

I-562

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 正会員 竹宮宏和
 学生員 石山 基
 学生員 谷口正昭

1. まえがき

杭基礎の強震時の応答性状で、その周辺の地盤の非線形特性は無視できない。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調べたものである。定式化は群杭を離散系質量を有する梁要素による有限要素化を行い、杭の周辺地盤は粘弾性体として、近傍地盤と遠地盤領域に分け、それぞれの反力を近似波動論から評価した。非線形性は近傍領域についてのみ考慮し、その際の土の力学特性には修正Ramberg-Osgoodモデルを使用した。基盤入力に対する時刻歴応答計算は、地盤バネの固定化を図った後、荷重伝達法から遂行した。

2. 定式化

〔地盤の平面歪解〕 杭の周辺地盤の動特性としての地盤インピーダンスを平面歪仮定から評価する。その結果、近似波動論解として、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

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

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

ただし、 V_s はせん断波速度、 ρ は密度、 p, q, r は 所定の波数、 K_i は第2種 i 次の変形ベッセル関数、 r は杭半径、 ω は振動数である。

〔地盤インピーダンスの近似化〕 杭周辺の地盤を便宜的に、杭近傍地盤と、それより外の遠地盤領域に分け、それぞれの複素剛性ばねの定義を Winkler型と想定して、深さ $z_i - z_{i-1} = h_i$ のものに対して次式から行う。

$$K_N^* = \frac{h_i}{u_p(z_i) - u_f(z_i)}, \quad K_F^* = \frac{h_i}{u_f(z_i)}, \quad K_z^* = \frac{1}{w_p(z_i)} \quad (2)$$

ここに、 u_p, u_f はそれぞれ、杭周上、近傍・遠地盤境界上の地盤フレキシビリティである。ポアソン比 $\nu = 0.5$ のとき ($q, s \rightarrow \infty$)

$$\text{近傍地盤インピーダンス } K_N^* = \frac{\alpha_4 (ia_0)^4 + \alpha_5 (ia_0)^3 + \alpha_6 (ia_0)^2 + \alpha_7 (ia_0) + \alpha_8}{\alpha_1 (ia_0)^2 + \alpha_2 (ia_0) + \alpha_3} \quad (3)$$

$$\text{遠地盤インピーダンス } K_F^* = \beta_1 (ia_0)^2 + \beta_2 (ia_0) + \beta_3 \quad (4)$$

ここに、係数 $\alpha_1 \sim \alpha_8$ 、 $\beta_1 \sim \beta_3$ は地盤物性から決定される定数である。

それぞれの領域の動的剛性は、上式(1)において一連の線形な n 個の複素剛性ばねの直列結合で表現されることを示しているので、一般に

$$K_N^* = \frac{\sum_{j=1}^n d_{j+1} (ia_0)^j}{\sum_{j=1}^n b_j (ia_0)^{j-1}} = d_2' (ia_0) + d_1' + \frac{\sum_{j=1}^{n-1} d_j'' (ia_0)^{j-1}}{\sum_{j=1}^n b_j (ia_0)^{j-1}} \quad (5)$$

〔地盤の非線形特性〕 土の非線形特性に関して修正Ramberg-Osgood型

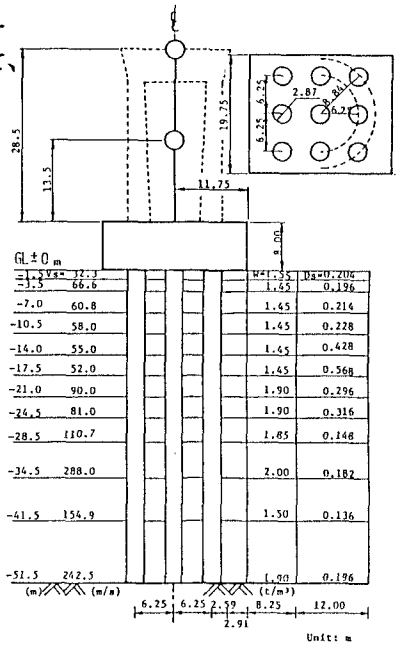


図1. 橋脚の群杭基礎構造物

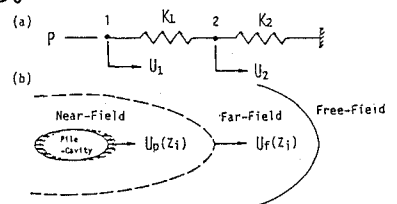


図2. 地盤インピーダンス

の応力-歪関係を導入する。

$$\text{スケルトン曲線: } \gamma = \frac{\tau}{G_0} (1 + \alpha |\tau|^\beta) \quad (6, a)$$

$$\text{履歴曲線: } \frac{\gamma \pm \gamma_s}{2} = \frac{\tau \pm \tau_s}{2G_0} \left(1 + \alpha \left| \frac{\tau \pm \tau_s}{2} \right|^\beta \right) \quad (6, b)$$

ここに $\beta = \frac{2\pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}}$, $\alpha = \left(\frac{2}{G_0 \gamma_r} \right)$, γ_r (基準歪み)=2.0e-03, $h_{\max} = .20$

〔地盤-杭系の支配方程式〕 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。運動方程式は

$$\begin{bmatrix} M_P & 0 \\ 0 & M_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_p \\ \ddot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_P + C_N & -C_N \\ -C_N & C_N + C_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_p \\ \dot{u}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_P + K_N & -K_N \\ -K_N & K_N + K_F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_p \\ u_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_P u_g + C_P \dot{u}_g \\ K_F u_s + C_F \dot{u}_s \end{Bmatrix} \quad (7)$$

と書き表すことができる。ここに M, C, K はそれぞれ集中質量、減衰、剛性マトリックスを表す。また添字 p, f, s, g はそれぞれ杭質点、地盤質点、自然地盤、基盤に関する応答あるいはマトリックスであることを意味し、添字 N は杭の近傍地盤を、 F は遠地盤を示す。上式(7)の増分形式を採り、さらに近傍地盤の非線形分を外力項に移した次式を荷重伝達法から解く。

$$M \Delta \ddot{u}_{t+\Delta t} + C \Delta \dot{u}_{t+\Delta t} + (K_P + K_N) \Delta u_{t+\Delta t} = \Delta R_{t+\Delta t} + \Delta K_N (\Delta u_f)_{t+\Delta t} + \Delta u_{t+\Delta t} \quad (8)$$

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300 galに調整して使用した。また地盤は近傍領域の半径を杭半径の3倍とし、非線形導入は6層までとした。なお地盤インピーダンスは近傍地盤については式(3)から、遠地盤については式(4)から求める数値を採った。図3は、線形解析と非線形解析結果を変位、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、変位において線形解析結果の約10%の増分であり、これは今回と同モデルの群杭基礎で杭周辺地盤を1つのバネのみで定式化した場合(参考文献1)参照)の非線形結果と同レベルであった。しかし速度については最大応答の差は変位ほど顕著に現れなくなり、加速度には差はほとんど見られない。

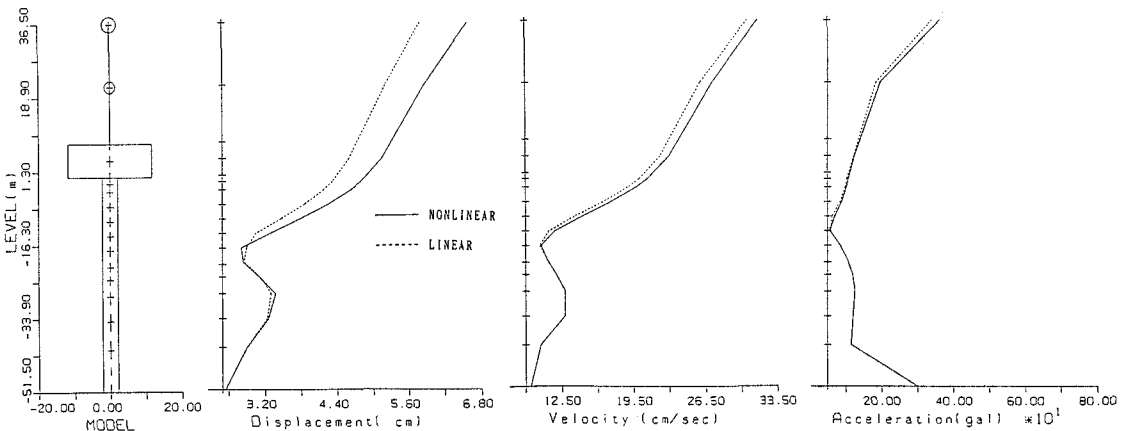


図3. 最大地震応答、線形系と非線形系の比較

参考文献 1)竹宮・小岩、地盤の非線形特性を考慮した杭基礎構造物の地震応答性状、平成1、中四支部年講概要。2)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。3)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。4)Takemiya, H. & Yukawa, Y., Dynamic Analysis of Grouped Pile Foundation in Layered soils, Proc. JSCE, No.368I-5, pp.195-201, 1986.