

# 流弾塑性構成式による流動化した杭-地盤系の三次元有効応力解析

京都大学大学院	学生員	○松丸貴樹
京都大学大学院	学生員	文 龍
岐阜大学工学部	正員	張 鋒
東北大学大学院	正員	渦岡良介
京都大学防災研究所	正員	佐藤忠信

## 1. はじめに

本研究では、液化化する砂地盤中の杭基礎の動的挙動を解析するための方法論を展開する。地盤を構成する砂の構成式としては流弾塑性モデル<sup>1)</sup>を用い、杭のモデルにはAFD(Axial Force Dependent)モデル<sup>2)</sup>を用いた有効応力解析法を提案する。解析コードはLIQCA3D<sup>3)</sup>をベースとした。提案した解析法を用いて、杭-地盤系の三次元有効応力解析を実施し、既存の繰返し弾塑性モデルを用いた結果<sup>3)</sup>と比較し、本解析手法の有用性を検討する。

## 2. 地盤及び杭の非線形特性

佐藤ら<sup>1)</sup>の流弾塑性構成式は以下のように表される。

$$\sigma_{ij} = (1 - \alpha)\sigma_{ij}^{ep} + \alpha\sigma_{ij}^{vf} + p\delta_{ij} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\sigma_{ij}$  は全応力テンソル、 $\sigma_{ij}^{ep}$  は砂の繰返し弾塑性モデルにおける有効応力テンソル、 $\sigma_{ij}^{vf}$  はNewton粘性流体モデルにおける有効応力テンソル、 $p$  は間隙水圧、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。 $\alpha$  は相変化を調節するパラメータであり、次式で定義する。

$$\alpha = 1.0 + \tanh\left\{31.0 \times \left(1 - \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}}\right) - 30.7\right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $1 - \sigma'_m/\sigma'_{m0}$  は過剰間隙水圧比に相当する。

支配方程式は、二相系のつりあい式及び流体相の連続式から成り、有限要素法による空間離散化(FEM)、Newmarkの $\beta$ 法と差分法(FDM)による時間離散化を行い、未知数を節点加速度及び間隙水圧とするu-p formulationによる定式化を行う。

杭のモデルは、ビーム要素とコラム要素から成るハイブリッド要素を用いる。また、杭の軸力変動や鉄筋及びコンクリートの非線形性を考慮できる張ら<sup>2)</sup>のAFDモデルを使用する。

## 3. 数値解析例

図-1に解析に用いた3次元有限要素モデルを示す。解析は杭頭にフーチングがない場合(ケース1)とフーチングのある場合(ケース2)の2ケースを実施した。境界条件としては、モデルの底面が全節点固定、 $x-z$ 面に関しては $y$ 軸方向のみ固定する。側方流動発生方向の両端には長さ100mの幅広要素を取り付け、等変位境界を用いることで擬似的に自由地盤を表現した。杭に関しては杭先端が剛結、杭頭はケース2で回転のみを拘束する。地盤は相対密度が約40%の珪砂8号をもとにモデルパラメータを決定し、杭は杭径500mm、杭長6.4mのRC杭を想定した。入力地震動は兵庫県南部地震におけるポートアイランドで

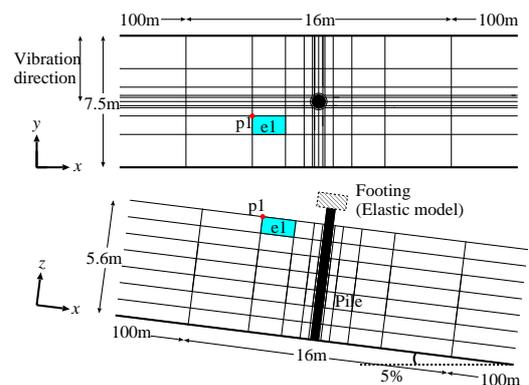


図-1 メッシュモデル

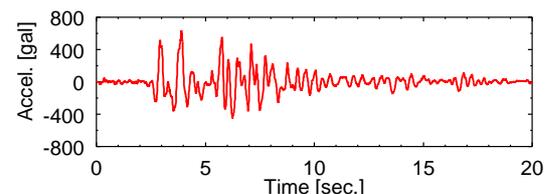


図-2 入力地震動

キーワード: 杭, 側方流動, 有効応力解析

連絡先: 〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 Tel 0774-38-4071/ Fax 0774-38-4070

の観測波を用いる．入力方向は  $y$  軸方向，流動方向は  $x$  軸方向である．また，地表面勾配 5% を与えた．

図-3 に，要素 e1 での過剰間隙水圧比，流弾塑性モデル使用時の相変化制御関数  $\alpha$ ，節点 p1 での水平変位，流動速度の時刻歴を示す．過剰間隙水圧比の時刻歴を見ると，加振とともに急上昇し，4 秒付近でほぼ 1 となっていることから，地盤が液状化に至ったことがわかる．また，加振終了時付近では過剰間隙水圧比が低下しており，過剰間隙水圧が消散している．なお，弾塑性モデル使用時に比べて流弾塑性モデル使用時の方が消散の度合いが遅くなっている．また，流弾塑性モデル使用時の相変化制御関数  $\alpha$  の時刻歴を見ると，加振 3 秒付近から 15 秒付近にかけて地盤が流体的な挙動を示したことがわかる．

次に節点 p1 での水平変位の時刻歴を見ると，弾塑性モデル使用時に比べ，流弾塑性モデル使用時の方が大きな変位が発生し，加振終了時において約 50cm ほど大きな変位が得られた．また，流動速度の時刻歴から，最大流動速度は弾塑性モデル使用時に比べ流弾塑性モデル使用時の方が大きな値を示していることがわかる．

図-4 に，加振終了時における杭の変位と曲率の深度分布を示す．杭の変形モードはケース 1 では杭先端で折れ曲がりが生じ，ケース 2 では杭先端及び杭頭で折れ曲がりが生じている．曲率も同様で，ケース 1 では杭先端で，ケース 2 では杭先端及び杭頭で大きな曲率が得られた．また，流弾塑性モデルを使用した時の杭の変位や曲率は，弾塑性モデル使用時に比べ，ケース 1 ではわずかに小さな値が得られたのに対し，ケース 2 では比較的小さな値が得られた．

4. 結論

砂の構成式に流弾塑性モデルを用いて地盤-杭系の解析を行った．その結果，弾塑性モデルと比べて地盤の最終変位量や最大速度が大きく評価されたのに対し，杭の残留変位や曲率は解析ケースによって程度が異なるが小さく評価され，過去の被災事例に対してより総合的な結果が得られた．

参考文献

- 1) 佐藤忠信，文龍，渦岡良介：傾斜地盤の液状化・流動過程のシミュレーション，土木学会論文集（投稿中）
- 2) 張鋒，木村亮，盧之偉：軸力変動を考慮できる AFD モデルを用いた杭基礎・地盤・上部工一体系弾塑性動的解析，杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書，pp. 27-34, 2001.
- 3) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied Scientific Research*, Vol. 52, pp. 209-245, 1994.

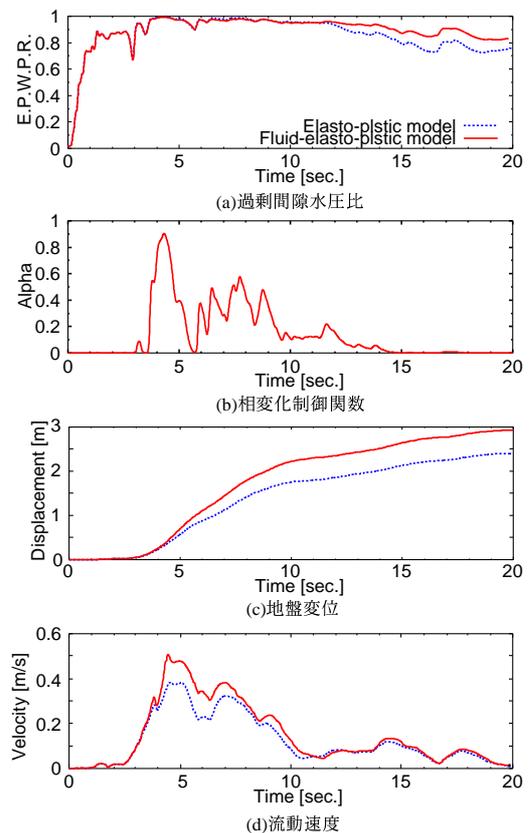


図-3 過剰間隙水圧比，相変化制御関数，地盤変位，流動速度の時刻歴

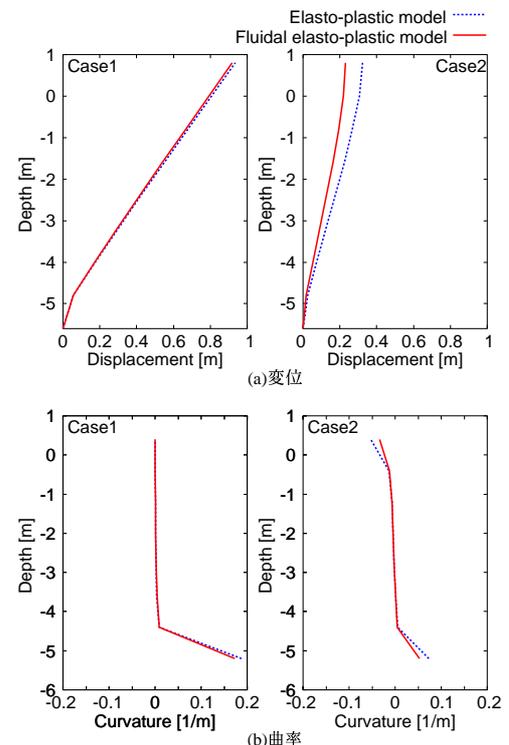


図-4 加振終了時の杭の変位，曲率の深度分布