

新しいせん断-透水同時実験装置の開発と  
GISによる不連続面内流れのシミュレーションに関する研究  
Development of New Shear-Flow Coupling Test Apparatus and Flow Simulation in Rock Joint  
by Using Geographic Information System (GIS)

三谷泰浩<sup>+</sup>, 江崎哲郎<sup>\*\*</sup>, 田中誠一郎<sup>\*\*\*</sup>, 和田圭仙<sup>\*\*\*\*</sup>  
Yasuhiro MITANI, Tetsuro ESAKI, Seichiro TANAKA, Yoshinori WADA

A new advanced shear-flow coupling apparatus is developed under the ideal condition for simulating the flow in rock joint as faithful as possible. The rotation of the upper shear box is perfectly controlled during shear and the permeability test of linear flow is conducted. As a result of apparatus verification experiment, the new apparatus sufficiently satisfied required performance. Furthermore, after measuring the roughness of rock joint, geometric distribution of rock joint is analyzed by using geographic information system (GIS), and flow simulation is carried out. The results of this simulation indicate that joint contact region after shearing decrease by 10% in comparison with the before shearing state and the channeling flow path in rock joint is clearly identified.

*Key Words : rock joint, shear-flow coupling property, GIS, laboratory test*

## 1. はじめに

近年、環境との調和を掲げて、放射性廃棄物処分や各種エネルギー貯蔵などの地下1000mに達する深部の厳しい環境下における地下利用が注目されている。このような地下空間開発は、構成要素である岩盤の剛性、密閉性、耐久性、隔離性などの特徴を活用するものであり、その開発に際しては、自然・社会環境へ及ぼす影響をできる限り押さえることが重要となる。さらに、地下は一度開発を行うと元の状態に戻すことが困難であるという不可逆性を有しているため、その設計、施工および維持管理においては、通常の土木構造物よりも格段に厳しい配慮を施さなければならない。したがってこれらの基礎的な情報として、岩盤中に存在する不連続面の力学・透水特性を正確に把握することが重要となる。

本論文では、著者らが既に開発したせん断-透水同時実験装置の問題点を整理・解決し、地下深部の理想的な条件をできるだけ忠実に再現できるような新しい実験装置の設計・開発を行い、せん断-透水同時実験を行う。さらに、せん断による不連続面の幾何学的分布を地理情報システム(GIS)を用いて処理し、透水モデルとの統合・解析を行い、不連続面内の流れのシミュレーションを行った結果を示す。

## 2. 新しいせん断-透水同時実験装置の設計・開発

### 2.1 従来の実験装置の問題点

筆者らは、90年代初めより独自のせん断-透水同時実験装置の設計・開発に取り組んだ。そして、試作した実験装置による数多くの実験結果から、岩盤不連続面のせん断-透水同時特性を捉え、多くのデータを取得してきた<sup>1)</sup>。この装置は不連続面の一面せん断試験機として避けることのできない本質的な問題点を除いて多く

\* 正会員 九州大学大学院工学研究科 助教授 \*\* 正会員 九州大学大学院工学研究科 教授  
\*\*\* 九州大学大学院工学研究科 \*\*\*\* (財)日本道路公団

の問題点は、ほぼ解決されているが、以下に示す問題点が残されている。

第1に、不連続面に載荷する垂直荷重は球座を介して載荷するため垂直荷重が小さい時には上箱の回転が生じやすく実験中に制御することが不可能である。その結果、せん断中に不連続面に作用する垂直応力・変形が一樣でなく、透水試験の際には、正確な透水量が計測されない可能性がある。

第2に、透水試験は試験体下部中央からの放射流によって行われるが、直方体の試験体を使用しているにもかかわらず、不連続面中央部から放射流で透水させており位置によって透水距離が変化するため、実験結果から直接透水係数を求めることができない。したがって得られる透水係数の値はその信頼性に疑問が残る。また、原位置における深部岩盤不連続面では、高い水頭下で比較的小さな動水勾配による流れが生じているため、このような状況を再現できることが理想的であり、不連続面内の流れを忠実に再現するには試験体側面からの一方向流が望ましい。

## 2.2 新しいせん断-透水同時実験装置の設計概念

前述の2つの問題点を解決するために、以下に示す設計概念のもと理想的なせん断-透水同時実験装置の開発を行う。

### (a) 垂直方向2点載荷の導入

従来の装置では実験中に上箱の回転が発生した場合には、その回転を制御することが不可能であり、垂直載荷軸と上箱の間に発生する摩擦力の影響が無視できなくなる。そこで新装置ではこの現象を防ぐため、Fig.1に示すように2点による垂直荷重載荷方式を導入する。その際、載荷ジャッキ上端と載荷枠および下端と上箱は、ピン結合とし発生する摩擦力の低減を図る。また載荷ジャッキを十分に長くし、上箱に回転が発生した時でも不連続面に正確な垂直荷重を載荷できる構造とする。さらに各々のジャッキを荷重もしくは変位制御できる構造にすることで、上箱の回転を制御した実験が可能となる。

### (b) 一方向流による透水機構の導入

原位置の岩盤不連続面内の水の流れを再現するために不連続面の両端に水頭を与え、その水頭差による一方向流の透水試験が可能となるよう設計する。そのためには、せん断面（不連続面）の周囲からの漏水を防がなければならないが、せん断面に伴い不連続面はせん断方向にずれが生じること、せん断面が矩形であることから、その止水は容易ではない。そこで、Fig.2に示すように不連続面周辺を軟質ゴムによりシールする方式を採用する。使用するゴムとして柔軟性に富み、大変形が可能な材料であれば、これを試験体に押し当てることでその周辺のわずかな隙間、さらには試験体の隅角部をも密閉することができる。構造的には、この軟

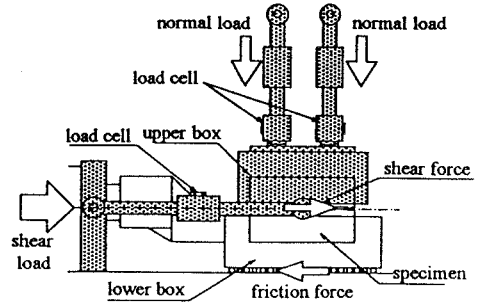


Fig.1 Forces acting on the shear testing unit.

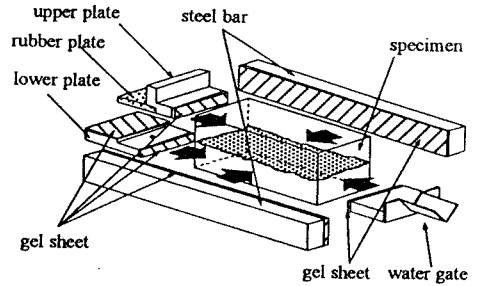


Fig.2 Schematic drawing of sealing mechanism.

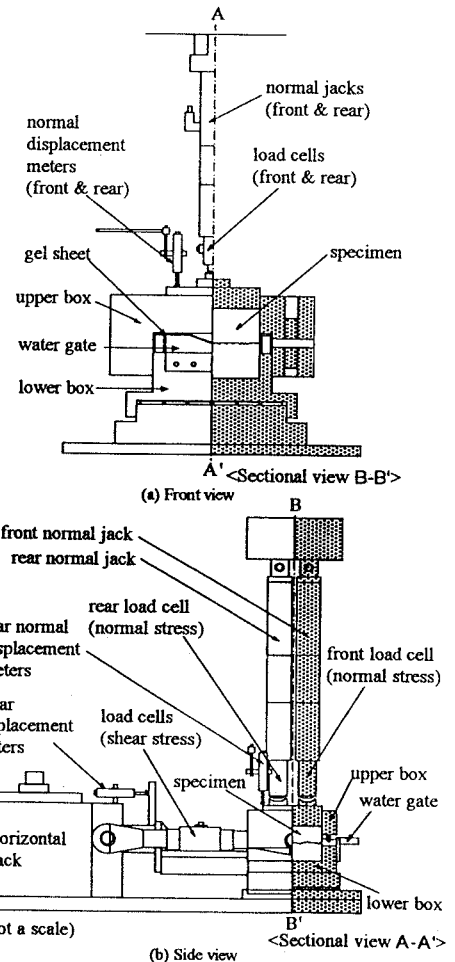


Fig.3 New shear-flow coupling test apparatus.

質ゴムを金属板に添付し、常に一定の圧力で押し当てる方式を採用する。またせん断方向両端部に取り付けられた金属板は試験体の上部と下部にそれぞれ押し当てられ、試験体の上下面のずれに追従できるように設計する。

### 2.3 新しいせん断-透水同時実験装置の仕様

新しく開発したせん断-透水実験装置の全体図を Fig.3 に示す。

#### (a) 直接せん断装置部

せん断装置部は従来のもと同様に一面せん断方式を採用する。せん断容器は、上箱と下箱が完全に分離されており、下箱が移動する構造となっており、上箱はせん断容器を挟み込む形で設置されたせん断荷重の測定用の2個のロードセル(引張・圧縮両用型、容量各200kN)を組み込んだロッドによって支持されている。ロッドは十分長く、両端取り付け部は上箱の上下移動および回転が許されるが水平方向の動きは拘束されている。載荷はせん断方向、垂直方向ともに油圧サーボ方式であり、せん断荷重は変位制御、垂直荷重は載荷枠に各々ピンによって取り付けられた2本のジャッキを組み込んだ十分長い載荷軸(長さ810mm)によって載荷され、それぞれのジャッキを荷重もしくは変位制御できる。最大載荷能力は、せん断方向は前進方向400kN、垂直方向は1本当たり200kNで計400kNである。垂直変位は、上箱の4隅に設置した4個の変位計を用いて行われ、上箱の回転角も評価できる。

#### (b) 透水装置部

透水試験は定水位法で行い、不連続面上流端部は高さが調節できる自動給水型の容量約10リットルの容器により水頭を与え、下流端部は大気圧開放とし、せん断面と同じ高さに設けられた堰から定水位で越流させる。越流した流量(透水量)は、その数オーダーの変化に対応するため、電子天秤を用いて計測される。また、不連続面両端部を閉塞し、両方に異なる水頭を与えた条件下での透水試験にも対応可能である。

不連続面のシールには、ゲルシートと呼ばれる軟質ゴムを用いる。ゲルシートは、柔軟性に富んだ大変形が可能な厚さ2mmのシート状の材料で、不連続面側部にはこのゲルシートを添付した金属板を押し当てシールし、せん断方向両端部には、不連続面を挟んで上下にゲルシートを添付した金属板を押し当て、側部の金属板と併せて貯留部を作り出す。また、金属板を安定した一定の荷重で試験体に押し当てるために、金属板中に複数の孔を作製し、これをシリンダーとする多連式のジャッキ(前後方向には直径10mmの4連のシリンダー、側方には直径10mmの9連のシリンダー)を作製し、ゲルシートの特性から必要な圧力を設定し使用する。

## 3. せん断-透水同時実験

### 3.1 試験体及び実験ケース

試験体は縦200mm×横100mm×高さ80mmの直方体の韓国南原産花崗岩(比重2.64、一軸圧縮強さ193MPa)のブロックの中央高部分に人工的に不連続面を作成したものをを用いる。この人工不連続面は垂直荷重を載荷した状態で、長手方向にくさびをあて、このくさびに荷重を加えた状態で垂直荷重を除荷することによって作成され、再現性のある安定した不連続面を得ることができる。ただし、せん断面の大きさは不連続面作成用のスリットがあるため180×100mmとなる。今回は装置の性能確認試験として垂直応力一定条件下で上箱の回転を制御する場合(Case-1)と上箱の回転を制御しない場合(Case-2)の2ケースの実験を2つの試験体を用いて行う。実験は、両ケースとも垂直応力を1MPa一定とし、せん断変位20mmまでせん断し、せん断変位1mmごとの各段階で一時的にそのせん断変位を保持した状態で透水試験を行う。

### 3.2 不連続面の平均的透水係数の算出方法

実験では、不連続面内の流れが一方向流であること、および面内流速が比較的遅いことから不連続面を1つの平行平板モデルと仮定して不連続面の平均的な透水係数を評価する。不連続面上流端にかかる水頭値は与えた全水頭と流速に応じた管路などの損失水頭の差で与えられる。損失水頭 $h$ はせん断箱上部を取り除いた状態

で透水試験を行い、その時の流量と水頭との関係を最小二乗法により曲線回帰した以下の式で与えられる。

$$h = 0.153 \cdot Q^{1.433} \quad (1)$$

ここで、 $h$  : 損失水頭 [cm],  $Q$  : 定常時の流量 [cm<sup>3</sup>/sec]

また定常時の不連続面内の動水勾配は、両端の水頭差とせん断変位に応じた透水距離で定義され、水理学的間隙幅による平行平板の式を基にダルシー則を適用することで、単位時間あたりの流量  $Q$  は以下の式で表される。

$$Q = \frac{g \cdot e_h^3 \cdot \Delta H}{12\nu \cdot \Delta} \cdot W \quad (2)$$

ここで  $g$  : 重力加速度 [cm/sec<sup>2</sup>],  $e_h$  : 水理学的間隙幅 [cm],  $\Delta H$  : 透水面両端の水頭差 [cm],  $\Delta$  : 透水長さ [cm],  $\nu$  : 流体の動粘性係数 [cm<sup>2</sup>/sec],  $W$  : 不連続面の幅 [cm] である。

その結果、実験で得られた定常状態における単位時間あたりの流量からせん断変位に応じた水理学的間隙幅を求めることができ、これを以下の式に代入することで不連続面の平均的な透水係数を求めることができる。

$$k = \frac{g \cdot e_h^2}{12\nu} \quad (3)$$

### 3.3 実験結果と考察

Case-1 の実験結果として、せん断変位に対するせん断、垂直応力、垂直変位、透水係数の変化を Fig.4 に、Case-2 の同様の結果を Fig.5 に示す。せん断応力は、両者ともせん断とともにせん断初期で最大値を示した後、ゆるやかに減少し一定の残留せん断応力を示す。両ケースとも垂直荷重の2つのジャッキの平均値はほぼ一定の値を示し、垂直応力を一定に保つことができた。垂直変位は、両者ともせん断とともに一旦減少し、その後、明確なダイランシー特性を示す。Case-1 では、前後の垂直変位をほぼ一定に保つことができ、せん断箱上箱と下箱をほぼ平行に保った条件下での実験が行われている。一方、Case-2 では前後の垂直変位が異なっており、せん断箱上箱の回転（せん断変位 20mm で時計回りに約 3.2° 回転）が生じている。透水係数は、両者ともせん断初期に減少した後、急激に 2 オーダー近く増加し、残留せん断応力を示すせん断変位において、透水係数はほぼ一定の値を示す。両者を比較すると、最大せん断応力は、Case-1 の方が大きな値を示すが、これはせん断中に上箱の回転を拘束したことによるものと考えられる。さらに、不連続面作成時に計測された両ケースの不連続面の初期間隙幅は 0.15mm と等しいことから、垂直変位の変化は間隙幅の変化に等しいとみなされ、実験では、両ケー

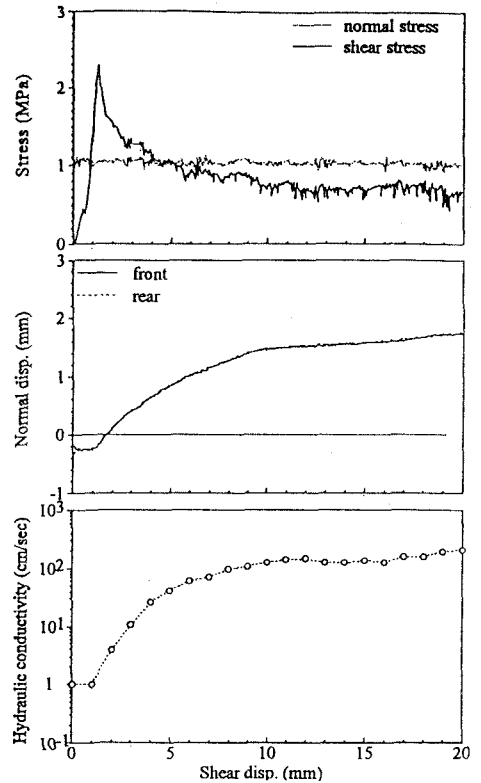


Fig.4 Shear stress, normal stress, normal disp. and hydraulic conductivity vs. shear disp. curves obtained from the Case-1.

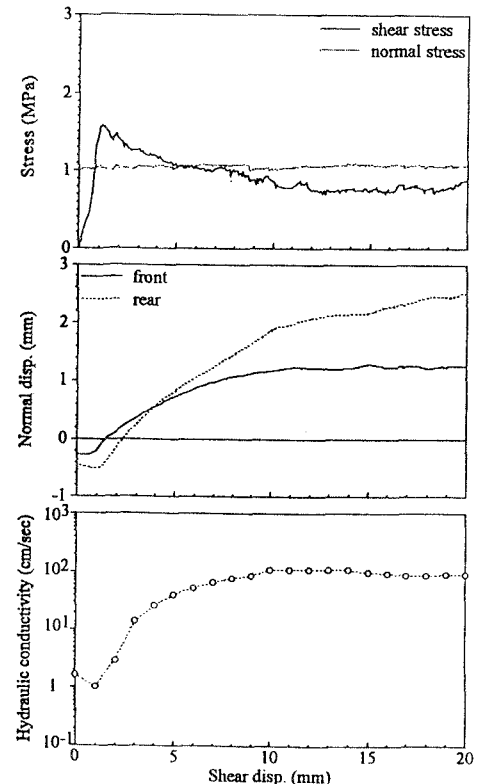


Fig.5 Shear stress, normal stress, normal disp. and hydraulic conductivity vs. shear disp. curves obtained from the Case-2.

スの間隙幅の平均値の変化は、ほぼ等しい結果が得られている。しかしながら、せん断変位5mm以降、Case-2の透水係数が89.9cm/secとなり、Case-1の透水係数209.1cm/secよりも約2倍小さくなっている。これは、透水係数に寄与する水理学的間隙幅は不連続面の平均的な間隙幅とは一致せず、不連続面の間隙幅が一様に変化しない場合には透水係数に差が生じることを示唆している。以上、装置の検証を兼ねて2つの実験を行った結果、新しい実験装置は、要求される性能を十分に満足しており、実験結果からせん断時の上箱の回転は、せん断-透水同時特性に大きな影響を与えることが明らかとなった。

#### 4. 地理情報システム (GIS) による不連続面内流れのシミュレーション

地理情報システム(GIS)は図形、画像、数値などの地図上の情報を統合して、管理、加工、分析を行うツールであり、一般には都市計画、環境アセスメントなどの分野で先進的な利用がなされている。周知の通り不連続面の透水特性は、不連続面の間隙幅の変化に大きく影響を受け、せん断中の間隙幅は、凹凸の乗り上げや破壊によって変化する。そこで、ここでは、GISの空間解析機能、いわゆる位置などの空間情報に基づく属性情報を分析・解析する機能を用いて不連続面の凹凸の幾何学的変化を解析し、透水モデルと統合することでせん断に伴う不連続面内の流れのシミュレーションを試みる。

##### 4. 1 表面形状計測システムの開発

不連続面の幾何学的分布を定量化するために、不連続面表面の凹凸計測システムを構築した。本計測システムは、精密X-Y位置決めテーブル(ストローク長250mm×150mm、繰り返し位置決め精度±3μm)、非接触型レーザー変位計(スポット径45μm×20μm、分解能0.5μm)及びデータ計測用のパソコンから構成される。本システムでは、試験体を位置決めテーブル上に固定し、これを設定した間隔でX,Y方向に移動させ、その位置における凹凸の高さを非接触型レーザー変位計により計測し、パソコンによりデータ処理を行う。

本システムの計測方法の確立とその精度を検証するために、測定値に影響を与える要素(温度・テーブルの移動速度・テーブル静止時間・レーザー変位計の平均測定回数)をパラメータとした検証を行った。その結果、温度の影響は、比較的溫度変化の少ない環境下で計測するため温度変化と測定値の間に明確な関係がみられず、検証時の誤差±0.006mmの変化が誤差として生じるものとした。また、その他の3項目については基準値からの誤差が±0.002mm以内に収まるように測定条件の設定を行った。以上の結果より本システムの計測精度として±0.01mm(有効数字小数点第2位まで)が確保できると考えられる。

##### 4. 2 不連続面内流れのシミュレーション

###### (a) 初期間隙幅の設定

せん断前の不連続面凹凸の幾何学的分布状況は、前述した計測システムを用いて計測するが、不連続面上下の空間的な位置関係は定義されておらず、流れのシミュレーションに不可欠な不連続面の初期間隙幅を設定する必要がある。そのため、垂直応力と垂直変位との関係から実験時の初期の間隙幅を設定する。まず、不連続面を1mmメッシュに分割し、不連続面に加わる垂直応力と垂直変位の関係を以下の式で定義する。

$$\sigma_n = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \sigma_{ni}) = \frac{m \cdot E}{A} \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \frac{u_{ni}}{h}) \quad (4)$$

ここで、 $A$ :せん断面の投影面積[cm<sup>2</sup>],  $a_i$ :メッシュの面積[cm<sup>2</sup>],  $\sigma_{ni}$ :各メッシュの垂直応力[kg/cm<sup>2</sup>],  $u_{ni}$ :各メッシュの垂直変位[cm],  $h$ :試験体上部および下部の高さ[cm],  $E$ :岩石の弾性係数[kg/cm<sup>2</sup>],  $m$ :岩石の応力-ひずみ関係に基づいた弾性係数を規定する係数である。

間隙幅の大きさは不連続面上部と下部の凹凸の高さの差として求められる。そこで、不連続面上下を徐々に接近させると上面と下面との値が逆転する部分、いわゆる凹凸が接触する領域が増加し始める。この時、不連続面

上面と下面との値が逆転した量から接触量を求めることができ、この接触量の1/2を凹凸の垂直変形量として(4)式に代入することで各メッシュにおける垂直応力が求められる。各メッシュの垂直応力の総和は、不連続面上下を接近させることで徐々に増加する。この垂直応力の総和が実験時の垂直応力に等しくなった時の不連続面上下の位置関係を初期の状態と定義し、この時の間隙幅分布を解析における初期間隙幅分布とする。ただし、不連続面上面と下面との値が逆転したものについては接触しているものとみなし間隙幅はゼロとする。

(b) 透水モデル

不連続面の透水モデルは、不連続面をFig.6に示すように $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ のメッシュに分割し、それぞれのメッシュが1つの間隙幅 $t_{i,j}$ と水頭値 $h_{i,j}$ を持つ平行平板と仮定してモデル化する。そして、各メッシュ間の水収支を考慮し不連続面全体の水頭分布を求め、不連続面内の流れの特性を明らかにする。まず、任意のメッシュおよびそれに隣接する各メッシュの間隙幅と水頭値をFig.6に示すように定義する。さらにZ方向の流速は無視し、メッシュ間の流量が、その間の水頭勾配に比例するものと考え、任意のメッシュにおけるX, Y方向の流量変化 $\Delta Q_x$ ,  $\Delta Q_y$ が求められる。定常状態では、 $\Delta Q_x$ ,  $\Delta Q_y$ の総和はゼロであることから、 $\Delta X = \Delta Y$ とすると任意のメッシュにおける水頭値は次式で表される。

$$h_{i,j} = \frac{C_{i-1,j} \cdot h_{i-1,j} + C_{i+1,j} \cdot h_{i+1,j} + C_{i,j-1} \cdot h_{i,j-1} + C_{i,j+1} \cdot h_{i,j+1}}{C_{i-1,j} + C_{i+1,j} + C_{i,j-1} + C_{i,j+1}} \quad (5)$$

ここで、 $C_{i,j}$ は、各メッシュ相互の透水性に関する係数であり、平行平板流れを仮定すると(3)式を参考に以下の式で表される。

$$C_{i,j} = \frac{g}{12\nu} (t_{i,j})^3 \quad (6)$$

境界条件は、透水方向の水頭は実験時の水頭とし、流入側は全水頭から損失水頭を差し引いた値、流出側はゼロとする。また、透水方向と直交する方向については水の収支がないものとし、不透水境界とする。接触領域部分については、岩盤自体も透水性を有すること、および計測時の凹凸高さの有効数字を小数点第2位としていることを考慮し、間隙幅を0.001mmと仮定した透水係数を与える。また、各メッシュの初期水頭値は境界条件をもとに仮定し、以上の条件下で、逐次近似法による収束計算を繰り返し、各メッシュの水頭値を算出する。そして、不連続面端部からの単位時間当たりの流出流量が実験値と一致するように水理学的間隙幅を求め、不連続面内の流量分布を求める。

(c) シミュレーション結果

透水シミュレーションのためにCase-2と同じ条件で実験を行う。ただし、Case-2とは異なり、人工不連続面を作成後、不連続面を一旦開いて、不連続面(180mm×100mm)上下を凹凸計測システムによりX, Y方向0.2mm間隔で計測した後、せん断-透水同時実験を行う。

得られた凹凸の計測データをGISにより処理し、実験時のせん断変位及び垂直変位の変化に応じて上下凹凸面を移動させ、せん断-透水同時実験をシミュレートする。

Fig.7にせん断変位0mm, 5mm, 20mmの不連続面の間隙幅の分布図をFig.8に水頭値の等圧力線図を示す。

せん断変位0mmでは、間隙幅ゼロの領域いわゆる接触領域は、ほぼ均一に分布しており、その接触率(全せん断面積に対する接触面積の割合)は49.4%である。せん断変位5mmでは、接触領域及び間隙幅の小さい領域がせん断方向に対して直交する方

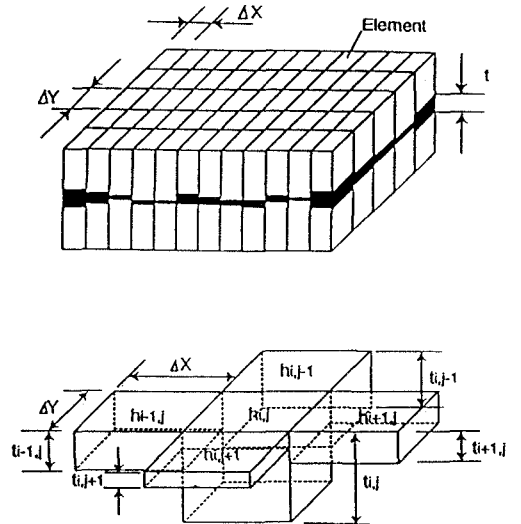


Fig.6 Fracture model for flow simulation.

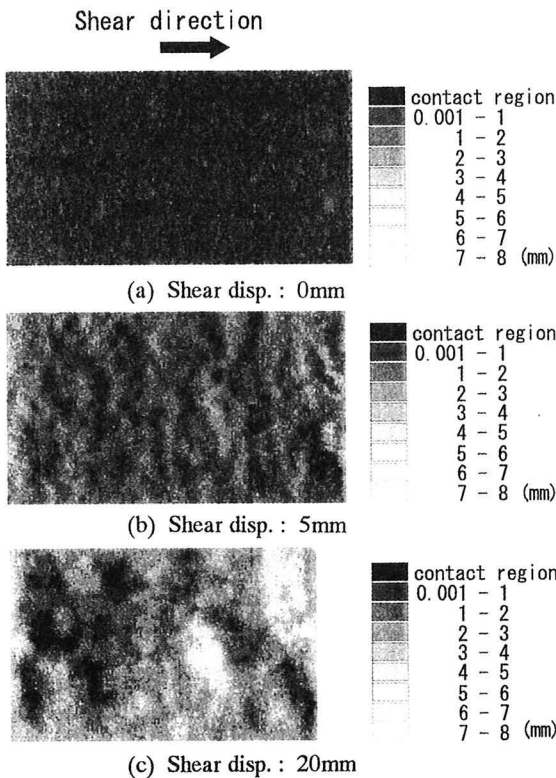


Fig.7 Aperture distribution.

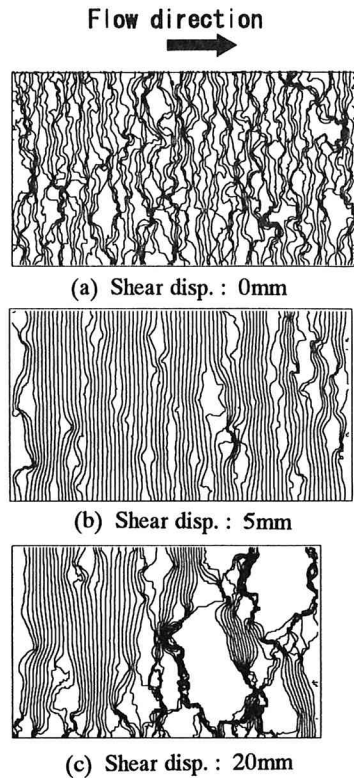


Fig.8 Contour of hydraulic head.

向に縞状に連なる傾向が確認され、接触率は7.5%と急激に減少する。さらに、せん断変位が20mmでは不連続面上下が局部的にしか接触しておらず、接触率が4.3%と間隙幅の大きな領域が拡大する。また、このことはせん断とともに不連続面内の接触領域でせん断応力、垂直応力が集中していることを意味する。水頭値の等圧力線図は、いずれも接触領域および間隙幅が小さな部分で密な分布を示し、圧力の急激な低下が生じる。この部分では、ほとんど透水しておらず、この領域を迂回するようにその周辺部分で局所的な流れが発生している。せん断変位0mmの場合には、このような状況が不連続面全体に均一に広がっているため、全体的に一樣な流れが生じているように見える。しかしながらせん断変位が大きくなると、接触領域が局所的な分布を示すため局所的な流れは著しくなる。このように不連続面内では、一樣な流れ場が発生しているのではなく、せん断に伴い接触領域が不均一に生じることで局所的な流れ場が生じている。

## 5. 結言

本論文では、岩盤不連続面中の流れをできるだけ忠実に再現した理想的な条件下でせん断-透水同時実験が行える新しい装置の開発を行った。そして、装置の検証を兼ねて実験を行った結果、新しい装置は、要求される性能を十分に満足しており、上箱の回転による不連続面のせん断-透水同時特性への影響を定量的に評価できた。さらに、不連続面表面の凹凸計測を行い、GISによる不連続面の幾何学的分布と透水モデルを統合・解析し、流れのシミュレーションを行った。その解析結果として、これまでに把握することが難しかったせん断過程での不連続面の間隙幅の変化の状況や不連続面内の流れの状況を定量的にシミュレートすることができた。

## 参考文献

1) 例えば、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, pp.213-218, 1996.