

画像解析及び X 線 CT 法による能登珪藻泥岩のひずみの局所化挙動の観察

京都大学 学生会員 ○太田 浩史 名城大学大学院 正会員 小高 猛司
 京都大学大学院 フェロー会員 岡 二三生 熊本大学大学院 正会員 大谷 順
 京都大学大学院 正会員 北原 秀樹 京都大学大学院 学生会員 今井 政之

1. はじめに：近年、従来から研究が行われてきたせん断帯(shear band)とは異なる変形局所帯のモードである圧縮帯(compaction bands)が注目されている¹⁾。圧縮帯とは、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変形局所帯であり、大きな体積圧縮ひずみの発生を伴う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、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、高有効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観察されている^{4), 5)}。一方、高間隙と高強度を有する能登珪藻泥岩は圧密排水試験(CD 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、特定の有効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、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応力経路の圧密排水試験を行った。また、三軸圧縮中の角柱供試体を撮影したデジタル画像を用いて画像処理及び画像解析を行い、供試体側面のひずみの局所化挙動を定性的・定量的に調べた。加えて、産業用 X 線 CT スキャナ装置を用いて供試体内部の密度変化を調べた。

2. 試料及び実験方法：実験に用いた能登珪藻泥岩は、石川県珠洲市の採土横穴坑道の切羽から堆積方向に留意してブロック塊(縦 30cm×横 30cm×高さ 15cm)で切り出されたものであり、特徴として未風化で乱れておらず、飽和に近い含水状態であることが挙げられる。本試料は珪藻遺骸と粘土を主な成分としており、非常に多孔質な材料である。本試料を角柱供試体(縦 4cm×横 4cm×高さ 8cm)に成形し、所定の有効拘束圧(表 1 参照)で等方圧密した後、軸ひずみ速度 0.01%/min で圧密排水試験(CD 試験)を行った。

3. 画像解析の手法：本報では、PTV 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。画像解析のためにあらかじめメンブレン(厚さ 0.5mm)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精度の高い二値化処理を行った。最終的に決定した各黒色ターゲットを近傍の 4 点で正方格子を構成させて、初期状態の座標からの各粒子の変位に 1 次の内挿関数を用いて、格子内部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、ここでのひずみと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。

また、供試体内部の密度変化を観察するために用いた産業用 X 線 CT スキャナ装置(熊本大学)は、X 線の照射が開始すると X 線発生装置と検出器の間を試料台が並進移動と回転運動を繰り返す事で 360 度方向からの供試体内部の情報を得ることが可能である。取得した X 線 CT 画像を取り扱う際に重要になるのが WW(Window Wide)と WL(Window Level)の設定であり、WW とは 256 階調表示する CT 値の範囲を決定するパラメータで、CT 画像は WL の値を中心として WW の範囲で表示される。本報における供試体の画像取得断面は図 2 に示す白線の通りであり、front 面に平行に撮影した。また、CT 画像は全てのケースにおいて WW=400, WL=400 で表示した。

4. 実験結果：図 3 に圧密排水試験の結果を示す。図 3(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 は折れ曲がり後にも単調なひずみ硬化挙動が見られる。図 3(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を読み取り、図 3(c)の有効応力経路にプロットしたものが黒丸で示された点である。黒丸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⁷⁾。

図 4 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、

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

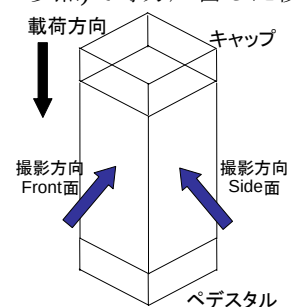


図 1 撮影方向

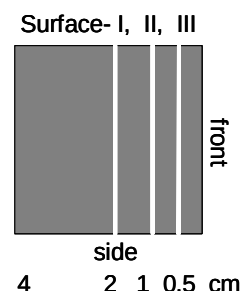


図 2 CT 画像取得断面

キーワード：圧縮帯、ひずみの局所化、珪藻泥岩、画像解析

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-753-5086

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 Case-5, Case-6 は圧縮帯の発生が明確に確認できる⁸⁾。

図 5 に試験終了後の供試体 X 線 CT 画像を示す。初期状態から若干の密度の高低差が認められるが、供試体内部の特定の部位に低密度領域が偏在する様子は見られない。PTV 画像解析結果から供試体の破断が確認された Case-1 は、破断面がクラックとして現れている。一方で、せん断帯が認められた Case-2 はせん断帯発生部において明確な密度変化は見られない。また、Case-3 は初期状態の低密度領域が縞状に存在しているが、これは局所的な圧縮の発生に伴い、圧縮していない部分が縞状に残ったものと考えている。さらに高拘束圧の Case-4, Case-6 には縞状の低密度領域は見られなくなるが、特に Case-6 では PTV 画像解析で明確に軸圧縮と体積圧縮が観察された供試体下部において、明確な高密度領域が X 線 CT 画像でも観察することができ、圧縮帯の存在を示すことができる。しかしながら、全ケースに PTV 画像解析の方が明確にひずみの局所化を捉えているのは、X 線 CT スキャナ装置の解像度よりも PTV 画像解析の解像度の方が高いことが理由として挙げられる。

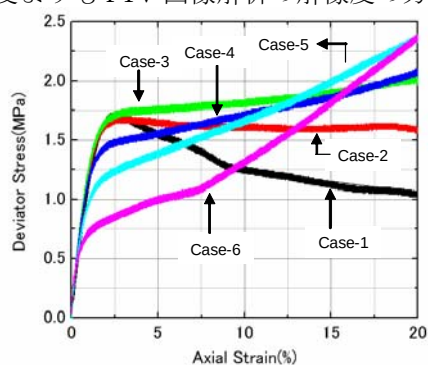


図 3(a) 軸差応力～軸ひずみ関係

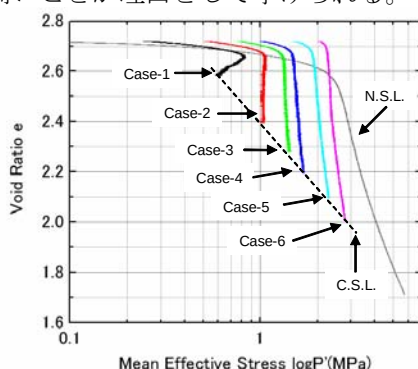


図 3(b) 間隙比～平均有効応力関係

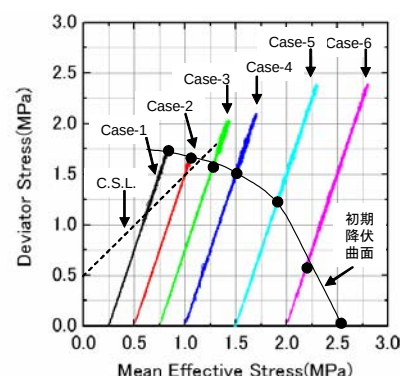


図 3(c) 有効応力経路

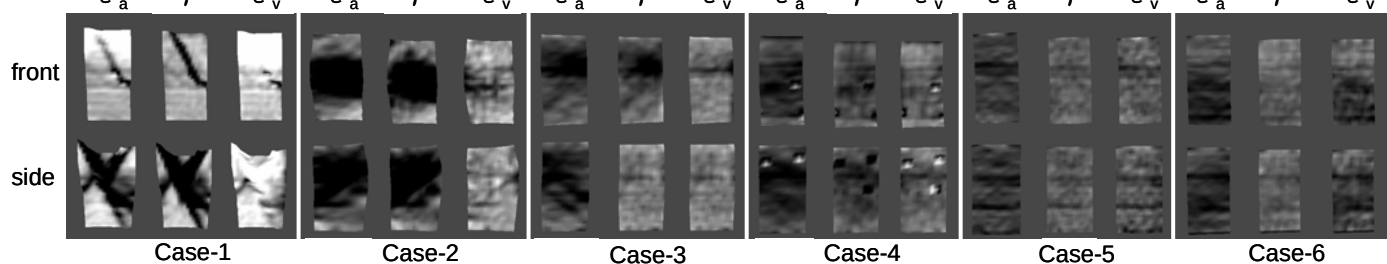


図 4 PTV 画像解析の結果

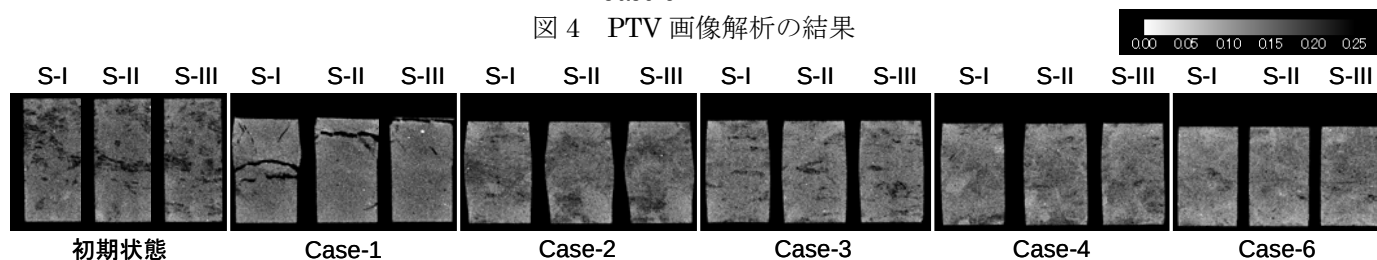


図 5 試験終了後の供試体 X 線 CT 画像

5. まとめ：本報では、三軸圧縮条件下における多孔質軟岩の圧縮帯生成とその生成条件の解明を目的とし、能登珪藻泥岩を用いて種々の応力経路の圧密排水試験を行った。その結果、供試体側面におけるひずみ分布図とCT画像の双方から、明確な圧縮帯の観察に成功した。また、能登珪藻泥岩はせん断過程における応力経路の違いによって変形の分岐挙動に違いが見られ、応力経路が初期降伏曲面と交差する場所と角度に応じて、(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パターン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 aelion 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. 7) 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. 8) 北原, 小高, 岡, 太田, 今井 : 画像解析による能登珪藻泥岩のせん断帯ならびに圧縮帯の観察, 第 41 回地盤工学研究発表会概要集, 2006.