

第Ⅲ部門

弾粘塑性構成式による珪藻泥岩の三軸試験のシミュレーション

京都大学大学院	学生会員	○佐名川太亮	京都大学大学院	フェロー会員	岡 二三生
京都大学大学院	正会員	木元小百合	京都大学大学院	正会員	肥後 陽介
京都大学大学院	学生会員	太田 浩史			

1. はじめに 珪藻泥岩は軟岩の中でもセメンテーション作用が高く、非常に多孔質な材料であるにもかかわらず、安定した組織形態を有する。また、珪藻泥岩は未風化・不攪乱・飽和条件を満たした状態で採取することが可能であり、均一性が高く試験の再現性が高い。前川¹⁾は、泥岩材料の力学的特性を明らかにするために、珪藻泥岩の供試体を用いた力学試験を行った。圧密非排水せん断試験の結果からは鋭敏性の高い粘土の挙動に類似することが示された。過圧密条件下で行った圧密排水せん断試験の結果からは、軸ひずみ～軸差応力関係において明確な降伏挙動が確認され、その降伏曲面は Cam-Clay model で近似できるとしている。木元は足立・岡の弾粘塑性構成式²⁾³⁾をもとに、セメンテーションなどに起因する内部構造の変化を考慮した飽和粘土の弾粘塑性構成式を誘導し、自然堆積粘土に対する検討を行っている。^{4),5)} 高いセメンテーション作用を有する珪藻泥岩に対してもこのモデルを適用することができる可能性が考えられる。そこで本報では圧密非排水三軸圧縮試験および圧密排水三軸圧縮試験について、内部構造の変化を考慮した飽和粘土の弾粘塑性構成式を用いたシミュレーションを行い、同弾粘塑性構成式の珪藻泥岩への適用性を検討する。

2. 内部構造の変化を考慮した弾粘塑性構成式

本構成式では過圧密境界面の縮小によって内部構造の変化を表現しており、過圧密境界面 f_b 、硬化～軟化パラメータ σ'_{mb} は以下のように与えられる。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} \quad (1) \quad \sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_v^{vp}\right) \quad (2) \quad \sigma'_{ma} = \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta z) \quad (3)$$

$$\bar{\eta}_{(0)}^* = \left\{ (\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*) (\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4) \quad z = \int_0^t \dot{z} dt \quad \dot{z} = \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ここで、 η_{ij}^* は応力比テンソル、 $\eta_{ij(0)}^*$ は圧密終了時の η_{ij}^* 、 M_m^* は破壊応力比、 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数、 β は σ'_{mb} の低減率を表すパラメータ、 z は粘塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ の第2不変量の累積値である。同様に静的降伏関数を式 (6) のように与え、静的降伏関数の縮小によってひずみ軟化を表現している。

$$f_y = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{my}^{(s)}} \quad (6) \quad \sigma'_{my}^{(s)} = \frac{\{\sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta z)\} \sigma'_{mai} \sigma'_{myr}^{(s)} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_v^{vp}\right)}{\sigma'_{mar}} \quad \sigma'_{myi}^{(s)} = \frac{\sigma'_{mai}}{\sigma'_{mar}} \sigma'_{myr}^{(s)} \quad (7)$$

$\sigma'_{my}^{(s)}$ は静的硬化パラメータであり、 σ'_{mar} は基準圧、 $\sigma'_{myr}^{(s)}$ は σ'_{ma} が基準圧に等しいときの $\sigma'_{myi}^{(s)}$ である。粘塑性ひずみ速度は超過応力型粘塑性理論を基に次式のように表される。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi_1(f_y) \rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (8) \quad \langle \Phi_1(f_y) \rangle = \begin{cases} \Phi_1(f_y) & ; f_y > 0 \\ 0 & ; f_y < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\gamma \Phi_1(f_y) = C_{ijkl} \exp \left\{ m' \left(\bar{\eta}_{(0)}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \quad (10) \quad C_{ijkl} = a \delta_{ij} \delta_{kl} + b (\delta_{ij} \delta_{kl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (11)$$

ここで f_p は粘塑性ポテンシャル関数であり、 $\langle \rangle$ は式 (9) のように定義する。 Φ_1 は速度依存性を表す材料関数、 $\tilde{M}^*$ はダイレイタンス係数である。 a, b は任意の定数であり、以下では $C_{01}=2b, C_{02}=3a+2b$ とする。

3. 圧密非排水三軸試験のシミュレーション

前川が行った、珪藻泥岩を用いた圧密非排水三軸圧縮試験の

シミュレーションを行う。試料は能登半島東部の珠洲地区において採取されたものを使用している。直径 5cm, 高さ 10cm に成形し, 有効拘束圧を 0.49-6.86MPa の範囲のもとで 8 供試体について, 軸ひずみ速度 0.025%/min で軸ひずみ 7 -10% まで試験を行っている。シミュレーションに用いた材料パラメータを表 1 に示す。シミュレーションに用いた材料パラメータの値については, C_{01} , C_{02} , σ'_{maf} , β はシミュレーションから求め, その他は前川が試験から直接求めた値を用いた。8 つのケースの中から, CU1, CU4, CU6, CU8 について有効応力経路と軸ひずみ～軸差応力関係における試験結果とシミュレーション結果の比較を図 1 に示す。有効拘束圧が正規圧密領域のケースでは挙動をよく再現することが出来た。過圧密領域のケースでもおおその挙動の形を再現することができた。

表 1：排水試験のシミュレーションに用いた材料パラメータ

ケース名	CU1	CU2	CU3	CU4	CU5	CU6	CU7	CU8
側圧条件 (MPa)	0.49	0.98	1.96	2.45	2.94	3.92	5.35	6.86
ひずみ速度 (%/min)	0.025							
初期せん断弾性係数 G_0 (MPa)	75.656	94.766	91.924	90.748	99.409	114.790	134.100	151.850
圧縮指数 λ	1.114							
膨張指数 κ	0.0857							
初期間隙比 e_0	2.573							
圧密降伏応力 σ'_{mai} (MPa)	2.646							
変相応力比 M_m^*	1.551							
粘塑性パラメータ m'	29.58							
粘塑性パラメータ C_1 (1/s)	1.0×10^{-16}	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}
粘塑性パラメータ C_2 (1/s)	1.0×10^{-16}	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}
構造パラメータ σ'_{maf} (MPa)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.8	1.8
構造パラメータ β	100	20	18	15	4	4	4	4

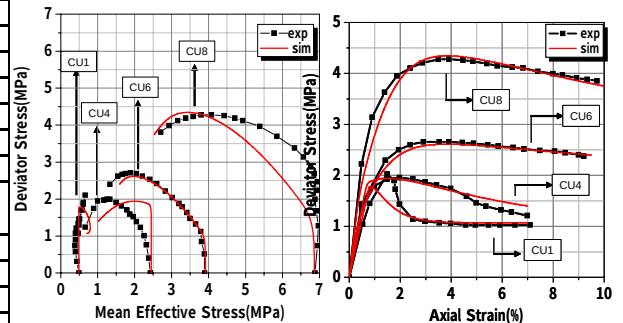


図 1：有効応力経路 軸ひずみ～軸差応力関係

4. 圧密排水三軸試験のシミュレーション 北原, 太田⁶⁾が行った珪藻泥岩の圧密排水三軸試験のシミュレーションを行う。資料は前川が用いた資料と同じ地区で採取された珪藻泥岩を使用している。一辺 4 cm, 高さ 8 cm に成形し, 有効拘束圧を 0.25-2.00MPa の範囲で, 6 ケースにおいて軸ひずみ速度 0.01%/min で軸ひずみ 20% まで試験を行った。シミュレーションに用いた材料パラメータを表 2 に示す。非排水試験のシミュレーションと同様に, C_{01} , C_{02} , σ'_{maf} , β はシミュレーションから求め, その他のパラメータの値は自ら力学試験を行った結果から求めた。6 ケースの中から CD1, CD2, CD4, CD6 について軸ひずみ～軸差応力関係と体積ひずみ～平均有効応力関係における試験結果とシミュレーション結果の比較を図 2 に示す。過圧密比が最も大きいケース (CD1) においてそのダイレイタンス挙動をうまく表現できなかったものの、それ以外のケースでは挙動を再現することが出来た。

表 2：排水試験のシミュレーションに用いた材料パラメータ

ケース名	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	CD6
側圧条件 (MPa)	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00
ひずみ速度 (%/min)	0.01					
初期せん断弾性係数 G_0 (MPa)	92.000					
圧縮指数 λ	1.292					
膨張指数 κ	0.0487					
初期間隙比 e_0	2.72					
圧密降伏応力 σ'_{mai} (MPa)	2.55					
変相応力比 M_m^*	1.551					
粘塑性パラメータ m'	28.76					
粘塑性パラメータ C_1 (1/s)	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
粘塑性パラメータ C_2 (1/s)	7.0×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}
構造パラメータ σ'_{maf} (MPa)	1.00	1.60	1.80	1.90	2.10	2.20
構造パラメータ β	7.5	7.0	7.0	6.0	3.0	2.0

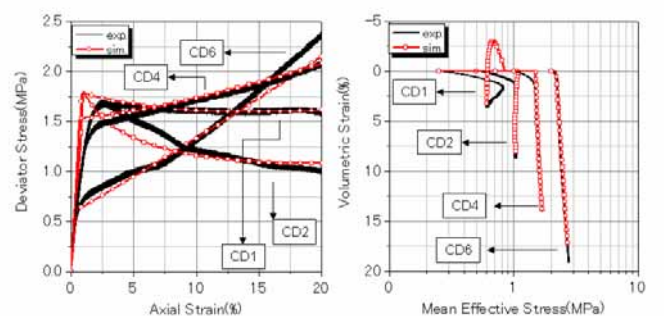


図 2：軸ひずみ～軸差応力関係 体積ひずみ～平均有効応力関係

5. まとめ 本報では内部構造の変化を考慮した飽和粘土の弾粘塑性構成式の珪藻泥岩に対する適用の検証を行った。試験結果とシミュレーション結果の比較から, 珪藻泥岩に対する同弾粘塑性構成式の適用性を確認できたと言える。今後の課題としてダイレイタンス挙動や折れ曲がり挙動をさらに正確に再現するために, パラメータや破壊線などを再考し更なる検討を行う。

参考文献 1) 前川義晴：軟質泥岩の力学的特性とその適用に関する研究, 京都大学博士申請論文 1992. 2) Adachi, T. and Oka, F.: Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity, *Soils and Foundation*, 22(4), pp.57-70, 1982. 3) Oka, F.: Elasto-viscoplastic constitutive equation for overconsolidated clay, *Proc. 1st Int. Symp. Numerical Models in Geomechanics*, Zurich, 147-156, 1982. 4) Kimoto, S.: Constitutive models for geomaterials considering structural changes and anisotropy, *Doc, Thesis, Kyoto Univ*, 2002. 5) Kimoto, S. and Oka, F.: An elasto-viscoplastic model for clay considering destructuralization and consolidation analysis, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.2, pp.29-42, 2005. 6) 太田, 小高, 岡, 北原, 今井：能登珪藻泥岩の降伏曲面と強度・変形特性, 第 41 回地盤工学研究発表会概要集, 2006.