

(97) 地盤の非線形履歴性を考慮した杭基礎構造物の地震応答性状

岡山大学工学部 竹宮宏和  
東亜建設(株) 小岩 武

1. まえがき

最近の土木・建築構造物の建設は深い軟弱地盤上にも杭基礎をもってなされる機会が多くなっている。杭基礎の地震時の応答性状を波動論、有限要素法から線形解析について調べた研究は多いが、強震時の杭周辺の地盤の非線形特性も無視できない。本論文はこの点に注目して、その非線形特性が構造物に与える影響を前報[1]に引き続いて調べたものである。定式化は群杭を離散質量系で表示し、地盤反力を近似波動論から評価した。土の力学特性には修正Ramberg-Osgoodモデルを使用した。基礎入力に対する応答計算には、地盤バネの固定化を図った後、直接逐次積分法から遂行した。

2. 定式化

〔群杭の線形特性〕 基礎入力を受ける地盤一杭系の解析は、自然地震振動解析と地盤と杭の動的相互作用解析から成る。前者は1次元の重複反射理論に基づく。一方、後者は3次元波動論に基づく。ここでは、杭の横振動と縦振動を分離して、それに応じる近似法、しかも平面歪仮定を導入した簡便法を採る。単杭の場合、水平、鉛直方向の単位加振力に対するそれぞれの方向の変位は

$$u_p = \frac{q K_1(sr) K_0(qr) + \frac{q}{r} K_1(sr) K_0(qr) + sq K_0(qr) K_0(sr)}{\pi r \mu \left(\frac{\omega}{V_s}\right)^2 \left[ \frac{4}{r} K_1(qr) K_1(sr) + s K_1(qr) K_0(sr) + q K_0(qr) K_1(sr) \right]}$$

$$w_p = \frac{K_0(pr)}{2\pi \mu p K_1(pr)} \quad (1)$$

ただし、 $V_s$  はせん断波速度、 $G$  はせん断剛性、 $\rho$  は密度、 $q, s$  は所定の波数、 $K_\nu$  は第2種  $\nu$  次の変形ベッセル関数、 $r$  は杭半径、 $\omega$  は振動数である。

群杭に対しては、同径上の応答がフーリエ級数において  $n=0, 1$  の展開に従うとして、3次元地盤フレキシビリティを座標回転を通して求める。地盤の剛性マトリックスはその逆行列から得られ

$$K_{xyz,j}^{soil} = \begin{bmatrix} K_{xy}^{soil} & \\ & K_z^{soil} \end{bmatrix}_j = \left[ F_{xyz,j}^{soil} \right]^{-1} \quad (2)$$

地盤の層状性、杭の断面諸元の変化から、一様な物性値の各セグメントに分割されたものに上式を適用する。杭-地盤系の定式化には、離散質量系モデルで直接剛性法を採る手法と、分布質量系モデルから伝達マトリックス法を適用する手法がある。いずれの手法においても、杭基礎では杭頭での断面力と変位を関係付ける杭頭インピーダンスが重要な指標となる。基礎面への入力  $u_g$  に対しての杭頭断面力は

$$\begin{Bmatrix} M \\ Q \\ P \end{Bmatrix}^h = \begin{bmatrix} K_{u\theta}^h & \\ & K_w^h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \theta \\ w \end{Bmatrix}^h + \begin{Bmatrix} Au_g \\ \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

杭頭断面の変形は杭頂版が剛体とすると、その自由度は変換

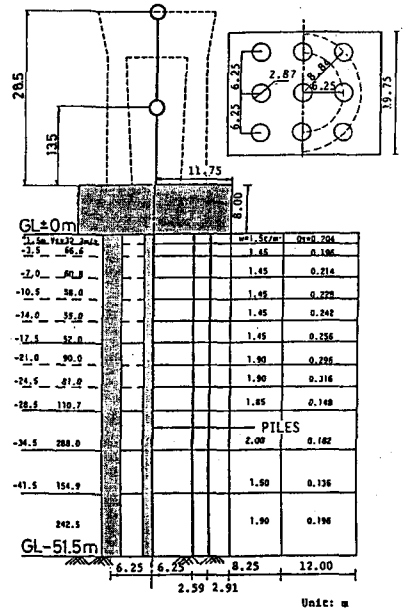


図1. 橋脚の群杭基礎構造物

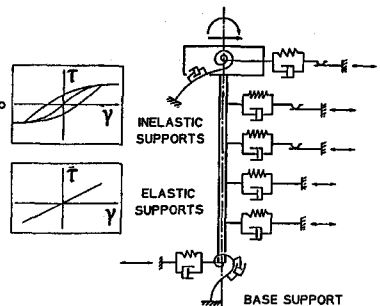


図2. 非線形解析モデル

マトリックス  $\alpha$  を介して後者のそれで評価される。その結果は

$$\mathbf{K}_{xyz}^h = \alpha^T \mathbf{K}_{xyz}^h \alpha \quad (4)$$

群杭の場合、杭一地盤一杭の動的相互作用のため、単杭と比して次式で評価される群杭効果が重要な指標となる。

$$e_N^Q = \frac{Q_N}{NQ_0} \quad e_N^M = \frac{M_N}{NM_0} \quad (5)$$

ここで  $Q_0, M_0, Q_N, M_N$  は、それぞれ単杭、群杭において単位の変形を杭頭に生じさせるに必要な力あるいはモーメントを定義している。これらについては参考文献 [2, 3] を参照されたい。

[近傍地盤の非線形特性を考慮した動的解析] 杭の近傍地盤の非線形履歴特性を導入しての群杭の地震応答解析を実施するに際して、まず群杭の定式化を簡略化した形で等価な単杭の形にする。地盤の歪レベルに応じて地盤反力は変化するため、定式化には直接剛性法を採る。地盤反力の振動数依存性は対象地盤の卓越振動数  $\omega_g$  で固定化して扱う。従って、単杭については、

$$\mathbf{K}_S = \text{Real}(\mathbf{K}(\omega_g)) \quad \mathbf{C}_S = \text{Imag}(\mathbf{K}(\omega_g))/\omega_g \quad (6)$$

より、運動方程式が

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_p + (\mathbf{C}_p + \mathbf{C}_s)\dot{\mathbf{u}}_{pt} + (\mathbf{K}_p + \mathbf{K}_s)\mathbf{u}_p = \mathbf{C}_p \dot{\mathbf{u}}_g + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{u}}_s + \mathbf{K}_p \mathbf{u}_g + \mathbf{K}_s \mathbf{u}_s \quad (7)$$

線形解析からの群杭効果の導入に際しては、杭頂版の水平、鉛直運動に、それぞれ杭の横振動、縦振動が大きく係っていることから、式(5)の指標をそれに応じた形で行う。その結果、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{sup}} \\ \mathbf{M}_F \\ \mathbf{e}^R \mathbf{M}_p \mathbf{e}^R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_{\text{sup}} \\ \dot{\mathbf{u}}_F \\ \dot{\mathbf{u}}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{e}^R \mathbf{C}_p \mathbf{e}^R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_{\text{sup}} \\ \dot{\mathbf{u}}_F \\ \dot{\mathbf{u}}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{e}^R \mathbf{K}_p \mathbf{e}^R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_{\text{sup}} \\ \mathbf{u}_F \\ \mathbf{u}_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{e}^R \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{e}^R = \text{Re}(\mathbf{e}) \mathbf{e}^I = \text{Im}(\mathbf{e})$  で地盤の卓越振動数  $\omega_g$  での値を採用する。

土の非線形特性に関して修正 Ramberg-Osgood モデルを採用すれば、同モデルは応力-歪関係式において、

$$\text{スケルトン曲線: } \gamma = \frac{\tau}{G_0} (1 + \alpha |\gamma|^\beta) \quad \text{履歴曲線: } \frac{\gamma \pm \gamma_a}{2} = \frac{\tau \pm \tau_a}{2G_0} (1 + \alpha \left| \frac{\tau \pm \tau_a}{2} \right|^\beta) \quad (9)$$

で与えられる。  $\beta = \frac{2\pi h_{\text{max}}}{2 - \pi h_{\text{max}}}$   $\alpha = \left( \frac{2}{G_0 \gamma_r} \right)^\beta$   $\gamma_r$  (基準歪み) = 2.0e-03,  $h_{\text{max}} = .20$ , 本研究では上から6層を対象とする。このとき、地盤一杭一上部構造物系の運動方程式を増分形式で表すと

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + (\mathbf{K}_p + \mathbf{K}_s^I - \Delta\mathbf{K}_s(\Delta\mathbf{u}_s)_{t+\Delta t}) \Delta\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \Delta\mathbf{R}_{t+\Delta t} \quad (10)$$

あるいは非線形項を外力項に移した形で

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + (\mathbf{K}_p + \mathbf{K}_s^I) \Delta\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \Delta\mathbf{R}_{t+\Delta t} + \Delta\mathbf{K}_s(\Delta\mathbf{u}_s)_{t+\Delta t} \Delta\mathbf{u}_{t+\Delta t} \quad (11)$$

前者の支配式には接線剛性を用いて直接逐次積分法を、後者の支配式には荷重伝達法を適用する。

### 3. 数値解析例と考察

本研究では、9本杭から成る群杭基礎(図1)を解析対象とした。基盤面の入力波には EL CENTRO 1940, NS を 100 gal に調整して使用した。図3は、地盤インピーダンスを地盤の卓越振動数で固定化したときの精度の検討をしているが、良好な近似が得られている。図4は、線形解析と非線形解析結果の比較を変位、速度、加速度の最大値について比較したもので、今回仮定した非線形性の程度は加速度には差が現れていないが、速度、変位にかなり顕著に見られる。また同図からは接線剛性法と荷重伝達法の応答計算おける差が無いといえる。図5は、地盤を元々の12層から2層(8層目を境)に近似下時の比較で、地盤のモデル化の影響を示している。図6は非線形効果を最大断面力図において調べたもので、線形時からの減少が見られる。図7地盤のモデル化の影響を示す。

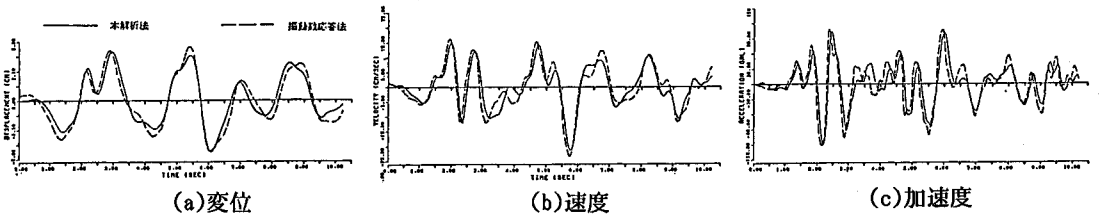


図3. フーチングの線形応答, 振動数依存の杭頭インピーダンス系に対する振動数応答法と固定化された杭頭インピーダンス系に対する逐次直接積分法の比較

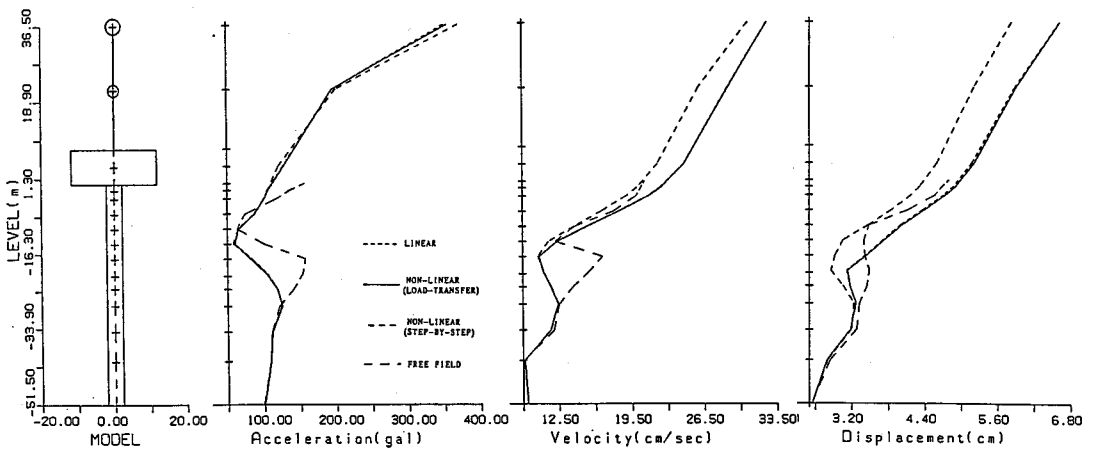


図4. 最大地震応答, 線形系と非線形系の比較

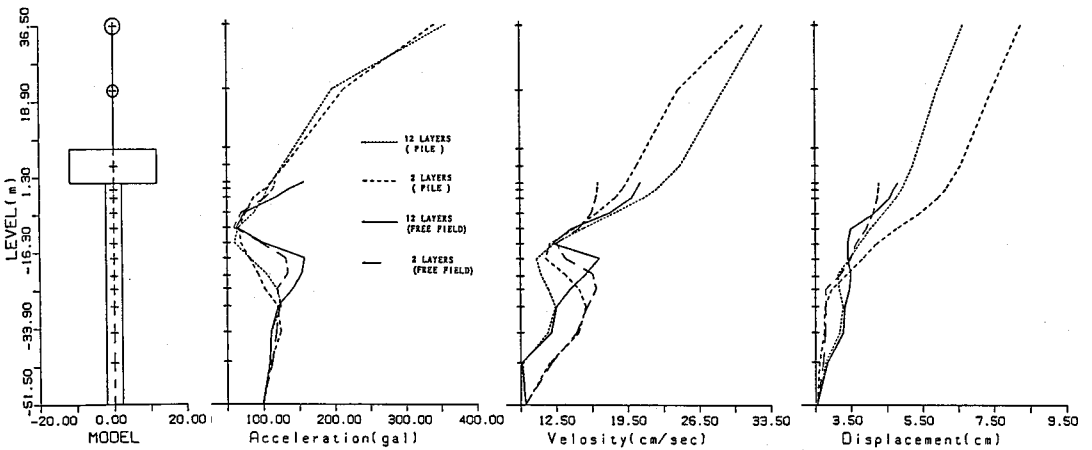


図5. 最大地震応答, 地盤モデル化の差

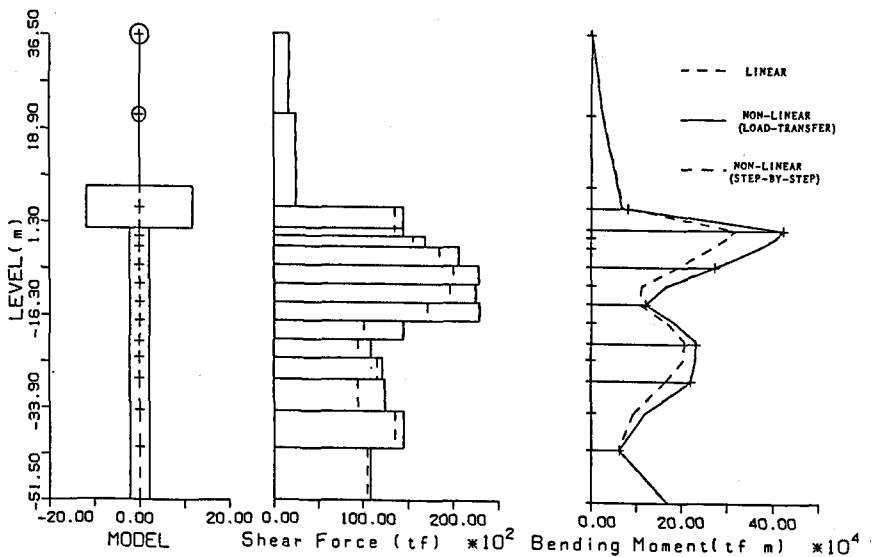


図6. 最大断面力分布，線形系と非線形系の比較

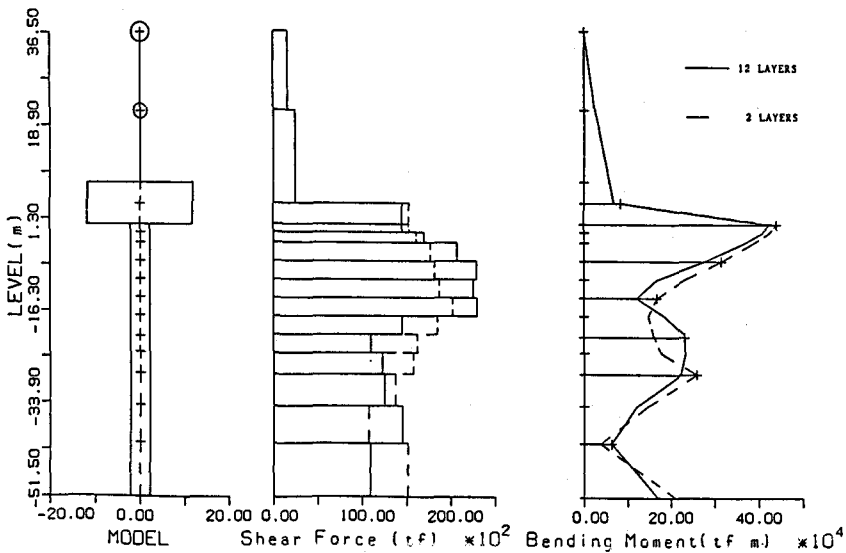


図7. 最大断面力分布，地盤モデル化の差

参考文献

- 1) Takemiya, H. & Yukawa, Y., Dynamic Analysis of Grouped Pile Foundation in Layered soils, Proc. JSCE, No. 368I-5, pp.195-201, 1986.
- 2) 竹宮・小松・菅野、群杭基礎の地盤との相互作用における動特性の効率的評価法、土木学会全国大会、昭和63、PS/I-25.
- 3) 竹宮・湯川・野田、群杭基礎構造物の非線形耐震解析、昭和61、中四支部年講概要。