

画像解析手法による不連続面のクリープ挙動の把握

Comprehension of Creep Behavior of Discontinuity with Image Analysis

吉田 秀典¹⁾, 則包 智彦²⁾

Hidenori YOSHIDA and Tomohiko NORIKANE

1) 香川大学工学部 (〒761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp)

2) 扶桑建設工業株式会社 (〒760-8551 高松市番町 2 丁目 16-3 E-mail: t.norikane@fusokensetsu.co.jp)

The mechanical and hydraulic behaviors of the rock mass have strong correlations respectively. In this study, flow-deformation coupled experiments are conducted with focusing on the local deformation of the discontinuity. Moreover, the image analyses are carried on with the pictures taken during the experiments. As the results, not only displacement distributions but also strain distributions are obtained by the image analysis which is a sort of a pattern-matching scheme in the field of image data processing. The local behaviors such as deformation and failure which cannot be discussed from macroscopic measured data are captured by the image analysis.

Key Words: image analysis, discontinuity, deformation, creep

1. 緒言

LPG, LNG の地下貯蔵施設や CO₂ の地中固定については, 対象となる岩盤の長期安全性 / 健全性を確保する必要がある. こうした岩盤構造物の長期安定性について検討するためには, 種々の条件下におけるクリープ現象を把握する必要がある. したがって, 一軸応力下におけるクリープ試験よりも三軸応力下におけるクリープ試験が望ましい. 一般に, 三軸試験では, 円柱状に加工した試料をアクリル円筒容器の中に入れて水圧を作用し, それから円柱体の軸方向より載荷を行う. この場合, 載荷重や巨視的な変位量の計測は可能であるが, 供試体は水没していること, また, 供試体にはゴムスリーブなど被せられるのが一般的であることから, 供試体に計測デバイス類を設置することが困難で, 故に, 局所的な変形を捉えることは困難である⁽¹⁾.

一般に, 実岩盤では, その変形挙動や透水挙動を支配しているのは内包される不連続面と言われているが, 実験室レベルでさえ, 不連続面の変形挙動を的確に捉えている事例は少ない. 検討が行われていても, 極めて小さな供試体 / 不連続面を対象としており^(2, 3, 4), 実岩盤のクリープ現象を考えるにあたって, これらが必ずしも十分な知見を与えているとは, 必ずしも言えない.

そこで本研究では, 画像解析を用いて, 不連続性岩盤におけるクリープ挙動, 特に, 不連続面の変形挙動の把握の可否について検討を行う.

2. 試験概要

本研究では, 対象を不連続性岩盤としていることから, 不連続面を含む供試体に対してクリープ試験を実施した. 実岩盤における節理などの不連続面を考えた場合, 室内試験においても, それなりの寸法の不連続面が内包されていることが望ましい. そこで本研究では, 供試体を 2 分するような不連続面を供試体に挿入した. こうした不連続面を内包する供試体に対して, 3 次元の応力を作用させてクリープ試験を実施するには, 岩盤不連続面の一面せん断試験方法 (地盤工学会, JGS 3821-2006 岩盤不連続面分布の幾何学的情報に関する調査方法) に掲げられたような一面せん断タイプの試験機ではなく, 別途, 試験機が必要となる.

吉田らは, 3 次元応力下にて, 不連続面の変形と透水性能の変化という連成現象の解明と, 既存あるいは新規発生不連続面の変形と透水特性の評価を目的として, 供試体の変形量と透水量の同時測定を可能とする装置の開発を行っている (特許公開番号: 特開 2008-46086, 発明の名称: 透水試験機および透水試験方法)⁽⁵⁾. 本研究では, この装置を用いて不連続面を含む供試体に対してクリープ試験を実施した.

試験装置は平面ひずみ圧縮試験をベースとしているので, 面外方向の変形を拘束しながら側部から拘束圧を作用し, 底部の垂直方向の変位を固定して上部より変位制御で載荷を行う. この試験装置では, 載荷とともに, 供試体の面外方向に透水試験が実施できる. したがって, この方向と平行になるようにあらかじめ不連続面を挿入する.

供試体を試験装置に設置すると, その前後には, 変形を詳

2011 年 9 月 25 日受付, 2011 年 11 月 7 日受理

[†]Dedicated to the memory of Prof. Takuo FUKUI

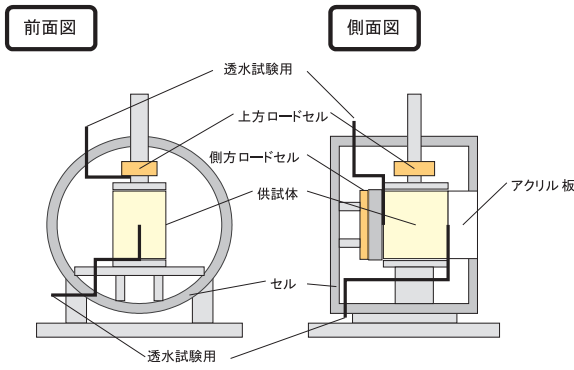


Fig. 1 Test apparatus

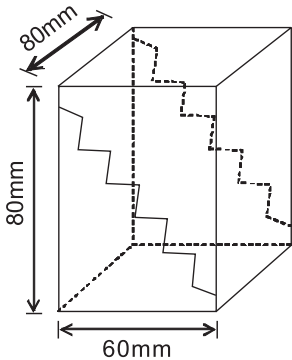


Fig. 2 Test piece

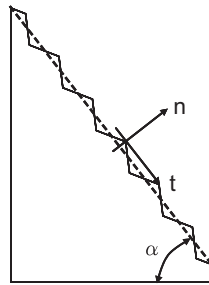


Fig. 3 Discontinuity

細に観察するためのアクリル板（幅 60 mm，高さ 80 mm）と金属板で挟まれる．これらの板によって供試体の面外方向の変形が拘束され，平面ひずみ状態が確保される．また，このアクリル製の観察窓を通して，供試体の変形に追従するメンブレンの動きを捉えることができる（Fig.1 参照）．本研究では，この観測窓にデジタルカメラを接眼し，任意の段階で供試体を撮影し，それを用いて画像解析を実施した．試験装置の詳細については，文献⁽⁵⁾を参照されたい．

本研究では，試験の再現性などを重視し，天然の岩盤／岩石ではなく，豊浦標準砂・石膏・水をベースとした人工供試体を用いることとした．また，試験機器の制約（試験機の容量が約 100 kN）と供試体の寸法を考慮し，石膏：砂：水：混和剤の比が，1:1:0.5:0.002 となるように配合した．混和剤には分離低減材（グリオキサール処理水溶性セルロースエーテル）を用い，水と石膏の分離ともなうブリージングを抑制した．不連続面の挿入については，全く同一形状の供試体を 2 つ用意し，それら 2 つを合わせることで単一不連続面を有する供試体を作製した．なお，2 つを合わせたサイズは，80 mm × 80 mm × 60 mm である（Fig.2 参照）．不連続面を有する供試体における作製の詳細についても，文献⁽⁵⁾を参照されたい．

単一不連続面は，Fig.3 に示すような 80.0 mm（奥行）× 100.7 mm（幅 = 斜辺方向の長さ）の平面として，供試体の水平面から 52 度（図中の α ）傾いた位置に入る．その形状については，天然の岩盤における不連続面が，少なからず起伏を

有していることから，奥行方向一定の三角波（波長 16.8mm，振幅 2mm）とする．このように単純な形状とする理由は，複雑さを排除して，不連続面形状が変形に及ぼす影響の程度などを評価しやすくするためである．

本研究では，上述した試験機および供試体を用いて，平面ひずみ圧縮試験と同時に透水試験を実施した．メンブレン上下面と載荷板の間にグリースを塗布することで載荷板と供試体に生じる摩擦の低減を図った．同様にして，前後方向（面外方向）もグリースでメンブレンとアクリル板および金属板の摩擦の低減を図っている．載荷については，クリープ応力に達するまでは変位制御による単調載荷（ひずみ速度：0.002 %/s）を行い，クリープ応力（静的試験のピーク応力 × 60%）に達した後は，応力を一定に保つ．拘束圧に関しては 0.5，1.0 MPa という 2 種類にて試験を行った．静的試験のピーク応力については，別途実施した静的試験より得ている．試験では，Fig.2 の不連続面がアクリル板より見えるように，つまり，Fig.2 の手前に見える 80 mm × 60 mm の面がアクリル板と平行になるように設置した上で，Fig.2 の底面を金属板に置いて（つまり，鉛直方向の変位を固定），頂面より載荷を行った．

3. 画像解析の概要

本研究では，平面ひずみ圧縮同時透水試験において，巨視的な変位や流量を計測することに加え，試験装置に設けられた観測窓（アクリル板）を通して，供試体の変形をデジタルカメラを用いて撮影し，その後，画像解析を実施した．

著者らの一部は，構造物や地盤の変形を捉える手法として，画像解析手法の一つであるテンプレートマッチング⁽⁶⁾を拡張した手法を提案かつ活用している^(7, 8)．この手法は，非接触の二次元変位場解析手法である．デジタルカメラやデジタルビデオを用いて供試体表面の画像を撮るだけで変位を計測でき，さらに変位場よりひずみ場を求めることもできるため，適応範囲が広いだけでなく，工学的に貴重なデータを得ることが可能である．なお，計測精度は，デジタイズした画像の 1 画素の寸法に依存することとなる．

本手法の手順であるが，まず，供試体を覆うメンブレンのアクリル板に面する一面にのみ 5 × 5 本の格子を引く．この格子が引かれた正方形のエリアが解析の対象範囲となる．線幅は約 0.5mm，各グリット幅は 4.5mm としている（Fig.4 参照）．格子線は市販の油性ペンを用いるので，おおよその値となる．メンブレンで包んだ供試体を試験機に設置後，観測窓（アクリル板）を通してデジタルカメラによる画像取得を行う．クリープ試験は長時間に及ぶため，手動による撮影は困難であることから，コンピュータ制御により無人状態で 1 時間毎に自動撮影する．試験後，取り込んだ画像を 24bit のビットマップファイルに変換する．解析画像領域におけるピクセルは縦 900 画素 × 横 900 画素，解像度は約 830dpi となっている．そのため，1 画素（1dot）ずれることによる誤差は約 30 μ m となる．ビットマップファイルにおいては，1 画素あたりの画像データは数値データとなって示されている．

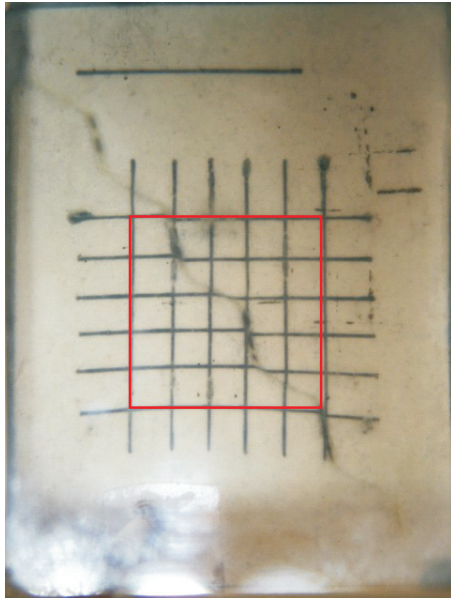


Fig. 4 Shot image (before test)

なお、実際に画像解析の対象となる部分は画像 (Fig.4) の中央部であり、レンズ補正の対象となる外周部近傍は解析の対象としていないことから、レンズ補正などは行っていない。

メンブレンに描いた格子を含む画像の部分領域を追跡することにより、移動量を算出するため、切り出すマスク領域は1つの格子が入る程度の大きさに設定する。追跡の一例として、時間 t における画像概念図を Fig.5 に示す。切り出すマスク領域は、画素としての座標 (4, 8) を基準とし 5 画素四方とする。これよりも δt の時間が経過した後の画像概念図を Fig.6 に示す。時間 t における 5 画素四方の範囲が移動した場所を探すために、全データに対して 1 画素ずつ移動させ、5 画素四方の範囲内にある画素同士の階調差の 2 乗和をとる。その差が最小となる領域が 5 画素四方の範囲が移動した場所であり、その移動距離がマスク領域の移動距離となる。例えば、Fig.5 と Fig.6 の比較を行うと、マスク領域は、 x 方向に-4 画素、 y 方向に-3 画素移動したということになる。実際の変位量を求めるには、あらかじめメンブレンに一定の長さの線を引いておく。試験開始前に撮影した画像 (Fig.4) より画像におけるその線の画素数を求めることにより、1 画素の実際の長さを算出することが可能となる。なお、本試験では、格子 1 辺の長さが 4.5mm であることから、これが目安となる。

4. 平均ひずみの算出

4 点 $A(x_a, y_a)$, $B(x_b, y_b)$, $C(x_c, y_c)$, $D(x_d, y_d)$ で、それぞれ変位が (u_a, v_a) , (u_b, v_b) , (u_c, v_c) , (u_d, v_d) と計測されたものとする。これらの 4 点に囲まれた四角形の領域の平均ひずみを算出には、次式を用いる。

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{ij} &= \frac{1}{A} \int_{\Omega} \varepsilon_{ij} dA \\ &= \frac{1}{A} \int_{\Omega} \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) dA = \frac{1}{A} \int_c \frac{1}{2} (u_i n_j + u_j n_i) dc. \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 A は領域 Ω の面積、 n_i は領域 Ω の境界における外

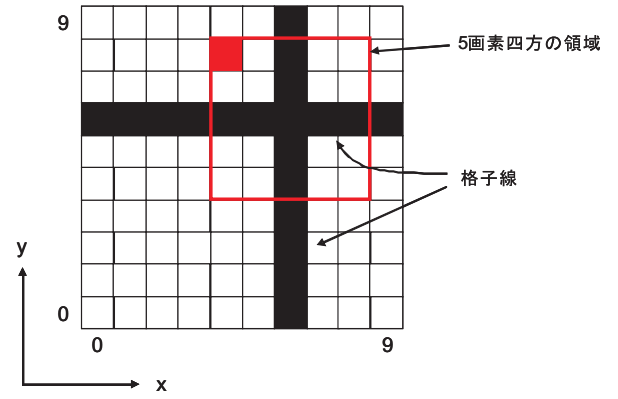


Fig. 5 Image at time t

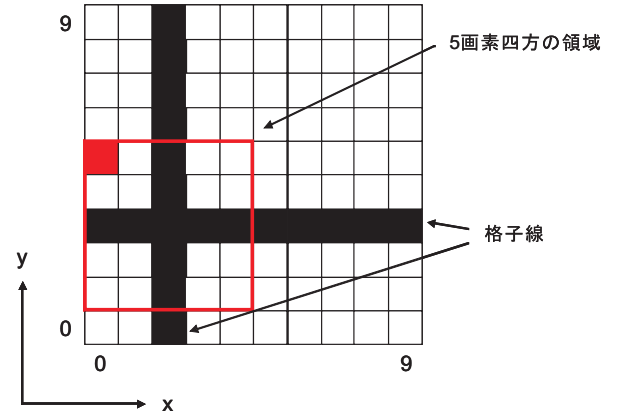


Fig. 6 Image at time $t + \delta t$

向き単位法線ベクトルの成分、 c は領域 Ω の境界である。なお、式中、2 行目の変換には発散定理を用いている。ここで議論している四角形領域における平均ひずみの算出には、式 (1) より、以下のように求まる。

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{ij} &= \frac{1}{A} \int_{AB} \frac{1}{2} (u_i n_j + u_j n_i) dc + \frac{1}{A} \int_{BC} \frac{1}{2} (u_i n_j + u_j n_i) dc \\ &+ \frac{1}{A} \int_{CD} \frac{1}{2} (u_i n_j + u_j n_i) dc + \frac{1}{A} \int_{DA} \frac{1}{2} (u_i n_j + u_j n_i) dc. \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、式 (2) の右辺の第 1 項に着目する。変位が線形的に変化するものと仮定すると、式 (2) の右辺の第 1 項のひずみ成分は、

$$\bar{\varepsilon}_{xx}^{AB} = \frac{1}{A} \int_{AB} u_x n_x dl = \frac{1}{A} \left(\frac{u_a + u_b}{2} l_{AB} \right) n_x, \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}_{yy}^{AB} = \frac{1}{A} \int_{AB} u_y n_y dl = \frac{1}{A} \left(\frac{v_a + v_b}{2} l_{AB} \right) n_y, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{xy}^{AB} &= \frac{1}{A} \int_{AB} \frac{1}{2} (u_x n_y + u_y n_x) dl \\ &= \frac{1}{2A} \left\{ \left(\frac{u_a + u_b}{2} l_{AB} \right) n_y + \left(\frac{v_a + v_b}{2} l_{AB} \right) n_x \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

と求まる。ここで、 l_{AB} は辺 AB の長さである。式 (2) の右辺の第 2 項、第 3 項、そして第 4 項についても、同様にして求めることができる。

5. 解析結果

試験では、拘束圧を変化させて実施しているが、紙面の都合上、すべての画像解析結果を掲載することは困難であるこ

とから、本論文では、拘束圧 1.0MPa のケースについてのみ、解析結果を示すこととする。まず、平面ひずみ圧縮同時透水試験より得られたクリープひずみ（载荷軸方向）と時間、および透水係数と時間の関係を Fig.7 に示す。ここでいう透水係数とは、計測流量を供試体の断面積（80mm × 60mm）と、差圧（200kPa）および供試体の面外方向の長さ（80mm）から求まる動水勾配で除した値であり、本供試体の巨視的な透水係数である。本試験で用いたクリープ応力は、本論文には示していないが、本クリープ試験より先行して実施した静的試験より得られたピーク応力の 60% 応力としている。そのため、クリープ応力は、拘束圧 1.0MPa の場合、5.2MPa である。最終段階、つまり 24 時間後の载荷軸方向のクリープひずみは 2.96% で、図より、第二次クリープの域を脱してはいないものの、漸増状況にあることが分かる。さらに 24 時間程度継続することで、場合によってはクリープ破壊に至ったかもしれない。

次に、試験終了時の供試体の状況を Fig.8 に示す。図では、供試体の不連続面を露出するように開いて置いた状態を示しており、開いた状態では、図の中央部が流入面、両サイドが流出面となる。図より、不連続面の凹凸部が綺麗に残っており、その他にも目立った損傷がないことが分かる。

上述のように、試験後の供試体に大きな変状も見受けられないが、クリープひずみは漸増しており、一方、透水係数はほぼ横ばいである。試験では、供試体を水中養生したものを使用しているが、決して飽和しておらず、また、供試体設置に時間を要することから、その間に供試体内の水分は排出されている可能性がある。そのため、初期の段階で透水係数の上昇が見受けられるが、これは吸水段階であり、吸水とともに透水係数が増大しているものと考えられる。したがって、吸水が一段落つくと、ほぼ透水係数は変化していない。このように、クリープ変形は漸増しても、透水係数（流量）が変化しない理由については、巨視的な時間と変形の関係、あるいは試験後の供試体の状況からは、その説明が困難である。前述の通り、不連続面の変形は、供試体の巨視的な変形さらには透水挙動を支配していると考えるのが一般的であり、それ故に、不連続面の変形を捉える必要がある。それには、以下に述べる画像解析手法が有効であると考えられる。

取得した画像を解析することで求まる変位場の最終段階の分布を、Fig.9 に示す。図の左上から右下にかけて、不連続面が存在しており、Fig.9 より、不連続面より上に位置する供試体の右斜め下方向への変位が卓越している様子が伺える。不連続面上では、摩擦力を受けることからやや変位が周辺より小さくなっている。

変形状況を詳細に議論するために、前章の手法を用いて、得られた変位場よりひずみの算出を行った。任意の段階における最大せん断ひずみを Fig.10 から Fig.18 に、また、巨視的な不連続面（Fig.3 における水平面より $\alpha=52$ 度の方向の破線で示した箇所）に対して直角方向のひずみ（以降、垂直ひずみと称する）を Fig.19 から Fig.27 に示す。図キャプション中の ε の値は軸方向の巨視的なクリープひずみの値を示す。

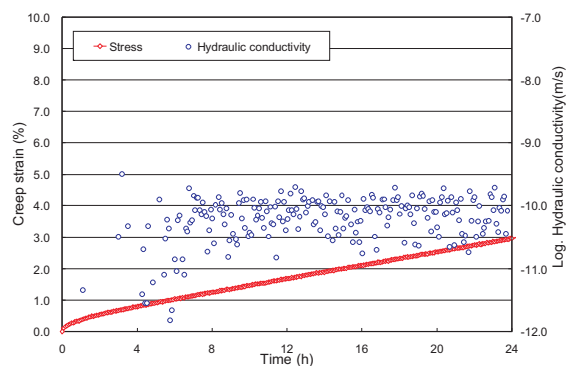


Fig.7 Stress / Hydraulic conductivity - strain ($\sigma_c=1.0$ MPa)

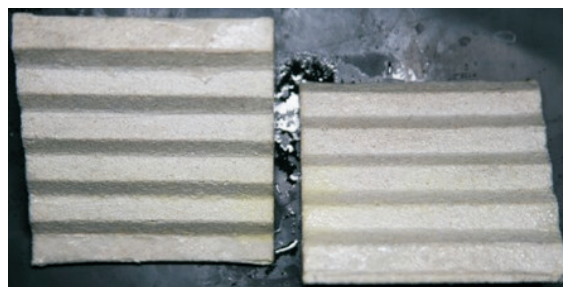


Fig.8 Test piece after experiment ($\sigma_c=1.0$ MPa)

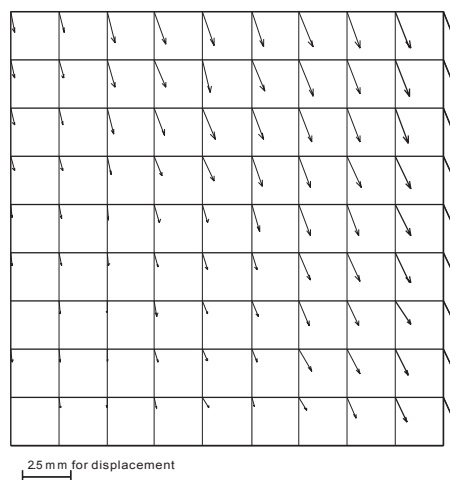


Fig.9 Displacement distribution ($\sigma_c=1.0$ MPa)

一連の図より、図下部の中央よりやや右の箇所に、初期の段階より最終段階までひずみの値が増大する箇所が存在することが分かる。また、これよりもややレベルは低い、図上部の中央よりやや左の箇所にもひずみの値が増大する箇所が存在する。これらの領域は、終始、他の領域よりもひずみの値そのものが大きく、また、増加する割合も大きい。これは、この箇所に変形が集中するような状態になっているからである。これらは、Fig.2 あるいは Fig.3 に示す不連続面（三角波）の山の頂点に対応している。

最大せん断ひずみおよび垂直ひずみの分布図より、全体として不連続面に相当する箇所でひずみの値が大きく、また、時間とともに、こうした箇所でひずみが増大していることが分かる。また、同じ不連続面上でも、ひずみの値に濃淡があ

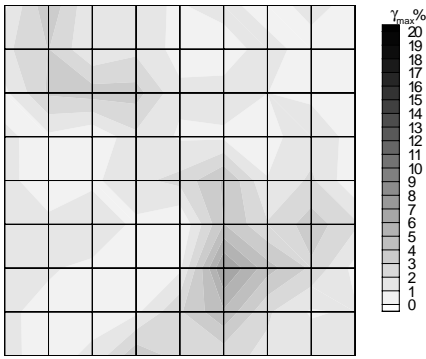


Fig. 10 Max. shear strain ($\epsilon=0.36\%$)

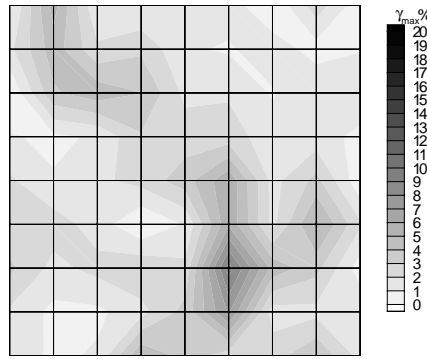


Fig. 11 Max. shear strain ($\epsilon=0.65\%$)

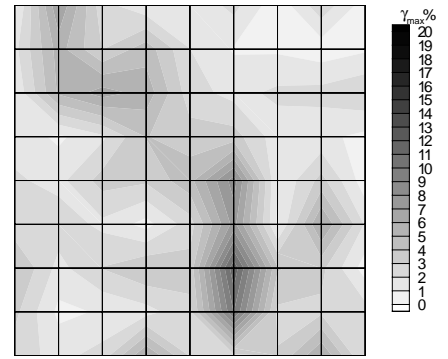


Fig. 12 Max. shear strain ($\epsilon=1.02\%$)

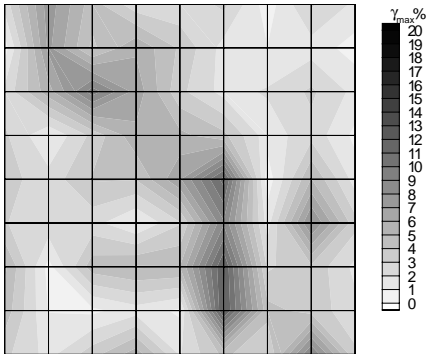


Fig. 13 Max. shear strain ($\epsilon=1.46\%$)

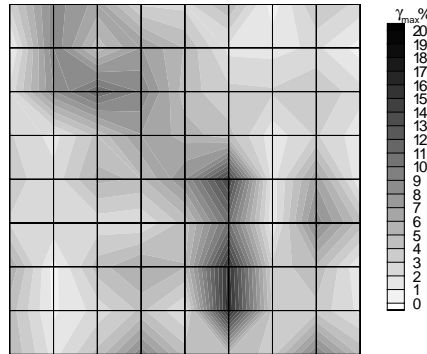


Fig. 14 Max. shear strain ($\epsilon=1.79\%$)

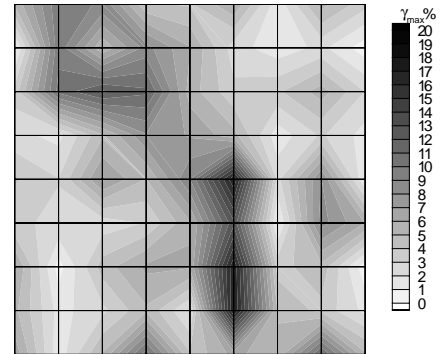


Fig. 15 Max. shear strain ($\epsilon=2.11\%$)

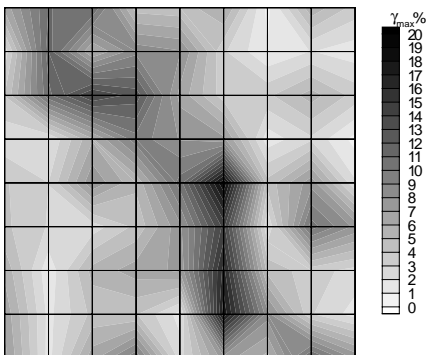


Fig. 16 Max. shear strain ($\epsilon=2.43\%$)

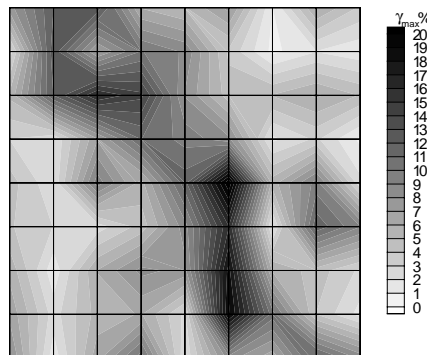


Fig. 17 Max. shear strain ($\epsilon=2.74\%$)

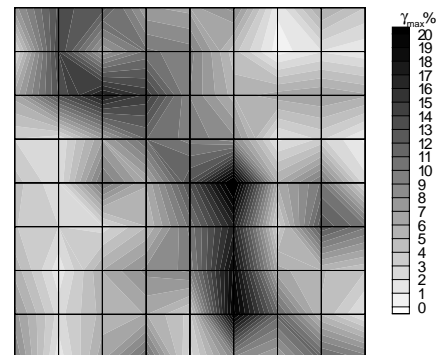


Fig. 18 Max. shear strain ($\epsilon=2.96\%$)

るが、これは、山の形をしている不連続面のどちらか一方の面で密着度を高めながら、不連続面より上に位置する供試体が右斜め下方向へ移動しているものと考えられる。垂直ひずみの分布図より、不連続面上で圧縮ひずみが卓越しており、特に、山の頂点でそれが大きくなっている。これより、時間経過とともに密着度が高まり、山の頂点は、僅かにではあるが、潰れているものと思われる。静的試験の場合、載荷の増大とともに、こうした山は最終的にほぼ削り取られてしまうが、クリープ試験の場合、供試体の基質部が破壊する、つまり、三角波の山の部分が削り取られる応力状態にはならず、不連続面が山でロックしたような状況が継続しているものと思われる。したがって、不連続面の山の頂点付近では応力集中が発生し、そのためやや変形が大きくなり、それとともにひずみの値を大きくしているものと考えられる。こうした最大せん断ひずみおよび垂直ひずみの分布より、不連続面上では、周辺に比べて滑動量が小さく、概ね、密着を保つ

ていたのではないと思われる。したがって、透水性の変化はほとんどなく、このことは、Fig.7 から読み取れる事項と合致する。

6. 結言

本研究では、不連続面を含む供試体に対して、クリープ試験を実施し、ひずみ - 時間の関係を取得したほか、観測窓に接眼したデジタルカメラにて不連続面の変形状況を追跡した。得られたデジタル画像より変位場を算出し、さらに、変位場より最大せん断ひずみ分布および垂直ひずみ分布を求めた。その結果、巨視的な計測では把握が不可能である局所的な挙動を、画像解析では把握可能であることが判明した。画像解析による変位場取得手法は、局所的な変形を把握する上で非常に有用である。しかしながら、クリープ試験などの長期変形挙動に対して、本手法の適用の可否を検討することに主眼があったことから、解析において十分な精度が得られて

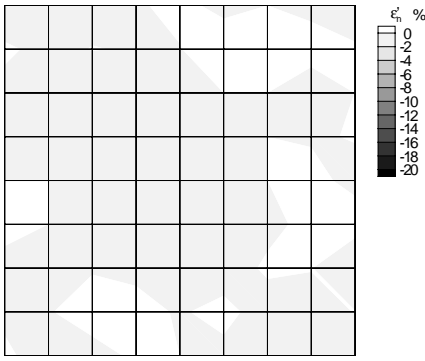


Fig. 19 Normal strain ($\epsilon=0.36\%$)

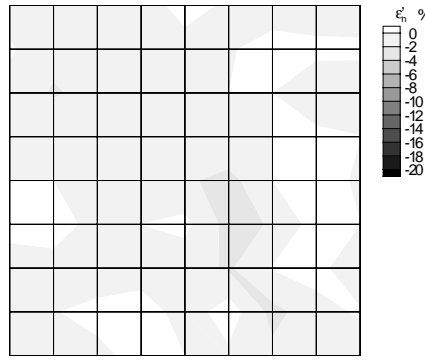


Fig. 20 Normal strain ($\epsilon=0.65\%$)

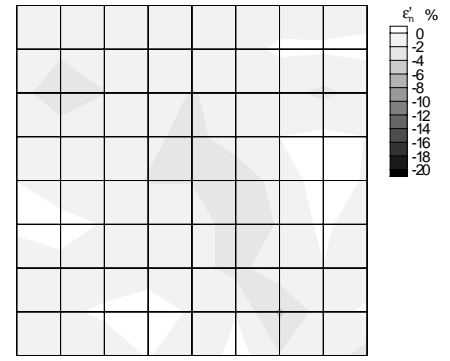


Fig. 21 Normal strain ($\epsilon=1.02\%$)

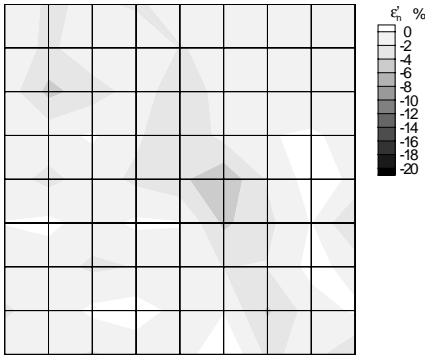


Fig. 22 Normal strain ($\epsilon=1.46\%$)

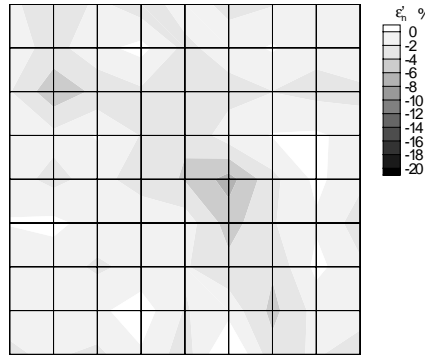


Fig. 23 Normal strain ($\epsilon=1.79\%$)

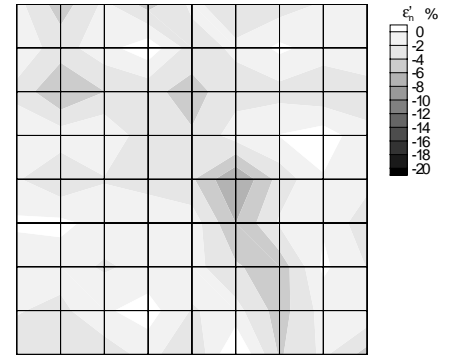


Fig. 24 Normal strain ($\epsilon=2.11\%$)

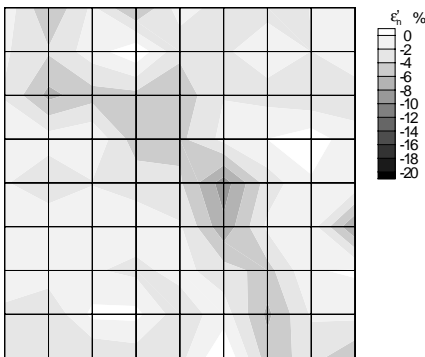


Fig. 25 Normal strain ($\epsilon=2.43\%$)

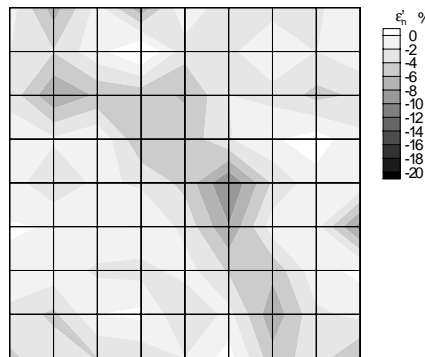


Fig. 26 Normal strain ($\epsilon=2.74\%$)

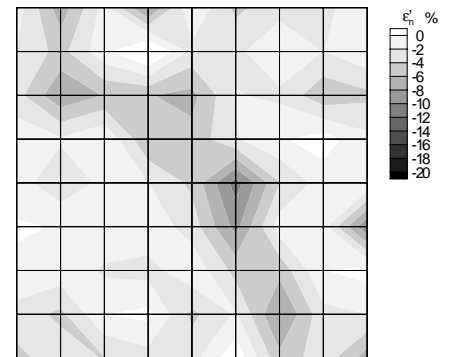


Fig. 27 Normal strain ($\epsilon=2.96\%$)

いない。精度については今後、検討する必要がある。

参考文献

- (1) 土木学会岩盤力学委員会編：軟岩の調査・試験の指針（案）1991年版，土木学会，（1991）124p.
- (2) R. L. Krantz: Crack Growth and Development During Creep of Barre Granite, J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.16 (1979) pp.23-35.
- (3) B. K. Atkinson: Subcritical Crack Growth in Geological Materials, Journal of Geophysical Research, Vol.89, No.B6 (1984) pp.4077-4114.
- (4) R. L. Krantz: The Effects of Confining Pressure and Stress Difference on Static Fatigue of Granite, Journal of Geophysical Research, Vol.85, No.B4 (1980) pp.1854-1866.
- (5) 吉田秀典，山崎卓哉，井上純哉：岩盤の透水 - 応力連成挙動の把握を目的とした試験装置の開発と連成挙動の解明に関する研究，土木学会論文集 C，Vol.64，No.4 (2008) pp.843-855 .
- (6) 安居院毅，中嶋正之，木見尻秀子：C言語による画像処理，昭晃堂，(1990) 204p .
- (7) 吉田秀典，新村達也：モルタル材料の破壊と変形の局所化に関する研究，構造工学論文集，Vol.44A (1998) pp.409-416 .
- (8) H. Horii, K. Takamatsu, J. Inoue and N. Sasaki : Measurement of Displacement Field by "Matching Method" and Observation of Strain Localization in Soft Rock , Proceedings of the Conference on Digital Image Technologies, (1997) pp.10-19.