

I-449

鉛直加振を受ける杭基礎の時刻歴応答解析

長岡技術科学大学 正員 小長井一男
ヒューストン大学 野上 仁昭

1. はじめに

平行な多層地盤内に打設された杭基礎の応答解析においては、杭の軸と直交する断面内で平面歪状態を仮定し、この面内で杭を支える地盤のスティフネスを評価し解析をおこなう方法がよく用いられている。このように、地盤をWinkler モデルとする定式化、およびその仮定の妥当性の検証は多くの研究者によってなされているが、その多くは周波数領域での解析を対象としたものである。この仮定の採用は、時刻歴応答解析においても効率的で実用性の高い計算手法の開発につながるものと考えられる。本報告は、鉛直加振を受ける杭基礎の時刻歴応答に関して著者らが開発した一手法¹⁾²⁾³⁾について報告するものである。

2. 定式化

杭基礎は、図1に示すように有限個数のスライスに分割されるものとする。加振力の時刻歴は、等間隔の時間刻み 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。時刻 t_i での、分割された杭要素の鉛直動を支配する方程式は以下のとおりである。

$$E_p A \frac{d^2 w_i}{dz^2} - p_i = m_p \ddot{w}_i \quad (1)$$

ここで w_i 、 $\ddot{w}_i$ はそれぞれ時刻 t_i における、杭の鉛直方向変位、加速度であり、 E_p 、 A 、 m_p は、杭のヤング率、断面積、単位長さ当たりの質量、そして p_i は杭地盤間の相互作用力である。Winkler 地盤を想定しているため、 p_i は考慮している深さ z での変位の時刻歴応答のみに支配されることになる。Winkler 地盤のスティフネスとして、Novak らが誘導した平面歪状態の無限薄層内の剛体円盤のスティフネスを用い得るが、著者らはこの解が直列のVoigt モデル群によって幅広い周波数領域 ($0.02 < 2\alpha_0 < 1.0$) で近似しうることを示した¹⁾(図2、図3)。無限薄層内の円盤以外の点への影響も波動到達の時間差とモデル構成要素の各定数を円盤からの距離の関数とすることで精度よく評価しうる。この結果、相互作用力は、対象が単杭か群杭かに拘らず以下の形で表現できる。

$$p_i = k w_i + d_i \dot{w}_i \quad (2)$$

ここで k は時間に依存しない定数であり、 d_i は前段のタイムステップでの応答の関数であり時刻 t_i における既知量となる。群杭の場合、時間刻み Δt を

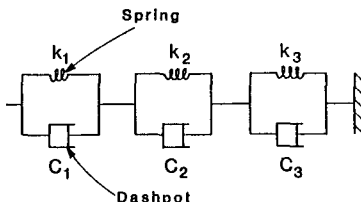
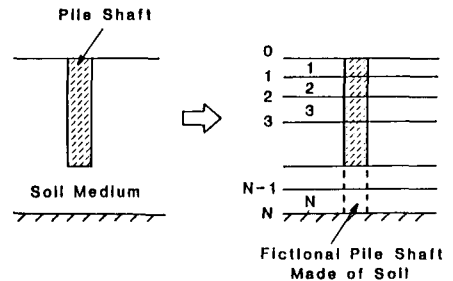
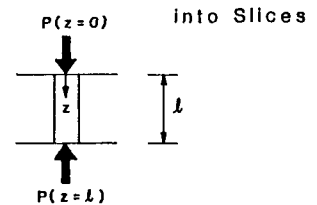


図2. 地盤のモデル化



(a) Soil-Pile System Divided



(b) Pile Segment Subjected Forces

図1. 杭基礎のモデル化

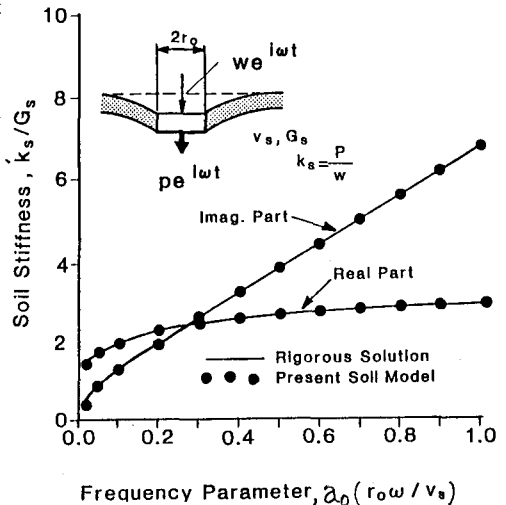


図3. Winkler 地盤のスティフネス

杭間距離をせん断波が伝播する時間以下にとれば、他の杭からの影響はやはり時刻 t_i での既知量として d_i に含まれることになる。さらに時刻 t_{i-1} より t_i までの加速度の変化が t^α (t の原点は t_{i-1} にとる) に比例するとすれば、式 (1) 中の加速度 $\ddot{w}_i$ は、

$$\ddot{w}_i = \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} w_i - \left\{ \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} w_{i-1} + \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t} \dot{w}_{i-1} + \frac{\alpha(\alpha+3)}{2} \ddot{w}_{i-1} \right\}$$

と表現することができる。この式は、式 (2) と同様、時刻 t_i でその勾配と切辺を既知量とする w_i の一次式である。式 (2) と式 (3) を式 (1) に代入すれば以下の表式をうる。

$$\frac{d^2 w}{dz^2} = \lambda^2 w_i + \gamma_i \quad (4)$$

w_i の形状が時刻 t_i において z 方向に 3 次曲線

$C_{1i} z^3 + C_{2i} z^2 + C_{3i} z + C_{4i}$ で表現できるとすると、これら 4 つの未定係数は、分割された杭要素の 4 つの境界条件、 $P_i(0)$, $w_i(0)$, $P_i(l)$, $w_i(l)$ から定めうるが、3 次曲線を 2 回微分した形状が式 (4) を満足しなければならないことから、次なる関係が導かれる。

$$\begin{Bmatrix} w_i \\ P_i \end{Bmatrix}_{z=0} = [t] \begin{Bmatrix} w_i \\ P_i \end{Bmatrix}_{z=l} + [q] \begin{Bmatrix} \gamma_i(0) \\ \gamma_i(l) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここで $[t]$, $[q]$ は、ともに 2×2 のマトリックスであり、各要素は杭要素長 l , 杭剛性 $E_p A$, そして λ の関数として表現される。したがって多層地盤内の杭の応答は、その両端の境界条件が明確であれば、この伝達マトリックスを用いて容易に算定できる。

3. 数値計算例

(1) 正弦加振を受ける群杭の応答： 剛体フーチングを有する 2 本杭の杭頭剛性を評価したものを図 (4) に示す。計算結果は、周波数領域で既に開発された手法による結果と比較されており、両者がよく符合している様子が認められる。ここで提示した手法による結果が高周波側での剛性を、わずかに高く評価するのは、分割された杭の要素内の変形を 3 次曲線に設定したことによるものである。

(2) 群杭のインパルス応答： 図 (5) に示すような剛体フーチングを有する群杭にインパルスを加えたときのフーチングの応答を図 (6) に示す。図中には、単杭のインパルス応答も併記してある。杭から放射された波動が隣接する他の杭に到達するまでその応答に単杭との差が現われないことは、理論的にも肯首しうる結果である。

これらの数値解析を行なうプログラムでは、軽微な修正を加えることで、杭周辺のすべりなどを考慮した非線形応答解析を行なうことも可能である。詳細は当日発表する。

参考文献

- 1) Nogami, T. & Konagai, K., Time Domain Axial Response of Dynamically Loaded Single Piles, Jour of Engineering Mechanics Div., ASCE, submitted for possible publication.
- 2) Konagai, K. & Nogami, T., Time Domain Axial Response of Dynamically Loaded Piles Groups, Jour of Engineering Mechanics Div., ASCE, submitted for possible publication.
- 3) Nogami, T. & Konagai, K., Dynamic Response of Vertically Loaded Nonlinear Pile Foundations, Jour of Engineering Mechanics Div., ASCE, submitted for possible publication.

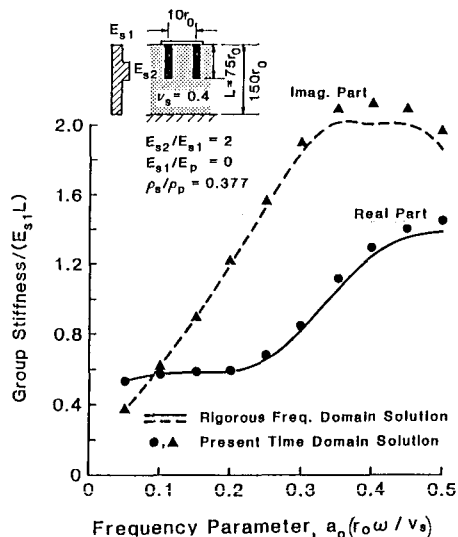


図 4. 群杭の杭頭剛性の周波数依存性

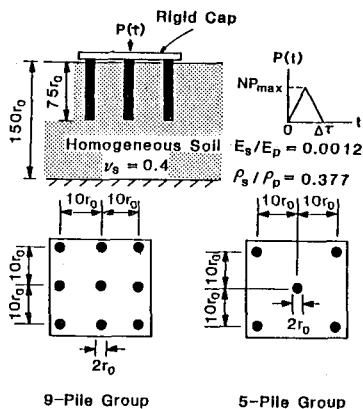


図 5. 解析モデル（インパルス応答）

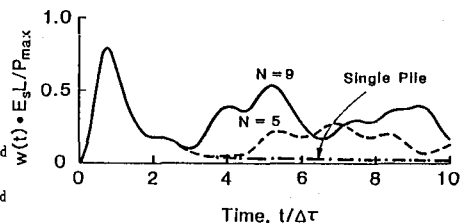


図 6. 剛体キャップのインパルス応答