

(95) 杭基礎-地盤系の動的相互作用解析モデルの構築

間組
京都大学防災研究所
京都大学防災研究所

竹内廣高
土岐憲三
佐藤忠信

1. はじめに

地震時における地盤-構造物系の動的相互作用の問題は、耐震工学の分野における重要な研究テーマの一つである。従来の研究は地盤を連続体と仮定し弾性波動論に基づき解析するものと、離散的なモデルにより解析を行うものとの大別できる。本研究では、力学モデルとしては最も簡単なモデルの一つであるスウェーロッキングモデル(以下S-Rモデル)により群杭の簡易動的解析モデルを構築し、地盤-基礎系の動的相互作用を評価する手法を開発する。

2. 多質点系詳細モデル

図-1に示されるように、まず杭基礎-地盤系を基礎近傍地盤の非線形特性を考慮した多質点系にモデル化する。解析の対象とした系の諸元を表-1に示す。本研究ではモデルとなる表層地盤を砂地盤とし、相互作用ばねの特性はVoigtモデルで表されるとした。相互作用ばねの復元力特性は、Hardin-Drnevich型モデルを用いた。このH-Dモデルの骨格曲線は、初期剛性と降伏強度の2つのパラメータを用いた双曲線関数で表される。初期剛性はNovakら¹⁾の動的水平ばね定数の実数部を、降伏強度はBroms²⁾によるRankineの受働土圧の3倍を使用した。またこれらのパラメータは全て N 値より推定するものとする。 N 値の深さ方向分布は $N(z) = az + b$ なる1次関数で表されると仮定した。履歴曲線は骨格曲線を2倍に相似拡大することにより決定した。

また減衰定数は動的水平ばね定数の虚数部より算定した。杭は、先端固定のはりと考え複数の要素に分割した。このとき杭のせん断変形、杭要素の回転慣性、杭要素の回転に対する地盤反力は無視する。質量は各要素の上端に集中させ、付加質量は考えないものとした。

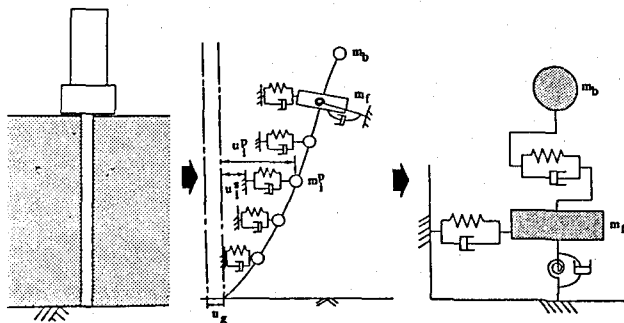


図-1 杭基礎-地盤系の多質点系詳細モデルと等価S-Rモデル

3. 単杭の簡易動的解析モデル

(a) 静的解析

図-1に示される等価S-Rモデルではスウェーとロッキングの連成を考慮しないので、等価S-Rモデルの相互作用ばねを決定するには、多質点系詳細モデルの杭頭における水平荷重と水平変位、モーメント荷重と回転変位の関係を知れば良い。そこで、静的載荷シミュレーションを行いこれらの関係を求めた。荷重は杭頭に作用し一方載荷とし、杭体及び支持基盤にはいかなる降伏も生じないと仮定して全ての相互作用ばねが降伏するまで載荷を続けた。図-2(a)は $N(z) = 10$ で、水平荷重のみ載荷の場合の杭頭荷重-変位曲線である。図中の直線は相互作用ばねが働かないとしたとき、すなわち杭を片持ち梁と考えた場合の荷重-変位曲線である。図より杭頭における荷重と変位の関係は地盤の非線形特性と杭体の弾性変形成分とに分離でき

表-1(a) 杭の諸元

ヤング率 (kgf/cm ²)	2.1×10^8
断面2次モーメント (cm ⁴)	1.54×10^4
断面積 (cm ²)	80.1
単位長さ重量 (kgf/m)	67.8
断面係数 (cm ³)	7.73×10^3
杭径 (cm)	40.0
杭長 (m)	6.0

表-1(b) 上部構造物の諸元

	単杭	群杭
質量 (tf · sec ² /cm)	200	0.25
慣性モーメント (tf · sec ² /cm)	400	2.0×10^4
重心高さ (m)	2.0	3.0
固有周期 (sec)	0.33	0.47

*慣性モーメントは杭頭周り、固有周期は上部構造物を1自由度でモデル化したときのもの

ることがわかる。図-2(b)は図-2(a)の曲線より直線を差し引いたものである。結局、この曲線をモデル化できれば多質点系詳細モデルを等価なS-Rモデルに置換することができる。ここではこの曲線を次式で表した。

$$Q(x) = \frac{K'_0 x}{1 + \left| \frac{x}{x_f} \right|} + K_P x \quad x_f = \frac{Q'_u}{K'_0} \quad (1)$$

K_P, K'_0, Q'_u は図-2中に示す通りである。

N 値の深さ方向分布を表す式 $N(z) = az + b$ において a を $0 \sim 3$ 、 b を $2 \sim 25$ の範囲で変化させて解析を行い K'_0, Q'_u を求めた。ここでは K'_0, Q'_u を、 N 値の深さ方向の分布特性を表現できる指標値と関連づける。この指標値として重み付き平均 N 値 N_{ave} を導入した。 N_{ave} は次式で定義される。

$$N_{ave} = \sum_{i=1}^n w_i N_i \quad \left(\sum_{i=1}^n w_i = 1 \right) \quad (2)$$

ここに、 w_i は重み、 N_i は杭近傍の表層地盤内で深さ方向に得られる n 個の N 値である。 K'_0 については $2.7(m)$ 以深で $w_i = 0$ とし地表面近くの N 値に大きな w_i を与えた。また Q'_u については杭全長にわたって均等に w_i を与え、 K'_0, Q'_u が N_{ave} に対して一つの曲線上に乗るようにした。これを図-3に示す。図-3を用いて等価S-Rモデルのスウェイばねを決定することができる。以上は水平荷重のみ载荷の場合であるがモーメント荷重と回転変位との関係についても同様な結果が得られた。

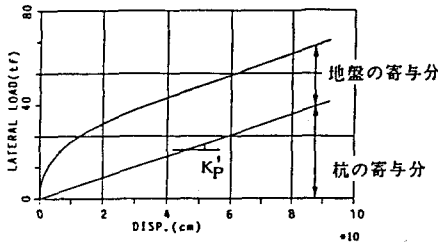


図-2(a) 荷重～変位曲線

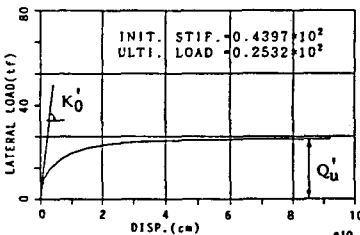


図-2(b) 荷重～変位曲線(地盤の寄与分)

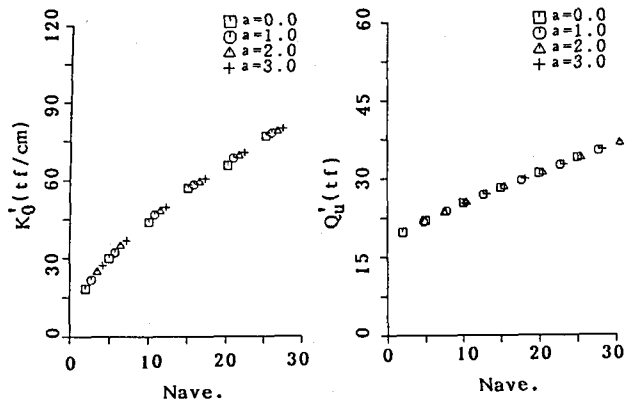


図-3 K'_0, Q'_u と重みつき平均 N 値との関係

(b) 動的解析

次に(a)で得られた等価S-Rモデルと多質点系詳細モデルを用いて地震応答解析を行うことにより等価S-Rモデルの妥当性を確かめる。等価S-Rモデルのスウェイばねとロッキングばねの履歴曲線は相互作用ばねと同様に骨格曲線を2倍に相似拡大することにより決定した。また減衰定数はばねの初期剛性の2%とした。図-4は $N(z) = 5$ の場合の2つのモデルの応答変位波形を比較したものである。入力加速度はTaft波形を支持基盤において得られる最大加速度が $200(gal)$ となるように修正して用いた。図中、太実線と細実線はそれぞれ等価S-Rモデルと多質点系詳細モデルによる解析結果である。また、 u_f, u_{BR} はそれぞれフーチング重心、上部構造物重心の地表面に対する相対変位、 θ はフーチングの回転である。ロッキングについては等価S-Rモデルが詳細モデルとよく一致するがスウェイについては等価S-Rモデルが振幅を大幅に小さく見積っていることがわかる。これは、詳細モデルの杭頭荷重～変位曲線を原点近傍の曲線の傾きと曲線が最終的に漸近する値の2つのパラメーターで表したために杭頭の地震時の挙動として興味のある $0(cm) \sim$

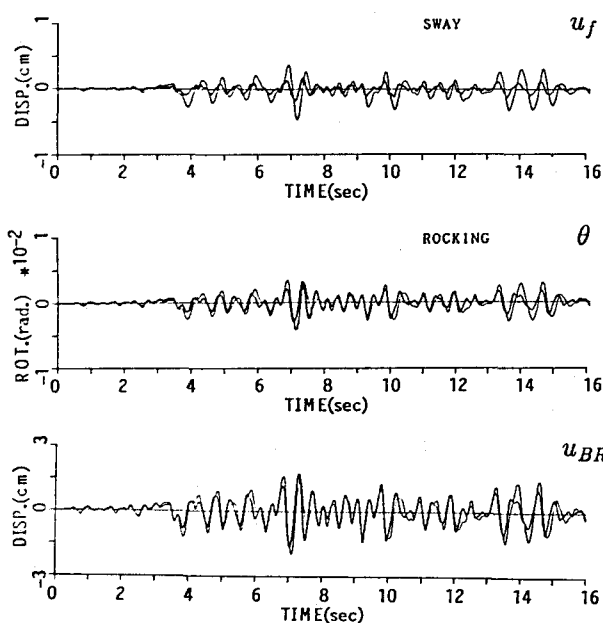


図-4 詳細モデルと等価S-Rモデルの応答変位波形

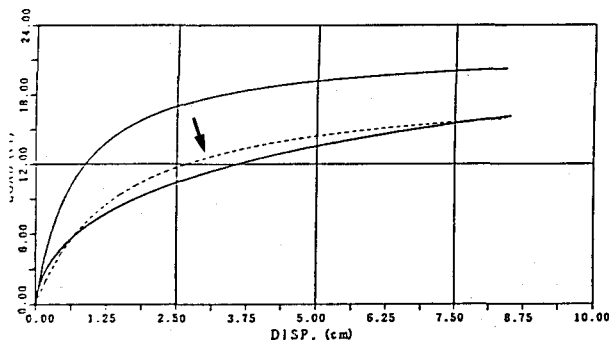


図-5 等価S-Rモデルのスウェイばねの修正
(地盤寄与分のみを表示)

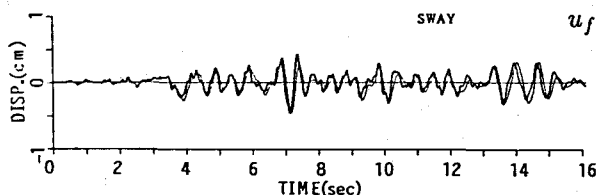


図-6 修正後の応答変位波形の比較

のみ载荷の場合である。単杭に比べて地盤の寄与分の割合が小さくなっているが、これはモーメント荷重に対して群杭が主に杭の軸力によって抵抗することによる。

図-9は、群杭の簡易動的解析モデルと多質点系詳細モデルの応答変位波形である。 N 値分布と基盤入力単杭のケースと同じとし、 $\mu = 0.5$ とした。図中、太実線と細実線はそれぞれ等価S-Rモデルと詳細モデルの解析結果である。2つのモデルは良く一致しており、単杭の場合に比べて等価S-Rモデルの精度が上がっている。これは、群杭のフーチング重心の荷重～変位曲線のうち杭の弾性変形分の割合が単杭に比べて大き

数(cm)の範囲で等価S-Rモデルのスウェイばねの骨格曲線が詳細モデルと一致しないためである。これを修正するためスウェイばねの K'_0 、 Q'_0 を0(cm)～数(cm)の範囲で2つの骨格曲線が最も良く一致するように変化させた。これを図-5に示す。図-6は修正後の等価S-Rモデルを用いて同様な解析を行った際のスウェイばねの応答変位波形である。図-4と比較して等価S-Rモデルの精度が上がっていることがわかる。他の N 値分布のもとでも同様な結果が得られた。

4. 群杭の簡易動的解析モデル

群杭は3本杭とし、群杭の多質点系詳細モデルは単杭の多質点系モデルの杭頭を剛なフーチングで連結することにより構築した。その際、表層地盤の変位 u_f は全ての杭に等しく作用し、群杭効果の影響は相互作用ばねの初期剛性に乗じられる低減率 μ で考慮するものとする。これは道路橋示方書「下部構造編」³⁾によると次式で定義される。

$$\mu = 1 - 0.2(2.5 - \frac{L}{D}) \quad L < 2.5D \quad (3)$$

ここで L は杭中心間隔、 D は杭径である。本解析においても、杭中心間隔としては群杭効果を無視できる杭径の2.5倍を用いたが、(3)式は静的な問題におけるもので、動的な群杭効果の影響については不明な点も多い。そこで低減率を各種変化させパラメトリックな解析を行うことによりその影響を調べた。図-7は $N = 10$ 、 $\mu = 1.0, 0.75, 0.5$ とした場合の杭の支持基盤に対する水平方向の相対変位 u_f の応答波形の比較である。低減率が1.0より減少するに従い応答値が増大するのが分かる。これは地盤をWinklerばねで離散化して群杭の解析を行うときに低減率の設定が重要であることを示唆している。

次に等価S-Rモデルへの置換を行った。図-8は単杭のケースと同様に静的载荷を行った際の杭頭における荷重～変位曲線でモーメント荷重

いたためであると考えられる。他の低減率と N 値分布を用いた場合にも同様な結果が得られた。以上により単杭について展開した方法論が群杭についても適用可能であることが示された。

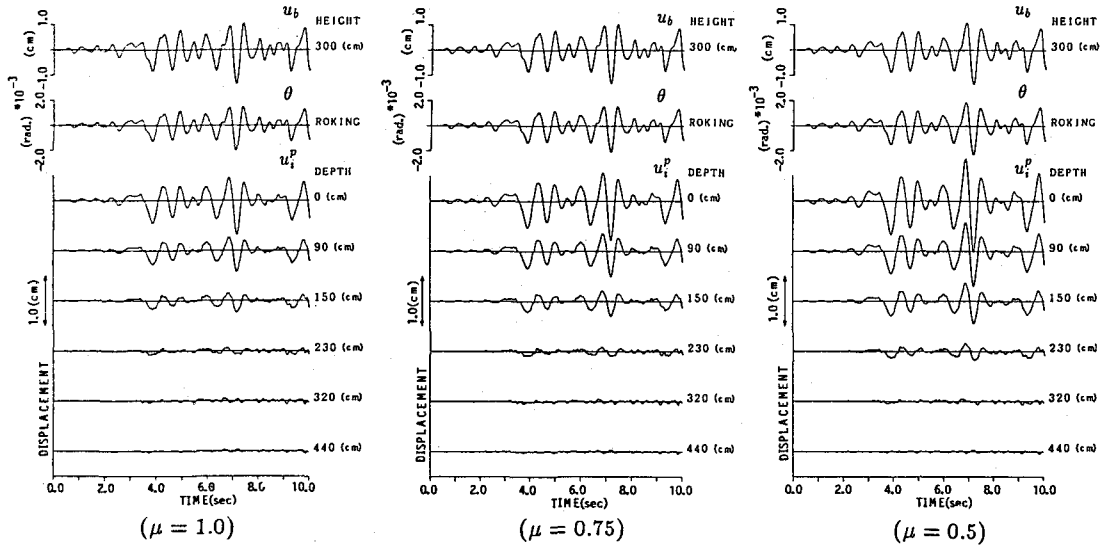


図-7 低減率と変位応答波形

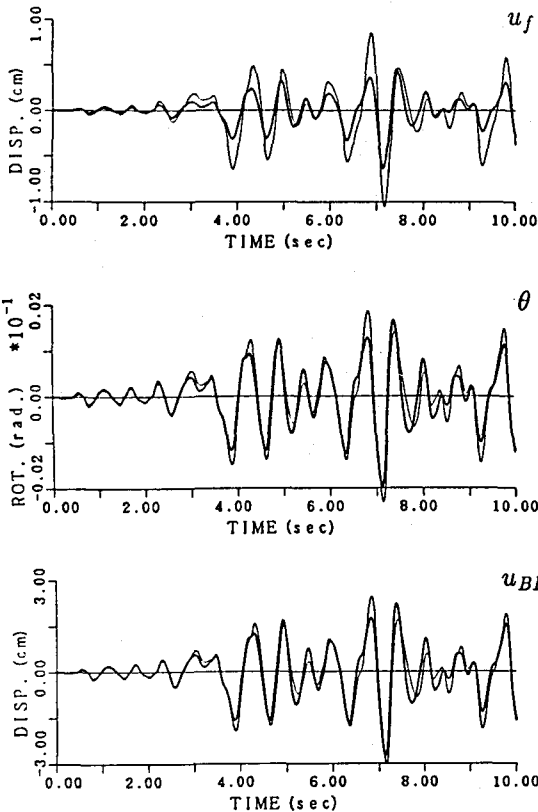


図-9 詳細モデルと等価 S-R モデルの応答変位波形 (群杭)

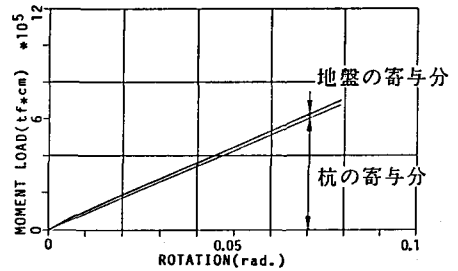


図-8 荷重～変位曲線
(モーメント荷重のみ載荷)

参考文献

- 1) Novak, M., Nogami, T., and Aboul-Ella, F.: Dynamic Soil Reaction for Plain Strain Case, EM4, ASCE, Vol.104, Aug, pp.953~959, 1978.
- 2) Broms, B.B.: Design of Laterally Loaded Piles, SM3, ASCE, Vol.91, May, pp.79~99, 1965.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説「下部構造編」, pp.271~273, 昭和55年5月