

(2)せん断を受けた岩盤不連続面の表面形状と透水特性

国立環境研究所	正会員	木村 強
九州大学工学部	正会員	江崎 哲郎
九州大学工学部	学生会員	○生貞 幸治

Surface Roughness Hydraulic Properties of Sheared Rock

Tsuyoshi KIMURA
National Institute for Environmental Studies
Teturo ESAKI & Koji IKUSADA
Faculty of Engineering, Kyusyu University

Abstract

Shear-dilation-flow characteristics of artificially fractured sandstone and granite are studied using a specially designed testing apparatus. The characteristics of sandstone are very different from those of granite because of difference in the joint compression strength (JSC) of the two rock types. The relationship between the ratio of E/e and the value of e during normal loading and shearing is discussed, where E is a real mechanical aperture obtained from a shear test and e is a theoretical smooth wall aperture from a flow test, on the basis of the model proposed by Barton et al. (1985). In addition, roughness heights of each surface of the fractures are measured with a laser displacement meter and combined numerically to derive the apertures between the both surfaces. The histogram of the apertures before shearing approximates a normal distribution, but the histogram after shearing does not obey such a definite distribution as normal or log-normal one.

1. はじめに

地下の開発利用において、岩盤内の地下水の挙動を把握することは最も重要な課題の一つであり、この挙動にとって支配的要素である不連続面の透水特性が議論されてきた。筆者らは、不連続面の凹凸がかみ合っている状態だけでなく、せん断によってかみ合わなくなったときの透水特性を実験的に明らかにするために、特別に開発した実験装置を用いて花崗岩のShear-Flow Coupling実験を行い、比較的高い垂直応力下において、透水特性とせん断応力およびダイレタンシー特性の関係を明らかにした(Esaki et al., 1991)。しかし、せん断によって生じるダイレタンシーが高い垂直応力によって抑制される領域までの実験については行っていない。他方、不連続面の表面形状および間隙幅に関する研究も多く行われており、筆者らも、割れ目両面の凹凸を計測し、凹凸がかみ合った状態の間隙幅の特徴とその透水性について検討してきたが(木村・江崎, 1991)、せん断によって表面形状が変化した場合については、まだ十分に把握されていない。

本研究では、まず、比較的風化した砂岩を用いて花崗岩と同様の実験を行い、壁面強度の違いが不連続面の力学的特性および透水特性に及ぼす影響について調べた。また、非接触型のレーザー変位計を用いて割れ目両面の表面形状を計測し、それらを重ね合わせることで間隙幅の分布を求めた。そして、この計測をせん断試験の前後で行い、せん断による間隙幅の変化を統計的に評価した。さらに、この間隙幅の変化が透水性に及ぼす影響を詳しく調べるために、実際の間隙幅と流量から算出される理論的間隙幅の関係を求め、Bartonら(1985)によって提案されたモデルとの比較を行った。

2. Shear-Flow Coupling実験

2. 1. 実験概要

使用したShear-Flow Coupling実験装置は、前報(江崎他, 1991)と同じであり、試験体に人工的な不連続面を作成し、その不連続面に垂直方向、せん断方向に任意の応力、変位を与えることができる。さらに、これらの応力および変位の計測と同時に、不連続面に一定の圧力水頭(50~150cm)を与え、この時の流量を計測して不連続面の透水実験を行うことができる。実験方法は、所定の垂直応力(1, 5, 10および20MPa)まで載荷し、その応力を一定に保ちながら約0.2mm/secの速度でせん断した。最大せん断変位20mmに達したところで逆方向にせん断し、開始時のせん断変位0mmに戻った後、垂直応力を除荷した。流量の計測は、その各段階において垂直応力またはせん断変位を一時的に保持して行った。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)と長崎相浦産砂岩(2.68, 12.2%, 36.6MPa)で、両者とも縦120mm、横100mm、高さ80mmの直方体であり、高さの中央位置には圧裂によって人工的な不連続面を作成した。また、透水試験中に岩の基質部へ水が浸透することを避けるため、不連続面を作成した後、水压をかけた状態で約1時間ほど放置し、不連続面の表面に十分水を飽和させて実験を開始した。なお、今回の実験では、せん断時の応力-変位曲線をより詳細に計測するために、サンプリング間隔をさらに短くし、せん断変位1mm当たり5回とした。

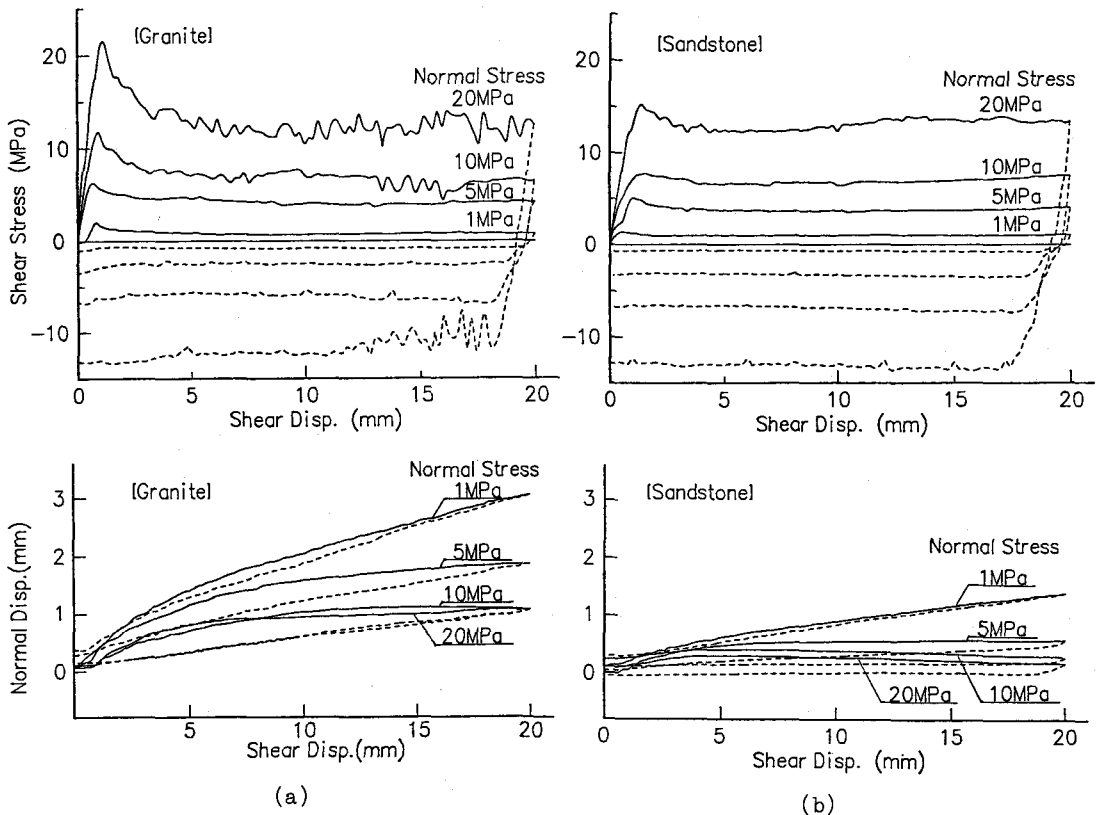


Fig.1 Shear stress-displacement and normal-shear displacement curves for different constant normal stresses: (a)granite, (b)sandstone.

2. 2. 実験結果および考察

Fig.1にせん断応力-せん断変位曲線および垂直変位-せん断変位曲線を示す。花崗岩の場合、せん断の初期段階で突出したピークせん断応力を示すのに対し、砂岩の場合は、それほど大きなピークを示さずにそのまま残留応力に達する。各垂直応力における残留応力は同じ程度の値を示すが、花崗岩の場合には、せん断応力に小さな変動が生じており、垂直応力が高いほどその振幅が顕著になる。これは、凹凸の破壊と同時にせん断応力が一時的に低下するスティック・スリップ現象と考えられ、砂岩の場合、凹凸の壁面強度(JCS)が花崗岩に比べて小さいために凹凸が大きく破壊されてもせん断応力に変動は生じない。この壁面強度は、

垂直変位-せん断変位曲線(せん断変位0mmにおけるY軸切片の値は初期の間隙幅である)にも影響しており、不連続面のダイレタンシー挙動に影響を及ぼす重要なパラメータの一つであるといえる。花崗岩の場合は、すべての垂直応力においてダイレタンシーの傾向があり、せん断によって不連続面の間隙幅は1~3mm増加する。しかし、砂岩の場合は凹凸の壁面強度が小さいため、その破壊の程度は花崗岩に比べて大きく、垂直変位がかなり抑制された状態でせん断が行われる。例えば、垂直応力が20MPaのケースでは間隙幅は約0.3mmしか増加していない。XuとFreitas(1990)は、ダイレタンシーはせん断開始よりも少し遅れて生じ、その勾配が最大になるときのせん断変位はせん断応力がピークに達するときより大きく、このときに初めて凹凸の破壊および乗り上げが生じることを指摘している。Fig.2に示す透水係数の変化はこのメカニズムの影響を強く受けており、せん断開始直後、両面の凹凸が密着するために透水係数は一時的に減少し、初期の凹凸の破壊と同時に急激な増加を示す。その増加が始まるときのせん断変位が花崗岩と砂岩で異なることは、せん断応力がピークに達するときのせん断変位が異なることから明らかである。また、逆方向のせん断時における透水係数の減少は砂岩の方が顕著である。これは、砂岩の場合はせん断によりかなりの凹凸が破壊されるため、それに伴い発生するグージの量が花崗岩に比べて多く、それが流路を塞ぐことによって透水性が低下したものと考えられる。

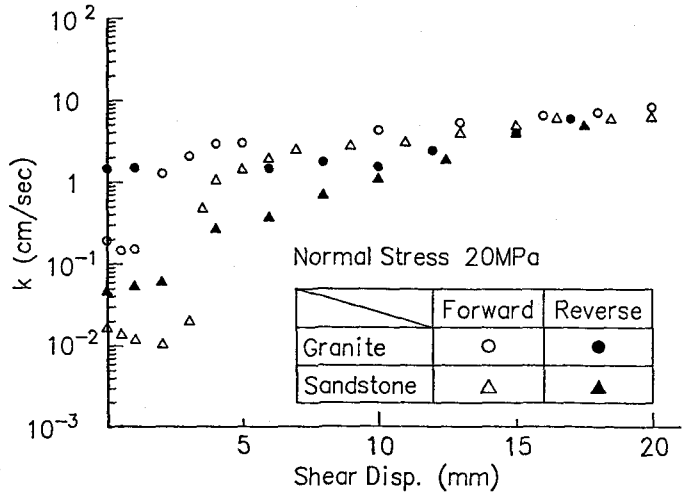


Fig.2 Hydraulic conductivity-shear displacement diagram for constant normal stress of 20MPa.

3. せん断前後の表面形状の計測

3. 1. 表面形状計測の概要

ここでは砂岩の結果のみを述べる。試験体に不連続面を作成した後、2軸可動式の微動ステージ上におき、試験体中央部からX軸方向(せん断方向)に40mm、Y軸方向(せん断方向に垂直な方向)に40mmの範囲で割れ目両面の表面形状を計測した。そのとき、X軸方向およびY軸方向にそれぞれ直線的に0.1mm間隔で読み取る1次元計測(サンプリング数:401点)と、平面的に1mm×1mm間隔で読み取る2次元計測(サンプリング数:1681点)を行った。次に、垂直応力一定のもとでせん断試験を行い、そのとき発生したグージを軽く流し落とした後、前述と同様の計測を行った。これらの凹凸の計測には、非接触タイプのレーザー変位計を用いた。

3. 2. 計測結果および考察

Fig.3に、せん断前後の計測により得られた間隙幅のヒストグラム(2次元、X方向、Y方向)と凹凸および間隙幅のプロファイル(X軸方向)を示す。本研究では、両面の凹凸データを重ね合わせることで間隙幅を求めているが、割れ目を1度開くため間隙幅の絶対値を求めるのは困難である。そこで、便宜上、せん断前の2次元データにおいて間隙幅が最小となる点を接触点とみなし、この点を基準として他の間隙幅を決定した。そして、せん断後の間隙幅にもこのせん断前の基準を採用し、両者の比較を行った。測定結果によると、せん断前の間隙幅の分布は、試験体により多少のばらつきはあるもののほぼ正規分布で近似することができる。これに対し、せん断後の分布状態は、せん断時の垂直応力により、かなり異なった傾向を示す。例えば、垂直応力が1MPaの場合では、両面の凹凸の頂点がわずかに欠損している程度で、巨視的にみて表面形状に顕著な変化はみられず、間隙幅の分布はせん断前の正規分布の状態を保っている。他方、垂直応力が20MPaの場合では、かなり激しく凹凸が破壊され両面のかみ合いが悪くなるため、間隙幅が大きくなり、その分布に規則性がなくなる。なお、プロファイルの左端は試験体の縁部であり、せん断によりその一部に剥離が生じたため表面形状に大きな変化が現れている。ヒストグラムにおいて間隙幅1mm以上の分布が生じているのはこのためである。

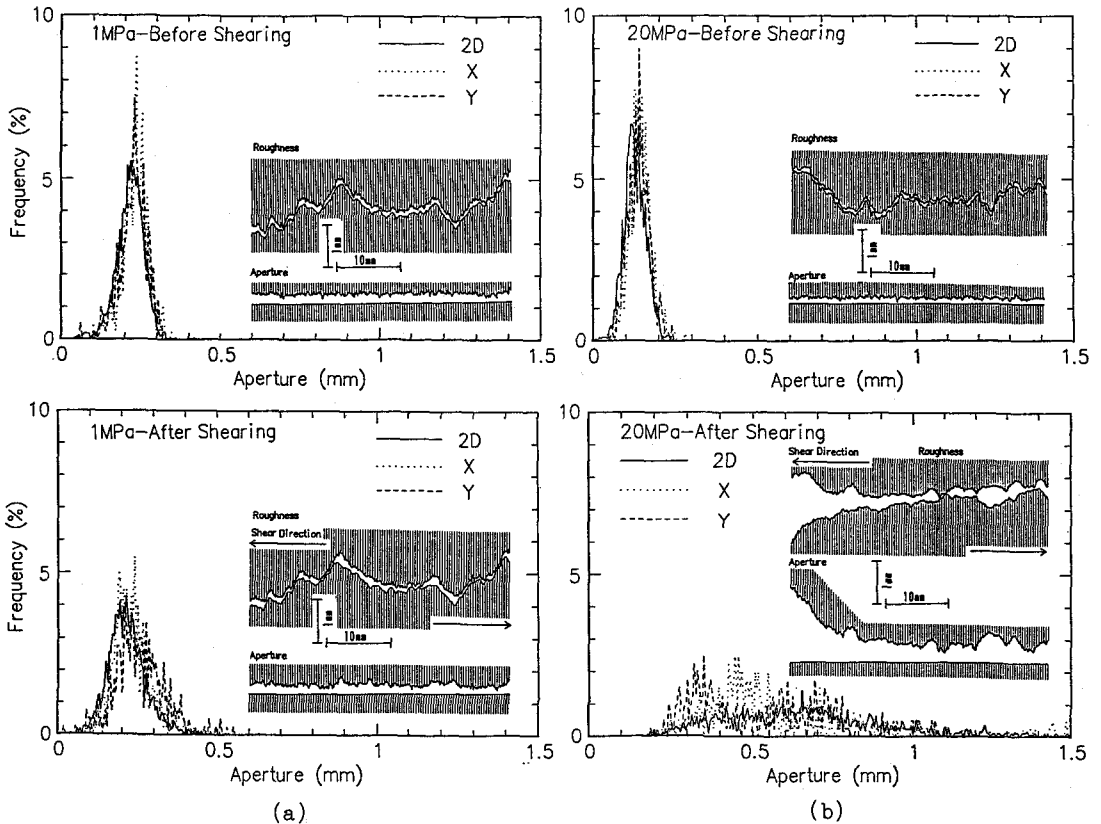


Fig.3 Histograms of aperture and, profiles of roughness and aperture, obtained from the measurements of joint surfaces before and after shearing: (a)normal stress of 1MPa, (b)normal stress of 20MPa.

4. 間隙幅の変化が透水性に及ぼす影響

不連続面の間隙幅の変化が透水性に及ぼす影響をさらに詳しく調べるために、実験の各段階(垂直応力載荷、順方向せん断、逆方向せん断、垂直応力除荷)において e と E/e の関係を求め、Bartonら(1985)が提案したモデルとの比較を行った。ここで、 E は割れ目の実際の間隙幅、 e は流量から算出される理論的間隙幅である。Bartonらは、この e と E の関係をジョイント粗さ係数(JRC)を考慮した次式で表されるとしている。

$$e = JRC^{2.5} / (E/e)^2$$

Fig.4に、上式の曲線と垂直応力20MPaで行った実験結果を併せて示す。なお、図中の数字は垂直応力の載荷時および除荷時では垂直応力(MPa)、せん断時ではせん断変位(mm)を表している。まず、垂直応力の増加とともに E/e の値はほぼ $JRC=10$ の曲線に沿って増加しており、凹凸の形状変化はない。せん断開始直後はダイレタンシーが生じないため E/e はほとんど変化せず、その後ダイレタンシー勾配が最大になるまで JRC の曲線を横切り急激に増加する。この区間ではまだ凹凸が破壊されていないので流量に変化はなく、 e は一定である。しかし、その直後に生じる凹凸の破壊とその乗り上げによって流量が増加するため、 e の増加とともに E/e は減少し1に漸近する。また、このときの JRC の低下は、せん断履歴によって不連続面の表面形状が変化し滑らかになることを裏付けている。

逆方向せん断時では、 e は減少するが E/e はほぼ一定であり、垂直応力を完全に除荷した後は実験開始の状態に戻る。逆方向せん断時に E/e の値が1よりも小さくなっているが、これは割れ目表面の激しいすり減りによる基準面の低下が、 E の正確な算定を困難にしたためと考えられる。

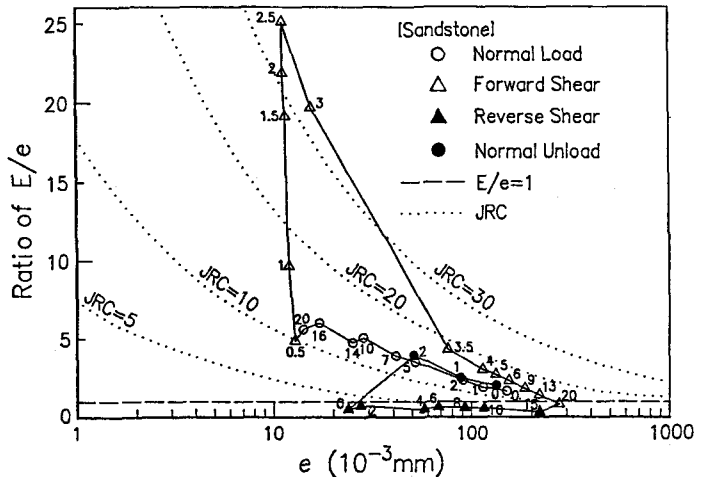


Fig.4 Relationship between the ratio of E/e and the value of e , where E is a real mechanical aperture and e is a theoretical smooth wall aperture: the numbers in this figure show normal stresses during normal loading, and shear displacements during shearing.

5. まとめ

2種類の試験体を用いてShear-Flow Coupling実験を行った。その結果、花崗岩と砂岩では凹凸の壁面強度が異なるため、同じ垂直応力でも、せん断応力、ダイレタンシー特性および透水特性が極めて異なることが分かった。次に、非接触型のレーザー変位計を用いて割れ目両面の表面形状を計測し、それらを重ね合わせることで間隙幅を求めた。そして、この計測をせん断試験の前後で行い、せん断による表面形状および間隙幅の変化を捉えることができた。さらに、実際の間隙幅と理論的間隙幅の関係を調べることで、不連続面のダイレタンシー特性と透水特性の関連性を実験の各段階において詳しく述べることができた。

参考文献

- T.Esaki, H.Hojo, T.Kimura & N.Kameda(1991): Proc. 7th Int. Congr. Rock Mech., pp.389-392.
 木村 強・江崎哲郎(1991): 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.262-266.
 N.Barton, S.Bandis & K.Bakhtar(1985): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, No.3, pp.121-140.
 江崎哲郎・木村 強・北条裕之(1991): 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.346-350.
 S.Xu & M.H.de Freitas(1990): Proc. Int. Symp. on Rock Joints, Loen, Norway, pp.767-774.