

京都大学	学生会員	○太田浩史
京都大学大学院	正会員	小高猛司
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	北原秀樹
京都大学大学院	学生会員	今井政之

1. はじめに

地盤材料の変形局所帯は、従来から研究されてきたせん断帯(shear bands)と圧縮帯(compaction bands)に大別される¹⁾。compaction bands とは、最大圧縮主応力方向に対して垂直または極めて垂直に近い形で発生する水平または低角度な変形局所帯であり、大きな体積圧縮ひずみの発生を伴うひずみの変形局所帯を言う²⁾。実地盤での圧縮帯の発生は想定外の地盤沈下の原因となり、周囲と比べ間隙の減少による透水係数の低下が報告されている³⁾。供試体レベルでの圧縮帯の発生は、高拘束圧条件下における多孔性砂岩の排水三軸圧縮試験で多く観察されている^{4),5)}。一方、能登珪藻泥岩は圧密排水試験において有効拘束圧のレベルに応じて様々な破壊形態を呈し、特定の拘束圧条件下では一次元的な圧縮変形をすることが報告されている⁶⁾。本報では圧縮帯の観察を目的とし、能登珪藻泥岩を対象として高圧三軸試験機を用いて種々の有効拘束圧条件下で圧密排水試験を行った。また、画像解析を利用して供試体側面のひずみの局所化挙動の観察を試みた。

2. 実験に用いた試料

実験に用いた能登珪藻泥岩は珪藻の遺骸と粘土からなる多孔質な試料であり、未風化で飽和状態であるものを堆積方向に留意して供試体を切り出した。今回の実験では、堆積方向が軸圧縮方向と垂直になるようにストレートエッジを用いて整形し、縦×横×高さが4×4×8cmとなる角柱供試体を用いた。

3. 実験方法および画像解析手法

表1に試験条件を示す。背圧は全試験で1MPaであり、所定の有効拘束圧で等方圧密した後に、軸ひずみ速度0.01%/minで軸ひずみ20%までせん断を行った。

また、本報では画像解析を用いて、供試体側面のひずみの局所化挙動を観察した。あらかじめメンブレン(厚さ0.5mm)

表1 試験条件一覧

No.	有効拘束圧 (MPa)
Case-1	0.25
Case-2	0.50
Case-3	0.75
Case-4	1.00
Case-5	1.50
Case-6	2.00

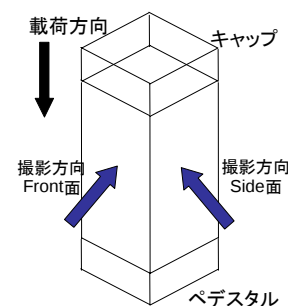


図1 撮影方向

上に、直径1mmの黒色ターゲットを2mm間隔正方形配置でプリントしておき、三

軸圧縮中に角柱供試体の隣り合う2側面を軸ひずみ0.5%ごとにCCDカメラを用いて定点撮影した(図1参照)。取得したデジタル写真は明度が不均一であったため、デジタル写真を小領域に分割し、その領域ごとに閾値を設定することで二値化処理を施し精度の高い二値化処理を行った。最終的に決定した各粒子の座標は、近傍の4点で正方格子を構成し、初期状態の座標からの各粒子の変位を用いて、1次の変位の内挿関数を用いて、格子内のせん断ひずみと体積ひずみを計算した。実際の変形は3次元であるが、ここでは画像で計測される表面の2次元成分だけで考え、軸ひずみ ε_a 、せん断ひずみ γ 及び体積ひずみ ε_v は次式のように定義した。

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{11}, \quad \gamma = \sqrt{e_{ij}e_{ij}}, \quad \varepsilon_v = \varepsilon_{ii}, \quad i, j = 1, 2 \text{ (2次元平面成分のみ考慮, 1方向が鉛直成分)}$$

ここに、 e_{ij} は偏差ひずみであり、 $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - (\varepsilon_v/2) \cdot \delta_{ij}$ 、 δ_{ij} :クロネッカーのデルタ、である。

4. 実験結果

図2に圧密排水試験の結果を示す。図2(a)に示す軸差応力～軸ひずみ関係を見ると、Case-1, Case-2は折れ曲がり後にひずみ軟化挙動が見られるが、Case-3～Case-6は折れ曲がり後に単調なひずみ硬化挙動が見られる。図2(b)に示す間隙比～平均有効応力関係における屈曲点の平均有効応力の値に対応する点が図2(c)に示す有効応力

経路に黒丸でプロットされた点であり、プロット点を結ぶことで能登珪藻泥岩の初期降伏曲面の形状が得られる。また、平均有効応力軸上の点は等方圧密試験により得られた圧密降伏応力である。

図3にPTV画像解析の結果を示す。PTV画像解析の結果として、試験終了時における front 面 side 面の軸ひずみ(ϵ_a), せん断ひずみ(γ), 体積ひずみ(ϵ_v)分布図を示しており、体積ひずみ分布図に関しては-が膨張で+が圧縮で、出力範囲は全て0~25%とした。有効拘束圧が低い Case-1 では供試体が破断するほどのせん断変形が見られるが、Case-2~Case-6 へと有効拘束圧が高くなるのに伴いせん断変形の程度は小さくなるとともに、供試体の一部が水平方向に局所的な圧縮変形を示す傾向が強くなる。供試体における水平方向に局所的な軸圧縮は特に有効拘束圧 1.0MPa 以上で顕著になり、水平方向の体積圧縮域は一箇所ではなく複数個所認められる。水平方向にせん断ひずみよりも体積圧縮ひずみの局所化の程度が大きいケース Case-5, Case-6 は圧縮帯の発生が明確に確認できる。

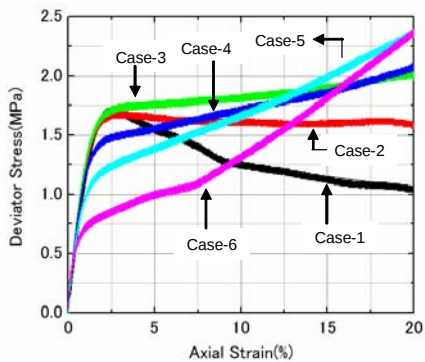


図 2(a) 軸差応力~軸ひずみ関係

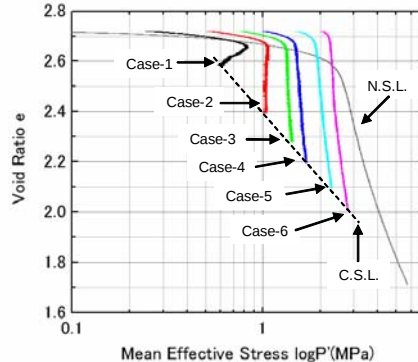


図 2(b) 間隙比~平均有効応力関係

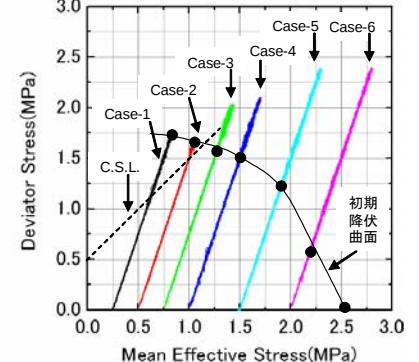


図 2(c) 有効応力経路

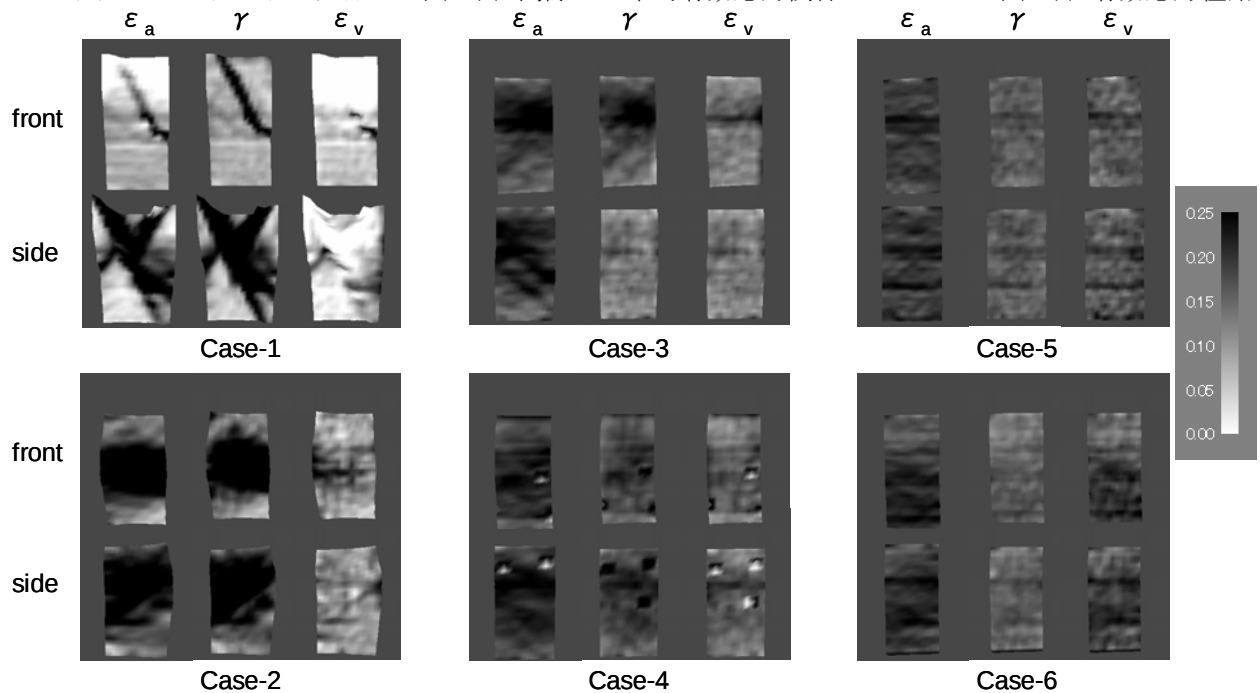


図 3 PTV 画像解析の結果

5. まとめ

本研究では、三軸圧縮条件下における多孔質軟岩の圧縮帯の観察を目的とし、能登珪藻泥岩を用いて種々の圧密排水試験を行った。PTV 画像解析の結果から、珪藻泥岩はせん断過程における有効拘束圧の違いによって変形の分岐挙動に違いが見られた。すなわち、応力経路が初期降伏曲面と交差する場所に応じて、(1)せん断帯のみが発生する場合、(2)せん断帯と圧縮帯がともに発生する遷移領域が認められる場合、(3)せん断変形よりも圧縮変形が卓越し圧縮帯が発生する場合、以上の3つの場合があるとの知見を得た。

[参考文献] 1) Mollema, P.N. and Antonellini, M.A. : Compaction bands : a structural analog for anti-mode I cracks in aeolian sandstone, *Tectonophysics*, 267, 209-228, 1996. 2) Issen, K.A. : The influence of constitutive models on localization conditions for porous rock, *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 1891-1906, 2002. 3) Holcomb, D.J. and Olsson, W.A. : Compaction localization and fluid flow, *Journal of geophysical research*, 108, (B6/ECV), 2-1 - 2-13, 2003. 4) Olsson, W. A. : Theoretical and experimental investigation of compaction bands in porous rock, *J. Geophysical research*, 104, (B4), 7219-7228, 1999. 5) Wong, T-f. , Baud, P. and Klein, E. : Localised failure modes in compactant porous rock, *Geophys. Res. Lett.*, 28, (13), 2521-2524, 2001. 6) 前川晴義, 宮北啓 : 珪藻質軟岩の力学的特性, 土木学会論文報告集 No.334, pp.135-143, 1983.