

# 液状化・流動化地盤内の杭基礎の三次元有効応力解析

京都大学防災研究所  
 京都大学大学院  
 三星物産建設部門  
 岐阜大学流域圏科学研究センター  
 東北大学大学院

佐藤忠信  
 ○松丸貴樹  
 文 龍  
 張 鋒  
 渦岡良介

## 1. はじめに

砂地盤の液状化・流動化現象は砂の固体・液体間の相変化過程を含んだ現象と考えることができる。すなわち、液状化が発生するまでは固体的な挙動を、完全液状化以降は流体的な挙動を示すようになり、流動現象が発生する。また、過剰間隙水圧の消散やダイレイタンスー現象によって砂地盤の流動化現象が終息し、再び固体的な挙動を示すようになる。本研究では、砂の繰返し弾塑性構成式と Newton 粘性流体構成式を組み合わせることで固体・液体間の相変化現象を解析できる流弾塑性構成式<sup>1)</sup>を用い、傾斜地盤・杭系の三次元有効応力解析を実施した。特に、杭および杭周辺地盤の挙動に着目して弾塑性構成式の解析結果と比較し、構成式の有効性を検討する。

## 2. 数値解析手法

### (1) 流弾塑性構成式の概要<sup>1)</sup>

弾塑性理論に基づく土骨格と水の混合体の全応力は有効応力と間隙水圧を用いて、以下のように表現できる。

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

ここに、 $\sigma_{ij}$  は全応力テンソル、 $\sigma_{ij}^{ep}$  は弾塑性体が負担する有効応力、 $p$  は間隙水圧、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。一方、流体力学における粘性流体の全応力は、一般に粘性抵抗応力  $\sigma_{ij}^{vf}$  を用いて次のように表される。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{vf} + p\delta_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

式(1)と式(2)を比較すると、全応力から水圧を差引いた成分が、式(1)では土骨格の有効応力テンソルに、式(2)では粘性抵抗応力に相当していることがわかる。この関係を利用して、液状化・流動化過程における固体・液体間の相変化をスムーズに表現できる流弾塑性構成式は次式のように表される。また、概念図を図-1に示す。

$$\sigma_{ij} = (1 - \alpha)\sigma_{ij}^{ep} + \alpha\sigma_{ij}^{vf} + p\delta_{ij} \dots\dots\dots (3)$$

ここでの弾塑性体の応力  $\sigma_{ij}^{ep}$  の評価には、Oka<sup>ら</sup><sup>2)</sup>の砂の繰返し弾塑性構成式を用いる。また、粘性流体の応力  $\sigma_{ij}^{vf}$  の評価には等方の Newton 粘性流体構成式を用いる。 $\alpha$  は固体相と流体相の支配率を決定する相変化制御関数  $\alpha$  であり、次式のように過剰間隙水圧比の関数として定義した。

$$\alpha = 1.0 + \tanh\{31.0 \cdot (1 - \sigma'_m/\sigma'_{m0}) - 30.7\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\sigma'_m$  は平均有効応力、 $\sigma'_{m0}$  は初期平均有効応力である。 $\alpha$  の値と過剰間隙水圧比の関係を図-2に示す。なお、ここでは  $1 - \sigma'_m/\sigma'_{m0}$  を過剰間隙水圧比とよぶ。

### (2) 場の方程式の定式化

場の方程式は、Biot の二相混合体力論に基づいた土骨格の変位と間隙水圧を未知数とする u-p formulation を用いており、力のつりあい式と連続式から成立っている<sup>3)</sup>。

$$\rho \ddot{u}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho^f \dot{\epsilon}_{ii}^s - \frac{\partial^2 p_d}{\partial x_i^2} - \frac{\gamma_w}{k} \left( \dot{\epsilon}_{ii}^s - \frac{n}{K^f} \dot{p}_d \right) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\rho$  は混合体の密度、 $u_i^s$  は固相の変位ベクトル、 $\sigma_{ij}$  は全応力テンソル、 $b_i$  は物体力ベクトル、 $k$  は透水係数、 $\gamma_w$  は間隙水の単位体積重量、 $\rho^f$  は液相の密度、 $\epsilon_{ii}^s$  は固相の体積ひずみ、 $p_d$  は過剰間隙水圧(初期値からの増分)、 $n$  は間隙率、 $K^f$  は間隙水の体積弾性係数である。ここでは、土粒子とその骨格を固相、間隙水を液相と表現している。空間離散化には、固相の変位を対象として有限要素法を用い、要素重心での過剰間隙水圧を対象として有限差分法を用いている。さらに、

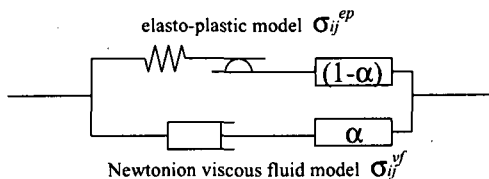


図-1 流弾塑性構成式概念

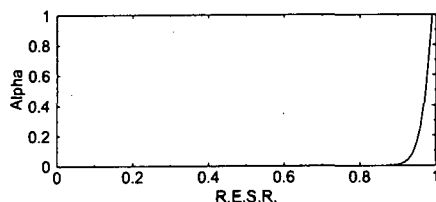


図-2 過剰間隙水圧比と相変化制御関数の関係

表-1 砂層・粘土層のモデルパラメータ

	間隙比 $e_0$	圧縮指数 $\lambda$	膨潤指数 $\kappa$	せん断比		破壊応力比		塑性パラメータ		基準ひずみ		ダイレイタンス
				$G_0/\sigma'_{m0}$	$M_f$	$M_m$	$B_0$	$B_1$	$\gamma_r^p$	$\gamma_r^e$	$D_0$	$n$
砂	1.143	0.025	0.0025	443.0	1.308	0.909	3200	32	0.001	0.006	3.5	1.1
粘土	1.750	0.01	0.0005	524.0	0.980	0.980	3000	100	1000.0	1000.0	0.0	0.0

表-2 PHC 杭 A 種のモデルパラメータ (単位 mm, MPa)

外径	500	かぶり厚	40	鉄筋のヤング率	$2.1 \times 10^5$	コンクリートのヤング率	$2.5 \times 10^4$	コンクリートの引張強度	4.7
内径	340	鉄筋の直径	7.1	鉄筋の降伏強度	1270.0	コンクリートの圧縮強度	78.4	鉄筋の本数	10

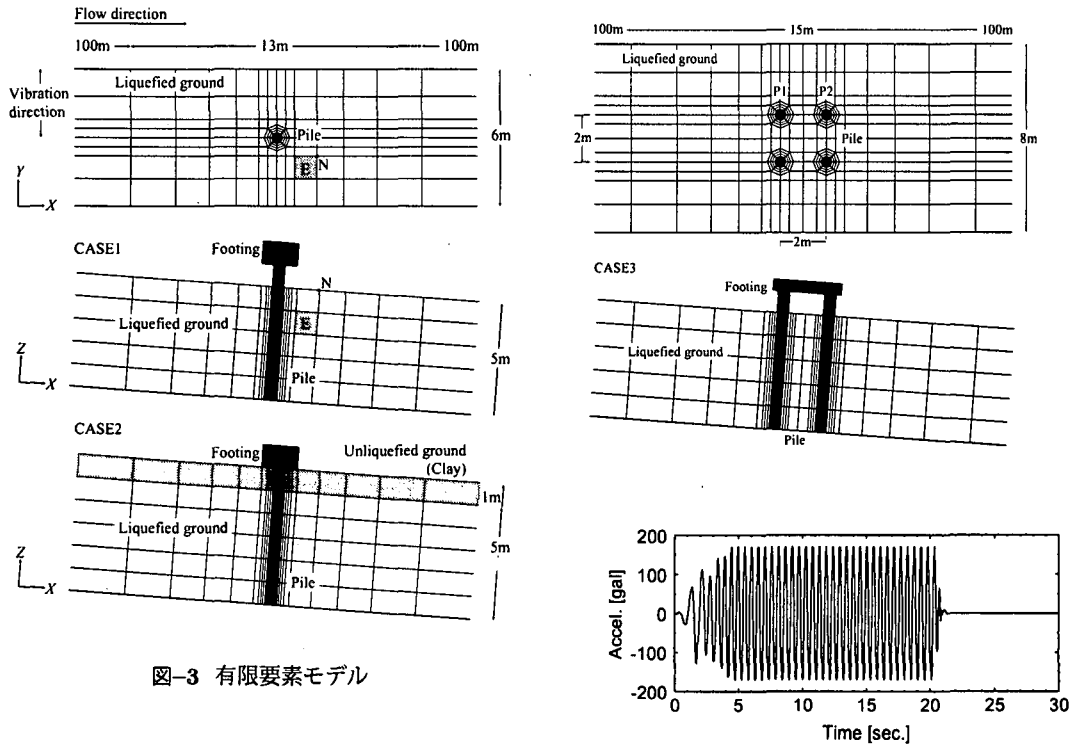


図-3 有限要素モデル

図-4 入力動の時刻歴

Newmark の  $\beta$  法を用いて時間離散化する。

### 3. 解析条件

図-3 に解析に用いた三次元有限要素モデルを示す。地盤深さは 5m であり、解析は傾斜地盤に杭が設置された CASE1 と、その上に 1m の非液化粘土層がある CASE2、および杭が 4 本設置された CASE3 の三ケースを実施した。変位境界条件として、モデルの底面は全節点固定、X-Z 面に関しては Y 軸方向の変位を固定した。側方流動が発生する方向 (X 軸方向) 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。また、排水条件として、CASE1 では地表面を、CASE2 では GL-1.0m をそれぞれ排水境界とした。杭は先端を剛結とし、杭頭では回転を拘束する。表-1、2 に地盤と杭の解析パラメータを示す。液化化砂は相対密度が約 40% の珪砂 8 号 ( $D_{50} = 0.24$ ,  $U_c = 1.92$ ,  $e_{max} = 1.251$ ,  $e_{min} = 0.706$ ) を対象とした繰返し三軸試験から得られた液化化強度を参考に設定した。杭は杭径 500mm、杭長 6m の PHC 杭 A 種を想定した。軸力変動による曲げ剛性への影響を考慮できる AFD モデル<sup>4)</sup>を用い、ビーム要素とソリッド要素の集合体としてモデル化している。入力動は図-4 に示す約 2Hz、最大加速度が約 200gal の正弦波を Y 軸方向に入力し、計算時間を 30 秒、計算時間増分を 0.002 秒とした。地表面勾配は 4% とする。また、Newton 粘性流体構成式における粘性係数はそれぞれ  $\mu' = 0.3\text{kPa}\cdot\text{s}$ 、 $\lambda' = 0.0$  とした。

### 4. 解析結果と考察

#### (1) 液化化・流動化の発生状況

弾塑性構成式と流弾塑性構成式の解析から得られた CASE1 の要素 E における過剰間隙水圧比と相変化制御関数  $\alpha$  の時刻歴を図-5 に示す。どちらの構成式においても加震開始 4 秒付近において過剰間隙水圧比はほぼ 1 に達し、地盤が液化化に至っている。また、相変化制御関数の時刻歴から、流弾塑性構成式においては概ね加震開始 4 秒から加震終了の 20 秒まで地盤が流体的な挙動を示していることが読み取れる。

図-6 に CASE1 の節点 N における地盤変位と流動速度の時刻歴を示す。流弾塑性構成式の変位や速度は弾塑性構成式より大きく発生している。特に流動速度に関しては、地盤が液化化・流動化している 4 秒から 20 秒にかけて、両モデル間に大きな違いが見られた。

(2) 杭と周辺地盤の挙動

図-7にCASE1, CASE2およびCASE3の杭P1とP2の曲率の最大値の分布を示す。ここでの曲率はX方向, Y方向の2成分の二乗和平方根であり, 各ビーム要素の重心の値を表示している。これは以下で述べる曲げモーメントについても同様である。杭頭および杭先端が固定されているため, 杭頭と杭先端で大きな曲率が得られた。CASE1とCASE3においては流弾塑性構成式の解析結果は弾塑性構成式と比べ小さくなっているが, CASE2では流弾塑性構成式の方が大きくなっている。また, CASE1とCASE2の杭先端のビーム要素の曲げモーメントと曲率の履歴曲線を図-8に示す。CASE1において, 弾塑性構成式では複雑な曲線を描いているが, 流弾塑性構成式では弾性領域での挙動にとどまっている。一方, CASE2ではCASE1に比べ大きなモーメント・曲率が発生しているが, 流弾塑性構成式の曲げモーメント・曲率は弾塑性構成式よりも大きくなっている。

図-9に, CASE1とCASE2の杭先端における曲率の時刻歴を示す。CASE1において, 弾塑性構成式の曲率は4から8秒にかけて急激に上昇しているが, 流弾塑性構成式ではほとんど上昇が見られない。これは, 加震開始4秒付近で液状化が発生し, 液状化後の地盤が弾塑性構成式では固体的な挙動のままであるのに対し, 流弾塑性構成式では流体的な挙動を示す影響を受けたためと考えられる。一方, CASE2では, 加震開始10秒以降において弾塑性構成式の曲率はほぼ一定となっているが, 流弾塑性構成式では上昇を続けている。この時間においては流動が発生しており, 液状化層の流動に伴う上部の非液状化層の変形が支配的となり, 地盤変位量の大きい流弾塑性構成式の方が杭に大きな曲率が生じたと考えられる。

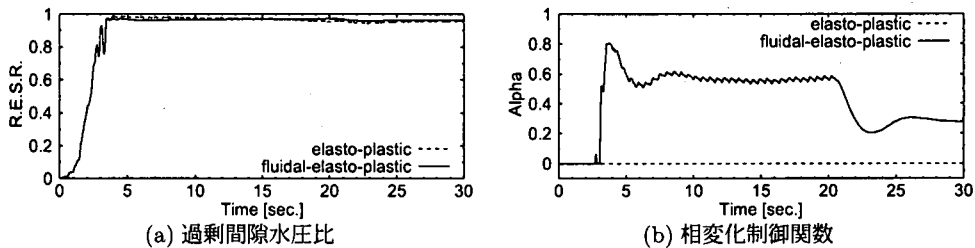


図-5 CASE1における過剰間隙水圧比と相変化制御関数の時刻歴

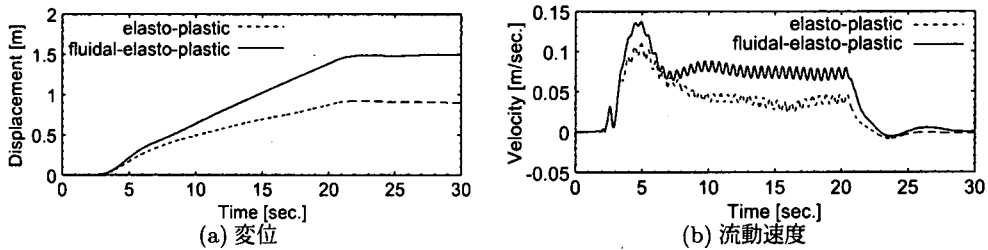


図-6 CASE1の地盤変位と流動速度の時刻歴

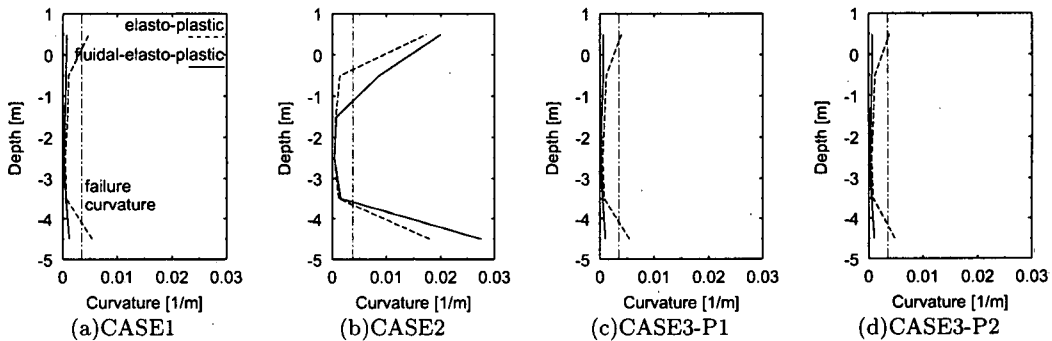


図-7 最大曲率の分布

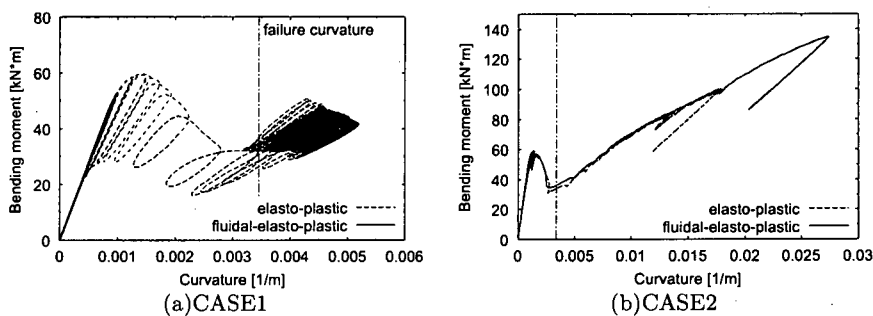


図-8 曲げモーメント-曲率の履歴曲線

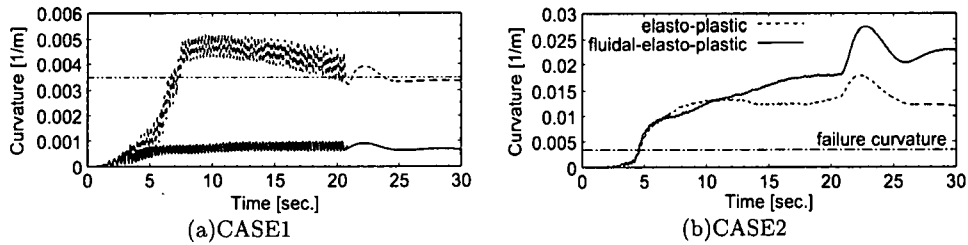


図-9 曲率の時刻歴

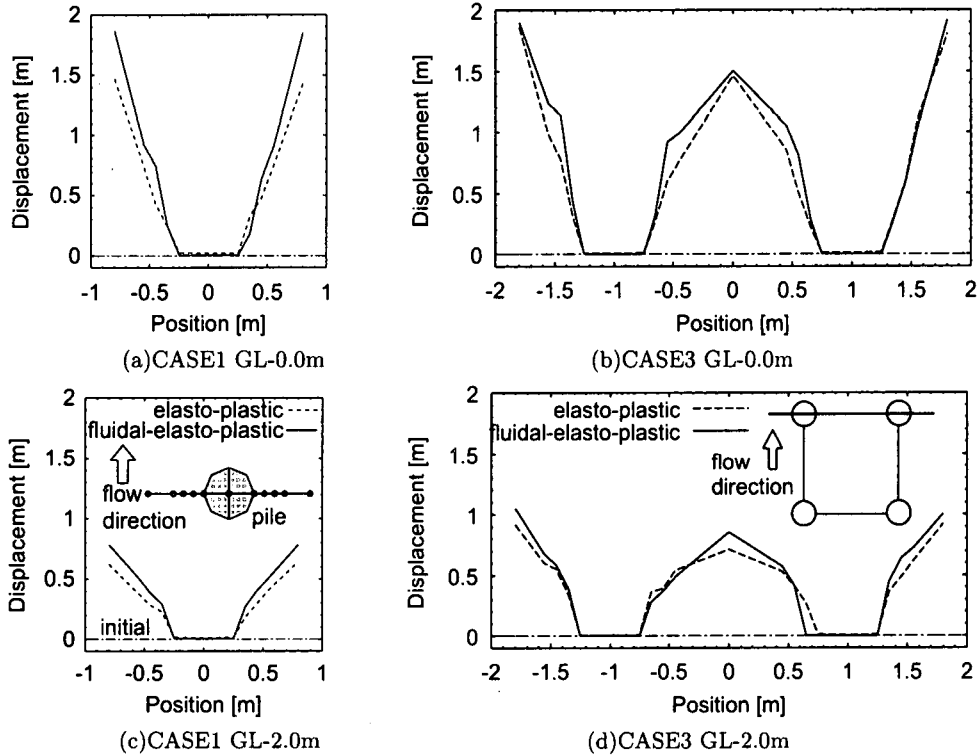


図-10 杭周辺地盤の変位

CASE1 と CASE3 の GL-0.0m および GL-2.0m おける杭周辺地盤の流動方向の最終変位量を図-10 に示す。CASE1 ではほとんどの節点において流弾塑性構成式の変位は弾塑性構成式よりも大きく発生しており、地盤の杭間のすり抜け量が大きいことわかる。一方 CASE3 においては、CASE1 ほど構成式による違いは見られない。これは、群杭の場合は周辺地盤が完全には液化化せず、流弾塑性構成式の  $\alpha$  の値が上昇しなかったためと考えられる。

## 5. まとめ

傾斜した液化化・流動化地盤中の杭の挙動について、弾塑性構成式と流弾塑性構成式を用いて三次元有効応力解析を行った。流弾塑性構成式の方が弾塑性構成式に比べて地盤の変位量や速度が大きく発生した。しかし、杭の挙動については解析ケースによって異なる結果が得られ、特に地表面の非液化化層の有無による応答の違いが流弾塑性構成式を用いた時には色濃く表れた。また、流弾塑性構成式では地盤の杭間すり抜け量が大きくなった。

今回の解析では、構成式による挙動の違いに関して定性的な知見は得られたが、定量的なことについてはよくわかっていない。今後は、この点についても検討を進めていきたい。

### 参考文献

- 1) 佐藤忠信, 文龍, 渦岡良介: 傾斜地盤の液化化・流動過程のシミュレーション, 土木学会論文集 No. 722, III-61, pp. 109-119, 2002.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol. 49, No. 5, pp. 661-680, 1999.
- 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.
- 4) Zhang, F., Yashima, A., Kimura, M. and Uzuoka, R.: 3-D FEM analysis of laterally cyclic loaded group-pile foundation based on an axial-force dependent hysteretic model for RC, *Proc. of Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne, Balkema, CD-ROM, 2000.