I-495　波動の地下逸散を考慮した杭基礎—地盤系の非線形時刻歴応答解析

東京電力株式会社　正員　大槻　哲也
東京大学生産技術研究所　正員　小長井一男
Univ. California, San Diego　野上　仁昭

1．まえがき

地震時における杭の応答解析をおこなうとき、波動の地下逸散性、地盤の非線形性などを考慮する必要性があることは、多くの研究者によって指摘されているところである。これらの問題を取り扱いうる解析手法としては、たとえば波動逸散境界を有した三次元有限要素法などが考えられる。しかし、この手法は繁雑な手続きと多大な計算時間を必要とするため、効率的な解析手法であるとはいい難い。本研究は、小長井、野上ら[1)]が用いた仮定をもとに、地盤の非線形性を考慮した杭基礎の簡便な時刻歴応答解析手法を提唱したものである。

2．解析モデルの概要

地盤および杭は、いくつかの水平な層に分割され、地盤は Winkler地盤を仮定している。本手法では応答変位法の考え方を採用し、地盤だけの動きを解析した後、その変位応答を杭−地盤系のモデルに入力して、杭の動きの解析を行っている。地盤の応答解析には、一次元せん断モデルを用いており、そのときの支配方程式は式(1) のようになる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial z} \qquad (1)$$

この式は、文献(1) で述べられているいくつかの仮定を用いることにより時刻歴で解析することが可能となる。また、土の応力とひずみの非線形特性は、図１に示すようなIwanのモデルを用いて表している。

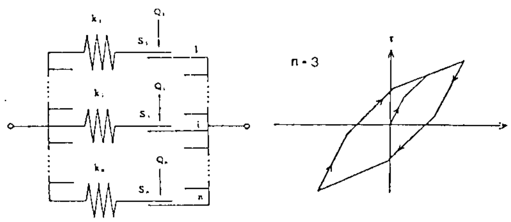


図１ Iwan's Modelと履歴曲線

地震時における、分割された杭要素の運動方程式は以下のようになる。

$$E_P I \frac{d^4 u_{P,i}}{d z^4} + m_P (\ddot{u}_P + \ddot{u}_g) = -P_{P,i} \qquad (2)$$

ここで、$u_{P,i}$，$\ddot{u}_{P,i}$は時刻t_iにおける杭の水平変位および加速度、$\ddot{u}_{g,i}$は基盤の加速度で、E_P，I，m_Pは杭のヤング係数、断面二次モーメント、杭の単位長さ当たりの質量、そして$P_{P,i}$は杭−地盤間の相互作用力である。

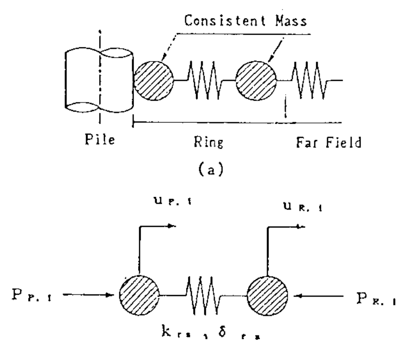


図２ 杭周辺部のモデル化

杭周辺部のリング状の領域は特に非線形化が激しいとして、小長井、野上ら[1)]によって提案されている非線形モデルを導入している。これは図２に示すように２つの整合質量とそれにはさまれた非線形バネからなっているもので、この領域の運動方程式は、式(3)のようになる。

$$\begin{aligned}
&\{k_{rs}(u_{P,i}-u_{R,i})+\delta_{rs}\}+m_{11}(\ddot{u}_{P,i}+\ddot{u}_{g,i})+m_{12}(\ddot{u}_{R,i}+\ddot{u}_{g,i})=P_{P,i} \\
&-\{k_{rs}(u_{P,i}-u_{R,i})+\delta_{rs}\}+m_{21}(\ddot{u}_{P,i}+\ddot{u}_{g,i})+m_{22}(\ddot{u}_{R,i}+\ddot{u}_{g,i})=-P_{R,i}
\end{aligned} \qquad (3)$$

Ring要素の外側の地盤からの反力$P_{R,i}$は、Novakら[2]によって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、以下のように変位の一次式の形で表される。

$$P_i = k\cdot(u_{R,i} - u_{S,i}) + d_i \tag{4}$$

ここで$u_{S,i}$は、あらかじめ計算しておいたt_iにおける地盤だけの変位である。地盤が線形状態にある場合、kは時間に依存しない変数であるが、非線形状態になると時々刻々とその値は変化していく。またd_iは線形、非線形とは関係なく、時刻t_{i-1}の応答値により求まる。

時刻t_{i-1}よりt_iまでの加速度の変化がt^{α}に比例すると仮定すれば、式(3)中の加速度$\ddot{u}_{P,i}$、$\ddot{u}_{R,i}$をそれぞれ変位$u_{P,i}$、$u_{R,i}$の一次式で表現することができる。この仮定を用いたうえで、式(4)を式(3-2)に代入することにより、リング要素外縁部の変位$u_{R,i}$は式(5)のように$u_{P,i}$の一次式で表される

$$u_{R,i} = C_1\cdot u_{P,i} + C_2 \tag{5}$$

式(5)を式(3-1)に代入した結果を、さらに式(2)に代入することにより以下に示す式を得る。

$$\frac{d^4 u_{P,i}}{dz^4} = -\lambda_i^4 u_{P,i} - \gamma_i \tag{6}$$

杭要素の変位$u_{P,i}$の形状が深さz方向に5次曲線で表現できると仮定すると、式(6)と要素上下端の境界条件より、次式のような杭要素両端の物理量の関係式を得ることができる。

$$\{u_{P,i},\theta_{P,i},S_{P,i},M_{P,i}\}^T_{z=0} = (t_i)\{u_{P,i},\theta_{P,i},S_{P,i},M_{P,i}\}^T_{z=\ell} + (q_i)\{\gamma_i(0),\gamma_i(\ell)\}^T \tag{7}$$

ここで$u_{P,i}$, $\theta_{P,i}$, $S_{P,i}$, $M_{P,i}$は変位、たわみ角、せん断力、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4X4および2X4のマトリックスである。これより、杭の応答は杭頭と杭下端での境界条件をもとに伝達マトリックス法で計算することができる。

3．数値計算例

図3に表層厚10m の地盤中に打設された先端支持杭が地震動を受けた場合の地表部における時刻歴変位応答の解析結果を示す。地震波は正弦3波で、その振動周期は表層地盤の固有周期と同じものとした。この図より、非線形解析によると線形解析に比べ、杭頭変位が小さくなるとともに位相に遅れが生じ、その変位応答の周期も長くなっていることがわかる。

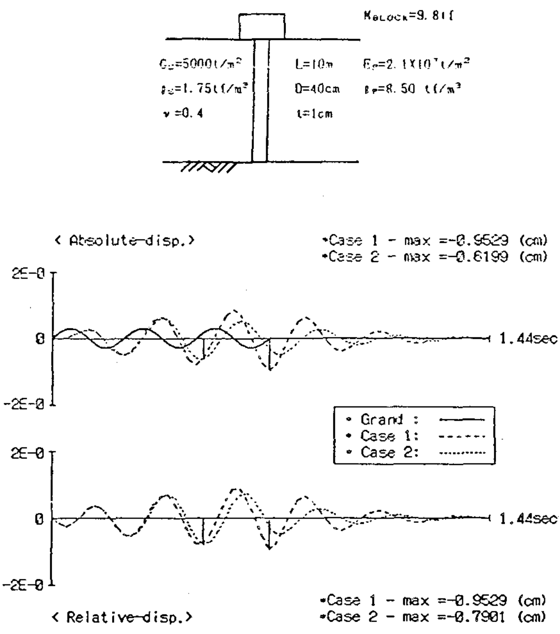
4．あとがき

本手法により、本来大型計算機によっても多大な時間を要した杭基礎の非線形時刻歴解析を、パソコンでも短時間で処理することが可能となった。今後の課題は、解析対象とする地盤の非線形性を表す構成則をいかにして決定し、組み込んでいくかということであろう。

（参考文献）

1）小長井、野上：水平加振を受ける群杭基礎の時刻歴応答解析、第19回地震工学研究発表会講演概要、1987

2）Novak,M.,Nogami,T.and Aboul-Ella,F.:Dynamic Soil Reactions for Plane Strain Case, Jour.,Engineering Mechanics Div.,ASCE,1978



Case 1　線形解析
Case 2　非線形解析

図3　地表部の時刻歴変位応答