

(73) 岩盤の不連続面の Shear-Flow Coupling

九州大学工学部 正会員 江崎哲郎
九州大学工学部 正会員 木村 強
九州大学大学院 学生会員 北條裕之

Shear-Flow Coupling on Jointed Rock Masses

Tetsuro ESAKI, Tsuyoshi KIMURA and Hiroyuki HOJO
Institute of Environmental Systems, Faculty of
Engineering, Kyusyu Univ.

Abstract

The subject of underground utilizations that is representative of radioactive waste disposal has enhanced the importance of investigating water flow characteristics of fractured rock masses.

From this point of view, this paper describes the characteristics obtained by using a new testing apparatus which was developed to enable shear-flow coupling test. Each granite specimen, 80·100·120 mm, used for the tests includes an artificially made fracture parallel to the lift plane of rock. It is found from the coupling tests that the permeability of the specimens decreases with increasing normal stress and increases so much with shear displacement. Such shear-flow characteristics agree with some predicted ones, taking account of the theoretical and physical apertures, and roughness of a fractured surface.

1. はじめに

近年、放射性廃棄物の地層処分、エネルギー貯蔵などの地下開発が注目されているが、環境問題などの厳しい制約があり、開発技術レベルの格段の向上が要求されている。なかんずく、これらのプロジェクトにとって非常に敏感な影響を及ぼす地下水の問題は避けることができず、従来からも、数値解析などの研究開発が盛んに行われてきた。しかし、その中で使用される透水性に関する諸係数は、巨視的な計測や、経験的なものから与えられているのが現状であり、それらは、不連続面自身の透水性およびその分布特性等から定量化することが望ましい。これまでの不連続面の透水特性の実験的研究の多くは、不連続面の凹凸がかみ合った状態で進められてきたが、実際の不連続面の多くは掘削等によって初期応力が変化し、不連続面に変形を生じていることを考えれば、そのような試験が実際の状態を十分に再現しているとは言い難い。

一方、不連続面は剛体でなく、透水性はその剛性の非線形現象、応力履歴、ダイレタンシーなどに支配的であることが多くのモデルによって示されているが、これらのモデルの開発者自身もこれらの理論を支持する上で、せん断-透水を同時計測する実験の必要性を述べている^{1,2)}。しかしながら、この coupling test は、特に実験の困難さから、ある程度の成果を得ているものは、筆者らの知る限り、Maini³⁾、Makurat⁴⁾、および Teufel⁵⁾などの例があるにすぎない。また、これらの例も垂直応力が極めて小さかったり、二軸または三軸状態で行われたため、せん断変位が1-2mm程度の非常に限られた条件下で行われたものであった。

このような観点から、本研究では、不連続面の直接せん断実験と透水実験を同時に行うことのできる実験装置を試作し、前述の要求を満たすための計測方法、実験手順を検討して基礎的な実験を試みた。実験には、垂直応力、せん断変位、ダイレタンシーと透水特性との関連性を検討した。また、提案されているBartonらによるモデルとの比較を行った。

2. 実験装置の概要

試作した実験装置は、直接せん断装置部分と透水加圧、計測装置部分から成り、試験体のせん断中に不連続面に水压勾配を与えることができる。このときの流量を計測することによって、せん断変形と同時にそのかみ合わない不連続面の透水実験を行うことができる。Fig.1に実験装置の概略図を示す。

(1) 直接せん断装置

せん断荷重は油圧サーボ方式で、制御は変位制御である。載荷能力は、前進方向40ton、後退方向35tonの復動型である。せん断容器は下箱移動型で、上箱は上下移動および回転が許される。せん断荷重計測のためのロードセル（引張・圧縮両用型、容量20ton）は上箱と装置本体の間に、試験体容器を左右から挟み込む形に一對設置されている。

透水実験のための注水口は試験体容器の下部に設け、排水は試験体の周囲、せん断面よりやや上に設けた堰から越流させることによって行った。垂直方向荷重も油圧サーボ方式で、制御は荷重制御、最大載荷能力は200tonである。

(2) 透水加圧、計測装置

定水位透水実験の加圧は、容量約20 lの自動給水が行われる容器を用い、この容器の高さを調節して水压を定めた。透水量は、透水係数が数オーダー変化することに対応するため、電子天秤（最小読み取り精度10mg、最大容量3,000g）をパソコンに連結し、10秒間の平均透水量を重量で計測した。計測は平均透水量がほぼ一定になったことを確認して10回程度の計測を行い、その平均値を透水量とした。垂直およびせん断方向の荷重、変位は、X-Yレコーダ等を用いて記録した。また、変位の計測については変位計を用いた計測の他に、不連続面近傍の上下から取り出した2本のプローブをビデオカメラで撮影し、画像解析を行って相対変位を求めた。

3. 実験方法および解析

(1) 試験体

使用した岩石は、韓国南原産花崗岩（比重2.61、吸水率0.37%、飽和状態での一軸圧縮強度162MPa）である。試験体は、縦120mm、横100mm、高さ80mmの直方体で、岩の目（rift plane）に平行な面に不連続面を持つ。直方体の各面はせん断箱と隙間ができないように精度よく仕上げた。また、試験体の下部の中央に岩石用ドリルで直径5.5mmの注水孔を設けた。不連続面は人工的に作製したもので、高さの半分の位置に二つの側面から深さ10mm、幅1mmのスリットを入れ、圧裂により亀裂を入れた。その際、不連続面が分離しないよう細心の注意を払った。

(2) 実験方法

実験は垂直応力一定で行った。まず、試験体下面に設けた孔から一定の圧力（10kPa）を与え透水させる。次に、透水させながら所定の垂直応力（0.2, 1, 5および20MPa）まで、0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10および20MPaと段階的に上げていき、各応力レベルで透水量を測定する。垂直応力が所定の値になると、その応力を一定に保ちながらせん断を開始する。せん断変位は速度約0.1mm/sec、最大変位20mmを設定し、途中の各段階（行き1, 2, 3, 4, 5, ..., 20mm, もどり19, 17, 15, ..., 2, 1mm）で一時的にその状態を保ちながら透水量を測定する。さらに、せん断終了後、垂直応力を0にもどすまでに加圧時と同様に段階的に透水量を測定した。

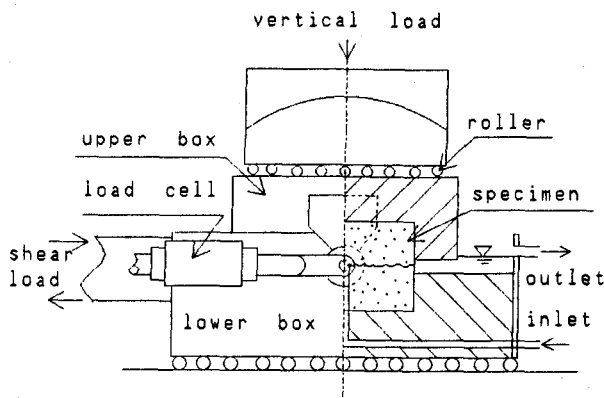


Fig 1. Shear-flow coupling test apparatus.
(left:side view, right:vertical section)

(3) 透水係数の決定法

本実験では直方体の試験体を使用し、放射流で透水させており、せん断変位により透水面の面積が変化するので透水係数を直接求めることができない。そこで、透水係数は、透水面を平行平板と仮定して次の手順で求めることにした。不連続面内の流れを平行平板流れと仮定すると、透水係数 k は次式で表される。

$$k = g / (12 \nu) \cdot e^2 \quad (1)$$

ただし、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数、 e は間隙幅である。また、流量 Q は間隙幅と次の関係がある。

$$Q = Ae^3 \quad (2)$$

ここで、 A は定数である。透水面をメッシュ分割し、隣接する各メッシュ間の水の流れを差分法を用いて近似的に解析し、各メッシュにおける水頭値および単位間隙幅あたりの流量を求め、この流量から(2)式の定数 A を決定する。そのうえで、実験より得られた流量と(2)式から間隙幅 e を逆算し、その値と(1)式を用いて透水係数を決定した。

また、せん断変位によって生じる透水面積の変化については、各せん断変位について流量と透水係数の関係を求めて各々のせん断変位に対する透水係数を求めた。

4. 実験結果および考察

(1) せん断応力、せん断変位および垂直変位の関係

せん断応力-せん断変位曲線および垂直変位-せん断変位曲線を Fig.2 に示す。せん断強度はせん断開始後約0.3-1mmの変位でピークを示しており、その後はほぼ一定の残留強度を示している。加える垂直応力が大きいほどピークせん断強度は大きく、そのピークは鋭くなり残留強度は比例的に大きくなる。垂直変位は、せん断開始後多少平坦な値を示すが、その後緩やかに増加する。せん断応力がピークを過ぎると、増加の割合は小さくなり、やがてほぼ一定の値に達する。すべての応力レベルでダイラタンシーの傾向がみられるが、ダイラタンシーは一般に垂直応力が小さいほど顕著になり、1MPa以下ではほとんど同じになる。局所計測による垂直変位の計測の結果を Fig.3 に示す。画像解析により得られた相対変位は、不連続面近傍の局所変位を表しており、垂直応力一定でせん断中は、変位計によるせん断箱間の変位とよく一致している。

(2) 垂直応力と透水係数の関係

せん断変位が0の場合の垂直応力と透水係数の関係を Fig.4 に示す。割れ目がかみ合った状態では、試験体ごとに個体差はあるが不連続面の閉塞の非線形性を反映して、垂直応力の増加にともなって指数的に透水係数は減少している。しかし、不連

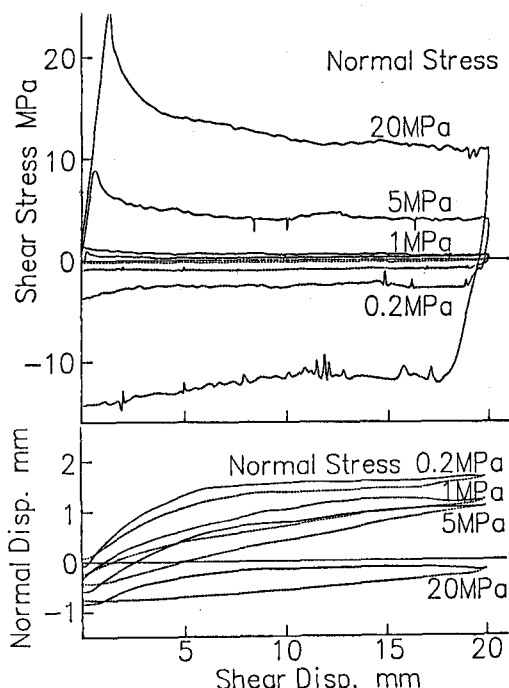


Fig 2. Shear stress-displacement and normal-shear displacement curves obtained from the shear-flow coupling test.

続面の生成により透水経路が確保されるため、これらの値は従来からの研究で得られているインタクトな岩や、岩盤としての透水係数よりもかなり大きなものとなっている。

(3)せん断変位と透水係数の関係

せん断変位と透水係数の関係をFig.5に示す。せん断変位を与えた場合、垂直応力が0.2, 1および5MPaのケースでは、せん断変位が0mmから約5mmの間で透水係数が一様に増加しており、垂直変位—せん断変位曲線の0mmから約5mmの間のダイレクشنシーの増加と符合している。また、その後透水係数はとなっており、せん断の行き(forward)ともどり(reverse)にそれほど変化はみられず、不連続面の凹凸がのり上げてしまい間隙幅に変化がないことを示している。

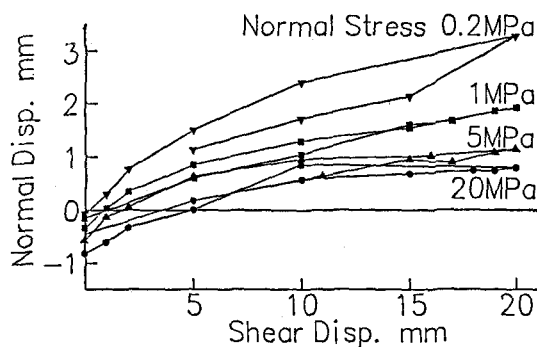


Fig 3. Normal-shear displacement data obtained from the picture analyzing system.

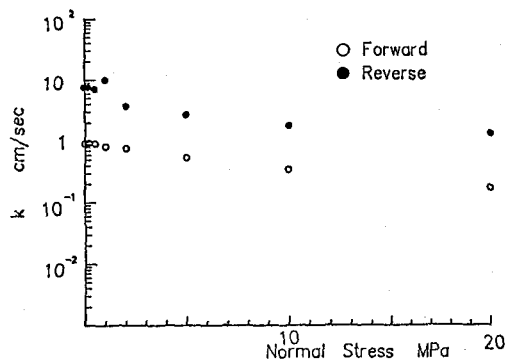


Fig 4. Conductivity-normal stress data with no shear displacement.

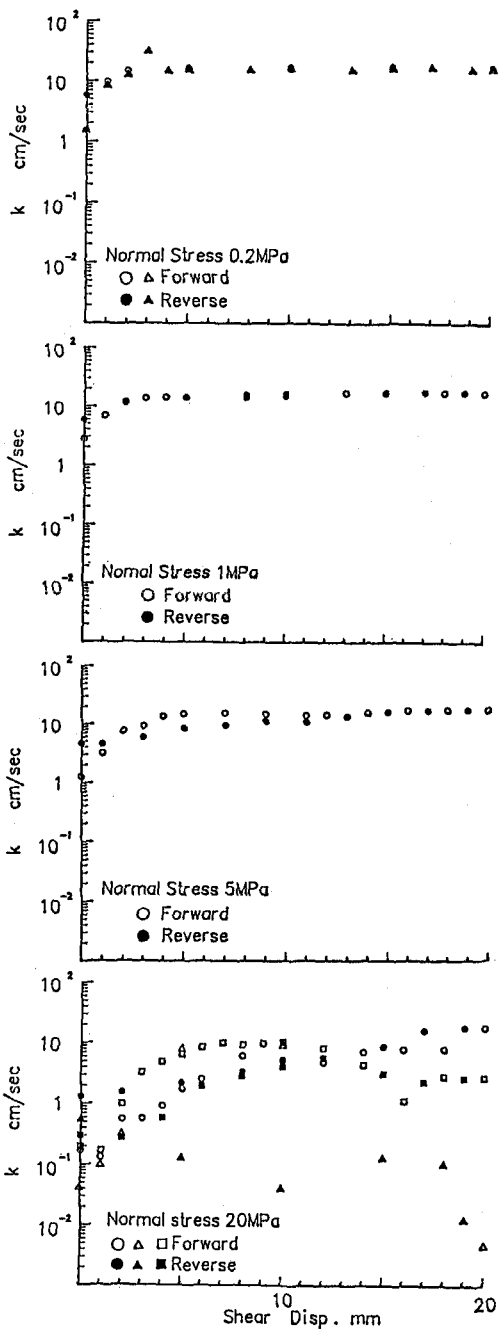


Fig 5. Conductivity-shear displacement data in various normal stresses.

20MPaのケースは3個の試験体で計測を行ったが、各々、非常に異なった傾向を示した。両者ともせん断変位が10mm前後までで2オーダー近く透水係数が増加しており、垂直変位-せん断変位曲線のダイレタンシーの増加と一致しない。これは、不連続面の凹凸がせん断によって、破壊されたことによるものと考えられる。

このことは、実験後の試験体の観察でも確認された。その後、一方は透水係数が急激に減少し、他方では全く減少していない。減少したケースでは、発生したグージによって透水経路が閉塞したためと考えられる。

(4) Bartonらのモデルとの比較

ここでは、本実験で得られたデータがどの程度妥当であるかを評価するために、他の研究との比較を行った。Bartonらは、比較的高い応力下で、割れ目の実際の間隙幅 e と平行平板と仮定した場合の間隙幅 e の関係をジョイントの粗さを考慮した次式で表せるとしている²⁾。

$$e = JRC \cdot 2.5 / (E/c)^2 \quad (3)$$

ここで、JRCはジョイントの粗さの係数である。

Bartonらは、あるせん断変位に対する E をダイレタンシー特性から求め、(3)式を用いてその E から e を算出した後、(1)式より透水係数を求める方法を提案している。Bartonらの示した予測値と、本実験のせん断変位-透水係数曲線をFig.6に示す。両者のJRCと試験体長さは、ほぼ同じであるが、よく一致した結果を示している。

5. まとめ

より正確な浸透流解析を行うためには、基本となるパラメータである不連続面の透水係数を、経験的でなく実験によって正確かつ迅速に定量化を行う必要がある。透水係数を的確に評価するためには、せん断試験と透水試験を同時に行うことのできる実験装置の製作と、それによる透水係数の評価方法の確立が必要である。本研究は、従来、モデルにおいてのみ予想されていたshear-flow couplingを実験的にを行い、現実に即した大きな変位まで求めることができた。また、その結果はBartonらの示したモデルとほぼ同じ値を示すことが確認された。

しかし、実験装置については2,3の問題点があったので今後の改良点として以下に述べておく。今回の実験では極めて透水量の多い場合、水圧の大きさに誤差が大きくなっている。当然、加圧装置から透水面までの管路の摩擦損失を考慮したが、透水量が多い場合にはこのままでは対応できない。一方、透水量が小さい場合には透水量の計測の誤差が大きくなる。その他、せん断装置など多くの問題が残されている。これらの点を改良することによってより正確に実験を行うことができると考える。

参考文献

- 1) Bawden W.F. et al.; Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 17, pp. 265-279, 1980
- 2) Barton N. et al.; Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 22, pp. 121-140, 1985
- 3) Maini T.; In-situ hydraulic parameters in jointed rock, their measurement and interpretation. Ph.D. thesis, Imperial College, London, 1977
- 4) Makurat A. and Barton N.; Int. Symp. on Processes Affecting the Performance of Nuclear Waste Repository, LBL, pp. 255-258, 1985
- 5) Teufel L.; Proc. 28th US Symp. on Rock Mech., pp. 473-480, 1987
- 6) 渡辺邦夫; 埼玉大学地盤水理実験施設報告, No.2, 1983

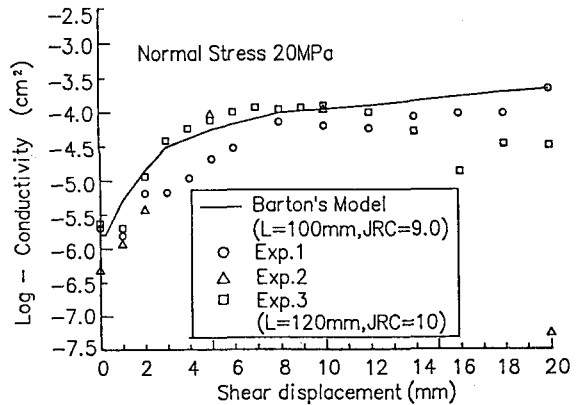


Fig 6. Comparison of conductivity-shear displacement data obtained from the shear-flow coupling test and the Barton's.