

(29) 先行履歴のある岩盤不連続面のせん断透水同時特性

Effects of preceding shear history on shear-flow coupling properties of rock joint

江崎 哲郎*・蔣 宇静**・三谷 泰浩***・○小林 和昭****

Tetsuro ESAKI, Yujing JIANG, Yasuhiro MITANI, Kazuaki KOBAYASHI

The subject of underground utilization whose representative is radioactive waste disposal sites has enhanced the importance of investigating the shear-flow characteristics of the rockmass as a natural barrier. In this study, the joints which have been given the prescribed shear history are used to examine the effects of past shear histories on the shear and hydraulic properties. As a result, some interested characteristics are obtained. Shear stress doesn't show a peak in all the normal stress ranges by the effects of preceded shear histories, even if the normal stress is higher than experienced one. Dilation and hydraulic conductivity have an intimate correlation to each other. Hydraulic conductivity of a historical joint is small on increasing rate and changing quantity, whereas that of a non-historical joint rapidly increases in the initial state of shearing.

1. まえがき

今日、放射性廃棄物の地層処分や各種エネルギーの貯蔵などの岩盤の遮蔽特性を利用した地下利用が注目されている。それらの地下構造物の評価、設計のためには、岩盤不連続面の力学特性、及び不連続面内を流れる地下水の透水性を調査し評価することがきわめて重要である。しかし、岩盤不連続面の透水性は岩盤に加わる応力、変形、面内の表面の状態に依存する。垂直応力がかかると開口は閉じるが、せん断を伴う場合は一般にダイレタンスーを示すため、透水特性は複雑な変化を起こす。この現象を解明するため、不連続面を理想化して、応力の履歴による挙動を推定する必要がある。しかし、これらの問題は複雑に関係しており、問題を実験的に解くのがよりよいと考えられる。現状では、せん断特性や透水特性を評価するための実験は個別に行われているものが多いが、これらは同時に評価するのが望ましい。加えて不連続面の透水試験は、ほとんどがかみ合ったジョイントにおいて行われており、せん断中、あるいはせん断後の透水特性についてはほとんど調べられていない。Makuratら(1990)はBartonの計算法(1985)に基づいて、2軸の応力を与えることのできる特殊なセルを使ってせん断特性と透水特性の両方を同時に評価するShear-flow coupling試験を行った。しかし、この試験装置はせん断変位

に制限があり、また、一定の垂直応力を与えることができなかった。Teufel(1987)は排水三軸圧縮試験により、軟岩における不連続面内の部分的な変形とグージ領域の進展が、せん断変形の進行に伴い透水係数を減少させることを示した。しかし、三軸試験機では大きい変形が生じるので、装置と計測方法に多くの問題がある。

筆者らはShear-flow coupling装置を開発し不連続面の特性を調べてきた。しかし、これらはせん断履歴を受けていないものに限られていた。実際の現場では岩盤不連続面は何らかのせん断履歴を受けていることが多く、応力変位の構成則、開口幅と透水係数の関係のモデルの検証を行うためにもせん断履歴の影響を考える必要がある。そこで今回は、種々のせん断履歴を与えた人工的不連続面を用いてShear-flow coupling試験を行い、この各過程におけるせん断特性と透水特性を同時に評価した。

2. 試験装置

せん断-透水特性同時計測装置をFig.1に示す。せん断は下箱を移動することによって行われ、垂直方向とせん断方向はともに油圧サーボにより独立にコントロールされる。透水試験は、給水孔(直径6mm)が下箱に設けられており、水は試験体内部を通して不連続面内を放射状に浸透し、せ

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部環境システム工学研究センター

** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部環境システム工学研究センター

*** 正会員 清水建設(株)技術研究所

**** 学生会員 九州大学 工学部環境システム工学研究センター

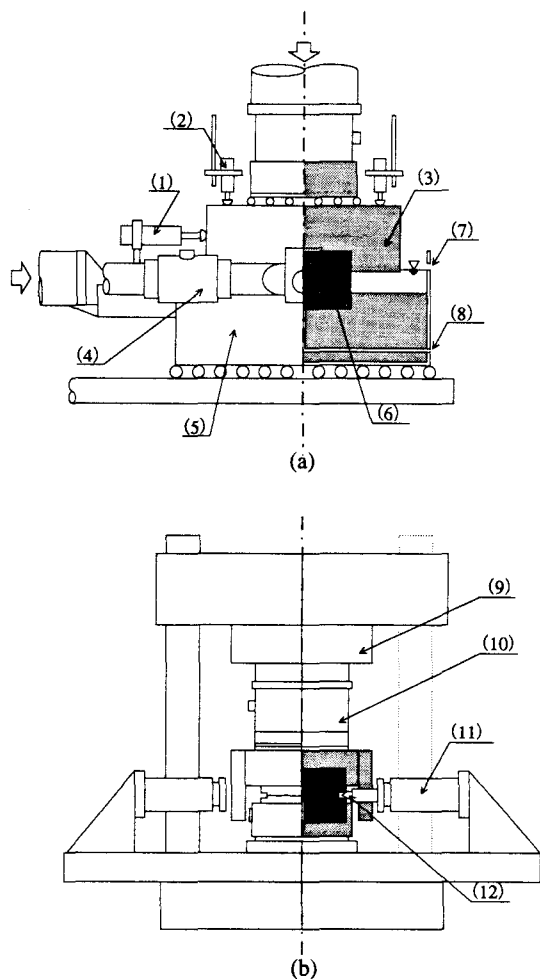


Fig.1 Shear-flow coupling test apparatus (a) side view, (b)front view: not a scale: 1. shear displacement meter, 2. normal displacement meter, 3. upper box, 4.load cell, 5.lower box, 6. specimen, 7. outlet, 8. inlet, 9.vertical jack, 10. load cell, 11.horizontal jack, 12. wedge.

せん断面より約5mm上に設けられた堰から越流される。制御は垂直方向は荷重制御、せん断方向は変位制御により行われる。垂直変位は上箱の上に備え付けられた4つの変位計で計測される。ロードセルや変位計からの信号は自動的にデータロガーで記録される。透水量は電子天秤（最小読み取り精度10mg、最大秤量3000g）を用いて計測を行う。不連続面の作成は、まず試験体をせん断容器内にセットした後、履歴が無視できる程度の垂直荷重を加え、不連続面の作成のために取り付けられた一対のジャッキによりくさびを介して載荷を行い、水平方向の荷重を一定に保ちながら垂直荷重を徐々に除荷することにより安定した状態で試験体を破断させる。

Table.1 Test case

	Preceding shear history		Shear test	Test case
	Normal stress	Shear disp.	Normal stress	
Case1	5MPa	12mm	1MPa	5MPa-1MPa
			5MPa	5MPa-5MPa
			10MPa	5MPa-10MPa
			20MPa	5MPa-20MPa
Case2	1MPa	12mm	5MPa	1MPa-5MPa
	5MPa			5MPa-5MPa
	10MPa			10MPa-5MPa
	20MPa			20MPa-5MPa

3. 試験体

使用した岩は、韓国南原産花崗岩（密度2.64g/cm³、間隙率0.37%、一軸圧縮強度190MPa）で、縦120mm、横100mm、高さ80mmの直方体に整形する。試験体高さの中央には不連続面の作成をするために、深さ10mm、幅1mmのスリットが試験体の4側面に入れられている。また、試験体下部中央には、透水試験のための給水孔（直径6mm）が不連続面まで貫通している。

4. 試験ケース

先行履歴および垂直応力の大きさを変化させてTable.1に示す実験を行った。先行履歴は12mm、せん断試験は20mmの変位を与える。せん断試験は、先行履歴を与えた後変位0mmの状態まで戻した後開始した。透水試験はせん断途中の各段階で一時的にそのせん断変位を保持して行った。

5. 実験結果及び考察

Fig.2にCase1のせん断応力-せん断変位履歴曲線を示す。4本の試験体の先行履歴には差異がないことが分かる。続いて行われたせん断によって、履歴を与えた不連続面では、履歴以下の垂直応力下のみならずすべての垂直応力下においてピークは現れず、残留せん断応力に達する。これは、初めに与えた履歴によって凹凸がいくぶん滑らかになっていることが原因と考えられる。また、履歴を与えた不連続面と履歴のない不連続面の残留せん断応力は一致した。

Fig.3にCase1の垂直変位-せん断変位曲線を示す。ここでは、不連続面の初期の間隙幅を垂直変位の初期値としている。履歴を与えた不連続面では、せん断変位12mmまではダイレーションの変化率はほぼ一定であり、履歴を与え

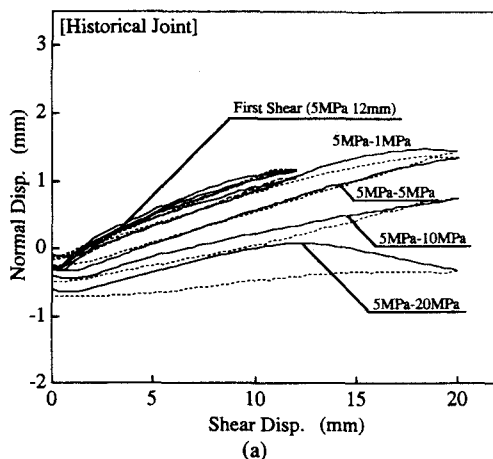
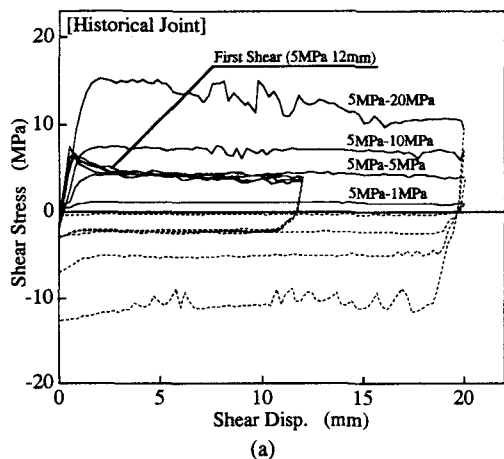


Fig.2 Shear stress vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the case1. (a) historical joint (b)non-historical joint.

ない場合のようなダイレイションの変化率の変化は確認されない。また、負のダイレイションが現れるせん断変位量も、履歴のない場合と比べて大きくなっている。また、先行履歴よりも小さな垂直応力を与えた場合 (5MPa-1MPa) は履歴のない1MPaに比べて垂直変位の量は小さくなっている。このことから、明らかに初めに与えた履歴 (垂直応力5MPa, せん断変位12mm) の影響を受けていることが分かる。また、5MPa-20MPaの12mm以降の垂直変位が減少する現象は、グージの急激な増加が原因であると考えられる。

Fig.4にCase1の透水係数-せん断変位の関係について、垂直応力1MPaと10MPaについて比較した図を示す。初期の透水係数は履歴を与えた場合0.9オーダーほど大きくなる。また、せん断に伴う透水係数の変化は、履歴のない不連続面では初期において透水係数は少し減少した後、急激に1.4~1.7オーダー増加する。これに対して履歴を与えた不連続面では、せん断初期において透水係数は緩やかに減

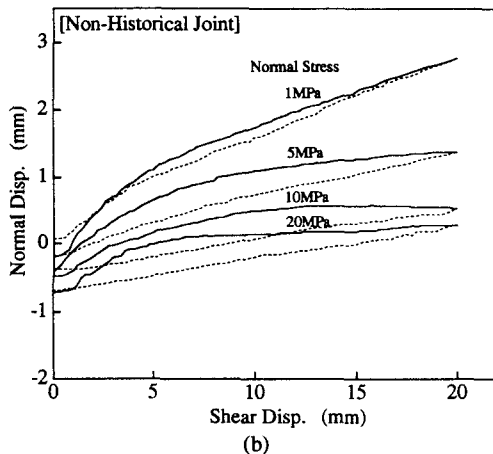


Fig.3 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from case 1. (a)historical joint (b)non-historical joint.

少し、その後増加して一定値になるが、増加量は履歴のない不連続面に対して小さい。これらの違いは、凹凸表面が履歴によって滑らかになっているので、凹凸の乗り上げが小さくなっていること、および凹凸が一致していないためであると考えられる。

Fig.5にCase2のせん断応力-せん断変位曲線を示す。履歴を受けていない5MPaはピークを示すのに対し、履歴を与えたものはすべてにおいてピークを示さず、残留せん断応力に達する。また、高い垂直応力による履歴を受けたもののほどせん断剛性も小さくなっている。これは、先行履歴の垂直応力が大きくなるに従って、凹凸表面が滑らかになる程度が大きくなるためである。

Fig.6にCase2の垂直変位-せん断変位曲線を示す。先行履歴よりも小さな垂直応力を与えた場合 (1MPa-5MPa) は、先行履歴の影響が小さく、履歴を受けていない5MPaの挙動と類似した傾向を示している。これに対して、5MPa以上

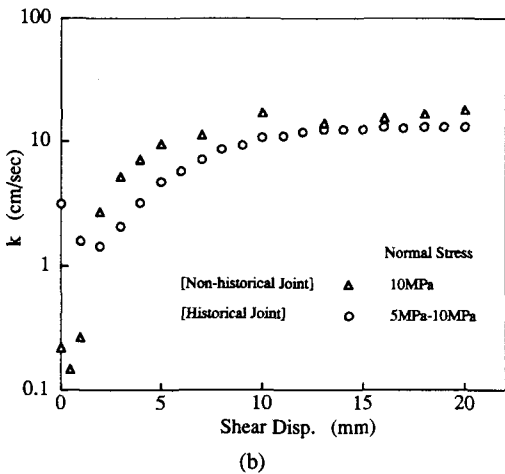
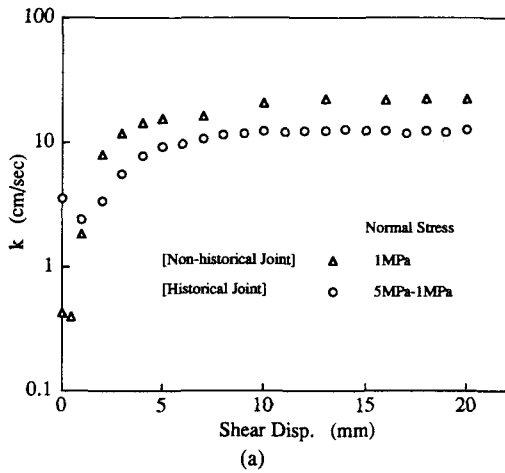


Fig.4 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, obtained from the case 1. (a)1MPa (b)10MPa.

の先行応力履歴を与えた場合には、Case1と同様にダイレクションの変化率がほぼ一定の曲線を示す。このことから、先行履歴に比べて低い垂直応力では、乗り上げのみでせん断が起こり凹凸はほとんど破壊されず、垂直応力5MPa付近で凹凸が破壊され滑らかになり、それ以上の垂直応力では凹凸の影響を受けなくなると考えられる。

Fig.7にCase2の透水係数—せん断変位の関係を示す。5MPa以上の先行応力履歴を与えた場合の透水係数は、比較的小さなせん断変位において徐々に減少した後に増加している。そして、せん断変位12mm付近で増加の割合が上昇し、その後一定値に収束する。これに対し、1MPa-5MPaは、せん断初期で比較の急激に増加し、一定値に収束している。また、これらの傾向はダイレクションの傾向と類似している。

Fig.8に垂直応力5MPaに対する、せん断応力、垂直変位、透水係数及びAEイベントの関係を示す。実線は履歴を受け

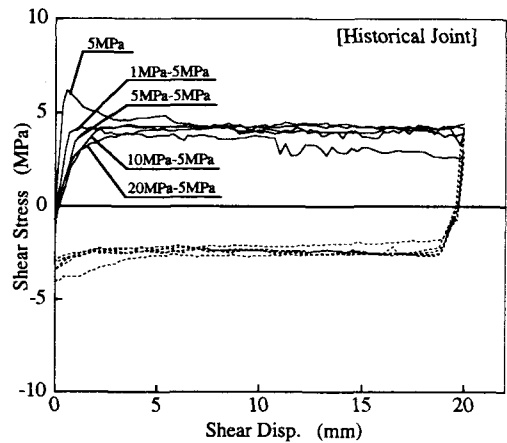


Fig.5 Shear stress vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the case 2.

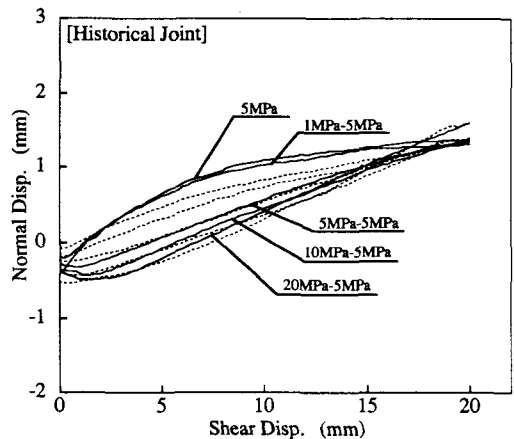


Fig.6 Normal displacement vs. shear displacement curves, for different constant normal stresses, obtained from the case2.

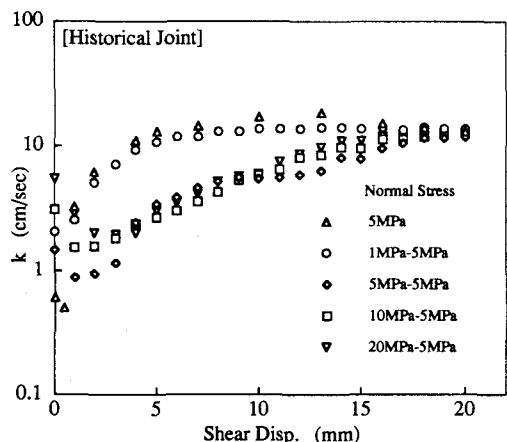


Fig.7 Hydraulic conductivity vs. shear displacement diagrams, for different constant normal stresses, obtained from the case 2.

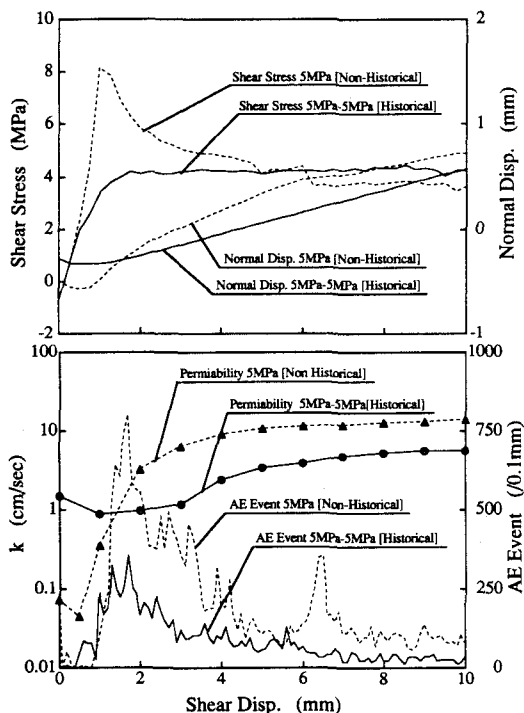


Fig.8 Shear-dilation-flow characteristics, and AE event count for the normal stress of 5MPa. (solid line : historical joint, broken line : non-historical joint)

た不連続面（先行履歴 5MPa-12mm），破線は履歴を受けていない不連続面の挙動をそれぞれ示す。まず，せん断変位 0mm の状態において，履歴を受けた不連続面は受けていないものに比べて凹凸が一致していないため，その透水係数，ジョイントの開口がともに大きくなっている。次にせん断初期状態においては，履歴を受けた不連続面も受けていない不連続面も両面の凹凸が密着しせん断方向に変形するため，透水係数，ダイレーションは少し減少するが，履歴を受けた不連続面のダイレーションの減少率は履歴を受けていないものに比べて小さい。その後履歴を受けた不連続面は，凹凸に緩やかに乗り上げ始め，透水係数は滑らかに上昇していき，ダイレーションもそれに類似した挙動を示す。そしてせん断応力はピークを示さず残留応力に漸近する。これに対して，履歴を受けていない不連続面は急激に乗り上げるため，透水係数，ダイレーションもそれに呼応して急激に上昇し，ダイレーションの変化率が最大の時に AE イベントもピークを示す。そしてせん断応力がピークに達した後，凹凸は破壊される。AE イベントは履歴を受けた場合そのイベント数は減少するが，履歴を受けたものと受けていないものの AE イベントのピークを示すせん断変位はほぼ同じである。これは 5MPa 程度の垂直応力では凹凸が完全に破壊されないためであると考えられる。

6. 結論

今回，本研究では人工的不連続面を用いて，そのせん断履歴の違いによって不連続面のせん断特性，透水特性がどのように変化するかを調べた。以下に，その結果を述べる。

1) 履歴を受けるとせん断応力はピークを示さない。また，履歴を受けている不連続面の残留せん断応力は，受けていないそれとほぼ同じ値になる。

2) せん断に伴うダイレーションの変化と透水係数の変化は相関が大きい。

3) 履歴のない不連続面の透水係数はせん断初期において鋭く減少した後，急激に増加するのに対し，凹凸を破壊するような履歴を与えた不連続面でのそれは緩やかに減少した後，増加していく。

4) せん断応力，垂直変位，透水係数の変化は AE イベントの変化と関連が強く，AE イベントの生起はピーク応力よりも，垂直変位の増加（ダイレーションの変化率）と相関があると考えられる。

参考文献

- Barton, N., S. Bandis and K. Bakhtar 1985 Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min Sci. and Geomech. Abstr.* 22 : 121-140.
- Esaki, T., Hojo, H., Kimura, T. and Kameda, N. 1991. Shear-flow coupling test on rock joints, *Proc. 7th Int. Congr. Rock Mech.* : 389-392.
- Esaki, T., Nakahara, K., Kimura, T. 1994 Shear-flow coupling properties of natural joints, *Proceeding of the 9th Japan Sympo. on Rock Mechanics* : 247-252.
- Makurat, A & N. Barton 1985 Shear- low coupling in non-planar rock joints, *Int. Sympo. Coupled Processes Affecting the Performance of Nuclear Waste Repository*, LBL : 255-258.
- Teufel, L.W. 1987 Permeability changes during shear deformation of fractured rock, *Proc. 28th US Sympo. Rock Mechanics* : 473-480.