

京都大学大学院	学生会員	○山崎順弘・田久 勉
京都大学大学院	フェロー会員	岡二三生
東亜建設工業（株）	正会員	大野康年
京都大学大学院	正会員	小高猛司

1. はじめに

葉液浸透注入工法は地盤の乱れを最小限に抑え、既設構造物の機能を維持しながらの対策が可能であり、作業用地が比較的狭くても施工可能であることから、近年、液状化対策として注目されつつある。本研究では葉液浸透注入による改良砂の構成式を開発することを目的とする。岡らによる繰返し弾塑性構成式¹⁾を拡張し、特殊シリカ液を浸透注入した改良砂の中空ねじりせん断試験結果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、図1に示すように岡らによる砂の繰返し弾塑性構成式¹⁾の過圧密境界面 f_b 、塑性ポテンシャル関数 g 、降伏関数 f および破壊線・変相線を平均有効応力 σ_m' の引張り側まで拡張した。

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

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

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

ここに、 $\bar{\eta}_{(0)}^* = \{(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)\}^{1/2}$ である。 η_{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 η_{ij}^* 、 σ_{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 σ_{m0}' に等しい。 s_{ij} は偏差応力テンソル、 σ_m' は平均有効応力で、 M_m^* は変相応力比である。また、 $\bar{\eta}_x^* = \{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)\}^{1/2}$ で、 χ_{ij}^* は非線形硬化パラメータである。 σ_{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の方を規定する。改良砂では未改良砂ほど急激な構造破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^* へと変化させた。

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

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

ここで、 σ_{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。 γ_{ap}^{p*} は変相後からの塑性せん断ひずみの

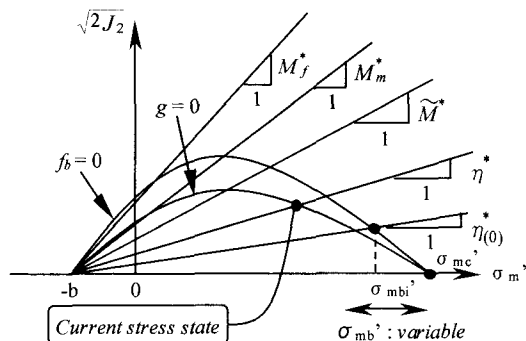


図1. 過圧密境界面，塑性ポテンシャル面

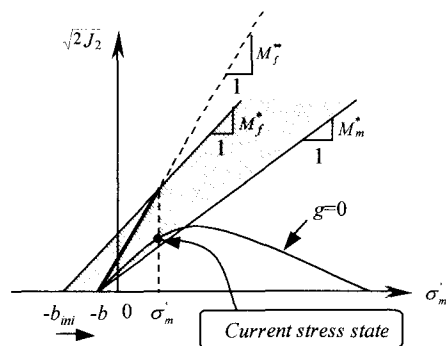


図2. b の減少の概要図

累積値であり、 $\tilde{M}_{(n)}^*$ は式(4)で求められるものとし、 α_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 χ_{ij}^* は次式に従う。

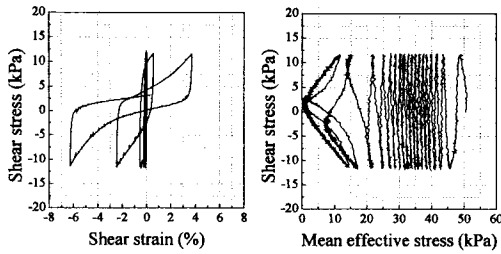
$$d\chi_{ij}^* = B^* (M_f^* d\epsilon_{ij}^{p*} - \chi_{ij}^* d\gamma^{p*}) \quad (6)$$

ここで、 M_f^* は破壊応力比、 $d\gamma^{p*}$ は塑性偏差ひずみの第二不偏量である。式(6)における硬化パラメータ B^* を、応力反転時からの塑性せん断ひずみ $\gamma_{(n)}^{p*}$ 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。

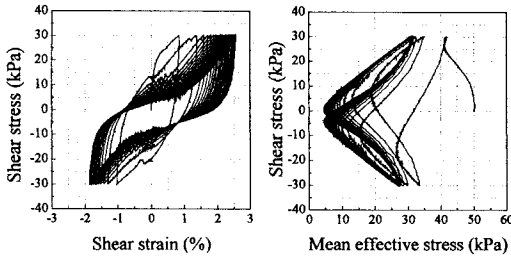
$$B^* = B_1^* + (B_{\max}^* - B_1^*) \exp(-C_f \gamma_{(n)}^{p*}) \quad (7)$$

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

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 $\gamma_{(n)}^{p*}$ の最大値 $\gamma_{\max}^{p*}$ を用いて式(8)を用いて低減する。 $\gamma_{\max}^{p*}$ は塑性規準ひずみである。

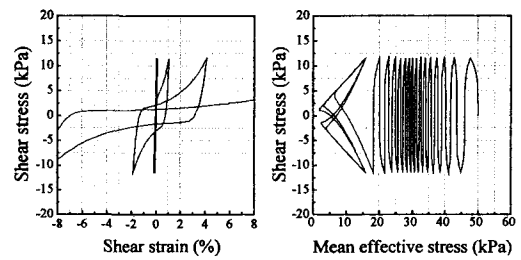


(a) 未改良砂 ($\tau/\sigma'_{m0}=0.23$)

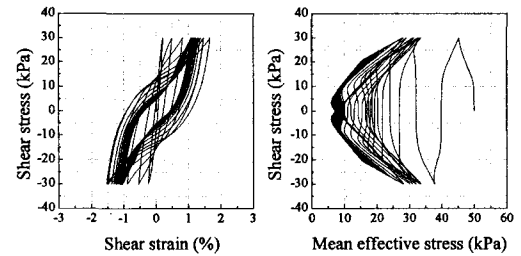


(b) 改良砂 ($\tau/\sigma'_{m0}=0.6$)

図 2. 中空ねじり試験結果



(a) 未改良砂 ($\tau/\sigma'_{m0}=0.23$)



(b) 改良砂 ($\tau/\sigma'_{m0}=0.6$)

図 3. 中空ねじり試験シミュレーション結果

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。

$$d\varepsilon^p_{ij} = H_{ijkl}(\partial g / \partial \sigma'_{kl}) \quad (9)$$

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

ここで、 H_{ijkl} は4階の等方テンソルで、スカラー変数 α 、 β を用いて表現される。ストレス-ダイレイタンシー関係は以下になる。

$$dv^p / dy^p = D^* \{ \tilde{M}^* - \eta^*_{st} (\eta^*_{st} - \chi^*_{st}) / \bar{\eta}^*_{st} \} \quad (11)$$

D^* はダイレイタンシー係数 $D^* = (3\alpha/2\beta) + 1$ 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 γ^p_{ap} を用いて次式で低減する。

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

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シ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 を次式で定める。

$$M^*_f = M^*_f \cdot (\sigma'_m + b_0) / (\sigma'_m + b) \quad (14)$$

3. 中空ねじり試験シミュレーション結果

田久²⁾による室内試験で用いられた相対密度40%の

緩詰め豊浦砂および、それに特殊シリカ液を浸透注入した改良砂を対象とし、中空ねじりせん断試験のシミュレーションを行った。それぞれの実験結果を図3に、シミュレーション結果を図4に示している。 $b = \alpha_1 = \alpha_2 = 0$ とすると、岡らによる砂の繰返し弾塑性構成式¹⁾と同様となり、未改良砂では $b = \alpha_1 = \alpha_2 = 0$ としてシミュレーションを行った。図4(a)に示すように、変相後に急激にせん断ひずみが発生する未改良砂の特徴をよく表現できている。図4(b)に示すように、改良砂へ拡張したモデルを用いると、改良砂の繰返し載荷の挙動をよく表現できることがわかる。

4. まとめ

岡らによる砂の弾塑性構成式を拡張し、特殊シリカ液を浸透注入した改良砂のシミュレーションを行った結果、載荷初期からせん断ひずみが発生し、その後、徐々に発生し収束に至るなどの改良砂の特徴を表現することができた。

参考文献

- 1) Oka et al., A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus, *Geotechnique*, 49(5), 661-680(1999).
- 2) 田久勉, 室内要素試験による特殊シリカ液浸透注入改良砂の改良効果の評価, 京都大学工学研究科土木工学専攻修士論文, (2003).