

(70) 水平加振を受ける群杭基礎の時刻歴応答解析

東京大学生産技術研究所

正員 小長井一男

Scripps Inst. of Oceanography

Univ. California, San Diego

野上 仁昭

1. はじめに

杭基礎と地盤の相互作用を解析する際、波動の地下逸散に加えて杭周面での地盤との剥離、滑動、杭近傍地盤の非線形化をも同時に考慮することが重要である。一般に杭基礎は、その軸方向の剛性が周辺の地盤と比べ著しく高いため、これをWinkler 地盤上の梁とみなして差し支えない場合が多い。筆者らは、さきにWinkler 地盤の仮定を採用し波動の逸散と杭・地盤境界面での滑りを同時に考慮する杭基礎の鉛直方向時刻歴応答解析手法を開発した^{(1),(2)}。しかし杭基礎は本質的に水平方向によりたわみやすい構造物であり、水平加振時に生じる非線形性が工学的に問題とされることが多い。筆者らはさきに開発された手法を改良し、これを水平加振を受ける群杭基礎の時刻歴応答解析手法として拡張した。本報告はこの手法の概要について述べるとともに、厳密解および模型実験結果と本手法による計算値との比較を通し、解析上の種々の仮定の妥当性を検討したものである。

2. モデル化の概要と定式化

杭基礎および地盤は、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。さらにこの地盤のスライスは杭の周りの Ring 状の非線形領域とその外側に広がる線形地盤とに分割される。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水平動を支配する方程式は以下のとおりである。

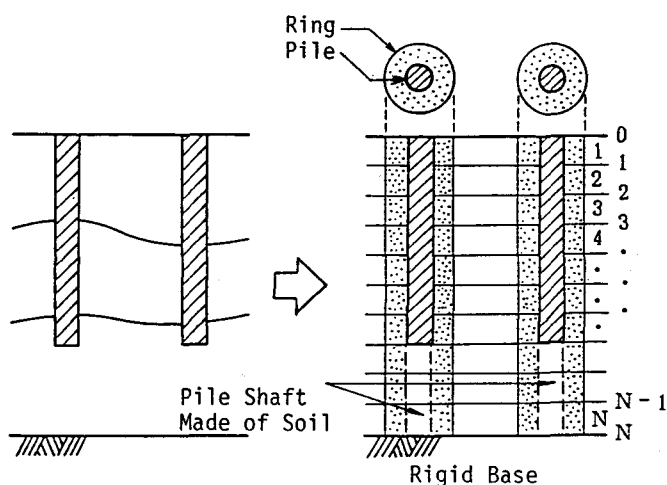


Fig.1 Soil-Pile Model

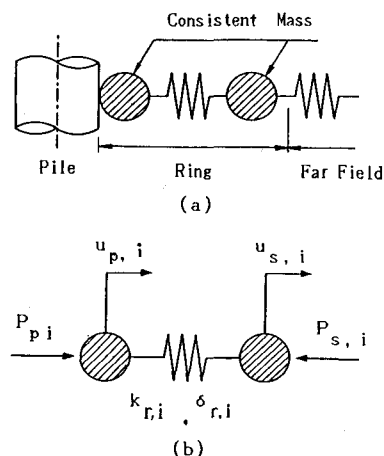


Fig.2 Ring Element

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

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、断面二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（地盤反力）である。Winkler 地盤の仮定を導入することにより地盤反力 $p_{p,i}$ 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。この地盤の薄層のモデルを図 2 に示す。層内の非線形領域の運動方程式は以下のように表現される。

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

$$- \{ k_{r,i} (\langle u_{p,i} - u_{s,i} \rangle + \delta_{r,i}) + m_{21} \ddot{u}_{p,i} + m_{22} \ddot{u}_{s,i} \} = -p_{s,i} \quad (2-2)$$

ここで、 $k_{r,i}$ 、 $\delta_{r,i}$ は非線形バネに生じた反力の勾配および切辺、 $p_{s,i}$ 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が直線的に変化するとして算定される。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 らにより誘導された平面歪状態の無限薄層内の剛体円盤の剛性³⁾を簡便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 間に波動の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。

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、加速度 $\ddot{u}_{p,i}$ 、 $\ddot{u}_{s,i}$ は時刻 t_i で勾配と切辺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。

$$\begin{aligned} u_{p,i} &= \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} u_{p,i} - \left\{ \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} u_{p,i-1} + \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t} \dot{u}_{p,i-1} + \frac{\alpha(\alpha+3)}{2} \ddot{u}_{p,i-1} \right\} \\ u_{s,i} &= \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} u_{s,i} - \left\{ \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t^2} u_{s,i-1} + \frac{(\alpha+1)(\alpha+2)}{\Delta t} \dot{u}_{s,i-1} + \frac{\alpha(\alpha+3)}{2} \ddot{u}_{s,i-1} \right\} \end{aligned} \quad (4-1), (4-2)$$

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。

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

ここで分割された杭要素内の $u_{p,i}$ 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。

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

この式中には 6 つの未定係数が含まれているが、これらは式(6) が式(7) を満足しなければならないという条件を杭要素両端で考慮し、さらに杭要素の一端 ($z=1$) での 4 つの物理量を与えることで表現することができる。この式(7) を用いて杭要素のもう一端 ($z=0$) での物理量は以下の形で表現される。

$$\{u_{p,i}, \theta_{p,i}, S_{p,i}, M_{p,i}\}_{z=0}^T = [t_i] \{u_{p,i}, \theta_{p,i}, S_{p,i}, M_{p,i}\}_{z=1}^T + [q_i] \{v_i(0), v_i(1)\}^T \quad (8)$$

ここで $\{u_{p,i}, \theta_{p,i}, S_{p,i}, M_{p,i}\}_{z=0}^T$ および $\{u_{p,i}, \theta_{p,i}, S_{p,i}, M_{p,i}\}_{z=1}^T$ 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 $E_p I$ 、 λ_i および要素長 l で表現される 4×4 および 2×4 のマトリックスである。これより杭の応答は、杭頭と杭端での境界条件をもとに伝達マトリックス法で計算される。

3. 模型実験による検討

本手法では杭基礎を Winkler 地盤上の梁と仮定しこの Winkler 地盤の剛性として Novak の平面歪解を用い、さらにこの解をバネ、ダッシュポット、マスの複合した簡便な力学モデルで表現するなど大胆な仮定を幾つか取り入れている。これまでこれらの仮定を導入するうえで段階を踏んだ厳密なチェックは行っているが、全体系の実物あるいは模型の応答を測定し計算結果と比較することで本手法に組み込まれた様々な仮定の妥当性を統合的に検討することは意義がある。ここでは筆者らにより開発された模型実験手法⁴⁾を用いウレタンの模型地盤内に打ち込まれた群杭基礎（4本）の線形範囲でのインパルス応答を計測する。なおさきに開発された鉛直方向の応答解析モデルの妥当性も検討すべく鉛直方向のインパルス応答も併せて計測する。

模型群杭頭のフーチングのインパルス応答を図3に対応する計算値と比較して示す。計算値と実測値はほぼ一致した傾向を示し採用した仮定が概ね妥当であると考えられる。水平方向の応答については、鉛直方向のそれに比べると精度が悪い。これは計算では考慮していない模型杭（ウレタン棒）の内部減衰の影響が水平方向で顕著に現れたためであると考えられる。

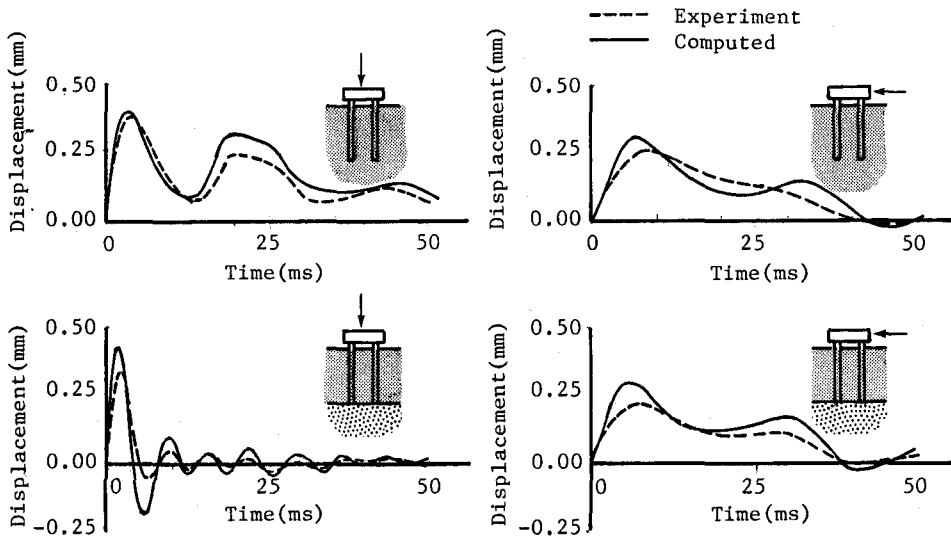


Fig.3 Histories of Pile-Cap Displacement Due to Transient Load

4. 非線形解析例

正弦加振を受ける2本杭の杭頭剛性を無次元化周波数の関数として評価したものを図4に示す。杭の周囲には杭半径の2倍の非線形領域を設定しておりこの内部の非線形パネのモデルとして Iwan のモデルを採用した。非線形化は線形解析で剛性の高くなる周波数領域で著しく進行しこの帯域での杭頭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留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(—○—)。この結果は、既に得られている鉛直方向の杭頭剛性の変化と共通するものであり、非線形化が進むにつれて杭間の相互作用の影響が現れなくなる様子を示すものである。

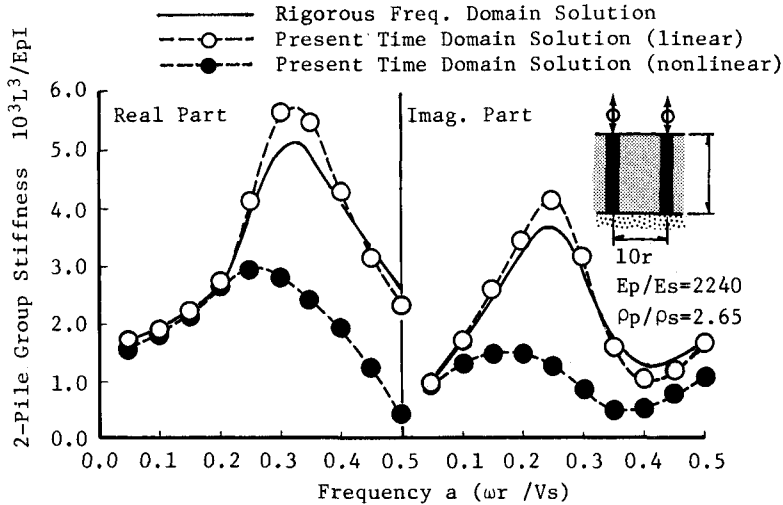


Fig.4 Lateral Pile-Head Stiffness of Pile Group

5. 結論

本報告では、杭と地盤の境界面付近で発生する地盤の非線形化を考慮しうる杭基礎水平動の簡便な時刻歴応答解析手法を提案した。本手法で用いられた線形領域での仮定は実験結果、厳密解を検討して、概ね妥当であると認められる。しかし非線形領域の構成則については、今後現場実験結果等をもとに緻密な検討を重ねて行く必要がある。最後に実験、解析に協力された元長岡技術科学大学大学院(現・福田組(株))小泉善弘氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Konagai, K. and Nogami, T. ; Time-Domain Axial Response of Dynamically Loaded Pile Groups, Jour., Engineering Mechanics, ASCE, Vol.113, No. 3, pp.417~430, 1987.
- 2) Nogami, T. and Konagai, K. ; Dynamic Response of Vertically Loaded Nonlinear Pile Foundations Jour., Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.113, No. 2, pp.147~160, 1987.
- 3) Novak, M., Nogami, T. and Abouli-Ella, F. ; Dynamic Soil Reactions for Plane Strain Case, Jour., Engineering Mechanics, ASCE, Vol.104, No. EM4, pp. 953~959, 1978.
- 4) Konagai, K., Koizumi, Y. and Ogawa, s. ; Experiments on Soil-Pile Interaction Using Electro-magnetic-Induction-Type Impulse Generator, ASCE, Special Technical Publication on "Dynamic Behaviour of Pile Foundations: Experimental Aspects", Apr., 1987.