

粘性土のひずみ速度依存性挙動と弾粘塑性構成式

京都大学大学院
京都大学大学院
京都大学大学院

フェロー会員
正会員
学生会員

岡 二三生
小高 猛司
○ 木元小百合・石垣 成直・辻 千之

1. はじめに

本研究では、従来の足立・岡による弾粘塑性構成式で正規圧密領域・過圧密領域において異なる形で表現していた降伏関数を両領域で同形のものに拡張した。また硬化則として、繰り返し載荷時にも適用できるよう移動硬化型を用いた¹⁾。

粘性土は異なるひずみ速度で非排水せん断試験を行なった場合に各ひずみ速度固有の応力-ひずみ関係が存在する、すなわちひずみ速度依存性挙動を示すことが知られている。本研究では、ひずみ速度の異なる非排水三軸圧縮試験および、ひずみ速度急変試験を行ない、これらについてモデルの適用性を検討した。

2. 弾粘塑性構成式

本モデルによって新たに考慮された項目を整理すると、

1. 正規圧密、過圧密領域において同形の降伏関数を用いる。
2. 等方圧密終了時の応力状態は一般的には過圧密境界面 $f_b = 0$ (図-1) 上ではなく $f_b = 0$ 面の外側にあると仮定することにより、等方応力状態での2次圧縮や応力緩和現象を説明することができる。
3. 繰り返し載荷時に適用できるよう、非線形移動硬化則を用いた降伏関数とする。
4. 重過圧密領域の挙動を表現するため、第2材料関数内に応力履歴テンソルを導入する。

粘塑性ひずみ速度の発展則は、

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \langle \Phi_{ijkl}(f_y) \rangle \cdot \Phi_2(\xi) \cdot \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \dots \dots \dots (1)$$

静的降伏関数は、応力比の変化に関するものと平均有効応力の変化に関するものの和で表現される (Double kinematic hardening model)。塑性ポテンシャル関数 $f_p = 0$ (図-1) は静的降伏関数と同形で与えられる。

$$f_y = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - x_{ij}^* \right) \cdot \left(\eta_{ij}^* - x_{ij}^* \right) \right\}^{1/2} + \alpha \tilde{M}^* \left| \ln \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} \right) - y_m^* \right| = 0, \quad \eta_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma'_m} \dots \dots \dots (2)$$

x_{ij}^*, y_m^* は移動硬化パラメータで、それぞれ粘塑性偏差ひずみ増分 de_{ij}^{vp} , 粘塑性体積ひずみ増分 dv^{vp} に伴って変化し、非線形移動硬化則を用いて以下の式で表現される。

$$dx_{ij}^* = B_1^* \left(A_1^* de_{ij}^{vp} - x_{ij}^* |d\gamma^{vp}| \right), \quad d\gamma^{vp} = \sqrt{de_{ij}^{vp} \cdot de_{ij}^{vp}}$$

$$dy_m^* = dy_{m1}^* + dy_{m2}^* = B_2^* (A_2^* dv^{vp} - y_m^* |dv^{vp}|) + A_3^* dv^{vp}$$

$A_1^*, B_1^*, A_2^*, B_2^*, A_3^*$ は材料定数である。 $dB_1^* = -B_t(B_1^* - B_s^*)d\gamma^{vp}$

で B_1^* の発展則を与える。重過圧密領域において、応力比が一旦限界状態線を越えた後ひずみ軟化し、再び限界状態線に戻る挙動を表現するため、破壊時の挙動を決定する第2材料関数に応力履歴比テンソル η_{ij}^{**} を導入する。応力履歴比テンソルは応力比テンソルを追従する量で過去の応力の影響ほど小さく、減退記憶の原理を満たす。応力履歴パラメータ τ の値が小さいほど現在の応力からの遅れは減少する。

$$\Phi_2 = \frac{\bar{\eta}_{(0)}^{**} M_f^*}{G_2^* \left\{ M_f^* - \frac{\eta_{mn}^{**} (\eta_{mn}^{**} - \eta_{mn(0)}^{**})}{\bar{\eta}_{(0)}^{**}} \right\}} + 1, \quad \bar{\eta}_{(0)}^{**} = \left\{ \left(\eta_{ij}^{**} - \eta_{ij(0)}^{**} \right) \left(\eta_{ij}^{**} - \eta_{ij(0)}^{**} \right) \right\} \dots \dots \dots (3)$$

$$d\eta_{ij}^{**} = \frac{1}{\tau} \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij}^{**} \right) d\gamma, \quad d\gamma = \sqrt{de_{ij} de_{ij}} \dots \dots \dots (4)$$

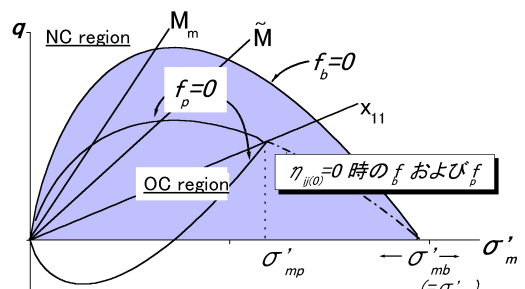


図-1 過圧密境界面, 塑性ポテンシャル面

キーワード: ひずみ速度依存性, 過圧密領域, 移動硬化則, ひずみ速度急変試験

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町 / Tel 075-753-5085 / Fax 075-753-5086

3. 非排水三軸圧縮試験

粘性土のひずみ速度依存性を調べるため、再構成深草粘土を用いて非排水三軸圧縮試験を行なった²⁾。図-2は軸ひずみ速度を0.5,0.05,0.005%/min.とした単調載荷試験結果である。図-4には同じ試料を用いて、せん断中に軸ひずみ速度を急変させた試験結果を示す。図-2に見られるように各ひずみ速度に固有の応力-ひずみ曲線、有効応力経路が得られたが破壊応力比はほぼ一致した。図-4では0.5%/min.,0.005%/min.の単調載荷試験結果に、ひずみ速度を急変させた場合の挙動を重ねて示している。ひずみ速度を変化させると瞬時に軸差応力が急変する。破壊線直前でひずみ速度を急激に上げた場合(~), 応力経路は単調載荷試験で得られた破壊応力線を飛び出している。

4. 本モデルによるシミュレーション

図-3,5は、前述した構成式を用いて非排水三軸試験のシミュレーションを行なった結果である。用いたパラメータを表-1に示す。 $\sigma'_{m0}=50\text{kPa}$ とした過圧密領域に対しては、 $B_{1(0)}^*=70, \tau=0.025$ とした。図-3に示すように破壊線近くで粘塑性体積ひずみが膨張を示し、応力経路が立つ傾向を表現できる。 ε_{11} を100倍(1/100倍)にした時、 ε_{11}^{vp} の増加は遅れるため $\dot{q}_{11}=3G(\dot{\varepsilon}_{11}-\dot{\varepsilon}_{11}^{vp})$ より、 $\dot{q}_{11}$ は急増(急減)し、図-5で実験同様、弾性的な応答を示している。特に限界状態近くの $\dot{q}_{11}=0$ の領域では ε_{11} の変化に対応してストレスオーバー(アンダー)シュートが再現される。また破壊直前でひずみ速度を上げた場合、破壊応力線を飛び超え、その上側では粘塑性体積膨張となり σ'_m は減少するため破壊線前後でループを描く。これは実験でも見られた挙動である。実験では破壊応力付近でひずみ速度を変化させた時の軸差応力の変化の度合いが減少しており、このようなひずみ度依存性の減少について今後さらに実験的・解析的に検討したい。

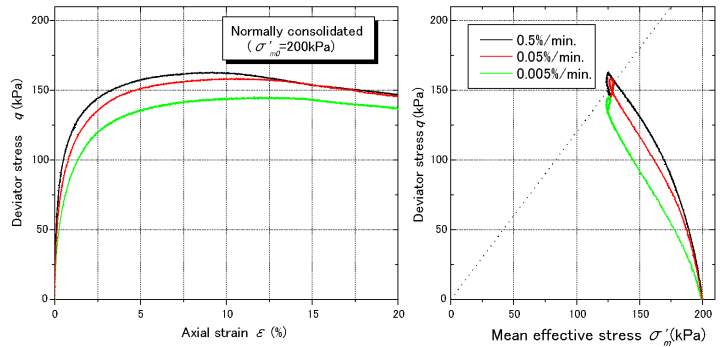


図-2 応力-ひずみ関係, 有効応力経路 (実験)

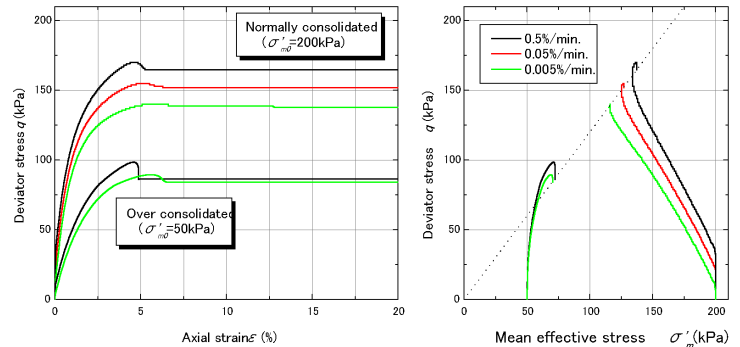


図-3 応力-ひずみ関係, 有効応力経路 (解析)

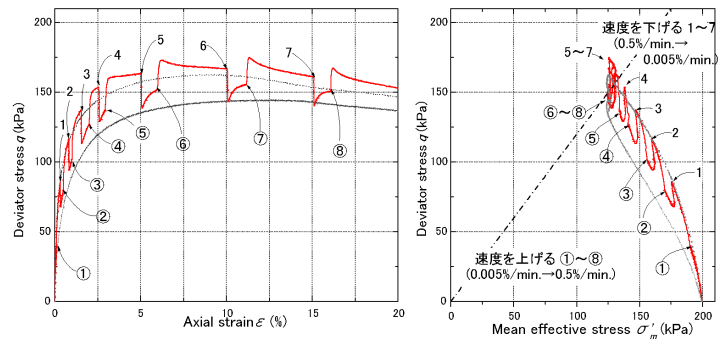


図-4 ひずみ速度急変試験 (実験)

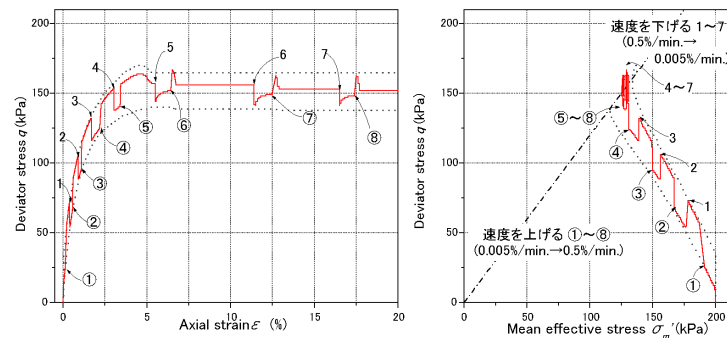


図-5 ひずみ速度急変試験 (解析)

表-1 解析パラメータ

せん断弾性係数 G_0	36100kPa	破壊応力比 M_f^*	0.98	移動硬化パラメータ A_1^*	0.98(= M_f^*)
圧密降伏応力 σ'_{mbi}	200kPa	粘塑性パラメータ m'	45	" $B_{1(0)}^*$	50
圧縮指数 λ	0.185	" C_{01}	$1.5 \times 10^{-7}(1/sec)$	" B_s^*	20
膨張指数 κ	0.041	" C_{02}	$1.1 \times 10^{-7}(1/sec)$	" B_t^*	10
初期間隙比 e_0	1.18	" G_2^*	1	" A_3^*	$15.14(= \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa})$
変相応力比 M_m^*	0.98	" α	0.15	応力履歴パラメータ τ	0.013

参考文献

- 岡二三生・木元小百合・肥後陽介, 飽和粘土の弾粘塑性構成式 (その 1)-構成式の誘導-, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集,2001.
- 岡二三生・小高猛司・木元小百合・石垣成直・辻千之, 限界状態到達前後における繰り返し粘土のひずみ速度効果, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集,2001.