

## 2次元有効応力解析における杭-液状化地盤の動的相互作用のモデル化

日本科学技術研修所 正会員○小堤 治 東電設計 正会員 溜 幸生  
川崎製鉄 正会員 岡 由剛 京都大学 正会員 井合 進  
沿岸開発技術研究センター 正会員 梅木 康之

## 1. はじめに

液状化する可能性のある地盤上に建設される杭基礎を有する構造物の地震時挙動を正しく評価するためには、杭と周辺地盤との相互作用を的確にモデル化して解析を行う必要がある。著者らは直杭式栈橋のように加振直交方向に杭が繰り返し現れるような構造を対象として（図-1 a）, 2次元有効応力解析における杭と地盤を結ぶ非線形ばね（以下、杭-地盤相互作用ばね）を提案した<sup>1)</sup>。すなわち、杭1本分の断面と隣接杭との中間地点（循環境界条件を課す）までの地盤からなる厚さ1mの水平断面モデル（図-1 b）を用いて、杭に静的繰り返し載荷を行い、荷重と杭変位（直近の中間地点に対する相対水平変位）の関係をもって杭-地盤相互作用ばねに必要とされる静的特性とした。さらに、そのような特性は、ある条件下で杭周辺土のせん断応力～せん断歪関係と相似になることを利用して、以下に示すように地盤の構成則を用いて静的なばね特性を表現する方法を提案した。

$$F = \alpha_p \tau \quad (\text{一般的には, } F = (H \times D \times \alpha_p) \times \tau) \quad (1)$$

$$u = \beta_p \gamma \quad (\text{一般的には, } u = (D \times \beta_p) \times \gamma) \quad (2)$$

ここに、 $F$ ：ばね力、 $u$ ：ばね変位、 $H$ ：ばね鉛直方向支配長、 $D$ ：杭径、 $\alpha_p$ と $\beta_p$ は文献1)を参照。また、 $\tau$ と $\gamma$ は、それぞれ、“せん断応力”と“せん断歪”であり、杭周辺土の構成則に基づくせん断応力～せん断歪関係を満足するものとし、これにより $F \sim u$ 関係が定まる。ここでは、同じ解析モデルを用いて、動的載荷解析および対応する土の動的要素シミュレーションを行い、杭-地盤相互作用ばねの減衰特性を検討する。なお、これらの解析には2次元有効応力解析プログラムFLIP<sup>3)</sup>を用いた。

## 2. 検討対象ケース

杭径 $D$ が1m、杭間隔 $L$ が5D、地盤が液状化した飽和砂( $N_{65}=10$ :有効上載圧65kPa換算の $N$ 値、 $\rho_t=1.8t/m^3$ 、 $\sigma_{m0}'=98kPa$ 、過剰間隙水圧比=95%、非排水条件)である水平断面モデルに対して、片振幅600kNで1Hzまたは2Hzの水平力を杭芯に加えた。また、初期接線剛性に比例するレーリー減衰を与えた。剛性比例係数 $\beta$ は、1Hzの場合は0.0032と0.00032(通常のレンジ内と極端に小さい場合)、2Hzの場合は0.0016と0.00016(1Hzに同じ)とした。対応する土の要素シミュレーションでは、同じ条件の飽和砂の1要素(1m×1m)を対象に(但し、密度は固有周期が水平断面モデルと同じになるよう調整)、図-2に示すように、98kPaで等方圧密後、片振幅47.62kPa(=600/ $\alpha_p$ )の正弦波状に変化する分布力 $q$ を加えた。加振振動数および減衰については、

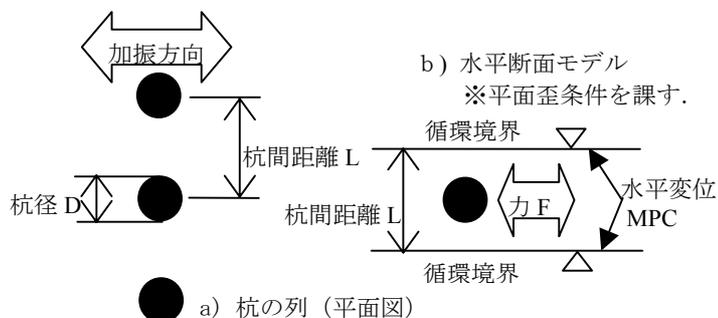


図-1 加振直交方向に杭が繰り返し現れる構造と杭1本分を取り出した水平断面モデル<sup>2)</sup>

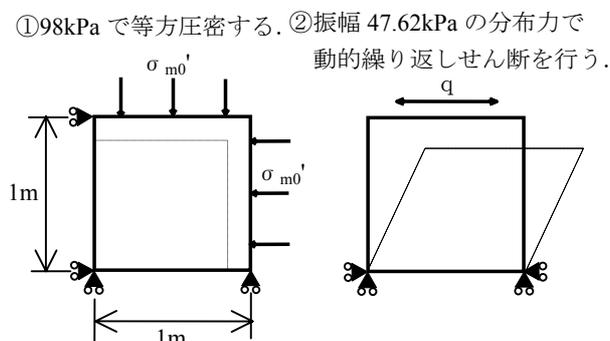


図-2 動的要素シミュレーションの手順

キーワード：2次元、有限要素解析、有効応力法、杭、相互作用ばね、液状化

連絡先：〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷5-10-9 (株)日本科学技術研修所 Tel.03-5379-5591

水平断面モデルと同様である。

### 3. 動的解析結果と減衰特性

水平断面モデルの解析結果である荷重～相対変位曲線を図-3の左列に示す。解析条件は、上から順に、0Hz（静的解析）、1Hzで $\beta=0.0032$ 、0.00032、2Hzで $\beta=0.0016$ 、0.00016である。対応する動的要素シミュレーションの結果である分布力～せん断歪関係とせん断応力～せん断歪関係を同じ図の右列に示す。左右の図が対応していて、荷重軸と分布力軸は(1)式で、相対変位軸とせん断歪軸は(2)式でそれぞれ対応させている。動的要素シミュレーションでは、慣性力と減衰力も加わって釣り合いが保たれるので、分布力とせん断応力は異なる。

剛性比例係数 $\beta$ が通常の大きさであれば、減衰力は慣性力よりかなり大きく、また水平断面モデルと要素シミュレーションの結果はよく対応している。従って、この場合、(1)式と(2)式に示した荷重～相対変位関係とせん断応力～せん断歪関係の変換式がそのまま成り立つ。但し、せん断応力は分布力に読み替える必要がある。すなわち、(1)式は、慣性力を無視して、

$$F = \alpha_p q = \alpha_p \times (\tau + \beta G_0 \dot{\gamma})$$

$$= \alpha_p \tau + \beta (\alpha_p G_0 / \beta_p) \dot{u}$$

(3)

となる。 $G_0$ は杭周辺土の初期状態でのせん断剛性である。右辺第1項は、既に求めた杭-地盤相互作用ばねの

静的特性を表す項であり、第2項が減衰特性を表す。このばねの適用例は文献4)5)を参照されたい。また、慣性力が無視出来ない例として極端に小さい $\beta$ を設定したケースも試したが、図-3によれば、要素シミュレーションで適当な質量を与えれば、概ね水平断面の挙動を表現出来ると思われるが、具体的には今後の課題である。

**謝辞：**本研究はFLIP研究会（事務局：沿岸開発技術研究センター）に設けられた杭基礎WGにおける研究成果をもとにとりまとめたものである。WGに参加された方々のご尽力に感謝します。

**参考文献：**1)小堤ほか：2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化、第38回地盤工学研究発表会、2003.7（投稿中）。2)三輪ほか：2次元水平断面モデルを用いた液状化地盤における杭-地盤系の相互作用の検討、第38回地盤工学研究発表会、2003.7（投稿中）。3)Iai,S. et al.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.6。4)岡ほか：杭近傍地盤の応力-歪関係に依存する相互作用ばねを用いた杭基礎の2次元有効応力解析、土木学会第58回年次学術講演会、2003.9（投稿中）。5)河又ほか：杭-地盤相互作用ばねを組み込んだ2次元解析によるスナップ水平載荷実験のシミュレーション、土木学会第58回年次学術講演会、2003.9（投稿中）。

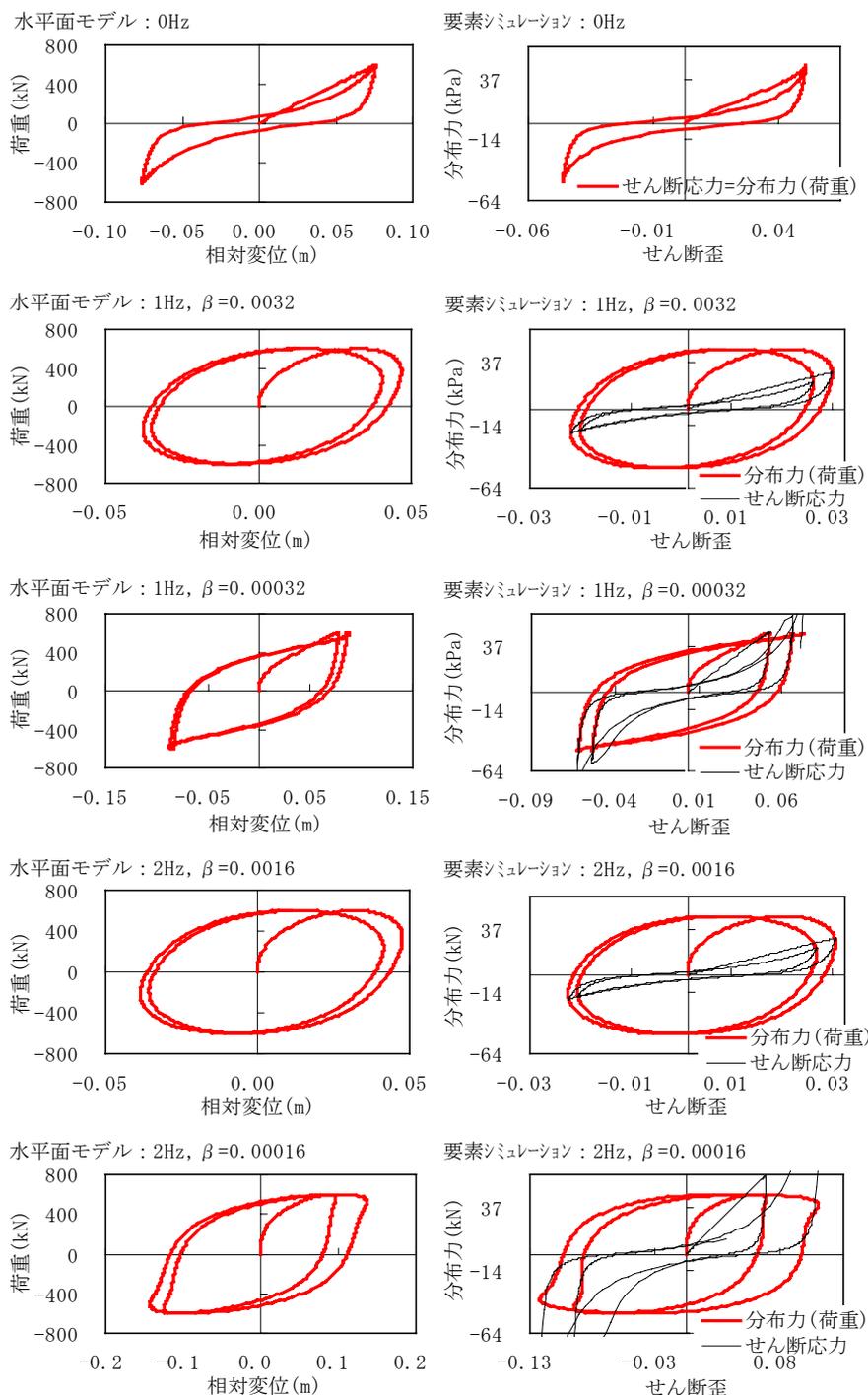


図-3 水平断面モデルの動的繰返し載荷結果（荷重片振幅=600 kN）とそれに応じた動的要素試験結果（荷重片振幅=47.62kPa）の比較