

岩盤の水 - 応力連成挙動に関する基礎的研究

Fundamental Study on Coupling Behavior of Water Flow and Deformation of Rock Mass

吉田秀典*・山崎卓哉**・井上純哉***・周郷啓一****・本多 剛†

Hidenori YOSHIDA, Takuya YAMASAKI, Junya INOUE, Keiichi SUGO and Tsuyoshi HONDA

*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)

**学生会員 香川大学 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)

***正会員 博士(工学) 東京大学助教授 大学院工学系研究科マテリアル工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

****東京大学技術職員 大学院工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

†正会員 修士(工学) 東京大学助手 大学院工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

In Japan, it is planned to dispose high-level radioactive waste (HLW) and transuranic (TRU) waste in a stable rock mass. Since the radioactive level of those wastes is extremely high and their half-life period is exceedingly long, it is necessary to ensure that residual radioactive substances are kept from reaching the biosphere after many thousands of years, and to clarify the mechanism of rock behaviors as well. The mechanical and hydraulic properties of rock mass have strong correlations respectively. In this study, an experimental approach with associated with the coupling behaviors of water flow and deformation is conducted with the use of an artificial specimen so as to seize the coupling mechanism of the behaviors. As for a method to seize the behaviors, "matching method" which is a sort of a pattern-matching scheme in the field of image data processing is employed. Finally, the coupling mechanism of the specimen is discussed.

Key Words : radioactive waste rock mass, coupling behaviors of water flow and deformation, pattern matching

キーワード：放射性廃棄物，岩盤，水 - 応力連成挙動，パターンマッチング

1. はじめに

2002年に原子力発電環境整備機構(NUMO)が原子力発電所の使用済み核燃料から分離される「高レベル放射性廃棄物」の処分場建設に向け、候補地選定のための「概要調査地区」の公募を開始した。また、2005年9月には、九州電力が玄海原発(佐賀県玄海町)の3号機で実施を目指しているプルサーマル発電計画が国から許可され、地元自治体からも了解が得られるに至っている。電力各社においても、2010年度までに16~18基の原発でプルサーマル発電の実施を目標としている。さらには、青森県六ヶ所村の核燃料再処理工場ではアクティブ試験が開始されている。わが国だけでなく米国においても、国際的な核不拡散と米国内の放射性廃棄物削減のため、直接地下に処分する方式から再処理方式へと方針転換し、2020年に高速増殖炉運転開始をする計画がある。

こうしたエネルギー施設の稼動にともなって、わが国や米国と言ったエネルギー大国において低レベル放射性廃棄物から高レベル放射性廃棄物に至るまで、様々な放射性廃棄物が排出されることとなる。わが国では含有放射性廃棄物の濃度などの特性に応じて、地層処分、余裕深度処分、トレンチ処分、ピット処分を検討し、トレンチ処分やピット処分の一部については操業に至っている¹⁾²⁾。濃度の高い放射性廃棄物について

は、長期に亘って地下の処分施設全体の安定性を確保する必要があり、処分坑道(地下空洞)についても例外ではない。

放射性廃棄物の処分事業では、核種が地下水により生物圏に運搬される時間と量によって、その安全性が評価されるため、地盤内を流れる地下水の経路長と流速を評価する必要がある。処分場の深度が、余裕深度処分では50~100m、地層処分では300m以深であることを考慮すると、処分坑道の周辺は主として岩盤ということになる。特に、高レベル放射性廃棄物の処分においては処分深度が深くなることから、地山応力も大きなものとなる。大きな地山応力の下、処分空洞などの地下空洞を掘削した場合、特に空洞周辺においてEDZ(掘削損傷領域, Excavation Damaged Zone)が出現することが懸念される¹⁾²⁾。こうした領域における岩盤の力学特性(変形特性、強度特性、水理特性など)は、応力解放にともなう岩盤の変形によって、掘削前に取得した岩石コアのものとは大きく異なることが予想される。したがって、放射性廃棄物の処分事業において重要視される水理特性の変化の程度を予測しておく必要がある。

しかしながら、岩盤の変形と透水性能の変化という連成挙動を的確に評価した研究事例は決して多くなく¹⁾²⁾、特に、不連続面などの存在の影響を評価に組み込んだ事例はほとんど存在しない(例えば金子ら³⁾、あるいは

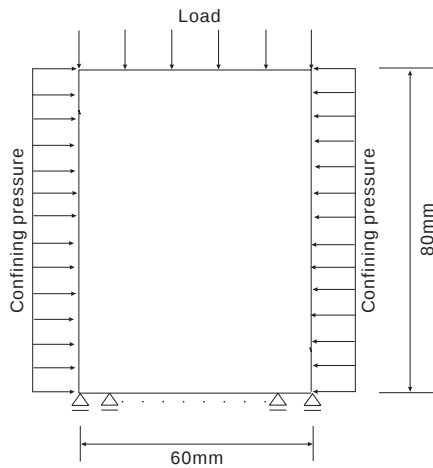


図-1 実験概略図

は井上⁴⁾を参照)。長期に亘る岩盤の性能評価を高い確度で行うためには、岩盤における水-応力の連成挙動のメカニズムを把握することが重要となる。そこで本研究では、岩盤の変形と透水性能の変化という連成挙動を明確にするために、人工供試体に対して平面ひずみ圧縮試験と同時に透水試験を実施し、その際の供試体の変形状況を詳細に検討することで、岩盤における水-応力連成挙動のメカニズムの把握を目指す。

2. 変形 - 透水連成試験

2.1 実験概要

本研究では、豊浦標準砂、石膏そして水をベースに、やや硬質な供試体を作成することとした。また、実験機器の制約（試験機の容量が約 100 kN）により、一軸強度を 5 MPa 程度にする必要がある。そこで本研究では、石膏/砂比を 1 に固定し、水の割合だけを増加させて一軸圧縮強度がおおよそ 5 MPa となるような配合試験を実施した。その結果、石膏：砂：水：混和剤の比が、1:1:0.7:0.02 となるように配合することとした。なお、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ジングを抑制した。打設した供試体の養生期間については、3 時間から 7 日間の範囲で室温で水封養生した供試体に対し一軸圧縮試験を実施した結果、養生期間が 3 時間以上であれば長期的な強度の変化が無い事を確認した。また、供試体については複数を作成し、実験ごとに初期段階の透水係数に大きな変動が無いことは確認している。本実験では十分なマージンを考慮し、室温で 1 日水封養生することとした。

平面ひずみ圧縮試験同時透水試験に用いる供試体の寸法は、高さ 80 mm、幅 60 mm、奥行 80 mm とした。平面ひずみ試験は 2 つの異なる拘束圧（0.5、1.0 MPa）の下で実施することとし、ひずみ速度 0.002（%/s）の

変位制御で単調载荷することとした。実験の概要を図-1 に示す。供試体の前後には、供試体を観察するためのアクリル板（幅 60 mm、高さ 80 mm）と金属板で平面ひずみ状態を確保している。ただし、この観察窓を通してメンブレンで覆われた供試体の変形の細部を観察することは困難であり、あくまでもマッチングをするために設けられたものと捉えて頂きたい。また、前面から後面にかけて円筒メンブレンで供試体を覆うことで供試体と外部を分離する。さらに、メンブレン上下面と試験機ヘッドおよび底面の間にグリースを塗布することで試験機ヘッドおよび底面と供試体上面および下面の間の摩擦の低減を図った。同様に、前後方向（面外方向）も四角いメンブレンとグリースで供試体とアクリル板および金属板の摩擦の低減を図った。

平面ひずみ圧縮試験と同時に透水試験を実施するために、吉田と井上は本研究専用の実験装置を開発した。機器の概要については、特許庁のホームページ（<http://www.jpo.go.jp/indexj.htm>）にてお調べ頂きたい（特許出願番号：特願 2006-224400、発明の名称：透水試験機および透水試験方法）。本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、側部から拘束圧を与え、底部を固定して上部から载荷を行う。この場合、载荷にともなって面外方向と垂直となる不連続面が形成される。従来手法では、载荷軸と同一方向に流体を流して透水性を評価しているが³⁾、この場合、流下方向と発生不連続面の方向が合致していないことから、最も透水性が高まる方向の透水性能を評価していないことになる。そこで吉田と井上は、こうした不連続面の形成にともなって変化する透水性能を評価するために、面外方向に流体を流すことが出来るような装置を開発した。面外方向に透水試験用にベDESTAL が付いており、そのベDESTAL から外部まではパイプでつながっていて、流入側の水タンクの圧力と流出側のピュレットの圧力差で片方のパイプより水を流入し、他方のパイプより流出するというように構成されている（図-2 を参照）。流出した水は一方のピュレットだけに蓄積され、もう一方のピュレットの水位は変わらないことから、二本のピュレットの差圧を測定することで流出量の測定が可能となる。上述したような供試体の変形と透水現象について、図-3 に概念図を示す。

なお、本実験における供試体の巨視的な透水係数 k （m/s）は次式により求める。

$$k = \frac{Q\ell}{\frac{\Delta p}{\rho g} A} \quad (1)$$

ここで、 Q は流量（ m^3/s ）、 ℓ は供試体の奥行幅（m）、 Δp は圧力差（Pa）、 g は重力加速度（ m/s^2 ）、そして A は透水面積（ m^2 ）である。本研究では、前面から背面に水を流すが、圧力差として 200 kPa を与えて実験

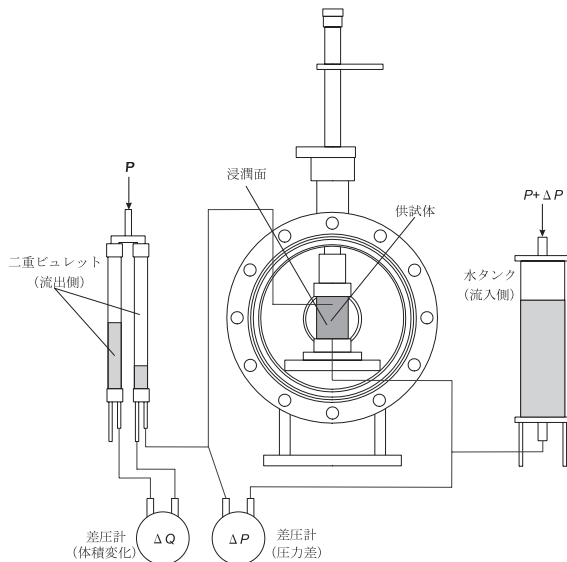


図-2 変形 - 透水実験装置の概略

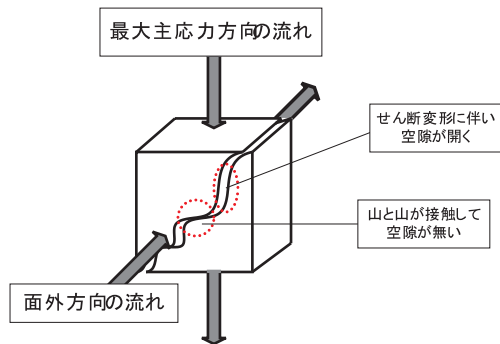


図-3 不連続面の形成と透水現象

を行い、その際の流量を計測して、式 (1) より透水係数を求める。ただし、水温の条件は室温としている。

また、本実験に先立って、0.0, 0.484, 1.2, 2.0 MPa という 4 種類の拘束圧の下で円柱供試体を用いて三軸圧縮試験を実施しているが、これより得られた材料の物性値を表-1 に、軸応力 - 軸ひずみ関係を図-4 に示す。図-4 より、拘束圧が高くなるについてピーク応力が大きくなっていることが分かる。いずれの拘束圧のケースについても、ピーク後はひずみ軟化的な挙動を呈している。

2.2 マッチング法

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、マッチング法という画像解析手法を提案かつ活用をしている⁵⁾⁶⁾。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⁷⁾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

表-1 材料物性	
弾性係数	520 MPa
ポアソン比	0.25
粘着力	3.80 MPa
内部摩擦角	16.7 °

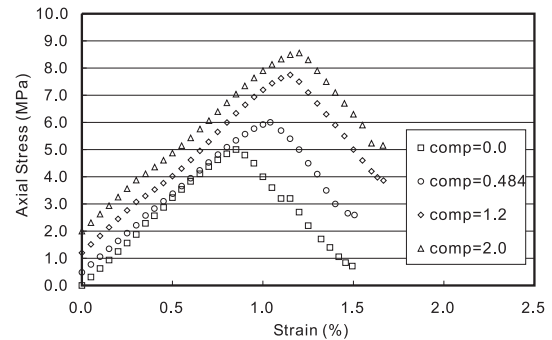


図-4 軸応力 - 軸ひずみ関係 (実験結果)



写真-1 マッチング用の十字マークとランダム模様

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。例えば、ある岩のサンプルに対して変形試験を施し、まず、ある任意の段階で供試体のあるターゲットの画像を取得する。それより後、同様にしてターゲットの画像を取得し、両画像を比較することでその変位場を求める。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、写真画像のデジタル化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、デジタル化した画像の 1 画素の寸法に依存することとなる。実験では、不動点として四隅付近と中央に赤色のインクにてアクリル板に十字のマークを打つ。また、供試体を包むメンブレンには、黒色のインクでランダム状に模様を打つ (写真-1 参照。写真中の青枠がマッチング解析領域)。載

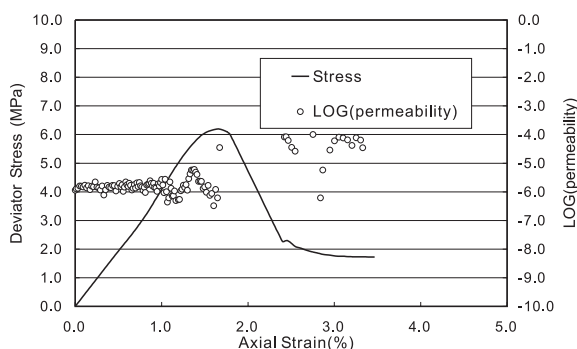


図-5 応力 / 透水係数 - ひずみ曲線 (拘束圧 0.5 MPa)

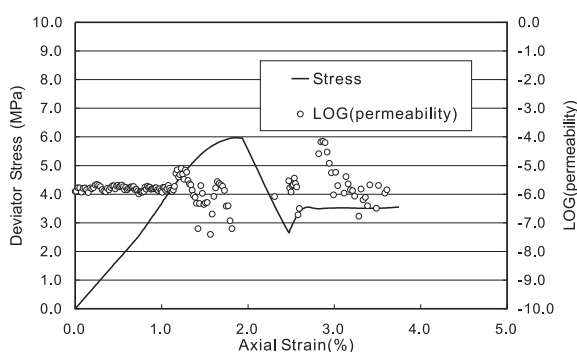


図-6 応力 / 透水係数 - ひずみ曲線 (拘束圧 1.0 MPa)

荷後、適当な間隔でデジタルカメラによる撮影を行い、24bit カラービットマップ形式で取り込んだ画像（デジタルデータ）より、赤色の十字マークと黒色のランダム模様を分離し、黒色のランダム模様の画像に関して、パターンマッチング法によって移動量を算出する。算出後、不動点の位置を確認し、必要に応じて補正を行う。具体的には、変形前の画像より、マッチング解析をするために必要な最小単位のマスキ画像（例えば、 m 画素 $\times$ n 画素）を切り出す。さらに、変形後の画像より、マッチングを実施する領域（例えば、 $3m$ 画素 $\times$ $3n$ 画素）を切り出す。この領域内において、マスク画像を縦横ともに 1 画素ずつ動かし、変形前後の各画素における画素値の差を求め、これを 2 乗してマスク画像全体にわたって和を取る。この 2 乗和が最低となる領域を探すことで移動位置を求め、同時に移動量を算出する。変位場が得られると、それからひずみ場の算出も可能となる。詳細は文献⁵⁾⁶⁾を参照されたい。なお、本実験では、マスク画像が真っ黒あるいは真っ白ということではマッチング解析ができないため、5 mm 角の画像中に、少なくとも 4～5 個程度の点が入る様にスプレーをかけるようにした。

2.3 実験結果および考察

まず、応力とひずみ、および透水係数とひずみの関係を、拘束圧 0.5 MPa の場合を図-5 に、拘束圧 1.0

MPa の場合を図-6 に示す。ただし、応力は載荷重を面積（幅 60 mm，奥行 80 mm）で除した巨視的な鉛直方向の応力、ひずみは鉛直方向の変位量を供試体高さ（80 mm）で除した巨視的な鉛直方向のひずみである。また、透水係数については、計測された流量より式 (1) を用いて算出しており、図では、それを対数スケール（鉛直右軸、単位は m/s）にてプロットしている。

いずれの拘束圧の場合も、载荷（変位制御）とともに荷重が増大し、ピーク手前でひずみ硬化的な挙動を示し、ピーク後は脆性的に軟化現象を生じて残留状態に至っている。図より、弾性係数は、表-1 に掲げたポアソン比 (0.25) を用いると、おおよそ 400 MPa 前後となる。これは、円柱供試体を用いた三軸試験より求めた値（表-1）よりも小さい。この差については、今後、検討したいと考えている。ひずみ硬化を示す領域はそれほど大きくなく、局所的に生じた破壊が脆性的に進展 / 成長しているものと考えられる。軟化後の挙動は、拘束圧 1.0 MPa の場合は、やや応力が上昇した後に残留状態に移行しているのに対し、拘束圧 0.5 MPa の場合は、こうした応力の上昇という現象は見られなかった。この点については、後述するマッチング法においても説明を加える。

透水係数に関しては、いずれの拘束圧の場合も、ピークまでそれほど大きな変化はないが、ひずみ硬化を呈する頃より値が上下に振れるという挙動が見られる。図より、不連続面などが発生していない状態では、実験供試体の透水係数は、ほぼ 1.0×10^{-6} m/s であるものと思われる。拘束圧 0.5 MPa の場合は、ピークを迎えると同時に流量が急激に増え、透水係数としては 10 倍以上になっていることが分かる。一方、拘束圧 1.0 MPa の場合は、ひずみ軟化後もほとんど流量が変化していないが、その後、やや応力が回復した時点で流量が一時的に増加し、そして徐々に減少している。この点についても、後述するマッチング法において考察を加える。なお、ピーク後の透水係数がピーク前より小さくなるような現象も確認されているが、亀裂の発生、成長そしてすべり、すべっている途中でも乗り上げや閉塞といった複雑な現象を生じているものと類推されることから、こうした複雑な透水係数の変動のメカニズムを、限られたデータのみから結論づけることは困難である。今回の実験で確認された現象が普遍的であるというわけではなく、あくまでも本実験にて観察された一例に過ぎないと思う。今後、データを増やしていく必要があることは確かであるが、後述するマッチング法は、従来の手法では類推が難しい変形と透水の連成現象の挙動解明にヒントをもたらすものとする。

参考までに、試験終了後に取り出した供試体の状況を写真-2（拘束圧 0.5 MPa）および写真-3（拘束圧 1.0 MPa）に示す。拘束圧 0.5 MPa の場合は、頂部中央付近から底部左隅へ 1 本、頂部中央よりやや右の付

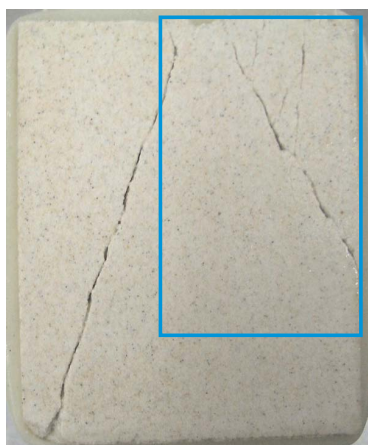


写真-2 実験後の供試体（拘束圧 0.5 MPa）



写真-3 実験後の供試体（拘束圧 1.0 MPa）

近から右側方へ 1 本と、合計 2 本の不連続面が確認できる。比較的高角な不連続面が発生しているが、側圧が小さいため、やや割裂的な破壊を呈するという特徴を有する。一方、拘束圧 1.0 MPa の場合は、頂部中央よりやや右の付近から底部左隅へ 1 本の不連続面が確認できる。頂部付近ではいくつかの分岐も確認できるが、主として、不連続面はこの 1 本に卓越している。なお、写真中の青枠はマッチングの解析領域を表す。

次に、マッチング法を用いて変位場を求め、求めた変位場より算出した最大せん断ひずみの分布を、拘束圧 0.5 MPa については図-7 から図-17 に、拘束圧 1.0 MPa については図-18 から図-28 に示す。前述の通り、巨視的なひずみのレベルで 1.3% 程度までは弾性的な挙動を呈していることから、巨視的なひずみのレベルがおおよそ 1.3% 付近より 3.1% 付近の間における分布図を示している。なお、図のキャプションにおいては、括弧の中に巨視的なひずみのレベルと拘束圧を記している。

マッチングにおいては、デジタルカメラの性能（約

600 万画素）上の制約より、128 画素 × 128 画素（取得画像は、1 画素が約 50 μm であるので、実際には、おおよそ 6.4 mm × 6.4 mm）の領域（マスク領域）を、鉛直方向 12 箇所、水平方向 7 箇所を 100 画素（おおよそ 5 mm）おきに抽出し、4 倍の領域（走査領域、512 画素 × 512 画素、つまりおおよそ 26 mm × 26 mm の領域）についてパターンマッチングを行う。パターンマッチングによって求まるマスク領域の移動量のある一点の移動量と考える。今回の解析では、全体として、高さ 60 mm、幅 35 mm 程度の領域となり、この領域において、鉛直方向 12 点および水平方向 7 点の合計 84 点における移動量が求まることになる。格子状に点が並ぶことから、各点の移動量を用いてひずみ場を算出することが可能となる。詳細は文献⁵⁾⁶⁾を参照されたい。

まず、拘束圧 0.5 MPa について考察を加える。拘束圧 0.5 MPa の場合は、巨視的にひずみ硬化が始まる頃に、内部にややひずみの高い箇所が出現する。載荷とともに、必ずしもこうしたひずみの値が大きい箇所が成長するわけではなく、他の箇所でもひずみの大きい箇所が出現している様子が伺える。これは応力再配分によるものと考えられる。透水係数が上下に振れる挙動は、こうした挙動に対応すると考える。その後、ピーク直前（巨視的な鉛直ひずみのレベルで 1.68%）において、解析領域の下半分、実際の供試体ではほぼ中央付近においてひずみの大きな領域が広がっているが、ピークにおいては（巨視的なひずみのレベルで 1.78%）、供試体の頂部中央よりやや右の箇所に、さらに値の大きなひずみの領域が出現し、軟化とともにそれが進展／成長する挙動を呈している。同様に、左側方部付近にもひずみの大きな領域が出現していることが分かる。写真-2 においてもこれらの箇所には不連続面が発生しているので、マッチングはこの現象を捉えていると考える。なお、最大せん断ひずみの最も大きな箇所は図-17 における不連続面上に出現しており、その大きさは 2.81% である。このように、拘束圧 0.5 MPa の場合は、ピーク前に変形が顕在化し始め、ピーク時に変形の局所化が起こり、しかも不連続面は脆性的に進展／成長していることに呼応して、流量も急激に増加している。これより、進展／成長する不連続面を水が流れたものと類推できる。

次に、拘束圧 1.0 MPa について考察を加える。拘束圧 1.0 MPa の場合は、巨視的なひずみのレベルで 2.0% 付近で底部右側にひずみのレベルの大きな箇所が出現しているが、解析領域底部では、その外に解析対象領域（マスク領域）が移動することもあり、画像解析が困難な場合もある。ひずみのレベルの大きな箇所は、供試体の頂部および底部から徐々に内部に拡大する。ピーク前に透水係数が上下に振れる挙動は、変形が徐々に顕在化していくという現象と関連があるものと思われる。拘束圧 0.5 MPa 場合は、ピーク付近で変形

が局所化していたが、拘束圧 1.0 MPa の場合は、ピーク付近（巨視的な鉛直ひずみのレベルで 1.97%）においても、それほど顕著な変形の局所化は確認できない。軟化後は、巨視的な鉛直ひずみのレベルが 2.51% 以降において、底部左隅より右斜め上に向かってひずみのレベルが大きな領域が拡大している。それは、巨視的な鉛直ひずみのレベルが 3.14% でようやく顕著となっている。写真-3 においても底部左隅より頂部中央付近にかけて不連続面が認められており、拘束圧 1.0 MPa の場合も、マッチングは供試体の変形状況を捉えているものとする。透水係数がひずみ軟化後から増大しているのは、このような挙動に対応しているものと思われる。なお、不連続面の勾配はマッチングと写真-3 では異なっているが、これは、今回用いたマッチング用のグリッドが粗いためと考える。最大せん断ひずみの最も大きな箇所は、図-28 における不連続面上に出現しており、その大きさは 3.15% である。なお、変形の局所化は明確ではないものの巨視的な鉛直ひずみのレベルで 2.51% 以降に認められ、この辺りから透水係数が増大していることを鑑みれば、拘束圧 1.0 MPa の場合においても、透水係数の増大は不連続面の進展 / 成長と密接な関係があることを示唆している。

3. まとめ

本研究では、岩盤の変形と透水性能の変化には強い相関があり、放射性廃棄物の処分などではこうした連成挙動が問題となることから、岩盤における水 - 応力連成挙動のメカニズムの解明を試みることにした。吉田および井上は、従来手法（載荷方向と同じ方向の流量を計測するという手法）では、材料の変形にともなって生ずる変形の局所化面とは異なる方向の流量を測定しており、最も透水性が高まる箇所の計測が出来ないという問題点を踏まえ、変形にともなって発生 / 成長する不連続面を考慮に入れた平面ひずみ圧縮同時透水試験機を開発している。本研究では、この装置を用いて、変形にともなう透水性能の変化について検討を実施した。

本研究では、供試体ごとのバラツキなどを極力低減する目的で、豊浦標準砂、石膏をベースとした人工供試体を用いた。実験では、巨視的な応力とひずみを計測すると同時に面外方向の流量を測るという手法を用いた。また、供試体の巨視的挙動から透水性能の変化を類推することは困難であるため、供試体内部の変形状況の把握を可能としたマッチング法という画像解析手法を採用した。マッチング法の採用によって、変形の局所化状況などが明らかとなり、同時に、透水性の変化状況の類推も可能となった。

本論文では、2 種類の拘束圧（0.5 MPa および 1.0 MPa）を用いて実験を行った。今回用意した供試体は

やや脆性的な物性となっており、ひずみ硬化領域が小さく、かつ、ピーク後は急激にひずみ軟化する傾向を示した。巨視的な応力 - ひずみ関係については、残留挙動を除けば、拘束圧の違いによる差は確認されなかったが、透水性の増大に関しては、拘束圧が 0.5 MPa の場合はピーク付近から生じているのに対し、拘束圧が 1.0 MPa の場合はひずみ軟化後からとなっているという違いが認められた。また、こうした変形の局所化を生じるポイントと透水性が変化するポイントが合致していることも分かった。これらより、透水係数の増大は不連続面の進展 / 成長と密接な関係があることが明らかとなった。こうした点については、巨視的な結果のみを用いては議論が難しいが、マッチング法を併用することで解明された点である。なお、今回の実験では解像度が 600 万画素程度のデジタルカメラを用いているが、ピーク付近で発生する変形の局所化を詳細に捉えるには、さらに高解像度のものが必要になるものとする。

今後は、さらに多種多様な条件の下で実験を行い、より詳細に水 - 応力連成挙動のメカニズムについて検討を加える他、人工供試体だけでなく天然の岩石 / 岩盤を用いた実験を実施する予定である。また、マッチング用のグリッドをより密にした詳細な解析も必要と思われる。

付記： 本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号 17560427、代表者：吉田秀典）、原子力安全基盤機構（代表者：吉田秀典）およびかがわ産業支援財団（代表者：吉田秀典）の助成を得て行なった。

参考文献

- 1) 例えば、核燃料リサイクル開発機構 編：わが国における高レベル放射性廃棄物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 - 総論レポート、核燃料リサイクル開発機構、1999
- 2) 例えば、核燃料リサイクル開発機構および電気事業連合会 編：TRU 廃棄物処分概念検討書、燃料リサイクル開発機構および電気事業連合会、2000。
- 3) 金子岳夫、小山俊博、鈴木康正、加藤和之、久米田正邦、高橋一憲：堆積軟岩のひずみレベルと透水性能に関する考察、第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.89-96、2005
- 4) 井上純哉・金亨穆、せん断変形に伴う単一亀裂の透水性特性の変化に対する統計的手法の適用、土木学会論文集、No.743/III-64、pp189-197、2003
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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

(2006 年 9 月 11 日 受付)

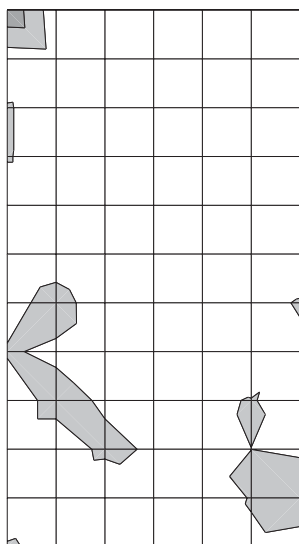


図-7 最大せん断ひずみ分布
(1.32%, 0.5 MPa)

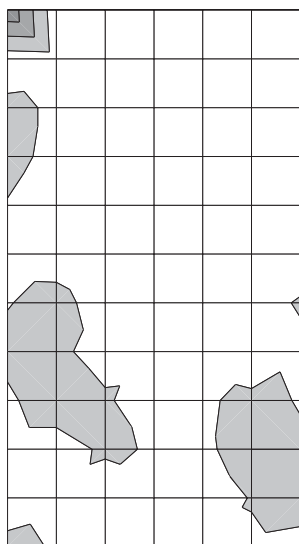


図-8 最大せん断ひずみ分布
(1.42%, 0.5 MPa)

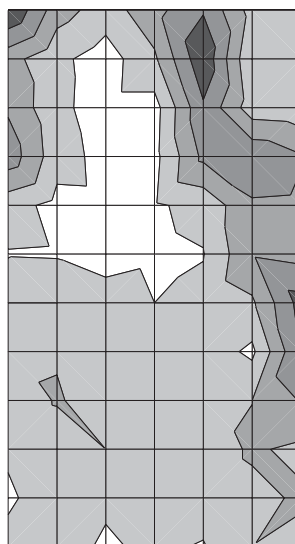


図-13 最大せん断ひずみ分布
(2.42%, 0.5 MPa)

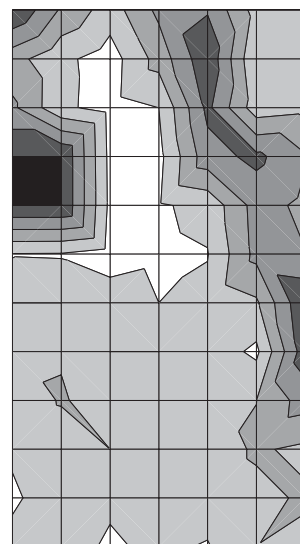


図-14 最大せん断ひずみ分布
(2.61%, 0.5 MPa)

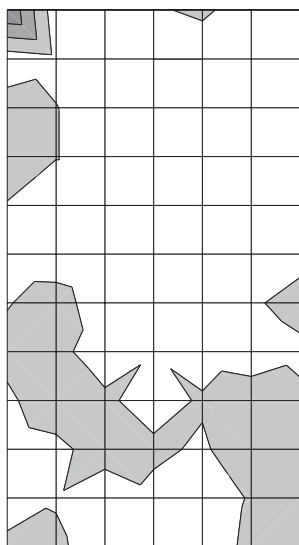


図-9 最大せん断ひずみ分布
(1.47%, 0.5 MPa)

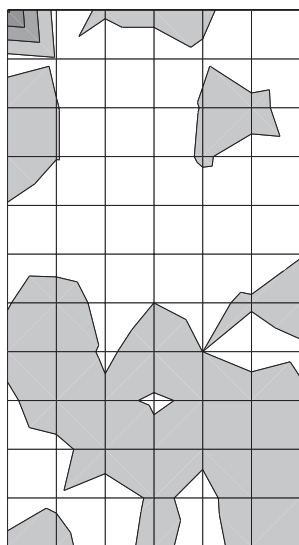


図-10 最大せん断ひずみ分布
(1.53%, 0.5 MPa)

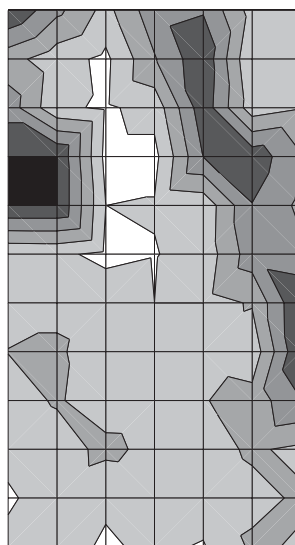


図-15 最大せん断ひずみ分布
(2.79%, 0.5 MPa)

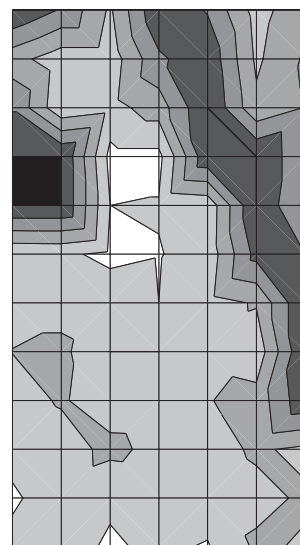


図-16 最大せん断ひずみ分布
(2.83%, 0.5 MPa)

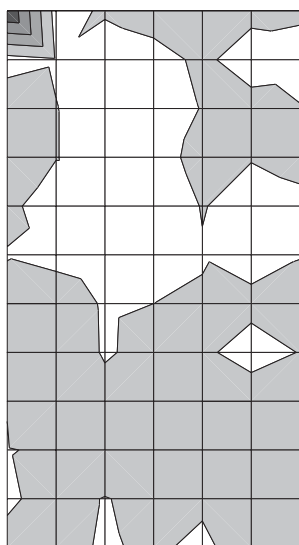


図-11 最大せん断ひずみ分布
(1.68%, 0.5 MPa)

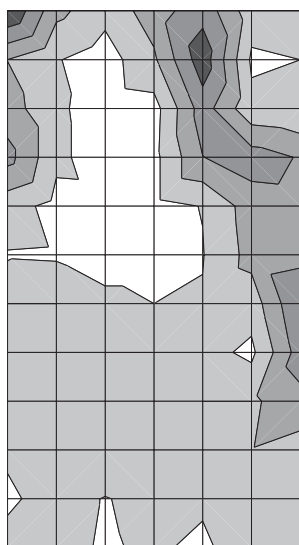


図-12 最大せん断ひずみ分布
(1.78%, 0.5 MPa)

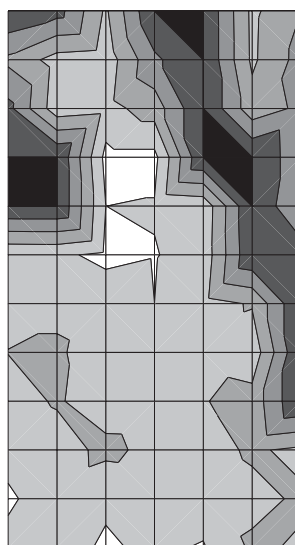
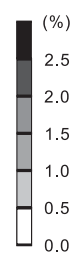


図-17 最大せん断ひずみ分布
(3.13%, 0.5 MPa)



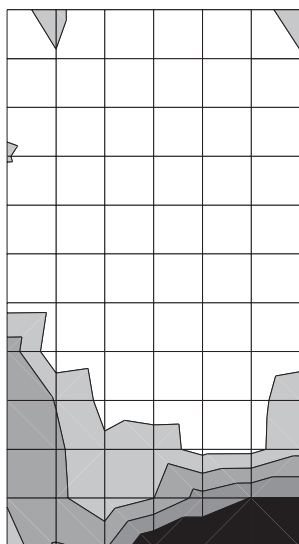


図-18 最大せん断ひずみ分布
(1.36%, 1.0 MPa)

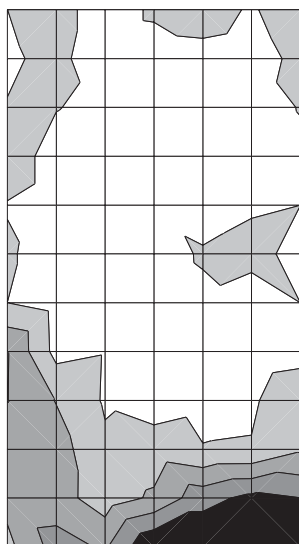


図-19 最大せん断ひずみ分布
(1.46%, 1.0 MPa)

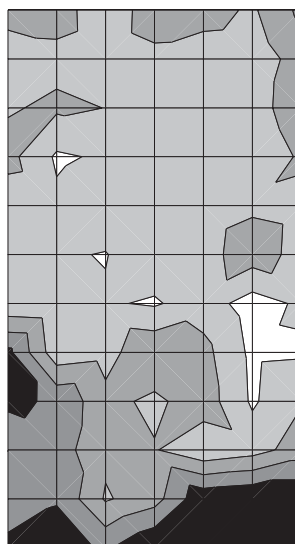


図-24 最大せん断ひずみ分布
(2.51%, 1.0 MPa)

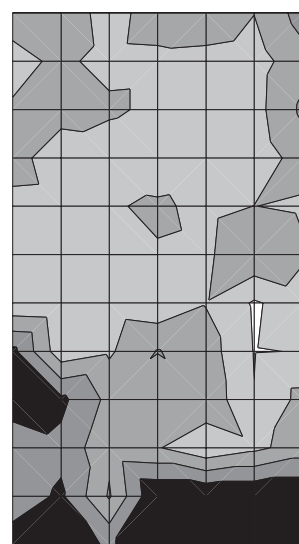


図-25 最大せん断ひずみ分布
(2.69%, 1.0 MPa)

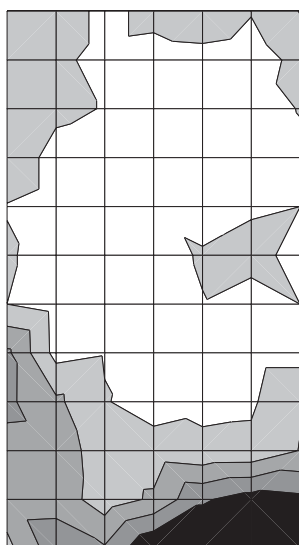


図-20 最大せん断ひずみ分布
(1.57%, 1.0 MPa)

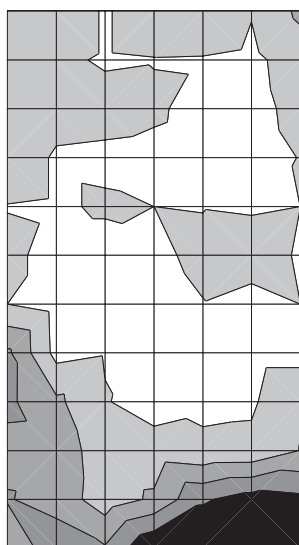


図-21 最大せん断ひずみ分布
(1.69%, 1.0 MPa)



図-26 最大せん断ひずみ分布
(2.85%, 1.0 MPa)

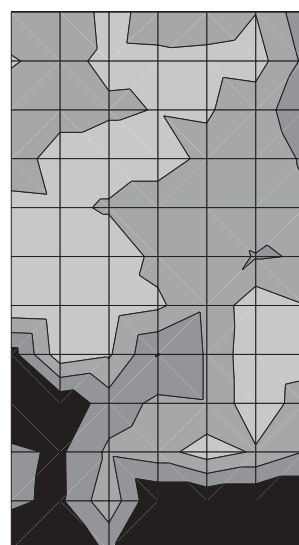


図-27 最大せん断ひずみ分布
(2.99%, 1.0 MPa)

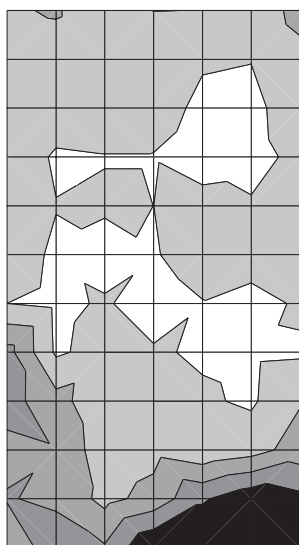


図-22 最大せん断ひずみ分布
(1.82%, 1.0 MPa)

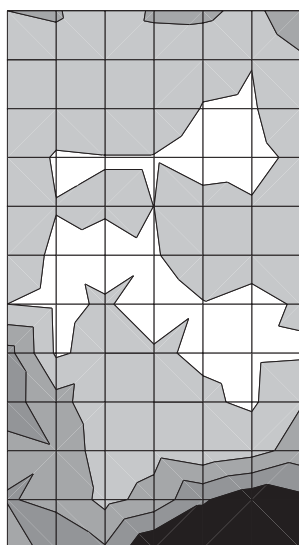


図-23 最大せん断ひずみ分布
(1.97%, 1.0 MPa)



図-28 最大せん断ひずみ分布
(3.14%, 1.0 MPa)

