

画像解析手法を用いた不連続面の変形・破壊挙動の把握

Grasp of Deformation and Fracture Behavior of Discontinuity through Image Analysis

吉田秀典*・則包智彦**

Hidenori YOSHIDA and Tomohiko NORIKANE

*正会員 博士(工学) 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

**香川大学大学院生 大学院工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

In order to secure the safety of geological disposal of high-level radioactive waste, it is necessary to grasp the hydraulic behavior associated with the deformation of a discontinuity in a rock mass. The mechanical and hydraulic behaviors of the rock mass have strong correlations respectively. Thus, this in study, flow-deformation coupled experiments are conducted with focusing on the local deformation of the discontinuity. Afterward, for the pictures taken during the experiment, the image analysis is carried on. 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 : *discontinuity, image analysis, rock mass, deformation, permeability*

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分には、岩盤内の不連続面が核種移行の経路となる¹⁾ということや、不連続面周辺の微視的構造が核種遅延機能を保持していることなどが挙げられるため、地下施設の建設前後において不連続性岩盤内の不連続面の挙動を把握する必要がある。特に、地下水の動きは緩衝材の働きや鋼鉄製容器の腐食速度、ガラスの溶解速度を左右するとともに、不連続面の存在は核種の運搬経路となるので、不連続面内の流体挙動の解明が必要となる。

地下水の動きを理解するためには、地下深部での動水勾配や岩盤の透水性を把握することが重要である。動水勾配については、深度が大きくなるほど局所的な地形の影響が減少するため緩やかになることが分かっている²⁾。地下水の動きが非常に緩慢であるということと同時に、せん断応力による透水性について実験とシミュレーションの両方から評価を行った場合、間隙としては開口していても水理学的には透水に関与しない間隙領域が存在することが分かっている³⁾。

単一の不連続面に関しては、不連続面を平行平板に置き換えてモデル化し、求められた開口幅より透水係数を評価することが多い⁴⁾。しかしながら、近年の研究では、不連続面の形状が複雑であることに加え⁵⁾、その中を流れる流体も複雑な経路を辿ることから、水理学的開口幅と力学的開口幅は大きく異なるという結論が示されている^{6),7),8),9)}。

こうしたことを受け、我々は岩盤不連続面内の開口幅分布と透水特性を解明するために、新たに構築した可視化技術を活用して、せん断に伴う不連続面内の接

触状態の変化を調べ、数値解析結果と比較・検討し、平行平板モデルの適用範囲の確認を試みている¹⁰⁾。具体的には、せん断-透水同時特性試験装置に、アクリル供試体の不連続面内に染色液を流し、CCDカメラにより撮影した画像の色の濃淡を輝度値に置き換え、定量的に開口幅の大小を求めるものである。画期的な手法ではあるが、3次元的な応力が作用している状態での計測は不可能である。地層処分などで対象となる岩盤は、3次元的な応力が作用していることを考えると、当該試験機で得られた結果よりも、さらに一歩踏み込んだ試験方法や計測手法が望まれる。

朴ら¹¹⁾も、インタクトな岩石に破断面が形成された場合を想定し、その内部構造が変化する過程における透水特性の変化が議論できるようなせん断-透水-可視化同時試験装置を開発している。この試験装置は、一面せん断試験と定水位透水試験を同時に実施できるように組み合わせたものであり、インタクトな試料からせん断面ができる過程における供試体表面の変形破壊挙動を合わせて観察できるが、この装置もまた、3次元的な応力が作用している状態での計測は不可能である。

吉田らは、3次元的な応力下にて、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)。この装置には、供試体の変形を詳細に観察するためのアクリル板が設けられており、この観察窓を通してメンブレンで覆われた供試体の細部を観察することは困

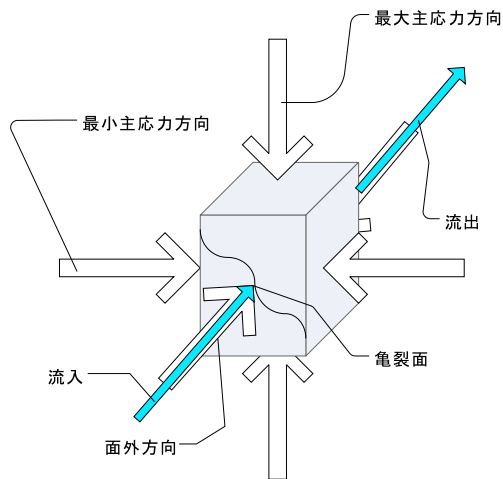


図-1 試験の概念図

難であるが、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も可能である¹²⁾。

そこで本研究では、吉田らが開発した装置を用い、不連続面を含む供試体に対して変形－透水の連成試験を実施し、巨視的な変形および透水挙動を把握すると同時に、観測窓に接眼したデジタルカメラで捉えた不連続面の変形および破壊状況などを考察することとした。

2. 試験概要

2.1 試験装置の概要

まず、図-1 に試験の概念を示す。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の拘束圧を制御し、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図-1 に示すような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。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（図-2 参照）。

透水試験についてであるが、面外方向に設けたペダスタルを通し、透水試験用の動水勾配を与える。面外方向のペダスタルはそれぞれ流入側の水压タンクおよび流出側のビュレットに連結されており、流入側と流出側の圧力差を制御している（図-3 参照）。流出量は二本のビュレットの差圧を測定することで、微少な流

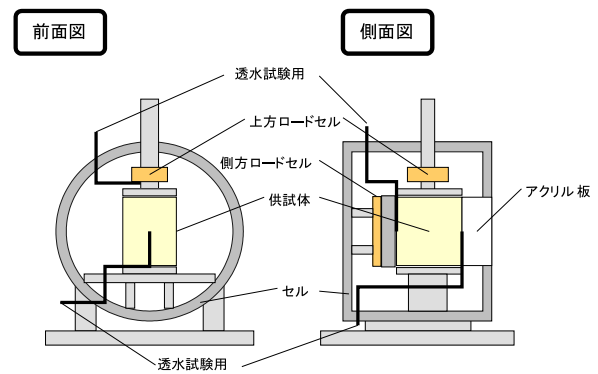


図-2 試験装置の概略図

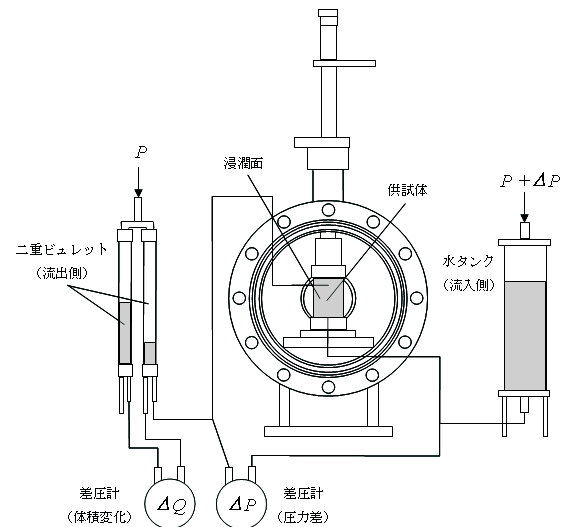


図-3 流量測定概念図

量（約 $10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$ ）の測定を可能にしている。試験装置の詳細については、文献¹²⁾を参照されたい。

2.2 供試体の作製

天然岩盤／岩石を試験供試体として用いるのが好ましいが、通常、天然岩石／岩盤は不均質性が強い。こうしたことは、試験結果の解釈を難解とする可能性があることから、本研究では、天然の岩盤／岩石ではなく、豊浦標準砂・石膏・水をベースに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）と前述の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 となるように配合することとした。このような配合とすることで、例えば、拘束圧 2.0 MPa の場合でも最大荷重は 15 MPa を下回る。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、水と石膏の分離にともなうブリーディングを抑制した。本研究では、対象を不連続性岩盤としていることから、不連続面を表現する必要がある。そこで、全く同一形状のものを 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

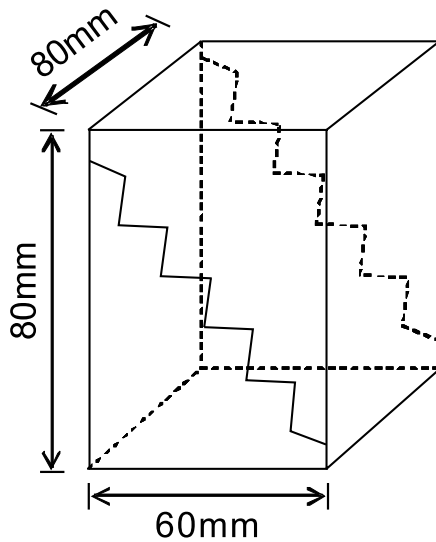


図-4 供試体の概要

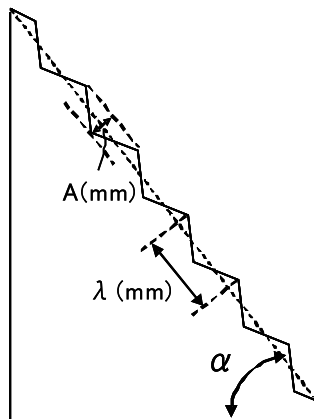


図-5 三角波形状の不連続面

イズは、80 mm × 80 mm × 60 mm である（図-4 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¹²⁾を参照されたい。

単一不連続面は、図-5 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 ）ほど傾いた位置に入る。その形状は奥行方向一定の三角波とする。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。なお、不連続面形状のパラメータは振幅と波長の 2 つであり、文献¹²⁾では、これらを変化させた試験を実施しているが、本研究では、振幅 1mm、波長 16.8 mm（波数 6 個）の形状についての試験についてのみ述べることにする。このような形状にした理由としては、フラットな不連続面の場合、変形しても透水性の増大が見込めないこと、また、天然の岩盤に包含される不連続面群は、少なからず凹凸や起伏を有していることから、本研究ではフラットな

不連続面形状は採用していない。打設した供試体の水中養生期間については、3 時間から 7 日間の範囲で水封養生（室温）した供試体に対し一軸圧縮試験を実施した結果、水中養生期間が 3 時間以上であれば長期的な強度の変化がほとんどないことを確認した。本研究では、十分なマージンを考慮し、打設後、3 時間の気中養生を行い、その後、12 時間の水中養生をすることとした。

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。載荷は、変位制御による単調載荷（ひずみ速度は 0.002 %/s）で行った。透水試験では、流入側に 300 kPa、流出側に 100 kPa、つまり差圧として 200 kPa を与えた。試験では、図-4 の不連続面がアクリル板より見えるように、つまり、図-4 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、図-4 の底面は金属板に置いて（つまり、鉛直方向の変位を固定）し、頂面より載過を行った。

3. 残差マッチング

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と言った項目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、残差マッチングという画像解析手法を提案かつ活用している^{13), 14)}。この手法は画像解析手法の一つであるテンプレートマッチング¹⁵⁾を拡張した、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。この手法はレーザーホログラフィー干渉法やレーザースペックル法より若干精度は低いが、写真画像のデジタイズの方法を工夫することにより精度を向上することは可能である。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。

本試験における残差マッチングの手順であるが、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 5mm × 5mm の格子を引く。線幅は約 0.5mm、各グリット幅は 4.5mm としている（図-6 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。メンブレンを試験機に設置後、観測窓（アクリル

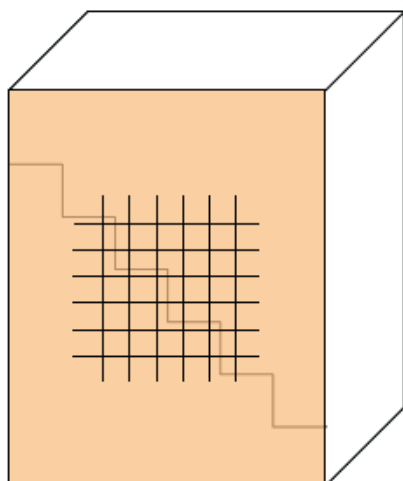
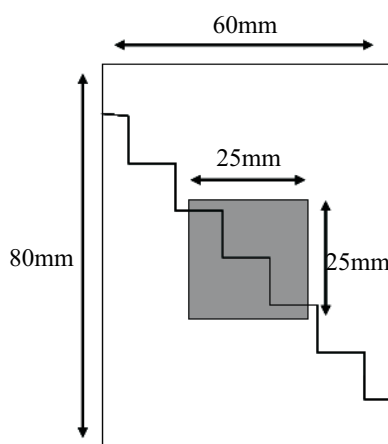


図-6 メンブレン上の格子



■ : 解析領域

図-7 マッチング対象領域

板)を通してデジタルカメラによる画像の取得を行う。撮影は30秒毎に行い、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 $30\mu\text{m}$ 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おり示されている。こうした画像データに対して残差マッチングの適用を行う。解析範囲については図-7に示す。

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 における画像データを図-8に示す。切り出すマスク領域は x 方向に5個目、 y 方向に8個目のマス基準とし5画素四方に形成されることとする。これよりも δt の時間が経過した後の画像データを図-9に示す。時間 t における5画素四方の

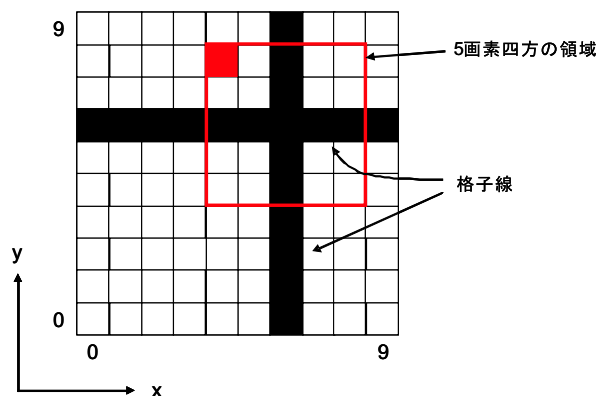


図-8 時間 t における画像

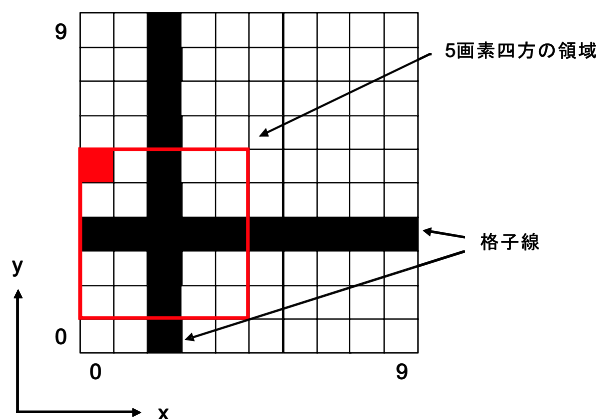


図-9 時間 $t+\delta t$ における画像

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、図-8と図-9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(写真-1)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。

本研究で用いる供試体における解析範囲を図-7に示す。切り出すマスク領域は解析範囲内における 10×10 のメッシュとなっている(図-10参照)。1つのマスク領域は左上の基準点より、90画素×90画素の範囲を切り出して用いる。その後、切り出したマスク領域を x 方向および y 方向に1画素ずつ移動させ、画素のデジタル値の差について2乗和をとる。こうしていくつかの画素を動かしていった際に、その2乗和が最小となる領域がマスク領域が移動した位置ということになる。同様にして、全てのマスク領域に対してこれらの手順を繰り返し、解析領域全体の移動量を求める。

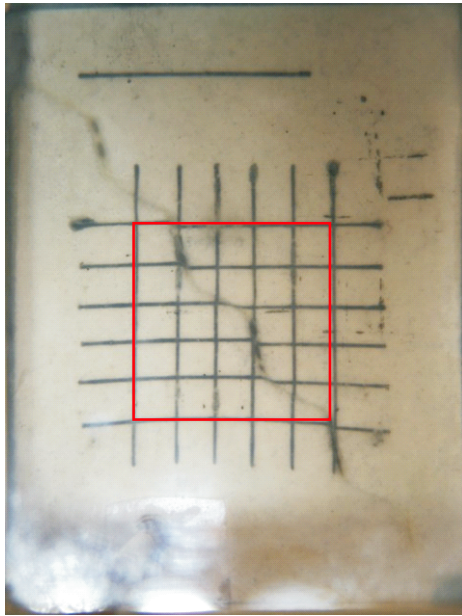


写真-1 取得画像（試験開始前）

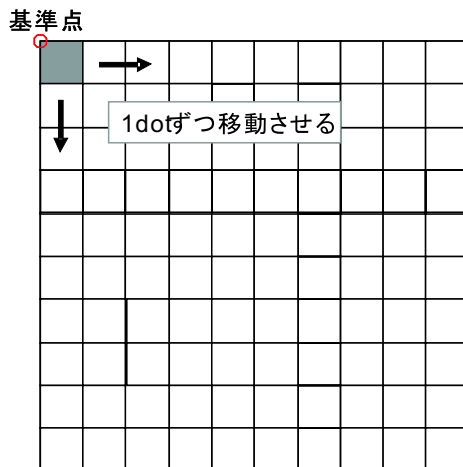


図-10 マスク領域

4. 試験およびマッティング解析の結果

まず、平面ひずみ圧縮同時透水試験より得られた軸ひずみ（载荷軸方向のひずみ）と応力、およびひずみと透水係数の関係について述べる。ここでいう透水係数とは、計測流量を供試体の断面積（80 mm × 60 mm）と、差圧（200 kPa）および供試体の面外方向の長さ（80 mm）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。拘束圧（ σ_c ）0.5MPaの結果を図-11に、拘束圧（ σ_c ）1.0MPaの結果を図-12に示す。本供試体は、巨視的にはやや拘束圧依存性を示し、ピーク強度は、拘束圧 0.5MPa で 8.3MPa（この時、鉛直ひずみ ε は約 1.4%）、拘束圧 1.0MPa で 10.2MPa（この時、鉛直ひずみ ε は約 1.3%）であった。透水係数は非常に小さく、いずれのケースも $1.0 \times 10^{-10} \sim 1.0 \times 10^{-8}$ m/s であった。ただし、拘束圧 1.0MPa については、瞬間的に 1.0×10^{-7} m/s 以上を示しているが、ほんの一瞬であった。また、機器の不具合があり、拘束圧 0.5MPa については、ピーク前までしか流量が計測できていないため、透水係数もピーク前までしか得られていない。流量が少ない場合、ペデスタルへつながるビニール製のパイプに、供試体の削りかすが溜まったり、供試体に添付したろ紙の状態によっては、やや水が多く流れたり、あるいは停流することもあり、このように透水係数が上下する結果となっている。軟化時の応力降下は脆性的な破壊パターンを示しており、その降下応力はいずれも 4MPa 程度、残留応力は、拘束圧 0.5MPa で 4MPa 程度、拘束圧 1.0MPa で 6MPa 程度であった。

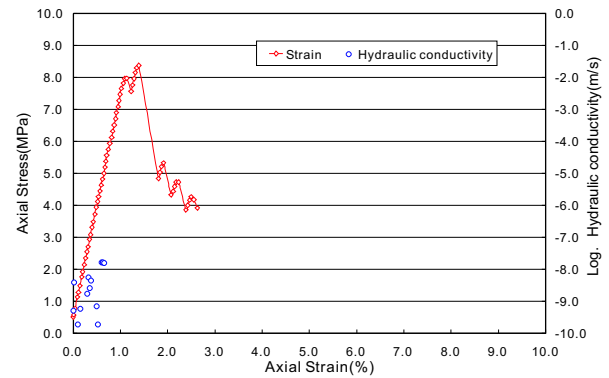


図-11 ひずみ-応力/透水係数関係（ $\sigma_c=0.5\text{MPa}$ ）

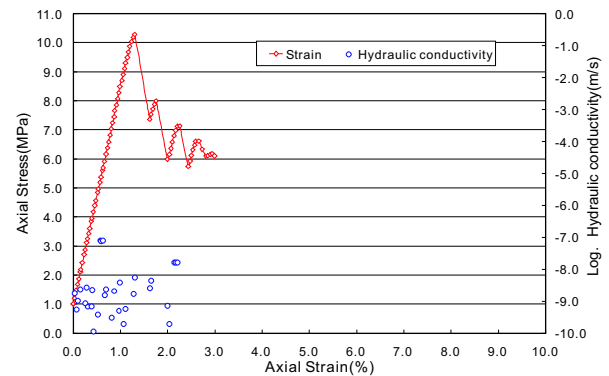


図-12 ひずみ-応力/透水係数関係（ $\sigma_c=1.0\text{MPa}$ ）

次に、試験終了時の供試体の破壊性状を、拘束圧 0.5MPa の場合を写真-2に、拘束圧 1.0MPa の場合を写真-3に示す。写真は、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、写真の中央部が流入面、両サイドが流出面となる。写真より、いずれの供試体も不連続面の凹部で削り取られている。拘束圧 0.5MPa については削られていない部分もやや残っているが、拘束圧 1.0MPa については削り取られが顕著となっており、三角波の振幅（山）はほとんど削り取られているのが分かる。これは、拘束が強いことから、せん断される際に不連続面がせ



写真-2 破壊性状 ($\sigma_c=0.5\text{MPa}$)



写真-3 破壊性状 ($\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

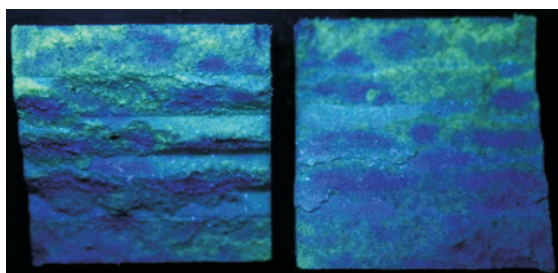


写真-4 流動状況 ($\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

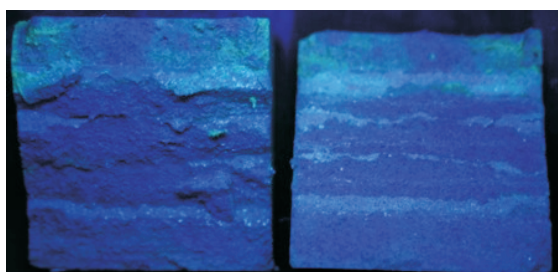


写真-5 流動状況 ($\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

ん断されたものと思われる。

試験においては、透水させる水に蛍光染料ウラニコンク（フルオレセインナトリウム）を混ぜている。試験後、供試体にブラックライトを当てるとウラニコンクが発光するという原理を応用し、供試体中における水の流路の確認を行っている。試験終了時の供試体の流動状況を、拘束圧 0.5MPa の場合を写真-4 に、拘束圧 1.0MPa の場合を写真-5 に示す。供試体の置き方は、写真-2 および写真-3 と同様である。拘束圧 1.0MPa の場合、画像の上部の箇所と、削り取られていない箇所ブラックライトによる発光が確認でき、この箇所を限定して流体が流れていることが分かる。削り取られ

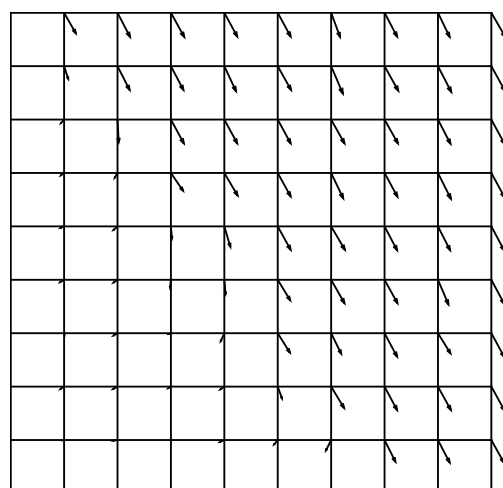


図-13 変位分布 ($\varepsilon=2.61\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

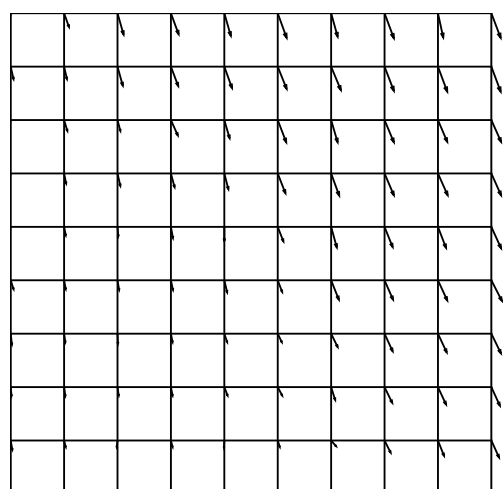


図-14 変位分布 ($\varepsilon=3.24\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

ていない箇所は、主として開口していた箇所に相当するものと思われる。一方、拘束圧 1.0MPa の場合、発光領域も限定されており、すなわち、水みちとなった箇所は狭いことが類推される。しかしながら、いずれの拘束圧の試験においても、それほど流量は多くない、つまり透水係数が小さいことから、水も常時流れていたのではなく、例えば、軟化してから開口した箇所などを中心に水が流れた可能性もある。しかしながら、こうした考え方を裏付けるためには、不連続面は削り取られながらせん断していることを捉える必要があるが、これについては、試験終了後の破壊性状あるいは流動状況だけを観察して何らかの結論を述べるには限界がある。

そこで、マッチング解析を用いた変位場計測の技術を導入し、試験中、不連続面がどのように変形していくかを捉えることとした。解析の手法は、前章にて述べた通りである。まず、取得した画像を解析することで求める変位場の最終段階の分布を、拘束圧 0.5MPa の場

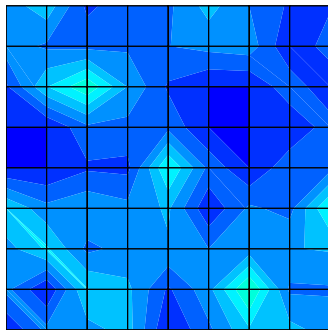


図-15 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=0.45\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

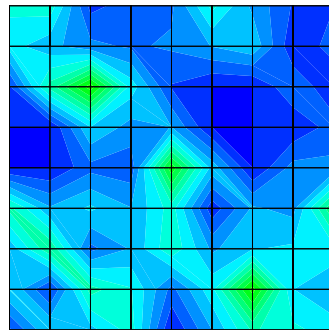


図-16 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=0.62\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

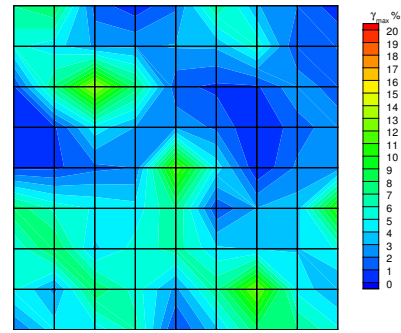


図-17 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=0.86\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

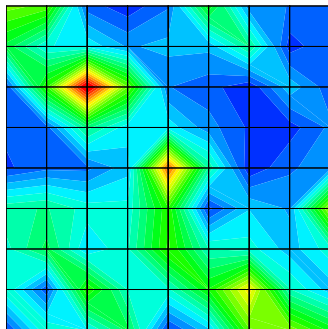


図-18 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=1.03\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

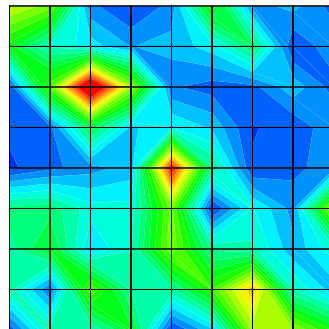


図-19 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=1.23\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

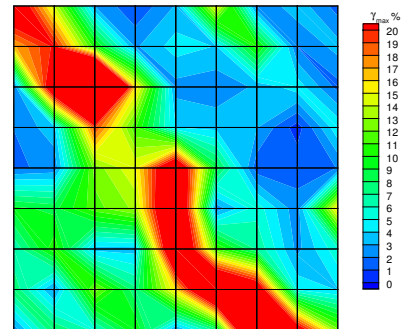


図-20 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=1.38\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

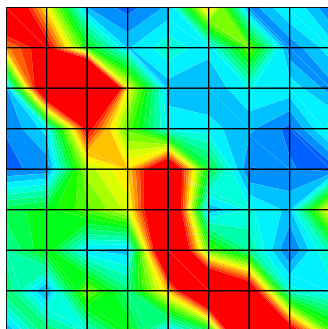


図-21 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=1.81\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

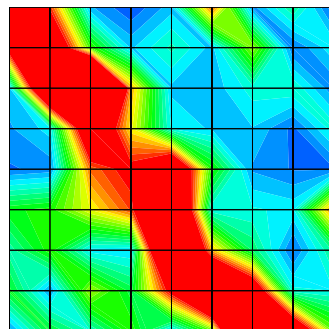


図-22 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=2.22\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

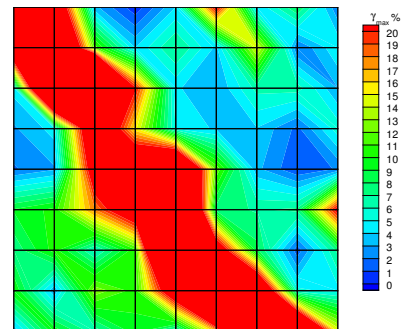


図-23 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=2.61\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

合については図-13に、拘束圧 1.0MPa の場合については図-14に示す。なお、試験の最終段階における供試体の巨視的な軸ひずみは、拘束圧 0.5MPa で 2.61%、拘束圧 1.0MPa で 3.24%であった。また、取得画像においては、不連続面が図-7あるいは写真-1に示すように入っている。図-13および図-14より、明らかに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。特に、最大ひずみのレベルが小さいにも関わらず大きな変位を生じている拘束圧 0.5MPa において顕著であるといえよう。

変形状況を詳細に議論するために、得られた変位場よりひずみの算出を行った。算出方法については、付録Iを参照されたい。まず、拘束圧 0.5MPa について、図-15から図-23に任意の段階における最大せん断ひずみを、また、最大せん断ひずみ方向と直交する方向

のひずみ（以降、垂直ひずみと称する）を図-24から図-32に示す。なお、キャプションには、画像を比較した時点の軸ひずみの大きさを示してある。また、全ての結果は紙面の関係より提示できないため、任意の9つの結果のみを示している。

前述の通り、拘束圧 0.5MPa の場合、ピーク強度は、材料の巨視的な鉛直ひずみ ε が約 1.4%でおよそ 8.3MPaであった。極めて初期の段階、つまり、軸ひずみが 0.45%の時は、図-15より、分布に大きなバラツキはない。ところが、これ以降は不連続面に対応する箇所ではひずみの値の高い箇所が出現する。特に、供試体は図-7の解析対象領域における上側の供試体の不連続面近傍でひずみの値の高い箇所が出現する。この値の高い箇所は三角波の山に相当する箇所、ピーク応力を迎える前までは、こうした箇所のみでひずみは高い値を示す。と

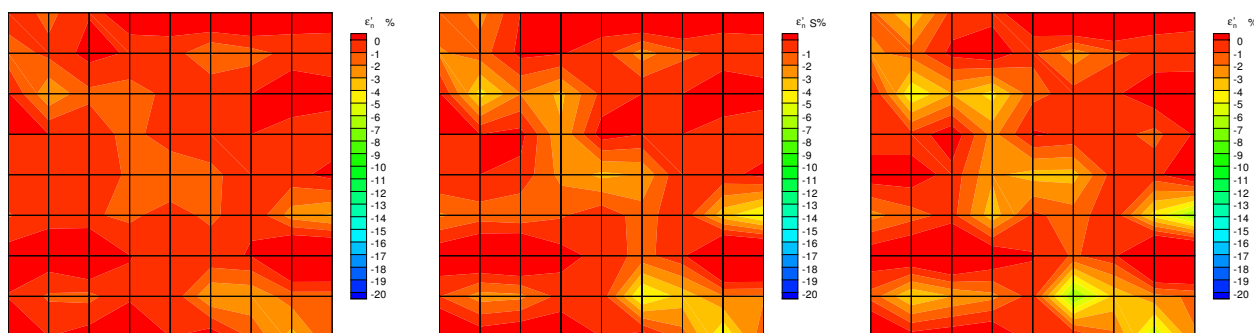


図-24 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=0.45\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$), 図-25 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=0.62\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$), 図-26 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=0.86\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

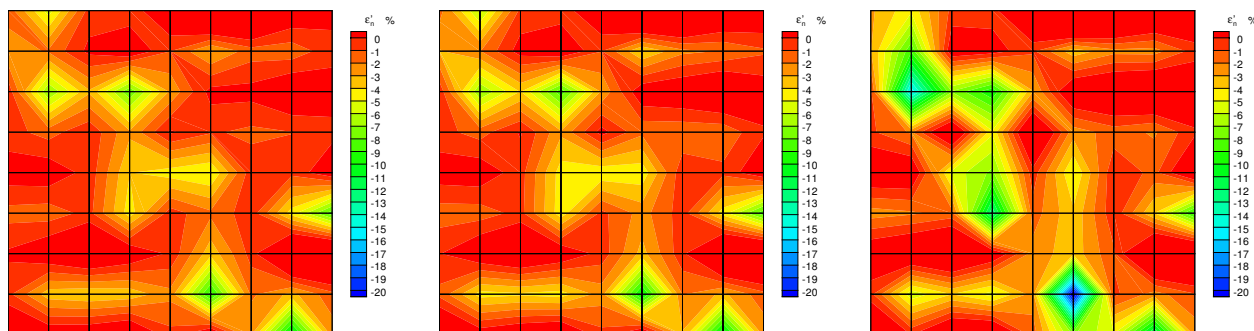


図-27 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=1.03\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$), 図-28 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=1.23\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$), 図-29 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=1.38\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

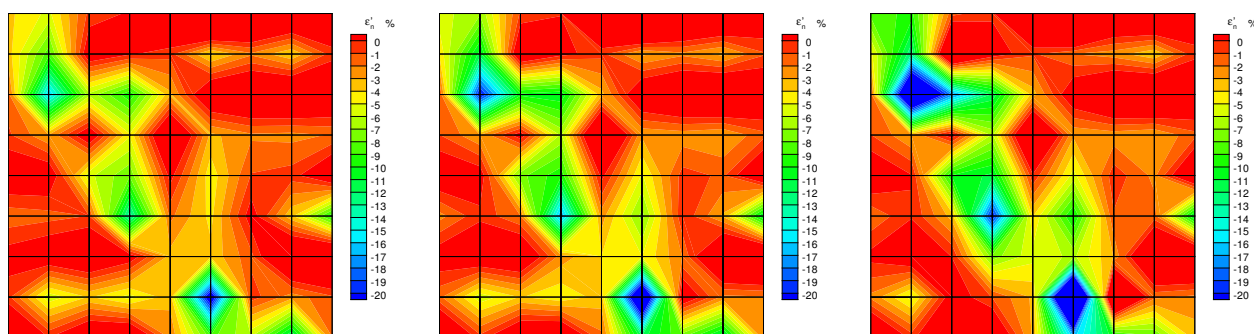


図-30 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=1.81\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$), 図-31 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=2.22\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$), 図-32 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=2.61\%$, $\sigma_c=0.5\text{MPa}$)

ころが、ピークに達すると(図-20 参照), ひずみの値の高い箇所が連続するようになり, その後は, その幅を大きくするようにひずみの値の高い領域が広がっていく。これより, ピーク前までに不連続面は変形はするものの, 三角波の山でプレーキがかかるような挙動をしているものと思われる。それがピーク時には山が削れ, 山が削れるような形でせん断変形が進行していくものとする。このことは, 垂直ひずみの分布からも伺える。最大せん断ひずみに対して垂直となる方向のひずみも, 初期の段階では, ほぼ均一に分布しているが(図-24 参照), やがてせん断ひずみの値が大きくなっている箇所に対応して垂直ひずみも大きな値を示し, 巨視的な変形の増大とともにその値を大きくしていく。ところが, 最大せん断ひずみと異なり, ピークに達しても領域が連続するような状態にはならず(図

-29 参照), 依然として, 三角波の山の頂点付近のひずみの値が大きくなっていた。これは, 山が削れる部分と, 不連続面の面同士でせん断する部分があるものと考えられる。不連続面は, その面を滑動して, 密着部分と開口部分が現れるという変形ではなく, 山を削りながら開口はともなわずに変形した結果, 透水性なども上がらなかったものと思われる。

次に, 拘束圧 1.0MPa について, 任意の段階における最大せん断ひずみを図-33 から図-41 に, また, 垂直ひずみを図-42 から図-50 に示す。なお, ここでもキャプションには, 画像を比較した時点の軸ひずみの大きさを示してある。ピークまで(図-33, 図-34, 図-42 および図-43 参照)の挙動は, 拘束圧 0.5MPa のケースと類似しており, 供試体は図-7 の解析対象領域における上側の供試体の不連続面近傍でひずみの値の

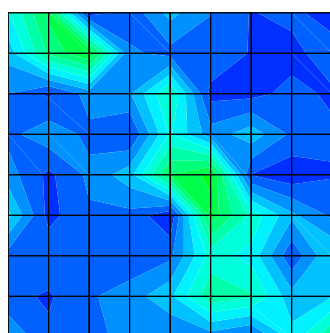


図-33 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=0.84\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

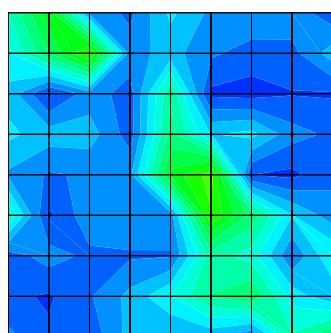


図-34 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=1.24\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

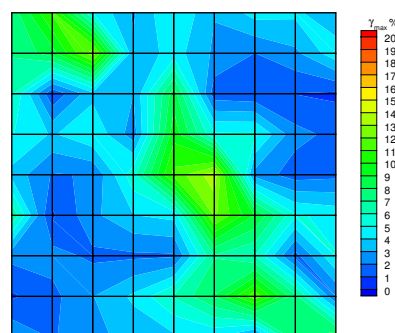


図-35 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=1.52\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

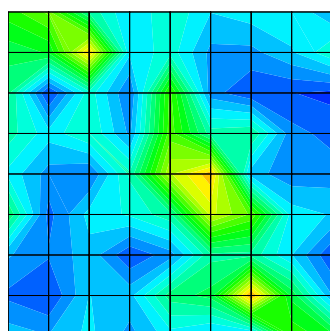


図-36 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=1.83\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

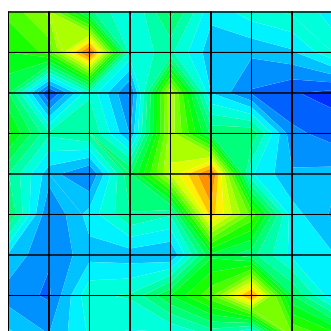


図-37 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=2.00\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

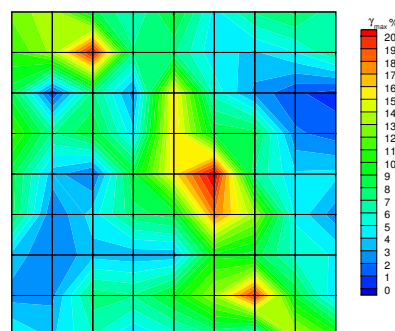


図-38 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=2.42\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

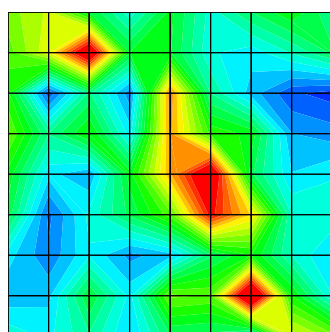


図-39 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=2.68\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

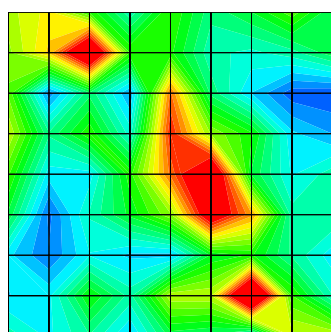


図-40 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=2.83\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

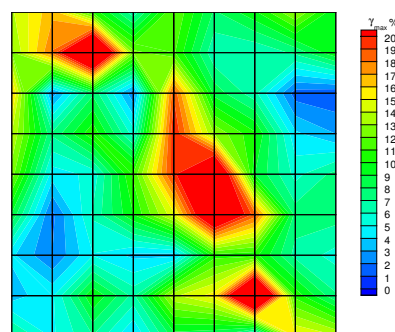


図-41 最大せん断ひずみ分布
($\varepsilon=3.24\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

高い箇所が出現している。この値の高い箇所は、やはり三角波の山に相当する箇所である。しかしながら、ピーク後（図-35 および図-44 以降）もこの三角波の山に相当する箇所のひずみの値がさらに増大しているものの、ひずみの値の大きい領域が連結して帯を形成する様子は伺えない。最終段階においても、最大せん断ひずみのレベルは拘束圧 0.5MPa の場合よりもやや低く、特に、垂直ひずみのレベルは大幅に小さい。これは、拘束圧の増大によって、不連続面のせん断変形およびせん断破壊が抑制されたことに起因するものと考えられる。

本研究で決定した配合による供試体においては、ほとんどの静的試験において同様の傾向がみられ、拘束圧が低いとせん断破壊が生じ、拘束圧が高まるにしたがってせん断破壊が抑制される結果となった。マッチング解析を行っていないことから、本論文には示して

いないが、拘束圧をさらに増加させると、ピーク後の脆性的な破壊は不明瞭となり、不連続面の形状である三角波の山のみが圧縮破壊をされるような結果を示し、破壊も脆性的なものから延性的なものに移行していた。また、静的試験の場合は、ピークに到達する以前に不連続面近傍において変形の局所化が現われ、ピーク時のそれが顕在化する傾向も確認された。透水挙動に関しては、拘束圧が低い場合は不連続面が破壊してせん断変形が生じるが、密着した状態が継続されるため、時折透水性が増大するものの、それほど大きくならず、また、拘束圧が高くなると、不連続面のせん断変形そのものが抑制されることから、透水性も増大しない結果となった。

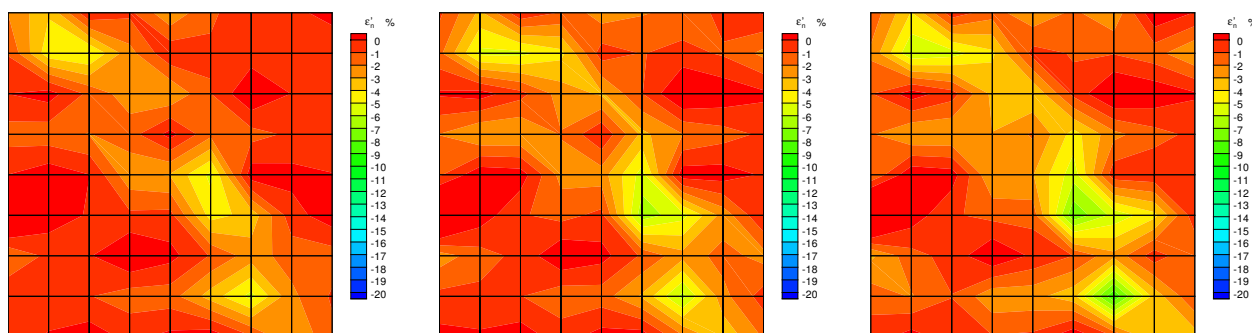


図-42 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=0.84\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$), 図-43 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=1.24\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$), 図-44 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=1.52\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

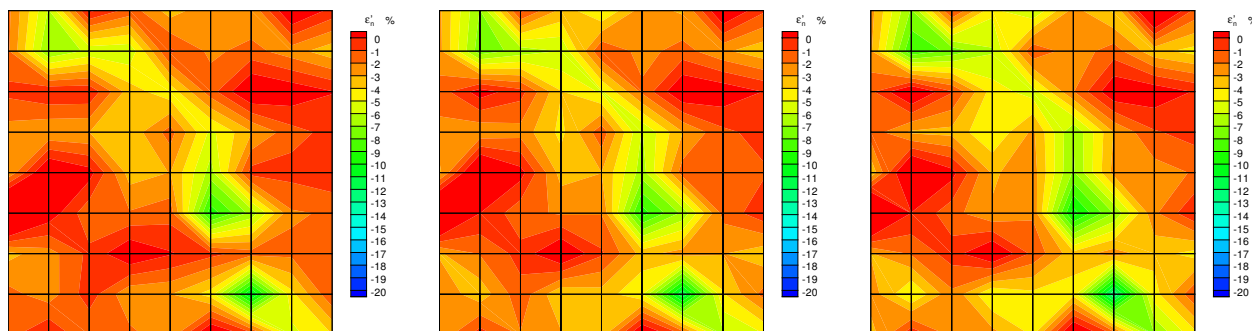


図-45 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=1.83\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$), 図-46 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=2.00\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$), 図-47 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=2.42\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

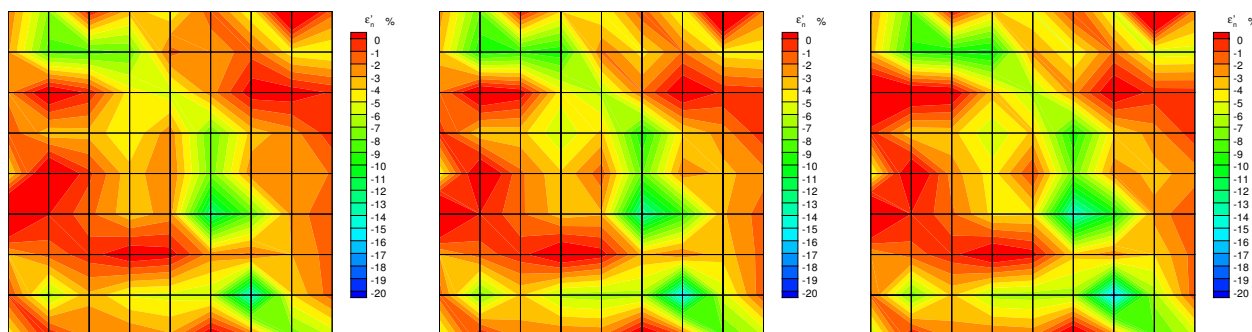


図-48 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=2.68\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$), 図-49 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=2.83\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$), 図-50 垂直ひずみ分布 ($\varepsilon=3.24\%$, $\sigma_c=1.0\text{MPa}$)

5. まとめ

本研究では、不連続面を含む供試体に対して変形－透水の連成試験を通して、巨視的な変形および透水挙動の挙動を把握を行った。試験では、三角波形状の不連続面を1つ包含する人工供試体を用意し、静的試験を実施した。試験より、一般的な荷重－変位の関係（供試体の巨視的な応力－ひずみ関係）を取得するほか、得られた流量より供試体の巨視的な透水係数を求めた。さらに、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、テンプレートマッチング手法の1つである残差マッチングを用いて変位場を算出し、さらに、変位場より最大せん断ひずみ分布、および最大せん断ひずみ方向と直交する方向の垂直ひずみ分布を求めた。こうして得ら

れた試験およびマッチング解析結果より、供試体の巨視的な挙動と不連続面の局所的な変形について考察を加えた。得られた知見を以下に示す。

1. 画像解析の結果、巨視的な計測では不可能である局所的な供試体の挙動を把握することが可能である。
2. 画像解析より求まる変位場は、不連続面を挟んで上下の供試体の挙動が異なることを示唆していた。
3. 変位場より求まるひずみ場より、普遍的とまでは言えないものの、拘束圧による変形の違いが明瞭となった。特に、得られたひずみ場より、変形が局所化していく様子や、その後、ひずみの値の高い領域が連結する、あるいは連結しないなどの挙動も得られた。
4. 残差マッチングを用いた変位場取得手法は、より局所的な変形を把握する上で非常に有用である。

5. 通水をした状態で、供試体が変形していく様子を捉えることは、従来の試験機では困難であったが、本研究で用いた試験機を活用することで、それが可能になる。特に、透水性の検討が重要となる案件については、本研究で用いた試験機を使用することで、多くの新しい知見が得られる可能性がある。
6. 不連続面の有無に関わらず、供試体の変形－透水の連成挙動を捉えるには、本研究のようなアプローチは非常に有効であると思われる。

今後の課題としては、以下の通りである。

1. 残差マッチングを併用した試験事例はまだ少ないことから、多くの試験を通して普遍的な挙動を把握する必要がある。
2. 本研究では、残差マッチングの適用の可否を検討することに主眼があったことから、マッチング解析においては十分な精度が得られていない。例えば、対象領域に対して、 10×10 のマスクエリアしか設けておらず、より詳細な変位場あるいはひずみ場を得るためには、さらにエリアを小さくする必要がある。つまり、精度については今後、さらに検討を必要とする。
3. 残差マッチングで捉えられる領域は限られており、解像度を落とすことなく、例えば、カメラを複数設置するなどの技巧により、対象領域を広げる必要がある。
4. 本論文では、静的試験（破壊試験）のみの結果を示しているが、高レベル放射性廃棄物の地層処分問題などを論じるためには、時間依存的な挙動（クリープ挙動）の議論が必要である。

付録 I 平均ひずみの算出方法

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するためには、まず、四角形 ABCD の 4 辺の長さ、面積を 4 点の座標から求め、4 辺を l_{ab} , l_{bc} , l_{cd} , l_{da} 、面積を A とする。平均ひずみの算出には、次式を用いる。

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

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 行目から 3 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 (I.1) を用いて以

下のようにして求まる。

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

ここで、(I.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 (I.2) の右辺の第 1 項のひずみ成分は、

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

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

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

と求まる。(I.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出来る。

参考文献

- 1) 土木学会：放射性廃棄物の地層処分における課題と取り組み、土木学会誌、第 91 巻、第 11 号、pp.21-23, 2006.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－、p.251, 1999.
- 3) 三谷泰浩、江崎哲郎、周国云、中島祐一：一方流型せん断－透水同時実験装置の開発と間隙幅分布の変化が透水特性に及ぼす影響に関する研究、亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム発表論文集、pp.179-186, 2001.
- 4) Witherspoon, P. A., Wang, J. S. Y., Iwai, K. and Gale, J. E.: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resources Research, Vol. 16, No. 6, pp.1016-1024, 1980.
- 5) Pyrak-Nolte, L., Myer, L.R., Cook, N.G.W. and Witherspoon, P.A.: Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, Proc. of 6th International Rock Mech. Symp., pp.225-231, 1985.
- 6) Louis, C.: A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses, Rock Mechanics Research Report, 10, Imperial College, London, p.90, 1969.
- 7) Elsworth, D. and Goodman, R.E.: Characterization of rock fissure hydraulic conductivity using idealized wall roughness profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 23(3), pp.233-243, 1985.

- 8) Brown, S. R.: Fluid flow through rock joint: The effect of surface roughness, J. of Geophys. Res., 92(B2), pp.1337-1347, 1987.
- 9) 岸田潔, 澤田淳, 佐藤久, 音田慎一郎, 細田尚: 三乗則成立条件下での局所レイノルズ数による透水挙動の評価, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.287-292, 2010.
- 10) 蔣宇静, 李博, 熊祥斌: 可視化技術を活用した岩盤不連続面のせん断-透水特性およびダルシー則の有効性に関する研究, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.72-76, 2010.
- 11) 朴赫, 長田昌彦, 渡辺邦夫: 岩石のせん断-透水-可視化同時試験装置の開発とそのデータ解析法, 応用地質, 第 49 巻, 第 5 号, pp.266-276, 2008.
- 12) 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, pp.843-855, 2008.
- 13) 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, pp.409-416, 1998.
- 14) Horii, H., Takamatsu, K., Inoue, J. and Sasaki, N.: Measurement of Displacement Field by "Matching Method" and Observation of Strain Localization in Soft Rock, Proceedings of the Conference on Digital Image Technologies, pp.10-19, 1990.
- 15) 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.

(2010 年 3 月 9 日 受付)