

浸透注入改良砂の繰返し弾塑性構成式とその液状化解析への適用

京都大学 フェロー会員 岡 二三生 京都大学 正会員 小高 猛司  
 東亜建設工業(株) 正会員 大野 康年 日本道路公団 正会員 田久 勉  
 京都大学 学生会員 ○山崎 順弘

1. はじめに

本報では、著者らが行って来た室内試験結果<sup>1)</sup>に基づき、特殊シリカを浸透注入した改良砂の構成式を提案し、それを動的有効応力解析に適用した結果を示す。

2. 改良砂へ拡張された砂の繰返し弾塑性構成式

改良砂の粘着力を考慮し、岡らによる砂の弾塑性構成式<sup>2)</sup>を拡張した。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln\{(\sigma_m' + b)/(\sigma_{mb}' + b)\} = 0 \quad (1)$$

$$g = \bar{\eta}_z^* + \tilde{M}^* \ln\{(\sigma_m' + b)/\sigma_{ma}'\} = 0 \quad (2)$$

$$f = \bar{\eta}_z^* - k = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\bar{\eta}_{(0)}^* = \{(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)\}^{1/2}$  である。 $\eta_{ij}^*$  は応力比テンソル  $\eta_{ij}^* = s_{ij}/(\sigma_m' + b)$  で、 $\eta_{ij(0)}^*$  は圧密終了時の  $\eta_{ij}^*$ 、 $\sigma_{mb}'$  は塑性体積ひずみに応じて変化し、初期値は圧密終了時の平均有効応力  $\sigma_{m0}'$  に等しい。 $s_{ij}$  は偏差応力テンソル、 $\sigma_m'$  は平均有効応力で、 $M_m^*$  は変相応力比である。また、 $\bar{\eta}_z^* = \{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)\}^{1/2}$  で、 $\chi_{ij}^*$  は非線形硬化パラメータである。 $\sigma_{ma}'$  は材料パラメータ、 $k$  は硬化パラメータである。 $b$  は定数であり、図1に示すように、過圧密境界面と平均有効応力軸の引張り側の交点の値である。また、 $\tilde{M}^*$  は塑性ひずみの増分を規定するが、通常の未改良砂では変相応力比に達すると構造崩壊が起こると仮定し以後は  $M_m^*$  としている。しかし、改良砂では未改良砂ほど急激な構造崩壊は起こらないものと仮定し、次式のように変相後にロジスティック関数を用いて徐々に  $M_m^*$  へと変化させる。

$$\tilde{M}^* = \tilde{M}_{(n)}^* = -\eta^* / \ln\{(\sigma_m' + b)/(\sigma_{mc}' + b)\} : (\eta^* < M_m^*) \quad (4)$$

$$= M_m^* / \{1 + (M_m^* / \tilde{M}_{(n)}^* - 1) \exp(-\alpha_1 \cdot \gamma_{ap}^*)\} : (\eta^* \geq M_m^*) \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{mc}'$  は過圧密境界面と平均有効応力軸との交点の値である。 $\gamma_{ap}^*$  は変相後からの塑性せん断ひずみの累積値であり、 $\tilde{M}_{(n)}^*$  は式(4)で求められるものとし、 $\alpha_1$  は進行速度を調節するパラメータである。

また非線形硬化パラメータ  $\chi_{ij}^*$  は次式に従う。

$$d\chi_{ij}^* = B^* (M_f^* d\epsilon_{ij}^p - \chi_{ij}^* d\gamma^p) \quad (6)$$

ここで、 $M_f^*$  は破壊応力比、 $d\gamma^p$  は塑性偏差ひずみの第2不偏量である。式(6)における硬化パラメータ  $B^*$  を、

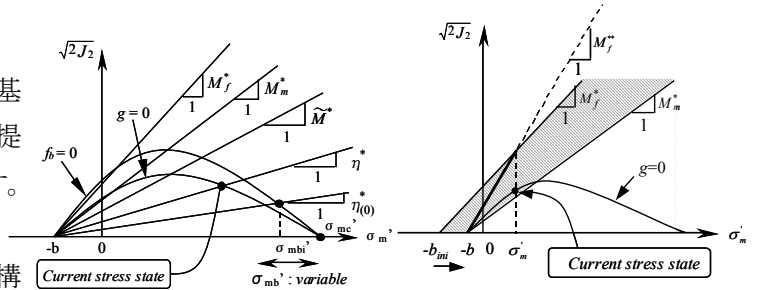


図1：過圧密境界面，塑性ポテンシャル面 図2：b値の減少の概念図

応力反転時からの塑性せん断ひずみ  $\gamma_{(n)}^*$  と  $B^*$  の低減を調整するパラメータ  $C_f$  を用いて次式で低減する。

$$B^* = B_1^* + (B_{max}^* - B_1^*) \exp(-C_f \gamma_{(n)}^*) \quad (7)$$

$$B_{max}^* = B_0^* / (1 + \gamma_{(n)}^* / \gamma_r^*) \quad (8)$$

ここで、 $B_1^*$  は  $B^*$  の下限値である。 $B_{max}^*$  は  $B^*$  の最大値で、変相後に過去の  $\gamma_{(n)}^*$  の最大値  $\gamma_{max}^*$  を用いて式(8)を用いて低減する。 $\gamma_r^*$  は塑性規準ひずみである。

また、式(9)、(10)に示す一般化された流動則を用いて塑性ひずみ増分を定める。

$$d\epsilon_{ij}^p = H_{ijkl} (\partial g / \partial \sigma_{kl}') \quad (9)$$

$$H_{ijkl} = \alpha \delta_{ij} \delta_{kl} + \beta (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (10)$$

ここで、 $H_{ijkl}$  は4階の等方テンソルで、スカラー変数  $\alpha$ 、 $\beta$  を用いて表現される。ストレス-ダイレイタンスー関係は以下ようになる。

$$d\gamma^p / d\gamma^p = D^* \{ \tilde{M}^* - \eta_{st}^* (\eta_{st}^* - \chi_{st}^*) / \bar{\eta}_z^* \} \quad (11)$$

$D^*$  はダイレイタンスー係数  $D^* = (3\alpha/2\beta) + 1$  である。正規圧密領域においては、 $D^*$  は一定値であるが、過圧密領域においては  $\tilde{M}^*$  を用いて次式で表される。

$$D^* = D_0^* (\tilde{M}^* / M_m^*)^n \quad (12)$$

改良砂の挙動を表現するために、繰返し回数の増加に伴い変相線が下がってくるものとして、式(2)における  $b$  の値を  $\gamma_{ap}^*$  を用いて次式で低減する。

$$b = b_0 \exp(-\alpha_2 \cdot \gamma_{ap}^*) \quad (13)$$

ここで、 $b_0$  は  $b$  の初期値である。しかし、破壊線の位置は繰返し回数の増加によって変化せず、図2に示すように正のダイレイタンスーが発生する領域が広がるものとし、ある応力状態に対する仮の破壊応力比  $M_f^*$

キーワード シリカ，浸透注入，構成式，改良砂，液状化解析

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL075-753-5085

を次式で定める。

$$M_f^{**} = M_f^* \cdot (\sigma'_m + b_0) / (\sigma'_m + b) \quad (14)$$

3. 動的有効応力解析への適用

前節で提案した改良砂の構成式を、液状化解析コード LIQCA-2D01<sup>3)</sup>へ導入し動的有効応力解析を行った。排水は上面のみからとし、平面ひずみを仮定して解析を行った。解析は図3に示す1次元地盤モデルとし、F、A<sub>s</sub>を改良すべき液状化層とする。A<sub>c</sub>、D<sub>s</sub>、D<sub>c</sub>はそれぞれ沖積粘土、洪積砂層、洪積粘土である。1987年に宮城県沖の大船渡で観測された地震波を用い、東京湾での大地震を想定し、振幅を2倍したものを入力地震波とした。

表1に既往の室内試験から得られた未改良砂と改良砂のパラメータを、表2に地盤のパラメータを示す。F、A<sub>s</sub>に表1のパラメータを用い、改良前後の地盤の

挙動をシミュレートする事とした。図5、図6に過剰間隙水圧比、応答加速度の時刻歴を未改良砂・改良砂各々について示す。未改良地盤の液状化層で発生している液状化が改良地盤では見られず、特殊シリカ液浸透注入による地盤の改良効果が確認できる。

4. まとめ

特殊シリカ液を浸透注入した改良砂地盤に適用するため、岡らによる砂の繰返し弾塑性構成式<sup>2)</sup>を拡張して、動的有効応力解析を行った結果、改良砂の液状化防止効果が確認できた。今後は多次元解析で改良地盤の地震時変形性能を照査する予定である。

参考文献

- 1) 岡研究室 HP: <http://nakisuna2.kuciv.kyoto-u.ac.jp/okalabo/>
- 2) Oka et al., *Geotechnique*, 49(5), 661-680, 1999.
- 3) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D01 (2001年公開版) 資料, 2002.

表1：未改良砂と改良砂のパラメータ

	Unimproved sand	Improved sand
<i>e</i>	0.824	0.783
$\lambda$	0.012	0.010
$\kappa$	0.0025	0.0029
$G_0 / \sigma'_m$	1030	700
$M_f^*$	1.021	1.050
$M_w^*$	0.875	0.780
$B_0$	2200	1500
$B_1$	50	10
$C_f$	2000	180
$OCR^*$	1.4	1.4
$D_0$	2.0	1.0
<i>n</i>	2.5	2.0
$\gamma_r^{p*}$	0.0050	0.0045
$\gamma_r^{e*}$	0.008	0.050
<i>b</i>	0.0	12.4
$\alpha_1$	0.0	5.0
$\alpha_2$	0.0	5.0

表2：各地盤のパラメータ

	Loose sand F and A <sub>s</sub>	Alluvial clay A <sub>c</sub>	Diluvial sand D <sub>s</sub>	Diluvial clay D <sub>c</sub>
<i>e</i>		1.60	1.10	
$\lambda$		0.260	0.025	
$\kappa$		0.0026	0.0025	
$G_0 / \sigma'_m$	Referring to Table 1	312	836	Modeled as elastic material
$M_f^*$		1.09	1.23	
$M_w^*$		1.09	1.02	
$B_0$		3000	3500	$G_0 = 133000$ (kPa)
$B_1$		300	100	$E = 355000$ (kPa)
$C_f$		2000	0	$\nu = 0.333$
$OCR^*$		1.0	1.3	
$D_0$	(Permeability)	0.0	1.0	
<i>n</i>	Improved	-	5.0	
$\gamma_r^{p*}$	$5.3 \times 10^{-5}$	$\infty$	0.010	
$\gamma_r^{e*}$	unimproved	$\infty$	0.100	
<i>k</i> (m/s)	$5.3 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-9}$	$8.7 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-9}$

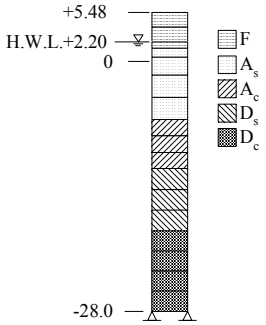


図3：1次元解析モデル

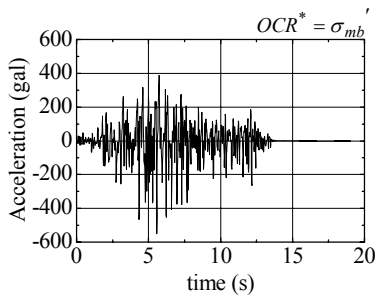


図4：入力地震動

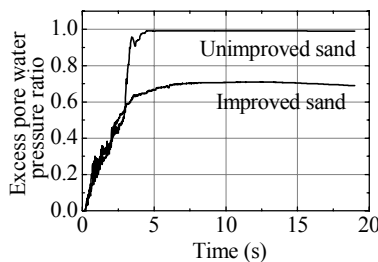
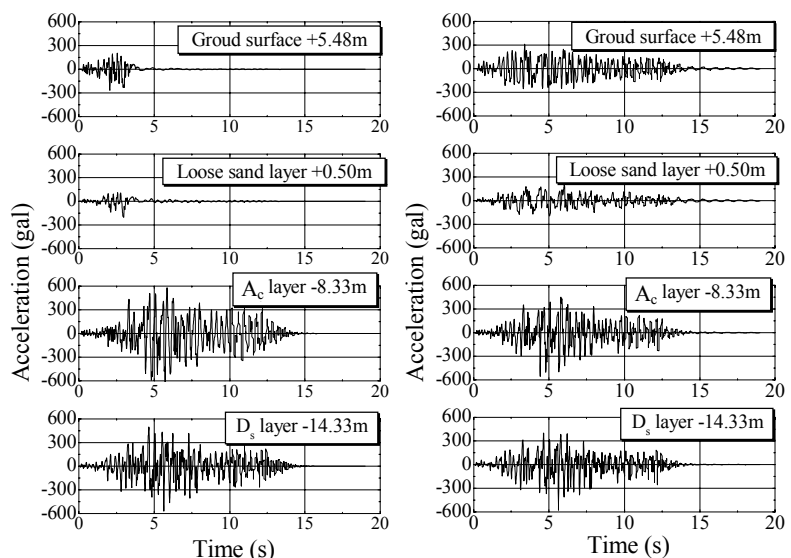


図5：過剰間隙水圧比の時刻歴



(a) 未改良砂

(b) 改良砂

図6：応答加速度の時刻歴