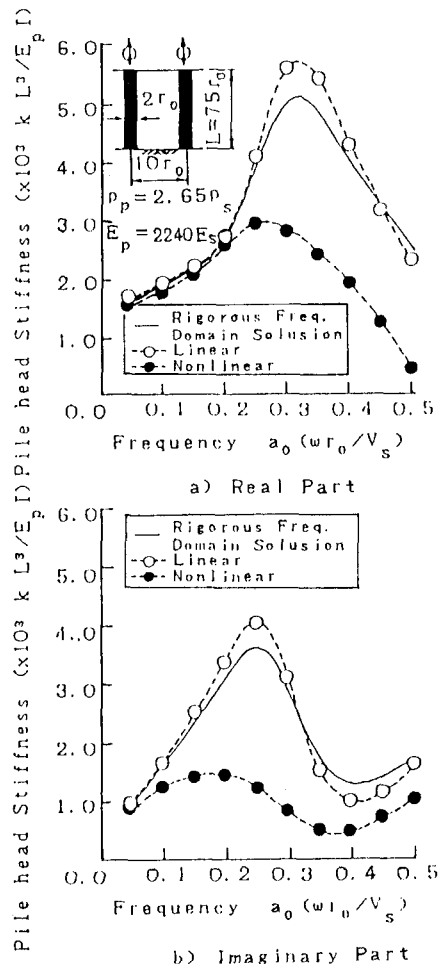


図2 群杭の杭頭剛性の変化