弾粘塑性構成式を用いた三次元有限要素法による圧縮帯の解析

京都大学大学院	正会員	○肥後 陽介
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
西日本旅客鉄道株式会社(元京大院)	正会員	太田 浩史
京都大学大学院	学生会員	佐名川 太亮

1. はじめに

圧縮帯はひずみの局所化現象の一種であり、自然露頭した砂岩の観察において、変形局所帯(deformation bands)は せん断帯(shear bands)と圧縮帯(compaction bands)に大別されることが示された¹⁾. せん断変形が卓越し体積変化は膨 張と圧縮を伴うせん断帯に対して,圧縮帯は最大主応力方向にほぼ垂直に体積圧縮が卓越する変形帯である.また、 多孔性軟岩である珪藻泥岩の排水三軸圧縮試験においても圧縮帯が観察している²⁾. そこで本研究では、弾粘塑性 構成式³⁾を用いた三次元有限要素法⁴⁾により、珪藻泥岩の角柱供試体を用いた排水三軸圧縮試験の数値シミュレー ションを行い、圧縮帯が発生する解析条件について検討し、解析で得られた圧縮帯の変形モードを示した.

2. 弾粘塑性構成式を用いた有限変形三次元水-土連成有限要素法

シミュレーションに用いた解析法は、有限変形三次元水ー土連成有限要素法であり、有効 Cauchy 応力の Jaumann 速度を用いた updated-Lagrangian 法を用いて定式化した⁷⁾.構成式は、内部構造変化を考慮した弾粘塑性構成式³⁾であり、珪藻泥岩に対する同弾粘塑性構成式の適用性が検証されている⁵⁾.粘塑性流れ則より、粘塑性ストレッチ ングテンソル Dⁱⁿ は以下のように与えられる.

$$D_{ij}^{vp} = C_{ijkl}\sigma'_m \exp\left[m'\left(\overline{\eta}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}}\right)\right]\frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}}$$
(1)

ここで,m'および C_{ijkl} は粘塑性パラメータで, C_{ijkl} は以下のように定義され,偏差成分 C_{01} と等方成分 C_{02} に分けられる.

 $C_{ijkl} = a\delta_{ij}\delta_{kl} + b(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}), \quad C_{01} = 2b, \quad C_{02} = 3a + 2b$ (2) また, σ'_{ij} はTerzaghiの有効応力テンソル, σ'_{m} は平均有効応力, η^* は相対応力比, σ'_{mb} は内部構造変化を考慮した硬化一軟化パラメ ータ, f_p はCam-clayタイプの粘塑性ポテンシャル関数, \tilde{M}^* はダ イレイタンシー係数である.

3. 珪藻泥岩の排水三軸圧縮試験の数値シミュレーション

珪藻泥岩の角柱供試体の排水三軸圧縮試験において圧縮帯 が観察された,圧密降伏応力以下でかつ高拘束圧条件である 有効拘束圧 2MPaのケース CD6を数値シミュレーションした. 解析の境界条件を図-1 に示す.上端面に摩擦境界を適用し, 鉛直方向にひずみ速度 0.01%/min で軸圧縮した.解析は4ケ ース行い,それぞれの解析に用いたパラメータを表-1 に示す. CD6 のパラメータは,等方圧密試験結果および排水三軸試験 の要素シミュレーションから決定した⁵⁾. CD6-a, CD6-b, CD6-c のパラメータの設定については結果と共に示す.



図-1 解析の境界条件

表-1	解析パラ	メータ
-12		/ /

ケース名	CD6	CD6-a	CD6-b	CD6-c
供試体条件	均質	均質	均質	不均質
有効拘束圧(MPa)		2.0	00	
初期せん断弾性係数 G ₀ (MPa)		92.0	000	
王縮指数 λ		1.2	292	
膨潤指数 κ		0.0	487	
初期間隙比e ₀		2.	72	
王密降伏応力 ơ' _{mbi} (MPa)		2.	55	
変相応力比 Mm*		1.5	551	
粘塑性パラメータ m'		28	.76	
粘塑性パラメータ C ₀₁ (1/s)	1.0×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁶	5.0×10 ⁻⁷	5.0×10 ⁻⁷
粘塑性パラメータ C ₀₂ (1/s)	1.5×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁵	5.0×10 ⁻⁶	5.0×10 ⁻⁶
冓造パラメータ σ' _{maf} (MPa)		2.2	20	
構造パラメータβ		2.	0	
透水係数 k (m/sec)		1.55	×10 ⁻⁹	

キーワード	圧縮帯,弾粘塑性構成式,有限要素法	
連絡先	〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4CクラスターC1棟	TEL 075-383-3193

図-2 に応力-ひずみ関係, 図-3 に軸ひずみ 10% における体積ひずみ ε_i および蓄積粘塑性偏差ひず み γ^p (= $\int d\gamma^p$, $d\gamma^p = \sqrt{de_{ij}^{vp} de_{ij}^{vp}}$, de_{ij}^{vp} :粘塑性偏 差ひずみ増分テンソル)を示す. 圧縮帯は, 最大 主応力方向にほぼ垂直に圧縮が卓越する変形局所 帯であり,本解析においては水平方向に圧縮体積 ひずみが局所化する変形モードが圧縮帯である.

要素シミュレーションによりパラメータを決定 した CD6 では、上部側面に端面摩擦に起因する大 きな圧縮変形が見られるが、それ以外のひずみ分 布はほぼ均一であり、圧縮帯は発生していない.

同構成式で自然堆積粘土の体積変化を適切に表 現する場合,粘塑性偏差ひずみを制御するパラメ ータ C_{01} よりも粘塑性体積ひずみを制御するパラ メータ C_{02} を最大で10倍程度大きく設定する^の. そこで,CD6-aではCD6よりも C_{02} を10倍大き く設定して解析を行ったところ,体積ひずみ ε_v が 水平方向に局所化する圧縮帯の変形モードが見 られた(図-3(a)).また, γ^p も水平方向に分布 しており,せん断帯の変形モードは見られていな い.しかし,図2の応力ーひずみ関係を見ると, 実験結果に比べて軸差応力が小さい事がわかる.

そこで、CD6-b では粘塑性パラメータ C_{01} と C_{02} をCD6-aの半分に低減したところ、図2の応





カーひずみ関係は実験結果に近づくが、 $\varepsilon_v \delta \gamma^p \delta t$ にば均一に分布し圧縮帯の発生は見られなかった(図-3(b)).

CD6-c では材料が潜在的に持つ不均質性を考慮して、図-4 に示すように擬似一様乱数を用いて各要素の粘塑性パラメータ C_{02} に幅 5%の揺らぎを与えて解析を行った.他は CD6-b と同じパラメータを用いた.図-3(c)のひずみ分 布図と図-4の C_{02} の分布を比べると、 C_{02} が大きい部分でより大きな体積ひずみが発生し、その箇所をトリガーとして体積ひずみ ε_v および γ^p は水平方向に局所化しており、圧縮帯の変形モードが見られた.

以上より,粘塑性体積ひずみを制御する粘塑性パラメータ*C*₀₂を,粘塑性偏差ひずみを制御する粘塑性パラメー タ*C*₀₁の10倍に設定すると,水平方向にひずみが局所化し圧縮帯の変形モードが現れたが(CD6-a),粘塑性パラメー タの絶対値が小さくなると局所化が見られなくなる事(CD6-b),さらに絶対値が小さい条件でも乱数を適用し材料の 不均一性を考慮する事で圧縮帯が現れる事がわかった(CD6-c).

4. まとめ

弾粘塑性構成式を用いた三次元有限要素法により珪藻泥岩の排水三軸圧縮試験の数値シミュレーションを行った. その結果,要素シミュレーションで決定したパラメータのうち粘塑性パラメータC₀₂をC₀₁より大きく再設定する事, 材料の不均質性を考慮する事により,水平方向に圧縮ひずみが局所化する圧縮帯の変形モードを表現できた.

参考文献

1) Mollema P.N. and Antonellini M.A., Tectonophysics, 267, pp.209-228, 1996., 2) Kodaka T., Oka F., Kitahara H., Ohta H., and Otani J., GeoX2006, Aussois, France, Oct.4-7, Desrues, J. et al. eds., iSTE, pp.185-191, 2006., 3) Kimoto, S. and Oka, F., Soils and Foundations, 45, 2, pp.29-42, 2005., 4) Higo Y., Oka F., Kodaka T. and Kimoto S., Philosophical Magazine, 86, 21-22, pp.3205-3240, 2006., 5) 佐名川, 岡, 木元, 肥後, 太田, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007., 6)渡辺, 肥後, 長屋, 岡, 第 41 回地盤工学研究発表会, 165, 鹿児島, 2006.