

垂直変位制御および垂直応力制御下での岩の不連続面のせん断－透水同時特性 Shear-Flow Coupling Properties of Rock Joint under the Controlled Normal Displacement and Stress

三谷泰浩*・江崎哲郎*・蔣宇静*・和田圭仙**

Yasuhiro MITANI, Tetsuro ESAKI, Yujing JIANG and Yoshinori WADA

The utilization of underground as the high-level radioactive waste disposal has rapidly increased the importance of investigating the shear-flow coupling characteristics of rock joints. These properties will be changed under the different boundary conditions. From this point of view, shear-flow coupling tests were conducted under the different boundary conditions which are restraint normal displacement and stress.

The experimental results indicate that the change of the hydraulic conductivity of joints decreases at small shear displacement, and then it rapidly increases by about 1-2.5 orders of magnitudes of the initial value with independent of the different boundary conditions. Furthermore, it is clarified that the change of the hydraulic conductivity is independent of the change of aperture of joints on large shear displacement.

keywords : rock joint, laboratory test, shear-flow coupling property

1. はじめに

岩盤自体が有する剛性、遮蔽性、耐久性などの特徴を利用する岩盤構造物の設計、施工およびその維持管理のために、岩盤の諸特性を精度良く捉える必要がある。特に岩盤の力学、水理学的特性は、それを構成する岩石基質部よりも、むしろ不連続面に大きく支配されるため、不連続面のこれら特性を現場の状況を踏まえた適切な条件下で明らかにすることが必要である。例えば、Fig.1に示すように、岩盤斜面において不連続面に沿ったすべりが発生する場合のように、不連続面を境界として岩盤が自由に移動できる場合、不連続面に作用する垂直応力を境界条件として考えるべきであるが、地下空洞周辺の不連続面のように、周辺の岩盤から変形を拘束された状況下でせん断を受ける場合、不連続面の挙動は、応力よりも岩盤の剛性に応じた変位拘束を境界条件として考えた方が、その挙動を適切に表現できる。このように地下構造物周辺の岩盤不連続面の特性を評価するためには、不連続面の境界条件として垂直応力だけでなく垂直変位をも考慮できるせん断－透水同時特性の評価が重要となる。

しかし、これまでに実施されているせん断試験の多くが、不連続面に作用する垂直応力を制御した条件下での実験であり、垂直剛性に着目した垂直変位制御実験は、その実験方法の困難さから実施された事例は数少ない^{1),2)}。また、これらを考慮したせん断－透水同時実験は、これまで実施されていない。

本論文では、垂直変位及び垂直応力を制御したせん断－透水同時実験を実施し、両者の境界条件の違いにより、岩の不連続面のせん断－透水同時特性がどのように変化するかについて検討を行う。

* 正会員 九州大学 工学部 環境システム科学研究センター

** 学生会員 九州大学大学院 工学研究科 建設システム工学専攻

2. 実験装置および実験方法

実験では先に筆者らが開発したせん断一透水同時実験装置³⁾を用いる。本実験装置のシステム概略図を Fig.2 に示す。本実験装置は、油圧サーボにより不連続面に作用する垂直応力や垂直変位を制御しながら、せん断変位制御によるせん断が可能であり、せん断過程の不連続面の透水量も同時に計測することができる。なお、フィードバック信号となる垂直方向またはせん断方向の変位は、せん断箱の外側で計測する。

使用する岩石は、韓国南原産花崗岩（比重 2.64，一軸圧縮強度 192MPa）で、縦 120mm × 横 100mm × 高さ 80mm の直方体に整形したものを使用する。試験体は、不連続面を作成するために試験体高さの中央位置には深さ 10mm，幅 1mm のスリット（試験体の 4 側面）と透水試験のために試験体下部に不連続面まで貫通する直径 6mm の細孔を有する。不連続面は、垂直荷重を載荷した状態で、このスリットに 2 方向からくさびをあて、水平荷重を載荷し、垂直荷重を徐々に除荷して作成する。

実験では、まず、垂直応力に応じた不連続面の間隙幅の変化を把握するために垂直荷重載荷実験を行う。この結果を基に実験初期段階の不連続面の間隙幅の大きさを評価する。せん断一透水同時実験は、垂直変位一定条件と垂直応力一定条件下で行う。垂直変位一定実験は、まず、設定した垂直変位まで垂直荷重を載荷し、その時の垂直変位を一定に制御して行われる（制御精度：±0.01mm）。一方、垂直応力一定実験は、設定した垂直荷重を載荷し、その時の垂直応力を一定に制御して行われる。このような条件下でせん断変位を増加させながら、同時に透水試験を行う。透水は定水位

（水頭差 100cm）で、不連続面中央から放射流を発生させ、不連続面を通過し流出した流量を計測する。さらに、得られた透水流量をもとに、不連続面を平行平板と仮定し、透水係数を算定する³⁾。今回実施する実験の初期条件および実験ケースについて Table 1 に示す。なお、垂直変位一定実験における初期垂直変位量は、不連続面作成前の変位をゼロとして実験中に制御したせん断箱外側での垂直変位量を示し、表中に示す間隙幅については、後述する評価式に基づいて算定した値を示す。

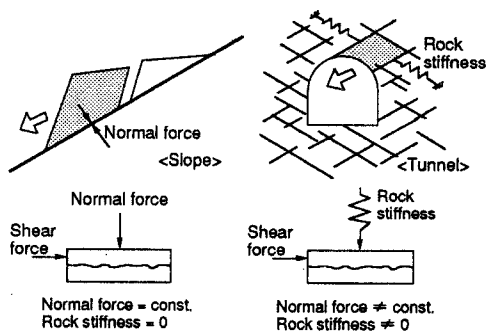


Fig.1 Simulation of in-situ boundary conditions in the shear test.

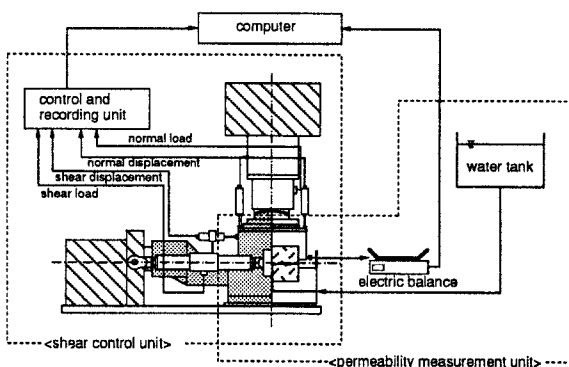


Fig.2 Schematic view of shear-flow coupling test system.

Table1 Test cases.

Case No.	Test Condition	Initial Value
Case1	Constant Normal Disp.	Normal Disp. : 0.00mm (at Normal Stress : 0MPa) Aperture : 0.15mm
Case2		Normal Disp. : 0.19mm (at Normal Stress : 1MPa) Aperture : 0.11mm
Case3		Normal Disp. : 0.45mm (at Normal Stress : 4MPa) Aperture : 0.09mm
Case4	Constant Normal Stress	Normal Stress : 1MPa
Case5		Normal Stress : 5MPa
Case6		Normal Stress : 10MPa
Case7		Normal Stress : 20MPa

3. 垂直応力載荷実験結果

不連続面の垂直荷重載荷実験を行うと、Fig.3に示すように不連続面以外に岩石インタクト部とせん断箱の垂直変形量が含まれた値が得られる。そのため、両者の垂直変形特性を求め、その差をとることで不連続面の垂直変形特性を求める。2つの垂直荷重載荷実験の結果として不連続面の垂直応力-垂直変位関係をFig.3に示す。実験では、垂直応力-変位曲線がほぼ一致するまで、載荷を繰り返す。その結果、3回の載荷で垂直変形曲線がほぼ一致し、不連続面の垂直変形特性は、2つの載荷実験の3回目の載荷履歴曲線の差から求められる。得られた結果に対してS.C.Bandisら⁴⁾が提案している双曲線関数による曲線近似を行った結果、以下の関係式が得られる。

$$\sigma_n = \frac{u_n}{0.098 - 1.512 \cdot u_n} \cdots \cdots \textcircled{1}$$

ここで、 σ_n は垂直応力、 u_n は垂直変位量である。
垂直荷重載荷前の不連続面の間隙幅は、不連続面作成時に実験より0.15mmと求められる。これより、垂直変位一定実験における不連続面の初期間隙幅は垂直荷重載荷時にCase 1で0.15mm、Case 2で0.11mm、Case 3で0.09mmと評価される。また、Fig.4に示す岩石インタクト部とせん断箱の垂直変形曲線の直線部分から、その垂直剛性を求めると、42MPa/mmとなる。

4. せん断-透水同時実験

Fig.5に垂直変位一定条件下でのせん断変位に対するせん断応力、垂直応力、透水係数の変化を、Fig.6に垂直応力一定条件下での同様の結果を示す。

4・1 垂直変位一定実験

せん断応力は、せん断初期（せん断変位がCase1：2.3mm、Case2：0.4mm、Case3：2.3mm）までは一定の割合で増加し、それ以降小さな変動を示しながら増加する。そしてCase 1では、せん断変位5.6mmで最大せん断応力15.2MPa、Case 2では、せん断変位5.3mmで最大せん断応力19.7MPa、Case 3ではせん断変位7.0mmで最大せん断応力24.5MPaを示す。その後、せん断応力は、変動しながら徐々に減少する。

垂直応力は、せん断初期（せん断変位がCase1：2.3mm、Case2：3.5mm、Case3：2.0mm）まで一定の割合で増加し、それ以降小さな変動を示しながら増加し、Case 1では、せん断変位5.9mmで最大垂直応力21.5MPaを、Case 2では、せん断変位5.9mmで最大垂直応力28.4MPaを、Case 3ではせん断変位7.0mmで最大垂直応力40.2MPaを示す。その後、垂直応力は変動しながら、徐々に減少する。

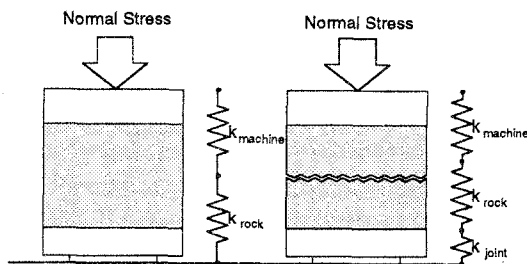


Fig.3 Normal stiffness for the intact rock and jointed rock.

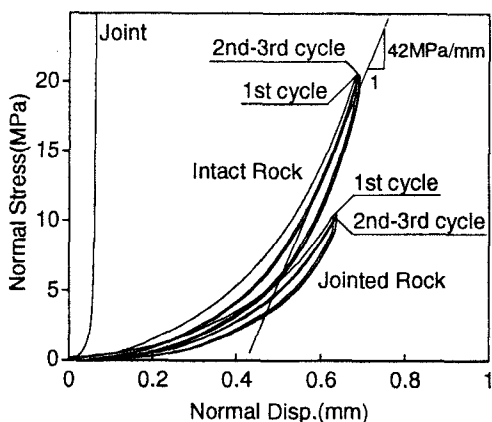


Fig.4 Normal stress vs. deformation relation of intact and jointed specimens of granite.

Fig.5に示すように最大せん断応力、最大垂直応力は、拘束された垂直変位が大きいほど大きくなり、垂直応力約10MPa以上で、ピーク以降のせん断応力の小さな変動(変動幅として0.5~1MPa程度)が発生し始め、垂直応力約20MPa以上では、変動幅約2~4 MPa程度の大きな変動を示す。

透水係数は、Case 1ではせん断変位1 mmまで急激に増加した後、せん断変位7 mmまで徐々に増加し、それ以降、ほぼ一定の値を示す。Case 2では、せん断変位1 mmで急激に増加した後、せん断変位5 mmまで徐々に増加するが、それ以降、次第に減少し、せん断変位11mm以降ほぼ一定の値を示す。Case 3では、せん断変位1 mmで増加するものの、せん断変位2 mmで一旦減少し、せん断変位3 mmで再び急激に増加した後、最大せん断変位まで徐々に増加する。Case 1では、最大で初期値の約700倍程度、Case 2では約30倍程度、Case 3では約530倍増加する。このように透水係数は、垂直変位を拘束しているにも拘わらず、せん断とともに増加し、せん断応力、垂直応力が最大値を示す前に1~2.5オーダーほど急激に増加する。

4・2 垂直応力一定実験

Fig.6に示すように、せん断応力は、せん断変位とともに急激に増加し、Case 4では、せん断変位0.57mmで最大せん断応力2.0MPa、Case 5では、せん断変位0.60mmで最大せん断応力6.2MPa、Case 6では、せん断

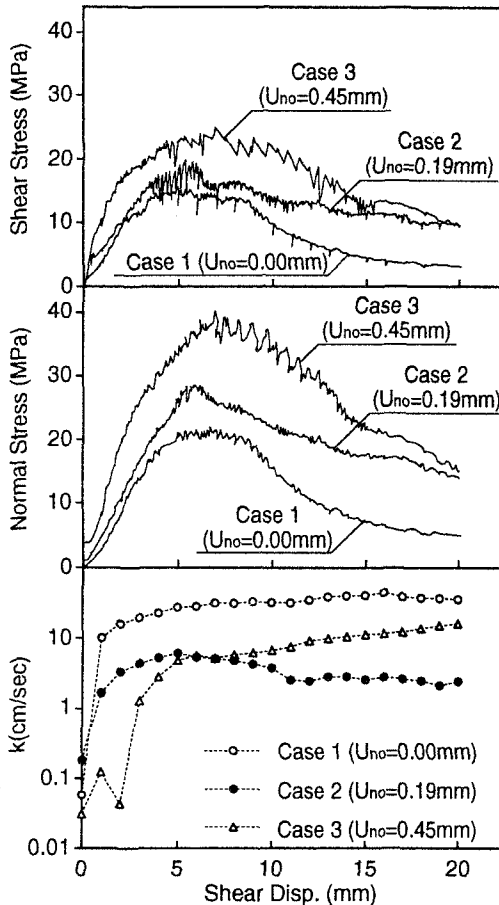


Fig.5 Shear-flow coupling test results for different constant normal displacement.

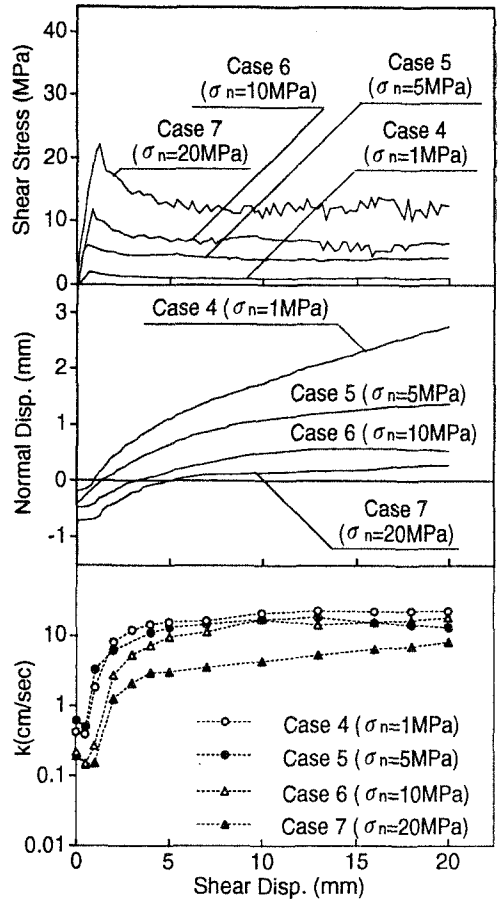
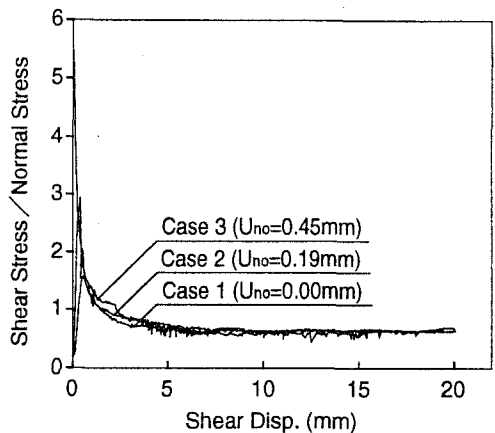


Fig.6 Shear-flow coupling test results for different constant normal stress.

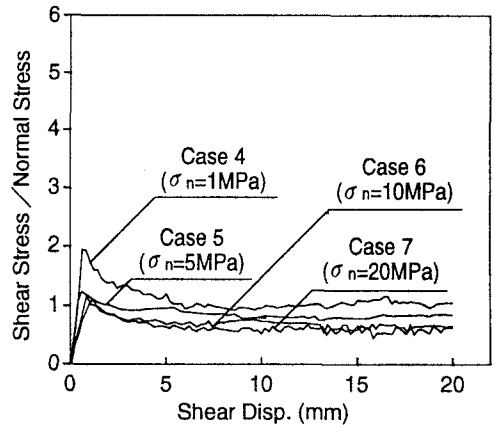
変位0.80mmで最大せん断応力11.7MPa, Case 7では, せん断変位1.2mmで最大せん断応力22.1MPaを示し, 垂直応力が大きいほど, 最大せん断応力およびその時のせん断変位は大きくなる. その後, せん断応力は, いずれもひずみ軟化現象を呈しながら徐々に減少し, ほぼ一定の残留せん断応力を示す. ただし, 垂直応力が10MPa以上であるCase 6, Case 7では, せん断応力の変動が生じる. この変動が生じる垂直応力は, 垂直変位一定実験でせん断応力の変動が見られた時の垂直応力とほぼ一致する. また, 残留時のせん断応力は, 垂直応力に比例して大きくなる.

垂直変位は, Case 4では, せん断の開始とともに一旦減少し, せん断変位0.25mmから増加し始める. 垂直変位の変化率(垂直変位-せん断変位曲線の勾配)は, せん断変位0.58mmで最大となり, その後, 徐々に小さくなり, せん断変位5.5mm以降に, 一定となる. Case 5では, せん断の開始とともに急激に増加し, せん断初期での垂直変位の減少は示さない. せん断開始直後から垂直変位の変化率は最大となり, その後, 徐々に小さくなり, せん断変位8.6mm以降一定となる. Case 6では, せん断の開始とともに一旦減少し, せん断変位0.5mmから増加し始める. 垂直変位の変化率は, せん断変位1.0mmで最大となり, その後, 徐々に小さくなり, せん断変位5.5mm以降, 一定となる. Case 7では, せん断変位0.7mmから増加し始め, 垂直変位の変化率は, せん断変位1.2mmで最大となり, その後, 徐々に小さくなり, せん断変位6.5mm以降一定となる. 各ケースとも垂直変位の変化率が最大となる時のせん断変位は, Case 5を除いてせん断応力が最大となるせん断変位よりもわずかに大きい, または, ほぼ一致し, この変化率が一定となる時のせん断変位は, せん断応力が残留値に至るせん断変位とほぼ一致する. また, 垂直変位は, 垂直応力が1, 5 MPaの場合には, 最大せん断変位まで増加するものの, 10MPa, 20MPaの場合には一定となる.

透水係数は, 各ケースともせん断変位初期に一旦減少した後, せん断変位2~3mmまで急激に増加する. そして, Case 4, 5, 6では, せん断変位約10mmまで徐々に増加し, それ以降は, ほぼ一定の値を示す. Case 7では, せん断変位5mm以降, ほぼ一定の割合で増加する. Case 4では, 最大で初期値の約50倍程度, Case 5では約30倍程度, Case 6では約80倍程度, Case 7では約40倍程度, 透水係数は増加する. 垂直応力一定実験では, 垂直変位の変化率が最大となるせん断変位付近で, 透水係数は最小値を示し, せん断応力がひずみ軟化現象を示すせん断変位において急激に増加し, その後, ほぼ一定の透水係数を示すものの, せん断応力がせん断とともに著しい変動を示すCase 7では, 透水係数は増加し続ける.



(a) Shear-flow coupling test for different constant normal displacement.



(b) Shear-flow coupling test for different constant normal stress.

Fig.7 The change of Shear-Stress/Normal stress during shear-flow coupling test process.

5. 考察

5・1 境界条件の違いによるせん断挙動への影響

垂直変位一定の条件下では、せん断応力は徐々に増加して、それが最大値を示すときのせん断変位はかなり大きくなる。また、その後のせん断応力は、急激な軟化現象を示さない。境界条件の違いによるせん断挙動を比較するためにせん断応力と垂直応力との比（以降、せん断／垂直応力比と称する）を求めて比較する（Fig.7）。図に示すようにせん断／垂直応力比は、すべてのケースでせん断初期に急激に増加し、最大値を示した後、一定の値を示す。また、せん断初期のせん断／垂直応力比の最大値は、垂直変位一定条件では、拘束した垂直変位が小さいほど、垂直応力一定条件では、垂直応力が小さいほど大きく、最大値を示すせん断変位も小さくなる。また、変動はあるもののせん断変位 5 mm 以降は、ほぼ一定の値を示し、この値は Case 4, 5 以外は、ほぼ同じ値を示す。

この結果より、垂直変位一定実験では、垂直変位の拘束により垂直応力が増加しているために、見かけ上、せん断応力の最大値およびその時のせん断変位が10倍程度に大きくなり、不連続面の強度特性は緩やかな増加、減少の曲線となる。

さらに、特徴ある挙動としては、垂直応力が約10MPa 以上になるとせん断応力の著しい変動を生じる。垂直変位一定実験では、このせん断応力の変動と垂直応力の変動が同時に発生する。せん断とともに、不連続面のかみ合いは減少し、垂直荷重は、不連続面上下の接触部分のみに集中して作用する。垂直応力の減少は、この接触部分が垂直荷重を支えることができなくなり、局所的に次々と破壊しているため生じるものと考えられる。そのため、凹凸の破壊が生じるとともにせん断応力は、急激に減少し、せん断とともに再びせん断応力は増加するように、同様の現象が繰り返し発生し、せん断応力は変動する。よって、せん断応力の著しい変動が生じている部分では、接触部分の破壊が生じていると考えられる。

5・2 境界条件の違いによる透水係数への影響

垂直応力一定実験での、透水係数の変化は前節で示したように、垂直変位曲線と密接に関係しており、従来からせん断に伴う透水係数の変化は、不連続面の垂直変位、つまり間隙幅に応じて変化すると考えてきた。しかし、垂直変位一定実験では、実験時の垂直変位量を拘束しているにも拘わらず、透水係数は、せん断とともに増加する。そこで、その理由について考える。垂直変位一定実験では、せん断箱上部に取り付けられた変位計により垂直変位を計測、制御するが、これには不連続面、岩石インタクト部およびせん断箱の変形量が含まれる。せん断とともに、垂直応力が増加するが、これは、不連続面周辺（岩石インタクト部およびせん断箱）の垂直剛性とダイレタンシーによる不連続面の間隙幅の増加に起因すると考えられる。不連続面周辺部の垂直剛性は、Fig.4 に示したように42MPa/mmで一定であり、不連続面の垂直剛性と比べるとかなり小さな値となる。このことから、せん断箱の垂直変位量は一定に拘束されているが、せん断に伴ってダイレタンシーが発生し、その際に岩石インタクト部とせん断箱が圧縮されていると考えられる。得られた垂直応力と不連続面周辺部の垂直剛性から求めた実験中の不連続面の間隙幅をFig.8に示す。図に示すようにせん断とともに不連続面の間隙幅は、いずれのケースもせん断変位1 mmから急激に増加し、最大値を示した後、減少する。この図とFig.6に示した垂直応力一定下での垂直変位の変化とを比較すると、間隙幅が最大値を示すまで（せん断変位約5 mmまで）は、垂直応力20MPa（Case 7）での結果とほぼ一致する。この結果より、垂直変位一定実験での透水係数の増加は、せん断とともに不連続面の間隙幅が増加するために生じたと考えら

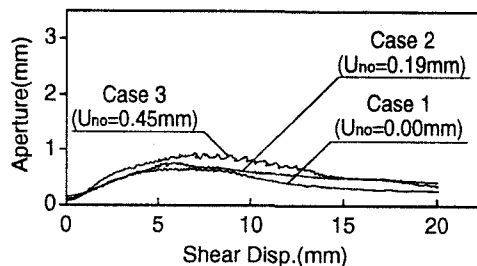


Fig.8 The estimated mechanical aperture vs. shear displacement curves in different constant normal displacement.

れる。特にせん断変位 1 mm 付近でその間隙幅の増加率は最大となり、透水係数もせん断変位 1 mm 付近で急激に増加し、その後、間隙幅の増加とともに透水係数は増加する。しかし、間隙幅は最大値を示した後、先に述べたように不連続面上下の接触部分の破壊が生じるため、少しずつ減少するが、Case 2 を除いて、透水係数の顕著な減少傾向は認められない。

このように、垂直変位一定実験は、不連続面の周辺の垂直剛性を一定に保持した実験であり、せん断に伴う透水係数の変化は、不連続面の間隙幅の変化によるものの、せん断変位が大きくなると、間隙幅の変化に対応しないことが明らかとなった。

6. 結論

不連続面の垂直変位、垂直応力を制御したせん断-透水同時実験を行い、両者のせん断-透水同時特性を比較した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 2つの異なる条件下で実験を行った結果、実験時の境界条件の違いにより垂直応力履歴が異なるため、せん断初期の不連続面の強度特性は、軟化、硬化といった異なる強度特性を示す。このことから岩盤内で変位が拘束された不連続面のせん断応力は、垂直変位一定実験で示したように垂直応力が増加するため、せん断とともに大きくなる。また、透水係数は境界条件の違いによらず、せん断にともなって増加することが明らかとなった。
- (2) 垂直変位一定実験は、不連続面周辺の垂直剛性を一定に保った実験であり、せん断箱上部に取り付けられた変位計により垂直変位量を一定に保持したとしても、間隙幅はせん断に伴い増加するため、透水係数は増加する。またせん断に伴う透水係数の変化は、せん断変位が大きくなると、間隙幅の変化に対応していないため、従来から行われている間隙幅の変化による透水係数の予測は難しいと考えられる。

実験では、垂直剛性が岩石インタクト部分とせん断箱が有する剛性により決定されるため、これを変化させることができない。今後は垂直剛性を変化させた実験について検討を行うとともに、せん断時の透水挙動のメカニズムについても検討を進める予定である。

7. 参考文献

- 1) 江崎哲郎他：垂直変位を拘束した場合のせん断特性および異方性岩のせん断特性，日本鉱業会誌，Vol.101, No.1, pp.1-7, 1985.
- 2) Y.Ohnishi et al. : Shear behaviour of physical models of rockjoints under constant normal stiffness conditions, Proc. of the International Symp. on Rock Joints, pp.267-273, 1990.
- 3) 江崎哲郎他：岩盤不連続面のせん断-透水同時実験装置の開発，資源と素材，Vol.112, No.4, pp.213-218, 1996.
- 4) S.C.Bandis et al. : Fundamentals of Rock Joint Deformation, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. , Vol.20, No.6, pp.249-268, 1983.