

内部構造の変化を考慮した弾粘塑性構成式

京都大学大学院 フェロー会員 岡 二三生
 京都大学大学院 学生会員 ○ 木元小百合

1. はじめに

自然堆積土は長い年月をかけて、二次圧密や粒子間の固結（セメンテーション）などの作用を受ける。年代効果と呼ばれるこのような作用を受け、堆積土の内部では微小な土粒子の集合体や、それを連結するリンク構造が形成される。構造骨格を有する土の圧縮・せん断特性は、再構成試料と大きく異なる。例えば不攪乱の洪積粘土はせん断時に非常に脆弱な挙動を示し、ピーク強度を超えてせん断を継続すると、土の構造の変化に伴って急激な強度低下を示す¹⁾。

以下では、せん断時のひずみ軟化挙動が、内部構造の破壊に起因するものとし、そのモデル化を試みる。また得られた構成式を洪積粘土に適用し、三軸応力状態でシミュレーションを行なった結果を示す。

2. 弾粘塑性構成式

過圧密境界面… 正規圧密領域 $f_b \geq 0$ 、過圧密領域 $f_b < 0$ の境界面は、次の関数で表現する。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0, \quad \bar{\eta}_{(0)}^* = \eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \quad \eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \quad 0_{1/2}, \quad \eta_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma'_m} \quad \dots (1)$$

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{mbi} \cdot \exp \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_{kk}^{vp} \quad \dots (2)$$

ここに σ'_m は平均有効応力、 S_{ij} は偏差応力テンソル、 M_m^* は変相応力比で粘塑性体積ひずみ増分が圧縮から膨張へ変化する時の応力比の値で定義される。 $\eta_{ij(0)}^*$ は異方圧密後の応力比である。

粘塑性ひずみ速度の発展則

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \langle \Phi_1(f_y) \rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad \dots (3)$$

$$C_{ijkl} = a\delta_{ij}\delta_{kl} + b(\delta_{kl}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}), \quad C_{01} = 2b, \quad C_{02} = 3a + 2b \quad \dots (4)$$

静的降伏関数… 静的降伏関数は、以下の式で与える。

$$f_y = \bar{\eta}_x^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} - y_m^* = \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_{myi}}{\sigma'_{ma}}, \quad \bar{\eta}_x^* = \eta_{ij}^* - x_{ij}^* \quad \eta_{ij}^* - x_{ij}^* \quad 0_{1/2} \quad \dots (5)$$

σ'_{myi} は本来、初期の静的降伏関数の大きさを表す定数であるが、 C_{01} , C_{02} に含めるものとする。一般に x_{ij}^* , y_m^* は移動硬化パラメータであるが、今回 $x_{ij}^* = \eta_{ij(0)}^* = 0$ とした。 y_m^* の硬化則は、

$$dy_m^* = dy_{m1}^* + dy_{m2}^* = B_2^* A_2^* d\varepsilon_{kk}^{vp} - y_m^* |d\varepsilon_{kk}^{vp}| + A_3^* d\varepsilon_{kk}^{vp} \quad \dots (6)$$

A_2^* , B_2^* , A_3^* は材料定数である。今回は A_2^* , $B_2^* = 0$ とし、 $A_3^* = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa}$ としている。式 (3) 中の $\Phi_1(f_y)$ の具体的な関数形は以下のように定められる²⁾。

$$\Phi_1(f_y) = \sigma'_m \exp \frac{f_y}{\sigma'_m} = \sigma'_m \exp \frac{\bar{\eta}_x^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} - y_m^*}{\sigma'_m} \quad \dots (7)$$

塑性ポテンシャル関数… 塑性ポテンシャル関数は以下の式によって表現する。

$$f_p = \bar{\eta}_x^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mc}} - y_m^* = 0 \quad \dots (8)$$

正規圧密領域では $\tilde{M}^* = M_m^*$ 、過圧密領域では $\tilde{M}^* = -\frac{\sqrt{\eta_{ij}^* \eta_{ij}^*}}{\ln(\sigma'_m/\sigma'_{mc})}$, $\sigma'_{mc} = \sigma'_{mb} \exp \frac{\eta_{ij(0)}^* \eta_{ij(0)}^*}{M_m^*}$ とする。ただし過圧密領域にあっても、一旦 $\tilde{M}^* = M_m^*$ に達した後は $\tilde{M}^* = M_m^*$ とする。

全ひずみ速度テンソルは $\dot{\varepsilon}_{ij}$ 、弾性ひずみ速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ と粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ の和で表される。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} + \dot{\varepsilon}_{kk}^e \frac{1}{3} \delta_{ij} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} + \dot{\varepsilon}_{kk}^{vp} \frac{1}{3} \delta_{ij} \quad \dots (9)$$

ここで G はせん断弾性係数、 $\dot{S}_{ij}$ は偏差応力速度テンソルである。

キーワード：構成式、粘性土、三軸試験、構造、ひずみ軟化

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

3. 内部構造変化の定式化

従来、静的降伏関数 (3) 式中の σ'_{ma} を定数としていたが、これを粘塑性ひずみの増加に従い減少させることで、内部構造の破壊の表現とする。 σ'_{ma} の減少は静的降伏関数の大きさを縮小させることに対応する。初期値を σ'_{mai} 、残留応力状態での収束値を σ'_{maf} として、

$$\sigma'_{ma} = \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \cdot \exp(\beta z) \quad (10)$$

ここで、 σ'_{ma} を減少させると、式 (7) によって粘塑性ひずみが増大し、ひずみ軟化が表現される。 β は構造の破壊速度に関する材料定数である。図-1 にパラメータ σ'_{maf} を変えた場合の、正規圧密領域での非排水三軸試験の計算結果を示す。初期値 σ'_{mai} はすべて 580(kPa) としている。他のパラメータは表-1 の OCR=1.0 に示すとおりである。 σ'_{maf} が小さいほど、残留時の軸差応力が小さくなり、軟化の度合いを決定するパラメータであることが分かる。

4. 上部大阪洪積粘土への適用

図-2 に鶴見洪積粘土（等方圧密降伏応力：580kPa）を用いた、ひずみ速度 0.005%/min.、過圧密比 1.0, 2.0, 5.9 における非排水三軸試験結果を示す¹⁾。どの過圧密比においても明確なピーク点がみられ、典型的なひずみ軟化挙動を示している。これについて本構成式を用いてシミュレーションした結果を図-3 に示す。解析パラメータは表-1 のとおりである。いずれもピーク点を過ぎた後の強度低下を再現している。過圧密領域においては、粘塑性膨張をとるような軸差応力の低下を表現する。変相応力線より上では $\varepsilon_{kk}^{vp} < 0$ つまり粘塑性膨張となるので、OCR=2.0 については実験結果にみられるピーク直後の有効応力の減少を表現できていない。

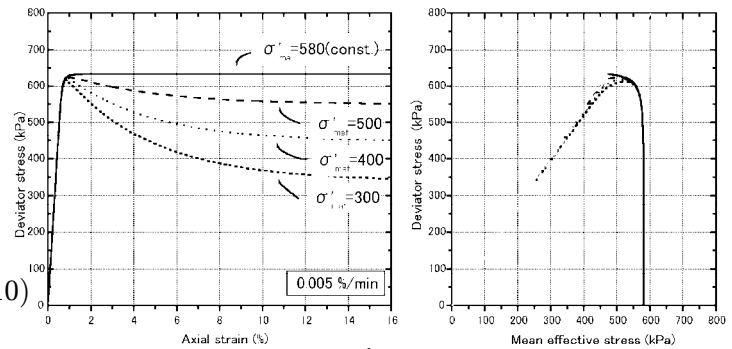


図-1 パラメータ σ'_{maf} による違い (解析)

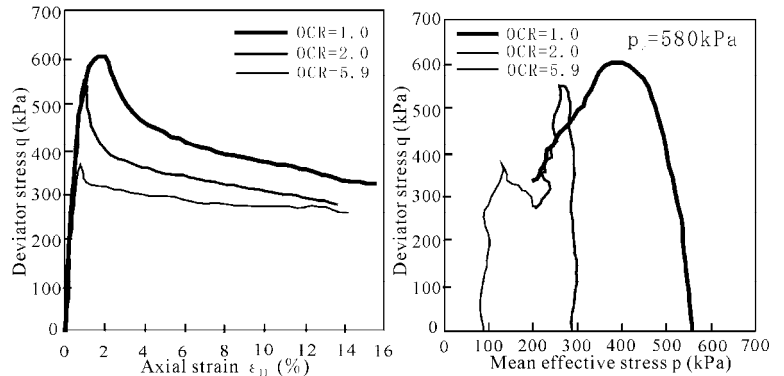


図-2 応力-ひずみ関係, 有効応力経路¹⁾(実験)

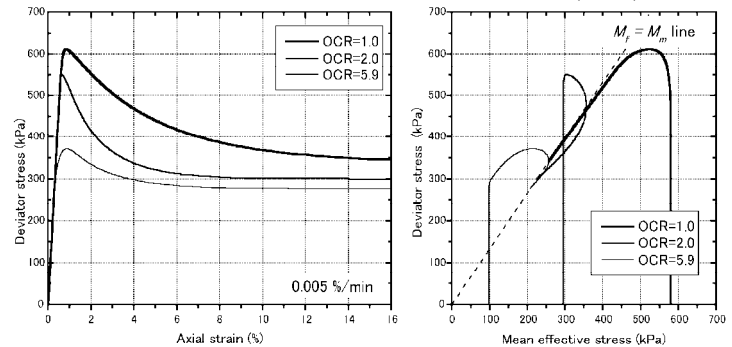


図-3 応力-ひずみ関係, 有効応力経路 (解析)

表-1 解析パラメータ

	OCR=5.9	OCR=2.0	OCR=1.0
初期平均有効応力 σ'_{mai} (kPa)	98	294	580
せん断弾性係数 G_0 (kPa)	31600	31600	31600
圧縮指数 λ	0.508	0.508	0.508
膨張指数 κ	0.0261	0.0261	0.0261
初期間隙比 e_0	1.70	1.70	1.70
圧密降伏応力 σ'_{mbi} (kPa)	580	580	580
変相応力比 M_m^*	1.09	1.09	1.09
破壊応力比 M_f^*	1.09	1.09	1.09
粘塑性パラメータ m'	18.5	18.5	18.5
" C_{01} (1/s)	1.0×10^{-10}	4.0×10^{-13}	1.3×10^{-13}
" C_{02} (1/s)	1.4×10^{-10}	4.0×10^{-13}	3.3×10^{-13}
構造の変化に関するパラメータ σ'_{mai} (kPa)	580	580	580
" σ'_{maf} (kPa)	370	290	300
" β	40	45	20

参考文献

- 1) 八嶋厚・重松宏明・岡二三生・長屋淳一：上部大阪洪積粘土の力学特性と構造変化，土木学会論文集，No. 624/ -47，pp. 217-229, 1999.
- 2) Adachi, T., Oka, F. and Mimura, M. : An elasto - viscoplastic theory for clay failure, Proc. 8th Asian Regional Conference on SMFE, Vol. 1, pp.5-8, 1987.