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

朴 赫*・長田昌彦**・渡辺邦夫***

要 旨

インタクトな岩石に破断面が形成され、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新たに開発した。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。このような試験装置の構築により、せん断過程における応力と流量と割れ目面積や局所垂直変位量等の表面情報が独立して取得可能となった。これを堆積軟岩に適用して、実例を示すとともに、上に示した各種の情報を整理することにより、多くの重要な示唆を得ることができ、本装置の優位性を示した。またこれにより今後のせん断-透水同時試験方法に関して、一つの方向性を示した。

Key words : せん断-透水-可視化同時試験 shear-flow-visualization coupling test, 割れ目面積 fracture area, 面積換算開口幅 area-converted aperture, 局所垂直変位量 local normal displacement

1. は じ め に

岩盤にトンネルや地下空洞などを掘削すると、壁面沿いには掘削影響領域が形成されることは良く知られている¹⁾。とくに放射性廃棄物の地層処分では、この掘削影響領域に沿って、漏れ出した物質が移動して生物圏に近づくことが懸念されている。

岩盤における掘削影響領域は、長さや開口幅などの寸法あるいは引張やせん断などの性状の異なる割れ目が形成されることによって発達する。THURY and BOSSART²⁾は、スイス・モンテリ地下研究所の対象とするオパリナス・クレイについて、トンネル軸と直交する方向の断面における割れ目の発達状況を詳細に記載している。そこに現れた割れ目は、引張やせん断などの性状を有し、エシェロン状の構造などを作りながら連結しあって掘削影響領域を形成していることが読み取れる。また、青森県六ヶ所村の堆積軟岩内に掘削された試験空洞では、掘削時に空洞壁面に平行方向に発生した割れ目沿いに剥落が生じたことが報告され

ている³⁾。

近い将来建設されるであろう放射性廃棄物の地層処分では、前述のオパリナス・クレイや六ヶ所の堆積軟岩のような、比較的割れ目を含まない場が選定される可能性がある。そのような場における掘削影響領域の透水特性の変化を調べるためには、インタクトな岩石状態から初期応力の再配分に伴って割れ目が発生・進展していく過程における透水特性の変化傾向を知っておくことが重要である。

また、掘削空洞壁面では、その直交方向が最小主応力軸となることが多い。空洞掘削による応力解放は空洞周りに引張割れ目を形成させ、その方向は主に壁面に平行方向に向くことになる。応力解放による空洞周りの変形時には引張割れ目だけでなく、せん断割れ目も発達する⁴⁾。Fig. 1に示すように、せん断割れ目は、独立している引張割れ目をつなげることによって空洞周りの透水性を増加させ、掘削影響領域を形成させる一つの原因になる。このとき、空洞壁面に沿った水の流れ方向とせん断方向は直交していることになる。したがって、掘削影響領域における透水挙動を把握することを目的としてせん断-透水同時計測を行う場合は、せん断方向と直交する方向の透水特性の変化傾向を知ることが重要となる。

MOERI and BOSSART⁵⁾は掘削影響領域の割れ目の発達状態を把握するため、ボーリング孔に蛍光液体を注入し割れ目を着色させ、まわりのボーリング・コアでの割れ目との関係を調べている。また、BOSSART *et al*⁴⁾はこの観

* 埼玉大学理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Saitama University(会員)

** 埼玉大学地圏科学研究センター Geosphere Research Institute, Saitama University(会員)
 E-mail : osada@mail.saitama-u.ac.jp

*** 埼玉大学地圏科学研究センター Geosphere Research Institute, Saitama University(会員)

Fig. 1 Fracture generation and water flow direction as a major concern due to tunnel excavation

察データをもとに掘削影響領域での引張割れ目とせん断割れ目の発達メカニズムを提案している。しかし、これらは、ボーリング孔と孔の間にある割れ目については可視的確認がとれていないため、マッピング時には主観的記入をしている。つまり掘削影響領域のより詳しい理解のためには、リーデルせん断実験⁶⁾のように全く破壊を生じない状況から、破壊に至る過程を再現し観察することが必要である。

そこで本論では、掘削影響領域の透水性増加の一因であると考えられるせん断に伴う割れ目に注目し、インタクトな岩石状態から破壊後まで、せん断方向と直交する方向における透水性の変化傾向およびせん断破壊メカニズムを捉えるために、せん断-透水-可視化試験装置を新たに開発し、堆積軟岩に適用して得られた実験結果を報告する。

2. 新たに開発したせん断-透水-可視化試験装置

2.1 これまでのせん断-透水同時試験の動向

これまでのせん断-透水同時試験の研究動向には、二つの傾向がある。一つは単一割れ目を持つ試料に対する同時試験であり、もう一つはインタクト状態からの同時試験である。単一割れ目試料に対する同時試験では、一面せん断試験装置が用いられることが多く^{7)~9)}、その他リングせん断試験が用いられることもある¹⁰⁾。インタクト試料の同時試験は、主に三軸圧縮試験装置を用いて実施されることが多い^{11)~13)}。張ら¹⁴⁾は、せん断-透水同時計測手法について現状と課題を述べながら、せん断-透水同時試験の前提条件を次のように提案している。

- 1) 応力・ひずみ経路のあらゆる段階での透水試験が可能であること。また、この際、供試体に発生するせん断ひずみの計測あるいは算出が可能であること。
- 2) 供試体の透水特性を評価する際、透水方向と既存あるいは発生したせん断面との関係を明確に設定あるいは判断できること。

3) 可能な限り、簡単な実験装置および実験操作により精度の良い定量的な結果が得られること。

4) いかなる透水試験法でも柔軟にカップリングできること。

5) 安定した状態で透水試験が行えることである。例えば、未固結堆積岩等を対象とした場合、水が試験体に接触、通過する際の流失および浸食が妨げられることである。

また、直接せん断試験法(一面せん断試験やリングせん断試験など)と間接せん断試験法(三軸圧縮試験や真三軸試験など)に分けて、透水試験との組み合わせについて、その長所短所を挙げながら説明を加えている。

岩石の破壊過程を直接可視化しようとする試みは、古くから実施されている。MEANS¹⁵⁾は粒状材料を70%まで変形させ、この間の粒子の移動や割れ目面上での変位などの微細構造の変化を透過光を用いて調べている。岩松・山田¹⁶⁾は高压容器内にボアスコープを設置し、共役なせん断割れ目の形成過程について論じた。またSEMの利用^{17)~19)}や、実体顕微鏡の利用²⁰⁾なども行われている。最近ではCCDカメラを用いて連続的にデータの取得が行われている^{21), 22)}。

2.2 開発した装置の概要

前述の張ら¹⁴⁾が提案しているせん断-透水同時試験の前提条件のすべてを満足させることは困難であるが、各前提条件を考慮に本装置では次のようにした。

- 1) 前提条件1については、インタクト試料とせん断フレームの寸法を考慮した設計をし、せん断応力の値が残留応力領域まで計測できるようにせん断距離を確保した。また、可視化データを画像解析することによって、せん断ひずみの算出を行うこととした。
- 2) 前提条件2については、せん断割れ目が供試体の中央を通るよう、また、水が供試体の下面から上面方向に流れるように設計し、透水方向を明確にした。
- 3) 前提条件3については、簡単な試験装置であることおよび形成されたせん断面の可視化ができることを考慮し、一面せん断試験方法を採用することとした。
- 4) 前提条件4については、長時間透水を続けながらせん断変形による流量の変化を測るため、定水位透水試験方法を選択した。
- 5) 前提条件5については、まだ検討中である。

本試験装置開発の特徴は、岩石の破壊過程を可視化しながら、せん断-透水同時試験を行うことである。また、データの連続取得の容易さ、およびデータ取得後の画像解析への汎用性、また今後の解像度の向上による精度向上を視野に入れてCCDカメラによる供試体表面観察を取り入れたことである。岩石試料に対し、一面せん断・透水・せん断破壊試料の表面可視化を同時に行えるようなプロトタイプ的な装置の構築を主眼とし、厳密な検討は今後の改良に委ねることとした。

本研究で設計・開発したせん断-透水-可視化試験装置の

概略図をFig. 2に示す。装置は卓上式であり、容易に移動できる大きさである。この装置は、垂直・せん断荷重載荷ユニット、透水試験ユニット、デジタル画像センサユニットからなる。載荷フレーム等の寸法を考慮して、ここで用いる供試体寸法は幅60mm、奥行き40mm、高さ20mmの角柱供試体とした。

2.2.1 垂直・せん断荷重載荷ユニット

垂直・せん断荷重載荷ユニットは、土質試験用一面せん断箱と類似の構造となっている。ただし形成されるせん断面が鉛直となるように、Fig. 3のような構成とした。

せん断荷重は、図中に示したウェッジをもつ二つのL字形のせん断フレームにより載荷される。左側のせん断フレームは固定し、右側のせん断フレームを電磁モータによって動かすことにより、せん断荷重を加える。せん断荷重は容量4.9kN(500kgf)のロードセルによって、またせん断荷重方向の変位は変位計(LVDT)によって計測する。なお、せん断中の垂直荷重載荷板からの摩擦を軽減するために、図中上部にスライダを配置している。

垂直荷重は次のようにして載荷する。2枚の垂直荷重載荷板を4本の支柱で連結し、せん断フレームを覆うように配置する。支柱につけられたネジを手動で締めることによって垂直荷重を載荷する。せん断フレームと下部垂直荷重載荷板の間に、二つの小型ロードセル(容量それぞれ2kN)を配置して、載荷時には二つのロードセルからの出力が均

Fig. 2 Schematic diagram of shear-flow testing system (side view)

- A : direct shear unit B : shear loading cell
C : LVDT D : controller
E : electronic motor F : water tank (constant head)
G : CCD camera H : electronic balance

Fig. 3 Schematic diagram of direct shear unit (plane view)

等になるように締める。

2.2.2 透水試験ユニット

透水試験方法は、長時間の計測が可能となるように、定水位透水試験を採用した。Fig. 4に示すように、供試体下面から注水し、供試体上面へ排水する構造となっている。流入出用のチューブには、割れ目が形成されたあとの高流量にも対応できるように内径4mmのウレタンチューブを用いた。排水量は電子天秤によって計測する。

供試体周りの止水は、次のように行った。まず供試体側面をシリコンゴムで被覆する。供試体の上下端面は、シリコンゴム部を覆うようにフレキシブルなゲルシート²³⁾を挟み、また供試体上面における表面構造の観察が可能となるように透明なアクリル板を、垂直荷重載荷板と同様に、ネジのついた四つの支柱で固定する。このような止水方法により、せん断面が形成されたあともシリコンゴムおよびゲルシートの弾性によって3mm弱までのせん断変位にも対応できることを予備実験により確認している。

なお、このときアクリル板によって拘束される力が不定

Fig. 4 Schematic diagram of hydraulic conductivity testing unit and specimen setting

Fig. 5 Schematic diagram of digital image recording unit

となる。この点については、可視化部分を取り除き、三軸圧縮状態が再現可能な載荷フレームを製作し、三軸せん断-透水試験を行うことで、確認を試みた。まず、せん断応力と垂直応力をともに0.00MPa、初期上下方向(観察方向)応力を0.05MPaにした試験では上下方向応力がせん断応力曲線の降伏点では1.03倍つまりほぼ一定であることと、せん断応力のピークでは1.98倍になることを確認している。さらに詳しくは、別稿にて議論する予定である。

2.2.3 デジタル画像センサユニット

上述したように、供試体上面を透明なアクリル板で覆うことによって、Fig. 5に示すように、せん断中の目に見える割れ目の発達過程を供試体上部表面で捉えることができる。ここではCCDカメラとしてキーエンス社製高速デジタル画像センサ(CV2000)を用いた。1フレームあたりの画素数は、512×480ピクセルである。

2.2.4 開発した装置の課題

ここに示した装置の課題としては、供試体上下方向への拘束力が不定であるために真の応力状態が定まらないことである。支柱間に小型のロードセルを配置することで応力を計測するのは可能であるが、供試体への水の注入排水を行うためには供試体表面とアクリル板の間に隙間を設ける必要がある。供試体表面を可視化することを合わせて行うための工夫が必要である。例えば、透水可能かつ観察可能な上下板の適用がなされれば改善できる。

もう一つの課題は、試験装置の設計上最小主応力軸が観察方向と一致していることで、観察方向と直交する割れ目が形成されやすいことである。とくに拘束圧(初期垂直応力)を大きくした状態では、この傾向が強くなる。この課題にも、上記の新材料の開発とそれによる拘束圧のコントロール(例えば、観察方向を中間主応力方向にし、垂直応力方向を最小主応力方向にするなど)で改善できる。

3. 堆積軟岩への適用例

3.1 乾燥供試体によるせん断-可視化試験

せん断変形中の供試体の変形過程を把握するため、また製作した試験装置の試運転を兼ねて、乾燥供試体を用いた一面せん断-可視化試験を行った。これ以降本論文では、試験に試料のインタクト状態から破壊後までの一連の過程を扱うため、「応力」と「ひずみ」を連続体区間だけでなくインタクトから破壊後までの概念として使うことにする。

3.1.1 供試体の作成と試験方法

試料には、新第三紀の堆積軟岩である軽石凝灰岩を用いた。Table 1にその物性値を示す。乾燥密度、湿潤密度、間隙率および透水係数は、角柱に整形した供試体から求めている。一方、一軸圧縮強さと引張強さは、別途実施した円柱供試体(直径60mm、高さ120mmあるいは高さ60mm)の試験によって求めたものである。この試料を60mm×40mm×20mm

Table 1 Physical, mechanical and hydraulic properties of specimen

Dry density	Wet density	Porosity	q_u	σ_t	k (Darcy)
g/cm ³	g/cm ³	%	MPa	MPa	×10 ⁻⁵ cm/s
1.02	1.55	52.71	2.07	0.17	4.75

Fig. 6 Stress-shear displacement curve and strain ellipses of rosette strain gauge during shear-visualization coupling test (shear displacement; a: 0.25mm, b: 0.89 mm, c: 1.10mm, d: 1.71mm)

の角柱供試体に整形し、60℃で24時間乾燥させたあと、室内で常温になるまで放置した。供試体の変形の計測にはロゼットゲージを用い、供試体下面中央に接着して計測した。

載荷方法は、垂直応力を0.7MPaまで負荷したあと0.1 mm/minの速度でせん断荷重を加えた。このときの供試体上面における変形はデジタル画像センサユニットを用いて観察した。

3.1.2 試験結果

Fig. 6にこのときのせん断応力および垂直応力-せん断変位関係を示す。図より、せん断変位0.89mmでピークせん断応力に達し、その後軟化していることがわかる。せん断変位が2.3mmに達した段階で載荷を止めている。一方、垂直応力はせん断初期に0.7MPaとしたが、せん断変位に伴いいったん減少したあと増加に転じ、せん断応力のピークのあとに、垂直応力がピークに達している。Fig. 6中にはa～dの各点におけるひずみ楕円も示してある。なお、破線は初期状態の真円を表している。またこのときの応力径路を描いたものが、Fig. 7である。b点で表されるピーク後、ループを描きながらc点からd点にかけては残留摩擦強さとほぼ一致する直線上を移動している。

Fig. 8に載荷過程をとおしての主ひずみ方向(圧縮)の経時変化を示す。なお主ひずみ方向は0°が垂直応力の載荷方向に一致するように定義し、時計回りを正にとっている。載荷初期(a:せん断変位0.25mm)には垂直応力の載荷により、上下方向に歪んだ形となっており、Fig. 8より主ひず

み方向は、ほぼ 0° となっている。せん断変位に伴い、主ひずみの方向は徐々に時計回りに回転し、ピーク時にはあまり変化せず 56° 程度で推移する。

3.1.3 破壊後の供試体の観察

乾燥供試体によるせん断-可視化試験後の供試体破断面を観察すると、供試体上面から下面まで割れ目が貫通していることが確認できた。しかし、方向は必ずしも鉛直ではなく、破断面は粗い形状となっている。とくにひずみゲージを貼り付けた部分を避けるように破断面が形成されることが多かった。これはひずみゲージ接着用の接着剤の剛性が供試体のそれと比較して大きかったためであると考えられる。また供試体上下面付近では、観察方向に直交する方向の割れ目が形成されることが多く、最終的にはこの部分が浮き上がるような変形をしている。これは、応力状態から予想されるように、最小主応力軸に直交する割れ目が発達しやすいことによる。供試体表面上において、このような浮き上がりが顕著に観察されるのはFig. 6中のc点からd点にかけてである。また、試料表面の画像(破壊前・後)を用いた2次元画像解析によるせん断ひずみ分布を見ると、中央部に大きい値を示し実際の割れ目と対応していることを確認している。

Fig. 7 Stress path during shear deformation (Shear-visualization coupling test for dry specimen, a~d correspond with the stages shown in Fig. 6)

Fig. 8 Change of principal strain axis angle with shear deformation (Shear-visualization coupling test for dry specimen, a~d correspond with the stages shown in Fig. 6). The 0 degree is defined as the direction of normal stress to be applied.

以上より、せん断応力のピーク点を超えて残留状態に近づくにつれ、せん断試料の変形は中央部に局所化すること、割れ目を除く部分はある程度均一の変形場となることがわかった。

3.2 飽和供試体によるせん断-透水-可視化試験

3.2.1 供試体の作成と試験方法

試料には前項と同じ軽石凝灰岩を用いた。乾燥供試体と同様に、 $60\text{mm} \times 40\text{mm} \times 20\text{mm}$ の角柱供試体に整形し、 60°C で24時間乾燥させたあと、常温で冷やした。その後、シリコンラバーで側面を被覆して乾燥させ、飽和装置内において蒸留水で飽和させた。

このようにして作成した供試体を垂直・せん断荷重ユニットにセットする。垂直応力が一定になるのを待って、せん断荷重を 0.05mm/min の変位速度で載荷した。試験の始めから終わりまで、一定の水頭差(動水勾配 40.5cm/cm)をつけて、透水量 Q を計測した。またこのときの供試体上面における変形はデジタル画像センサユニットを用いて観察した。試験は、せん断応力がピークに達したあと約50%まで強度低下が生じた段階で終了とした。

3.2.2 応力-せん断変位-流量関係

インタクト飽和供試体の応力-せん断変位-流量関係の一例を、Fig. 9に示す。この場合は初期垂直応力が 0.0MPa である。せん断変位の増加に伴い、せん断応力、垂直応力ともに増加し、せん断応力のピークに遅れて、垂直応力のピークが現れている。この傾向は、先に示した乾燥供試体の場合と同じである。流量は、載荷初期からわずかに減少したあと、せん断応力-せん断変位関係の降伏点付近から増加

Fig. 9 Shear-flow coupled behavior and typical stages during shear-flow-visualization coupling test for intact-saturated specimen (1: experiment starting point, 2: beginning of elastic behavior of shear stress curve, 3: yielding point of shear stress curve, 4: peak point of shear stress, 5: 90% point of peak shear stress, 6: 80% point of peak shear stress, 7: 70% point of peak shear stress, 8: 55.5% point of peak shear stress)

に転じている。その後せん断応力のピーク時にも増加し続け、残留応力状態にむかって増加割合が減少していく傾向にある。

Fig. 9中の破線は、せん断-透水挙動において特徴のあるところを選んだもので、8段階に分類しておく。1：試験開始、2：せん断応力曲線の弾性挙動開始、3：せん断応力曲線の降伏点、4：最大せん断応力点、5：最大せん断応力の90%点、6：最大せん断応力の80%点、7：最大せん断応力の70%点、8：最大せん断応力の55.5%点。

3.2.3 供試体上面の変形過程

Fig. 9の供試体上面における変形過程をFig. 10(a)に示す。試験中、画像は1秒おきに記録されているが、ここではFig. 9に示した特徴的な各段階における画像(第3～8段階)を示した。またFig. 10(b)には、各段階の画像において確認できる割れ目のトレースを開口幅も考慮してデジタイズしたスケッチを示す。画像で確認できる割れ目が形成されたのは第3段階、すなわちせん断応力-せん断変位関係における降伏点に達したときであり、このとき割れ目は供試体中央の真ん中から左側にかけてエシェロン状に数条観察できる。その後、せん断応力のピーク時(第4段階)に至るまでに、ほぼ供試体中央全体に広がる。ピークを過ぎたあとも割れ目は徐々に進展して連結するが、第6段階以降では新たに割れ目が形成されるというよりは、第6段階までに形成された割れ目の開口幅が徐々に増加するようにして第8段階に至っている。これらを割れ目の発達過程と流量との関係からみると、第3段階において流量が増加しはじめる点および第6段階以降、流量の増加割合がほぼ一定(直線で近似される)であることに対応しているものと考えられる。この現象はFig. 3に示したせん断装置の設計に依存していると考えられる。つまり、設計の意図の一つであるせん断面の位置を試料中央にするということが実現されている。

3.2.4 流量-割れ目面積関係

ここでは流量と割れ目面積の増加傾向との関係を求める。割れ目面積は、Fig. 10(b)に示したようなデジタルスケッチを3回実施して、平均的な面積を算出した。なおこのときの1ピクセルの実面積は 0.0173mm^2 に相当する。

Fig. 11に流量と割れ目面積との関係の一例を示す。図中のエラーバーは3回デジタルスケッチしたときの最大値

Fig. 10 CCD images at each stage and digitalized visible fractures (Numbers correspond with the typical stages shown in Fig. 9)

Fig. 11 Fracture flow rate versus fracture area (Numbers correspond with the typical stages shown in Fig. 9) と最小値を示している。図より、明らかな非線形な関係があることがわかる。これより、ダルシー則が成り立たないことは明らかである。3乗則との関係については、次章で議論するが、ここで得られた非線形な関係は、平行平板モデルを仮定して求めたものではないことに注意してほしい。

4. 考 察

このような試験装置の構築により、せん断過程における応力と流量と割れ目面積が独立して取得可能となった。これらの情報を用いた若干の考察を行って、ここで開発した

試験装置の優位性を示す。本試料のせん断-透水と割れ目発達過程の詳細な検討は、稿を改めて行うこととしたい。

4.1 レイノルズ数の範囲

割れ目の中の水の流れは、次式で表される、いわゆる3乗則でモデル化されることが多い^{24)~26)}。

$$Q_f = \frac{g \cdot i \cdot w}{12 \cdot \nu} e_h^3 \quad (1)$$

ここに Q_f は単位時間あたりの割れ目流量、 g は重力加速度、 i は動水勾配、 w は透水方向に垂直な方向の長さ、 ν は水の動粘度(動粘性係数)、 e_h は水理学的開口幅(hydraulic aperture)である。この3乗則は流れが層流であることを前提としているため、試験結果が層流条件を満たしているか確認しておく必要がある。一般には、レイノルズ数と摩擦損失係数の関係が反比例しているかどうかで判断される²⁴⁾。レイノルズ数 Re は慣性力と粘性力の比として定義され²⁷⁾、

$$Re = \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}} \simeq \frac{U_0 d}{\nu} \quad (2)$$

で表される。ここに U_0 は代表的流速、 d は代表的長さ、 ν は流体の動粘度(あるいは動粘性係数)である。摩擦損失係数 f は抵抗係数とも呼ばれ、流体が平行平板中を流れる場合を考えると、流体と壁面との摩擦による損失を表している。したがって、この判定をそのまま今回の試験に適用するには問題がある。すなわちインタクトからのせん断試験では、割れ目は徐々に進展するため、割れ目壁面の面積がせん断変位に伴って変化してしまうためである。そこでここでは、式(2)において代表的長さを式(1)の水理学的開口幅を採用してレイノルズ数のみを算出し、既往の研究結果の範囲との比較するに留める。この点に関してはさらなる考察が必要である。このようにして求めた本試験に対するレイノルズ数の範囲は、最大24程度であり、既往の研究結果²⁴⁾と比較すると、ほぼ層流状態にあると仮定できる。

4.2 割れ目流量、割れ目面積、開口幅の関係

本試験で直接計測される透水特性に関係した諸量は、全流量と割れ目面積である。ここでは、これらのパラメータから導かれる割れ目流量や水理学的開口幅、力学的開口幅を用いて、それらの関係を考察する。

4.2.1 割れ目流量 Q_f の定義

計測された流量 Q は、インタクト部分を通る流量と形成された割れ目部分を通る流量の和である。インタクト部分の流量は、岩石の変形、とくに体積ひずみあるいは間隙率の変化に依存する。割れ目流量に比べてインタクト部分の流量が無視できる場合には $Q_f \simeq Q$ と考えることができる。しかしここで用いた試料では、Table 1 に示すように、かなり大きな透水係数を有している。したがってインタクト部分の流量を考慮する必要がある。

ここでは体積ひずみは計測されていないので、これに代

Fig. 12 Fracture flow rate versus fracture area (Numbers correspond with the typical stages shown in Fig. 9)

わる量として実験的に得られる垂直応力と流量によって、この影響を考慮する。Fig. 9の第3段階までにおける流量と垂直応力との関係は非線形な関係にあるが、垂直応力が0.1MPaまでの応力範囲においては、弾性変形分の流量の変化を ΔQ として、

$$\Delta Q [\text{cm}^3/\text{s}] = 0.04081 - 1.82 \times 10^{-3} \log \sigma [\text{MPa}] \quad (3)$$

で与えられる実験的な関係がある。インタクト部分に関しては、割れ目の形成後もこの関係が成り立つと仮定して割れ目流量 Q_f を、

$$Q_f = Q - \Delta Q \quad (4)$$

と定義する。このとき割れ目流量と割れ目面積との関係はFig. 12で与えられる。なお図は両対数軸とした。Fig. 10(b)において、5段階以降は割れ目の位置があまり変化しないことを考慮して、Fig. 12では第3, 4段階(黒丸)と5段階以降(白丸)で、異なるマークを用いている。またFig. 12中の破線は、第5段階以降のデータをフィッティングしたものである。これらにはほぼ線形な関係が認められる。ただし、このときの傾きはほぼ3に近いが、これが3乗則に起因しているかどうかは、さらなる検討が必要である。なお上述のように、垂直応力の変化分を考慮して割れ目流量を定義したが、この試験に関しては、このような操作を行わずとも第4段階以降この近似直線の傾きに影響を与えるほどの影響はないことを確認している。

ここで特記すべきことは、せん断応力のピークに対応する第4段階はフィッティングには用いていないが、その平均値はこの近似直線上に乗っていることである。このことは、破壊以降の透水特性は見かけ上割れ目が繋がっていかなくとも、統一的に解釈できる一般的な傾向があることを示唆している。これに対して、第3段階の割れ目流量はこの傾向から大きくはずれている。このずれは、割れ目が未だ十分に連結していないことを表現している可能性があり、割れ目の発達と透水特性の変化を考察するうえでは今後詳細に検討する必要がある。

4.2.2 開口幅と割れ目面積の関係

先に定義した割れ目流量 Q_f を用いて、水理学的な開口幅 e_h を式(1)より計算し、割れ目面積との関係を調べる。

Fig. 13 Hydraulic aperture versus fracture area (Numbers correspond with the typical stages shown in Fig. 9)

この結果をFig. 13に示す。前項の議論を踏まえて、第4段階以降のデータについての近似直線を破線で示している。図から明らかに直線関係が認められる。ここで注意すべきことは、このようにして近似した直線の原点がほぼゼロを通っていることである。このことは、インタクトな状態から割れ目を形成させた場合の当然の帰結である。逆に言えば、ここでデジタル計測した割れ目面積がある程度妥当であることを示すものである。

割れ目面積を供試体幅 w で除し、これをもって開口幅相当の値として用いることも可能である。一般には、BANDIS²⁸⁾やBARTON²⁹⁾の方法を用いて、垂直応力-垂直変位関係から導かれる量を力学的な開口幅と定義して議論されることが多い。割れ目面積を供試体幅で除した値は、いわゆるこの力学的開口幅と似たような表現となるが、定義が異なるので、ここではこれを面積換算開口幅(area-converted aperture; e_c)と呼ぶことにする。

この面積換算開口幅と水理学的開口幅の関係は、Fig. 13から容易に推定されるように、直線関係で表され、

$$e_h [\text{mm}] = -0.00043 + 0.114 e_c [\text{mm}] \approx 0.114 e_c \quad (5)$$

となる。したがって水理学的開口幅と力学的開口幅の議論^{26),30)}と同じく、面積換算開口幅は水理学的開口幅と比較して、大きな値をとり、この例では8.7倍ほど大きい。この倍率は、他の研究²⁶⁾で得られている水理学的開口幅と力学的開口幅の比の範囲内にある。なおここで示した e_c には、載荷板と供試体との間に発生する不具合等による誤差は含まれていないことを付け加えておく。

以上より、ここで得られた割れ目面積を用いれば、単一割れ目についてしばしば考察される垂直変位-透水特性関係と同等の表現が得られることになる。

4.3 画像解析による割れ目近傍の垂直変位の推定

ここで開発した試験装置では、供試体の垂直変位量を計測できないが、その代わりとして1秒間隔での供試体表面の変形場が画像として計測されている。したがって、この画像データに対して画像解析を行うことによって、割れ目近傍における変位場を推定することができる。

ここではその一例として、形成された割れ目の範囲を含

Fig. 14 Template displacement before and after shear deformation (CCD image corresponds with the stage -4 shown in Fig. 9)

Fig. 15 Local normal displacement versus shear displacement (Numbers correspond with the typical stages shown in Fig. 9)

む領域を覆うように、Fig. 14のようなテンプレートを配置し、そのテンプレートが初期位置に対してどのように変化したのかをサブピクセル推定を適用したテンプレートマッチング³¹⁾により求めた。

せん断方向に10個のテンプレートを配置しているため、それぞれの位置における移動量がベクトル量として求まる。このうち垂直変位成分を取り出して、10個の垂直変位量の平均を局所垂直変位量(local normal displacement; LND)と呼ぶこととする。この値とせん断変位との関係をFig. 15に示す。図中には、エラーバーでそれぞれのせん断変位時における最大値と最小値を示している。また参考のため、実線で垂直応力の値を、さらにFig. 9に対応した各段階を示してある。なお、この画像解析における計測誤差は、1ピクセルの長さ(=0.1315mm)程度である約0.1mmである。

LNDの変化傾向は、先に示したせん断過程の各段階と非常に一致をみせる。すなわち、第2から第3段階にかけて変位量が観測されはじめ、第3から第4段階ではLNDが急増する。第4段階である垂直応力のピークを過ぎた辺りからこの勾配が変化し、第5から第8段階では、不規則ではあるがほぼ一定した傾きで増加している。よって、精度は高くないものの、ここで定義した局所垂直変位

Fig. 16 Fracture flow rate versus various fracture apertures (e_c : area-converted aperture, LND: local normal displacement, e_h : hydraulic aperture. Numbers correspond with the typical stages shown in Fig. 9)

量LNDは供試体内部の変位場を適切に表現しているものと考えられる。

最後に、割れ目流量とLNDおよび e_c の関係をFig. 16に示す。図には参考のために水理学的な開口幅 e_h と割れ目流量の関係を実線で示してある。この図から次のことが言える。

- 1) まず e_c は破壊後以降、破線で示したような直線で近似できる。
- 2) 一方、LNDと割れ目流量の関係はこの破線付近を通るものの、全体としては非線形な関係にある。第6段階以降ではほぼ直線関係にあるが、破線で示した e_c の傾きとは明らかに異なる。
- 3) しかし e_c とLNDで示される割れ目開口幅は、最終段階である第8段階ではその大きさがほぼ一致している。

1)については、破線の傾きが3乗則を表す e_h の傾きとほぼ同じであるが、このことから3乗則が成り立っているというためにはさらなるデータの提示が必要であると考えている。

2)については、破壊後以降なぜ傾きが異なるのかを考察する。破壊後以降のLNDの変化傾向は若干増加傾向にあるが、第6～8段階のせん断変位量0.58mmに対して、LNDの変化量は小さく0.11mmである(Fig. 15 第6～8段階参考)。このときの e_c の変化量は0.28mm程度である。また、この間のせん断応力の低下量は0.10MPaに対して(Fig. 9参考)、垂直応力の変化は、Fig. 15より0.02MPaと小さい。かなり大雑把な見方をすれば、垂直応力一定、垂直変位一定条件においてせん断変位に対して割れ目流量だけが增加することになる。このような関係を満たすための力学-透水モデルとしてはステップ構造やextension shear fractureなどのようなモデルが考えられる。インタクトな岩石から破壊が生じ、それによる透水特性の変化を考える場合にはこのようなモデルを念頭におく必要性を示唆している。こ

Fig. 17 Shear fractures in dry specimen (b, c and d correspond with the stages shown in Fig. 6)

のような力学-透水モデルは頭の中のイメージだけでなく、例えば、せん断-可視化試験に用いた乾燥供試体表面においても、Fig. 17のような構造がはっきりと確認できることからある程度妥当であると考えられる。このようなせん断-透水挙動が支配的であるならば、せん断-透水同時試験を行う場合に、注意すべきことを喚起できる。すなわち、インタクトな岩石からの透水特性の変化を議論するためには、供試体外側の垂直変位を計測しても岩石の内部構造の変化と対応させることはかなり難しいことである。

3)については、詳細を議論するにはやはり多くのデータの提示が必要であろうが、残留応力状態に至っては、このような岩石の内部構造の発達による透水特性の変化と単一割れ目面上でのせん断変位(つまり、すべり)によるそれとが同じ傾向になることを暗示していると考えられ、興味深い。

5. 結論と今後の課題

本研究では、インタクトな岩石にせん断破壊による内部構造を形成させながら破断面が形成される過程を観察できるとともに透水特性の変化が議論できる、せん断-透水-可視化同時試験装置を新たに開発した。

この試験装置の特徴は、次のとおりである。

- 1) 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てある。
- 2) 供試体にせん断面ができる過程における供試体表面の変形・破壊挙動を直接観察できる。
- 3) 可視部のデジタル画像を用いた画像解析によって、せん

断割れ目の面積と開口幅を求められる。

4)これにより、通常のせん断-透水同時試験では別途垂直応力-垂直変形量の関係を求めなければならないが、本試験方法ではこの部分を省略できる。

この装置を堆積軟岩に適用して得られた結果は次のとおりである。

- 1)応力挙動は、せん断変位の増加に伴い、せん断応力、垂直応力ともに増加し、せん断応力のピークに遅れて、垂直応力のピークが現れる。
- 2)流量の挙動は、载荷初期とせん断応力曲線の降伏点付近との間に微量の流量減少後、降伏点付近から増加しはじめ、せん断応力のピーク点でも増加し続ける。その後も増加を続け、残留応力状態にむかって増加割合は減少していく。
- 3)せん断中の供試体表面の画像が得られたことによって、せん断応力の降伏点付近での初期割れ目の発生を確認することと、ピーク点ではまだ割れ目がつながりきっていない状況を確認することができた。これは前述のせん断応力のピーク時にも流量が増加し続ける理由を説明することになる。
- 4)また画像データをデジタイズすることによって、割れ目の面積を求めることができ、流量と割れ目面積が非線形関係であることがわかった。つまり、インタクト試料のせん断割れ目にはダルシー則が成り立たないことがわかった。
- 5)透水試験の流量から得られる水理学的開口幅 e_h と、画像データによる割れ目面積から換算して得られる開口幅 (面積換算開口幅 e_c) と、画像解析による割れ目近傍の垂直変位 (局所垂直変位量 LND) を比較することによって、岩石試料のせん断-透水挙動を調べるとき、割れ目の幾何学的な情報を取り込む必要があることを示した。

今後検討すべき課題としては、

- 1)供試体上下方向の応力状態確認と可視化を同時に可能にするための、透水可能かつ観察可能な素材の開発
- 2)本研究では動水勾配を一つにしていたが、動水勾配を変えることによる試験結果への影響
- 3)供試体寸法の影響
- 4)連続载荷中における定水位試験の実施による測定値の妥当性
などが挙げられる。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、筆頭著者は、文部科学省の「平成18年度国内採用による国費外国人留学生」による奨学金援助を受けました。試料の提供に関しては、日本原燃(株)佐々木泰氏および(株)ダイヤコンサルタントの方々に大変お世話になりました。実験の遂行に関しては、(元)埼玉大学工学部建設工学科庄司健二君、ならびに(現)埼玉大学理工学研究科環境社会基盤国際コース熊谷聡之君に補助していただきました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 1) TSANG, C. F., BERNIER, F. and DAVIES, C. (2005) : Geohydromechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays-in the context of radioactive waste disposal, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 42, pp. 109-125.
- 2) THURY, M. and BOSSART, P. (1999) : The Mont Terri rock laboratory, a new international research project in a Mesozoic shale formation, in Switzerland, *Engineering geology*, Vol. 52, pp. 347-359.
- 3) 富田敦紀・戸井田克・白鷺卓・蛭名孝仁・岸田潔・足立紀尚 (2007) : 空洞掘削後の岩盤内応力測定結果に基づく堆積軟岩空洞掘削時の破壊現象の一考察, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 245-250.
- 4) BOSSART, P., TRICK, T., MEIER, P. M. and MAYOR, J. C. (2004) : Structural and hydrogeological characterisation of the excavation-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland), *Applied clay science*, Vol. 26, pp. 429-448.
- 5) MOERI, A. and BOSSART, P. (1999) : Visualization of Flow Paths (FMBExperiment). In : Thury, M., Bossart, P. (Eds.), Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments (performed in 1996 and 1997). Geological Report No. 23 Swiss National Geological and Hydrogeological Survey, Ittigen-Berne, Switzerland, pp. 160-170.
- 6) RIEDEL, W. (1929) : Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen. Zentral-blatt fur Mineralogie, *Geologie und Paleontologie B*, pp. 354-368.
- 7) MAKURAT, A., BARTON, N., RAD, N. S. and BANDIS, S. (1990) : Joint conductivity variation due to normal and shear deformation. In : *Proc. Int. Symp. Rock Joints*, N. Barton and O. Stephansson (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 535-540.
- 8) 矢野隆夫・大西有三・西山哲・齋藤竜平 (2005) : 単一岩盤不連続面のせん断透水特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 792/Ⅲ-71, pp. 159-174.
- 9) ESAKI, T., DU, S., MITANI, Y., IKUSADA, K. and JING, L. (1999) : Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36, pp. 641-650.
- 10) OLSSON, W. A. and BROWN, S. R. (1993) : Hydraulic response of a fracture undergoing compression and shear, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech Abstr.*, Vol. 30, pp. 845-851.
- 11) WANG, R. and KEMENY, J. M. (1994) : A study of the coupling between mechanical loading and flow properties in tuffaceous rock. *Rock Mechanics*, Nelson & Laubach (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 749-756.
- 12) NICKERSON, M. D. and KEMENY, J. M. (1996) : Coupling of radial permeability and uniaxial loading of a saturated sandstone. *Rock Mechanics*, Aubertin, Hassani & Mitri (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 1673-1680.
- 13) WANG, J. A. and PARK, H. D. (2002) : Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process, *Engineering Geology*, Vol. 63, pp. 291-300.
- 14) 張銘・高橋学・江崎哲郎 (1999) : 室内における岩盤材料のせ

- ん断透水同時計測の現状と問題, 応用地質, Vol. 40, No. 4, pp. 204-246.
- 15) MEANS, W. D. (1977) : A deformation experiment in transmitted light, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 35, pp. 169-179.
 - 16) 岩松暉・山田和宏(1988) : ボアスコープを用いた高圧下における岩石破壊過程の直接観察, 第9回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp. 24-27.
 - 17) LINDQVIST, P. A., LAI, H. H. and ALM, O. (1984) : Indentation fracture development in rock continuously observed with a scanning electron microscope, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 30, No. 7, pp. 925-928.
 - 18) HUANG, J., WANG, Z. and ZHAO, Y. (1993) : The development of rock fracture from microfracture to main fracture formation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 30, No. 7, pp. 925-928.
 - 19) ZHAO, Y., HUANG, J. and WANG, R. (1993) : Fractal characteristics of mesofractures in compressed rock specimens, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 30, No. 7, pp. 877-882.
 - 20) ICHIKAWA, Y., WANG, J. and JEONG, G. C. (1995) : Uniaxial compression test of heterogeneous crystalline rock under microscope observation and its homogenization analysis, In ISRM, pp. 227-231.
 - 21) JIANG, Y., TANABASHI, Y., XIAO, J. and NAGAIE, K. (2004) : An improved shear-flow test apparatus and its application to deep underground construction. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* (SINOROCK2004 Paper 1A28), Vol. 41, pp. 385-386.
 - 22) CHENG, J. T., MORRIS, J. P., TRAN, J., LUMSDAINE, A., GIORDANO, N. J., NOLTE, D. D. and PYRAK-NOLTE, L. J. (2004) : Single-phase flow in a rock fracture : micro-model experiments and network flow simulation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 41, pp. 687-693.
 - 23) MITANI, Y., ESAKI, T., ZHOU, G. and NAKASHIMA, Y. (2003) : Experiments and simulation of shear-flow coupling properties of a rock joint. In : Proceedings of the 12th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and the 39th U. S. Rock Mechanics Symposium, Soil and Rock America, pp. 1459-1464.
 - 24) WITHERSPOON, P. A., WANG, J. S. Y., IWAI, K. and GALE, J. E. (1980) : Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resources Research*, Vol. x x x 16, No. 6, pp. 1016-1024.
 - 25) TSANG, Y. W. and WITHERSPOON, P. A. (1981) : Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, No. B10, pp. 9287-9298.
 - 26) ZIMMERMAN, R. W. and BODVARSSON, G. S. (1996) : Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in Porous Media*, Vol. 23, pp. 1-30.
 - 27) 日野幹雄(1992) : 流体力学, 朝倉書店, 東京.
 - 28) BANDIS, S. C., LUMSDEN, A. C. and BARTON, N. R. (1983) : Fundamentals of rock joint deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 6, pp. 249-268.
 - 29) BARTON, N., BANDIS, S. and BAKHTAR, K. (1985) : Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22, No. 3, pp. 121-140.
 - 30) OLSSON, R. and BARTON, N. (2001) : An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 38, pp. 317-329.
 - 31) (財)画像情報教育振興協会(CG-ARTS協会)(2006) : デジタル画像処理, CG-ARTS協会, 東京.

(2008年1月16日受付, 2008年7月24日受理)

Development of Shear-Flow-Visualization Coupling Test Apparatus and Its Data Analysis

Hyuck PARK, Masahiko OSADA and Kunio WATANABE

Abstract

A new type of shear-flow-visualization coupling test apparatus was developed to investigate the hydraulic conductivity alteration and fracturing process of intact soft sedimentary rock (pumice tuff) during shear deformation. The design of new apparatus allows both direct shear test and hydraulic conductivity test to be carried out at the same time. In addition, it is possible to observe the specimen surface during experiment. Shear/normal stress, volumetric flow rate and deformation (shear/normal displacements) can be obtained directly. Area of visible fractures and local normal displacement of fractured specimen were obtained by the image processing technique. With these obtained values, especially, the area of visible fractures and the local normal displacement of fracture revealed the advantage of new apparatus for the shear-flow coupling. This study shows one of new directions on the shear-flow coupling experiment of rock.

Key words : shear-flow-visualization coupling test, fracture area, area-converted aperture, local normal displacement