

岩盤不連続面のせん断—透水同時試験の数値シミュレーション†

小山 倫史* 塚原 隆裕** 松本 拓真*
蔣 宇静*** 李 博***

Numerical Simulation of Laboratory Coupled Shear-Flow Tests for Rock Fractures

by

Tomofumi KOYAMA *, Takahiro TSUKAHARA **, Takuma MATSUMOTO *, Yujing JIANG *** and Bo LI ***

The fluid flow in rock fractures during shearing processes was investigated in this paper considering the evolutions of aperture (void geometry) with shear displacement histories under constant normal stress. The distribution of fracture aperture and its evolution during shear were calculated from the initial aperture and shear dilations measured in the laboratory coupled shear-flow tests. For the fluid flow simulations, three-dimensional Navier-Stokes (NS) and two-dimensional Reynolds (local cubic law) were solved numerically and simulation results were compared.

Key words : Coupled shear-flow test, Rock fracture, Fluid flow, Shear displacement, Numerical simulation, Reynolds equation, Navier-Stokes equation.

1 はじめに

近年、エネルギー・環境問題に対する社会的関心が高まっており、岩盤工学においては、高レベル放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素の地中貯留などのプロジェクトが注目を浴びている。特に、高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、地下水シナリオを中心に処分施設の安全性評価を行うことが重要であると考えられており、特に地下空洞掘削に伴う掘削影響領域 (EDZ: Excavation Disturbed Zone) における透水・物質移行特性の把握が重要な研究テーマの一つとして挙げられている。

岩盤の水理学的挙動は岩盤基質部よりも岩盤中に存在する潜在的な弱面である不連続面に大きく支配され、岩盤全体の水理学的挙動の予測には不連続面の透水特性を把握することが重要となる。また、不連続面は応力によって垂直・せん断変位、表面凸凹形状や岩石基質部の変形・破壊などを生じ、不連続面内の空隙構造が変化する。特に、掘削による応力再配分により、不連続面に沿ってせん断変位を起こす場合には、ダイレーションの発現と共にその空隙構造が大きく変化し、それに伴い不連続面の透水特性も大きく変化するため、岩盤不連続面内の応力—浸透連成挙動は、結晶質岩内に高レベル放射性廃棄物の処分施設を建設する場合、特に重要である。

岩盤不連続面内の流体の流動機構を明らかにするために、ラフネスを有する粗い不連続面を対象とした流れの数値シミュレーションが実施されてきたが、一般的に3次元のナビエ・ストークス (NS) 方程式を解く代わりに、不連続面を局所的に滑らかな2枚の平行平板としてモデ

ル化し、流体の流れを層流と仮定して、レイノルズ方程式 (local cubic law : 局所三乗則) が適用されてきた。レイノルズ方程式や局所三乗則は、流れが遅く、レイノルズ数が十分に小さい場合、さらに、不連続面の開口幅の分布が急激に変化しない場合に適用が可能である。¹⁾ ただし、一般的に、複雑な空隙構造をもつ岩盤不連続面の流体の流れは層流ではなく、局所平行平板モデルのような単純なモデルで置き換えることには限界がある。不連続面の起伏が大きい場合や、流速が速くレイノルズ数が比較的大きい場合、不連続面内の開口幅方向の流速分布は放物線とならず、実際の流速場との差が生まれる。このことは、岩盤不連続面内の流体の流れのみならず物質移行特性にも重大な影響を与えられと考えられる。また、不連続面に作用するせん断変位は不連続面内部の接触の状態や空隙構造を変化させ、流体の流れや物質移行特性をより複雑なものにしている。

これまで、不連続面内の流体の流れに関する局所三乗則、レイノルズ方程式の適用については多くの研究者によって理論的あるいは数値解析手法を用いて議論されてきた。^{2)~4)} しかし、不連続面に作用する応力や変位 (特にせん断変位) が内部の接触状況・空隙構造の変化さらには流体の流れに与える影響について定量的に評価した事例はあまり見られず、議論も十分されていない。

本研究では、長崎大学で実施した岩盤不連続面のせん断—透水同時試験 (垂直応力一定下) を以下の2つの異なる数値解析モデルを用いてシミュレーションを行い、室内試験の結果と比較を行った。

† 原稿受理 平成 21 年 7 月 10 日 Received July 10, 2009 © 2010 The Society of Materials Science, Japan

* 京都大学工学研究科都市環境工学専攻 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Dept. Urban and Environment. Eng., Kyoto Univ., Nishikyoku-ku, Kyoto, 615-8540

** 東京理科大学理工学部機械工学科 〒278-8510 野田市山崎, Dept. Mech. Eng., Faculty of Science and Technology, Tokyo Univ. of Sci., Yamazaki, Noda, 278-8510.

*** 正会員 長崎大学工学部社会開発工学科 〒852-8521 長崎市文教町, Dept. Civil Eng., Nagasaki Univ., Bunkyo-machi, Nagasaki, 852-8521

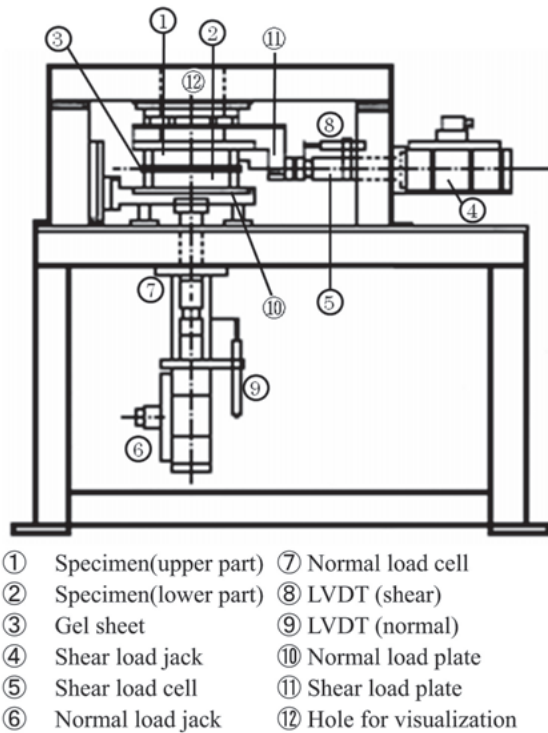


Fig. 1 Schematic view of the coupled shear-flow test apparatus.

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| ① Specimen(upper part) | ⑦ Normal load cell |
| ② Specimen(lower part) | ⑧ LVDT (shear) |
| ③ Gel sheet | ⑨ LVDT (normal) |
| ④ Shear load jack | ⑩ Normal load plate |
| ⑤ Shear load cell | ⑪ Shear load plate |
| ⑥ Normal load jack | ⑫ Hole for visualization |

a) 3次元モデル. 差分法 (FDM) により3次元のナビエ・ストークス (NS) 方程式を解く (本論文で主に解析結果を報告する).

b) 局所平行平板モデル. 開口幅方向に放物線型の流速の分布を仮定し, 有限要素法 (FEM) により2次元のレイノルズ方程式を解く.⁵⁾

なお, せん断変位に伴う不連続面の接触状況の空隙の変化については, 自然岩盤不連続面から型取った供試体を非接触型のレーザー変位システムにより計測した不連続面の3次元ラフネスデータおよびせん断試験中に計測したせん断変位-垂直変位 (ダイレーション) 関係を用いて計算した (詳細は次節で述べる). また, 2つの異なる数値解析の結果を比較することで, レイノルズ方程式・局所三乗則の適用性について検討を行った.

2 岩盤不連続面の一面せん断-透水同時試験

2.1 試験装置の概要

本研究で使用した長崎大学の一面せん断-透水同時試験装置の概要を Fig. 1 に示す. この装置はフィードバック機構を有する完全閉ループ方式の電気・油圧サーボシステムであり, 载荷条件はコンピュータにより自動制御した. パネを用いた垂直剛性一定方式に比べて, 本装置はコンピュータに垂直剛性値を入力するだけでよく, 垂直剛性の設定, 変更, さらにせん断試験中の制御方式の切り替えが容易であるという特徴がある. また, 透水機構部についてはカセット式せん断箱に止水機構を組み込み, 供試体の端部に接続したパイプから圧力をかけることで水を流入させ, 供試体の逆端部から流出する水の重量をリアルタイムに計測することができる. 圧力水頭差は不連続面に対して最大で 100m (動水勾配に換

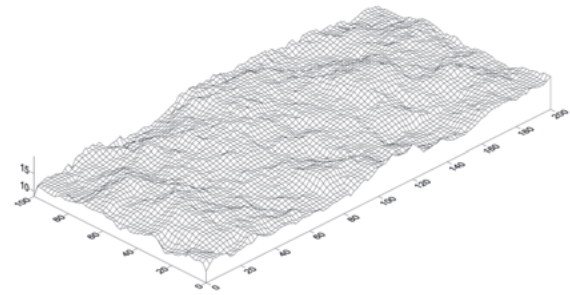


Fig. 2 3-D models of fracture specimen J3 based on the measured topographical data.

算して最大で約 500 まで) を模擬でき, 流入させる際に供試体側面より漏水させることなく確実に集水するために側面にゲルシートと呼ばれる非常に柔らかく変形性に富んだポリマー材を用いて止水している. なお, 透水方向はせん断方向と平行である.

2.2 供試体の作成および一面せん断-透水同時試験

本試験で用いた供試体は, 揚水発電所の建設現場で採取した花崗岩の自然岩盤不連続面から型取ったものであり, 寸法は, 幅 100mm, 長さ 200mm, 高さ 100mm である (以降, 供試体 J3 と呼ぶ). 供試体の材料は重量比で石膏:水:遅延材 = 1:0.2:0.005 の混合材である. 供試体の作成手順として, まず自然岩盤不連続面の表面を変形しにくい樹脂を用いて型取って樹脂供試体を作成し, その樹脂供試体を型枠として不連続面を模擬した石膏供試体を作成した. 次に, その石膏供試体を型枠にしてペアとなる石膏供試体を作成した. このような作成法により作成した石膏供試体は, 初期状態で上下の不連続面はよく噛み合っており, 接触率は限りなく 1 に近い状態である. また, 岩盤不連続面の形状データを得るために, 非接触型 3次元レーザー変位計システムを用いて, x -, y -軸方向にそれぞれ 0.2mm 間隔で供試体の表面の幾何学形状を計測した.⁵⁾ Fig. 2 に本研究で用いた供試体 J3 の表面形状を示す. 本図より, 供試体表面に大きな凹凸はないが, 小さな凹凸が数多く一様に分布し, 比較的粗い表面である ($JRC = 16 - 18$) ことがわかる.

せん断-透水同時試験は 1.0MPa の一定垂直応力下 (CNL) で行い, せん断変位は最大 18mm まで与えた. せん断変位 1mm ごとにせん断を停止し, 水頭差 0.1m を与え, 定水位透水試験を実施した. ただし, 供試体の上部と下部の寸法は同じであり, せん断の進行に伴い透水長が減少していくため, 動水勾配は一定ではないことに注意する. 供試体の作成方法, せん断-透水同時試験装置の特徴および手順の詳細については文献⁵⁾に譲る.

3 岩盤不連続面の一面せん断-透水同時試験

3.1 数値解析手法

岩盤単一不連続面内の流体の流れは一般的に, 3次元のナビエ・ストークス (NS) 方程式で記述が可能である. 非圧縮粘性流体の非定常流の支配方程式 (NS 方程式) をベクトル形式で記述すると以下ようになる.

$$\partial_t \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

ここに、流速ベクトル \mathbf{u} は (u, v, w) の成分からなり、それぞれ (x, y, z) 方向速度成分である。また、 p は圧力、 Re はレイノルズ数、 \mathbf{f} は後述の埋込境界法 (Immersed Boundary Method) により生じる項であり、固体 (岩盤) 内部の速度を強制するために及ぼされる力の密度である。本計算におけるレイノルズ数 Re は、室内試験で再現される圧力勾配 (dp/dx) に基づく無次元化パラメータとした。空間的離散化には、スタガード格子および2~4次精度中心差分による有限差分法を適用した。⁹⁾ 直交格子に任意に交わる固体境界 (複雑な岩盤壁面) を取り扱うため、その再現には埋込境界法を用いた。本手法では、速度の Dirichlet 条件を式 (1) のように外力の形で強制する方法で、この強制速度を流体中の隣接格子点と壁面との間で互いの速度を補完して与えることにより、格子と交わらない壁境界を表現することが特徴である。⁷⁻⁹⁾ このため、任意の固体 (岩盤) 壁について格子生成をその都度行なう必要がない利点が挙げられる。

本研究では、室内試験において各せん断変位における定常状態での流量を計測したため、3次元のシミュレーションも流体の流れが定常になるまで行った。一方、2次元の局所平行平板モデルにおける定常流れの支配方程式は次式 (2) で示すレイノルズ方程式であり、有限要素法の汎用ソフトを用いて解析を行った。

$$\nabla \cdot \left(\frac{\rho_f g b^3}{12\mu} \nabla h \right) = 0 \quad (2)$$

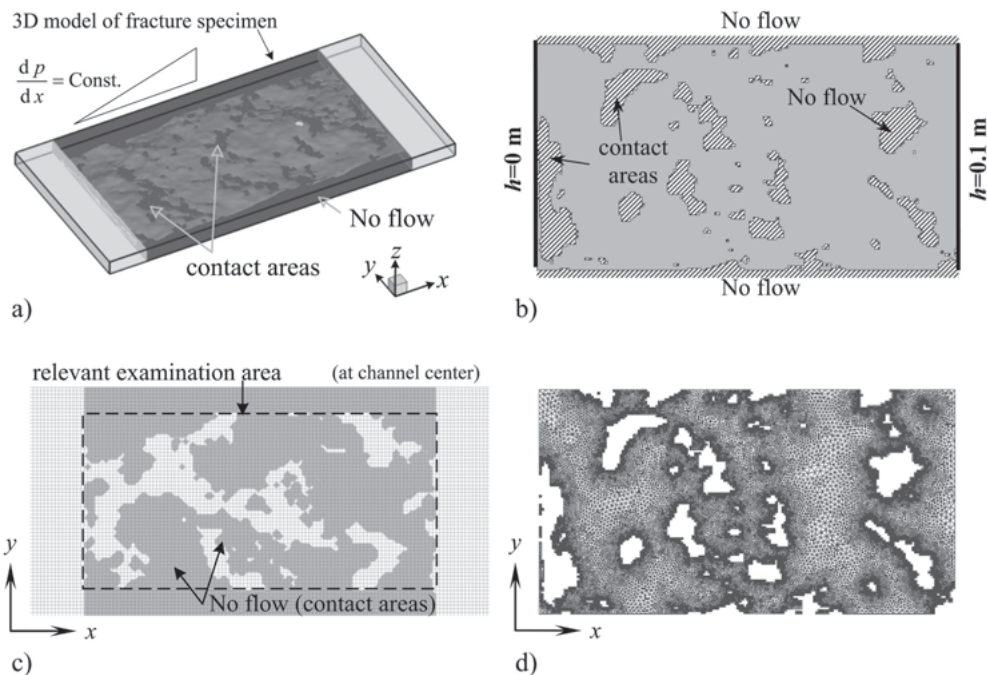


Fig. 3 Hydraulic boundary conditions and calculation grid/mesh for a), c) 3-D and b), d) aperture-averaged 2-D models, respectively.

ここに、 μ は動粘性係数、 ρ_f は流体密度、 g は重力加速度、 b は局所不連続面開口幅である。せん断過程での不連続面の開口幅の分布および透水量係数の変化は各せん断変位ごとに計算し、不連続面の透水量係数は局所的に三乗則を適用することで計算した。なお、本研究では流体として10℃の蒸留水を用いたため、密度および動粘性係数はそれぞれ $\rho_f = 9.997 \times 10^2 \text{kg/m}^3$ 、 $\mu = 1.307 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ である。また、重力加速度は $g = 9.807 \text{m/s}^2$ とした。せん断試験後の不連続面供試体の表面を観察した結果、せん断試験中に発生しうるアスペリティの損傷・ガウジの発生は、ほとんど観察されなかったため、数値解析モデルにおいても、それらの影響は考慮しないこととした。

3・2 せん断に伴う不連続面開口幅分布の変化

不連続面内の流体の流れを正確に把握するためには、せん断過程における開口幅の分布の変化を精度よく測定することが重要である。せん断-透水同時試験における開口幅分布の変化は、供試体の表面幾何学形状、計測により得られた初期開口幅およびせん断変位-垂直変位関係 (ダイレーション・カーブ) を用いて、以下のように計算できる。¹⁰⁾

$$b_m = b_0 - \Delta b_n + \Delta b_s \quad (3)$$

ここに、 b_0 は初期開口幅、 Δb_n は垂直応力の変化に伴う開口幅の変化、 Δb_s はせん断による開口幅の変化 (ダイレーション) である。ある特定の垂直応力における初期開口幅 b_0 は不連続面の剛性試験による垂直応力-垂直変位曲線を双曲線近似したものを用いて計算することができる。¹⁰⁾ 鉛直応力一定 (CNL) 下では、 Δb_n は一定

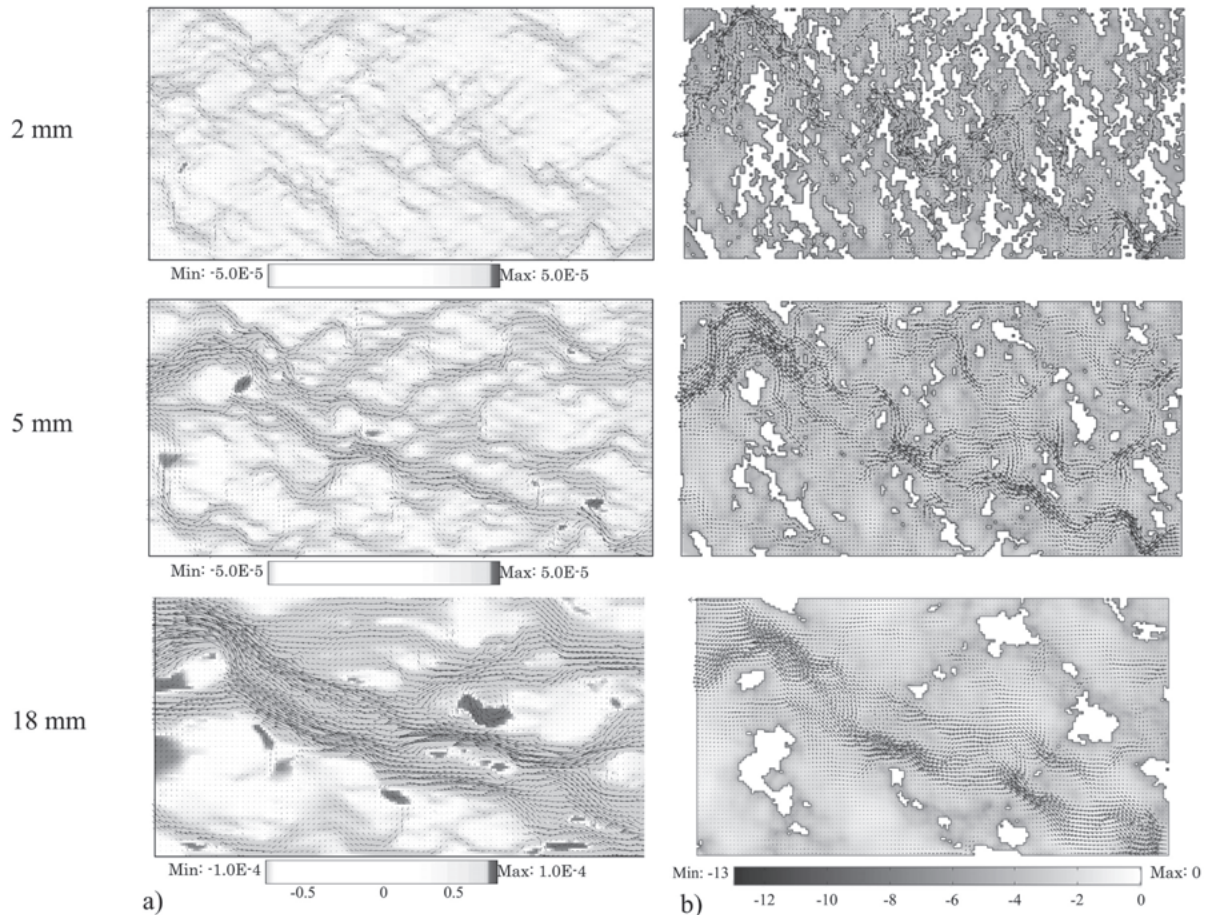


Fig. 4 The evolution of flow velocity fields during shear in the (x, y) plane, a) 3-D and b) aperture-averaged 2-D simulations. The legend shows the magnitude of the streamwise mean velocity (m^2/sec) and the order of fracture transmissivity (m^2/sec) for 3-D and aperture-averaged 2-D models, respectively. Mean flow is from right to left.

値である。また、せん断変位 u_d を与えたときの不連続面表面の任意の点 (x, y) における開口幅 b_m は、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} b_m(x, y) &= b_0(x, y) + b_s(x, y) \\ &= b_0(x, y) + [V(u_d) + Z_L(x + u_d, y)] - Z_L(x, y) \\ &= Z_U(x + u_d, y) - Z_L(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $V(u_d)$ はせん断変位 u_d を与えたときの垂直変位（ダイレーション）、 Z_U と Z_L はそれぞれ上部・下部供試体の基準面からのラフネス高さである。

数値シミュレーションの際に設けた仮定を整理すると以下ようになる。(1) 初期状態では石膏供試体がよく噛み合っているため、初期開口幅 b_0 をゼロとする。(2) せん断に伴う垂直変位（ダイレーション）は、せん断—透水同時試験で計測したものをを用いる。この際、ダイレーションは上部供試体に均等に与え、供試体がせん断中に傾く（チルティング）現象は考慮しない。(3) 各せん断変位ごとに上部、下部供試体を重ね合わせる際、いくつかの計測点で開口幅の値がゼロもしくは負の値をとることがあるが、それらの点では接触しているものと

みなし、開口幅としてゼロを与える。(4) せん断時に発生するガウジの影響は無視できるものとする。(5) 石膏供試体実部への浸透は考慮しないものとする。

3.3 境界条件

水理境界条件はせん断—透室内同時試験と同様に与えた。すなわち、上・下流端での水頭をそれぞれ 0.1m, 0m で固定し、せん断方向と平行な一方向流とした。ただし、供試体の上部と下部のサイズが同じであるため、せん断に伴って透水長は減少し、動水勾配は一定ではなく少しずつ大きくなる。3次元モデルでは、亀裂の上下壁面や接触領域に沿って、埋込境界法によってノンスリップ境界条件を適用した (Fig. 3a 参照)。一方、2次元局所平行平板モデルにおいては、接触領域すなわち開口幅がゼロの領域で流れが生じないように計算領域から削除し、接触領域に流入・出しないようにするため、接触領域境界の法線方向の流速をゼロとする条件 ($\partial h / \partial n \equiv (\nabla h) \cdot \mathbf{n} = 0$ (\mathbf{n} は接触領域の境界に対する法線ベクトル))¹¹⁾ を与えた (Fig. 3b 参照)。

4 解析結果

Fig. 4 に各せん断変位ごと（せん断変位 2mm, 5mm, 18mm）に、2通りの計算方法（レイノルズ方程式で記

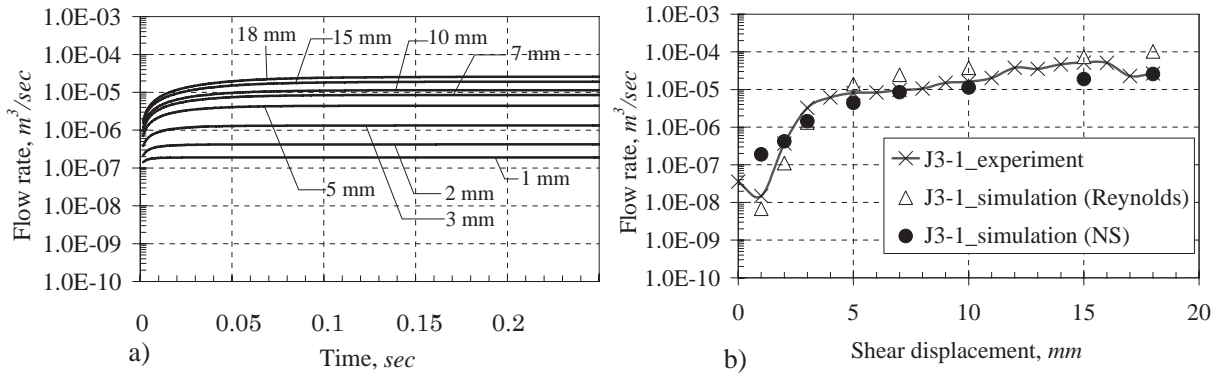


Fig. 5 a) Time evolution of flow rate at each shear displacements for unsteady NS simulation in 3-D and b) comparison of the flow rate at the outlet between laboratory experiment and two different numerical predictions (NS and Reynolds equation).

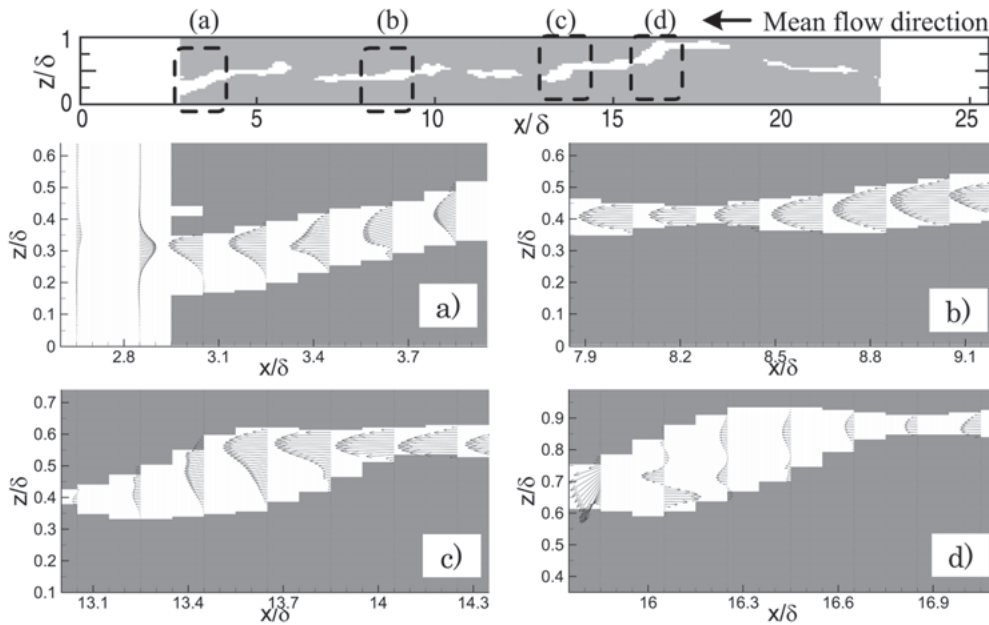


Fig. 6 Evolutions of fluid flow velocity fields and cross-sectional profiles along zones (a-d), for shear displacement of 5mm (NS simulation in 3D), where δ means the minimum width which includes whole fracture in depth direction and X/δ and Z/δ are normalized x - and z - coordinates by δ .

述される局所平行平板モデルおよび3次元のナビエ・ストークス方程式)で計算した流速場(流速ベクトルの分布)の比較を示す。なお、局所平行平板モデルについては、透水量係数の分布およびせん断に伴う変化についてもあわせて示す。本図より、せん断によるダイレーションにより不連続面は開口し、透水性が高くなることから分かる。不連続面供試体の作成法により、不連続面供試体の上下面がよくかみ合っているため、初期の状態、すなわち、せん断変位がゼロの状態では、開口幅がゼロであると仮定したので、流れは存在しない。また、せん断変位 2mm から流れのチャンネルが形成し始め、せん断に伴って接触領域が減少し、接触領域の局在化が起こる。それに伴い、不連続面の流体の流れは、接触領域を避けるように屈曲した流れとなる。この現象は「チャンネル効果」と呼ばれる。平面流速場については、両解析モデルで、類似しているが、3次元のナビエ・ストークス方

程式を解いた場合、接触領域の背面で流れの渦が生じている箇所が数箇所みられる (Fig. 4 で流速ベクトルが $-x$ 方向を向いている箇所)。この流れの渦はレイノルズ方程式を解くことでは表現することができない。

3次元のナビエ・ストークス方程式は非定常であるので、両解析モデルについて、定常状態での流量を比較するため、定常状態になったのを確認してから流量の計算を行った (Fig. 5a 参照)。Fig. 5b にせん断-透水同時試験により得られたせん断に伴う流量の変化と数値解析により得られた結果の比較を示す。本図より、不連続面を流れる流量はせん断初期の段階(すなわち、せん断変位 2, 3mm)で、急激に 2~3 オーダー程度上昇し、せん断変位が 5mm 以降も増大を続けるが、流量のオーダーの変化は見られない(ある一定の流量に落ち着く傾向がみられる)。そして、最終的に流量は 4~5 オーダー程度上昇する。この一般的な傾向は、解析結果とよく一致

しており, せん断に伴う不連続面の透水性の変化を, 異なる2つの解析モデルを用いた数値解析によってある程度よく捉えることができています. しかし, 3次元のナビエ・ストークス方程式を解いた場合, 特に, せん断変位が大きくなり, 流速が速くなった場合に, 実験値とよりよい整合性がみられる. 一方, レイノルズ方程式の場合は, 放物線速度分布をいずれの場所においても仮定しているため, 実際の流路の急拡大・急縮小や流速の加減速の時に生じる圧力抵抗や壁面摩擦の局所的な急変化を表現できない. そのため, それに係る水頭のロスを表現できないため, 実験値より過大評価する傾向がみられる. また, せん断初期に実験値と解析結果(特にNS方程式をたいた場合)に相違がみられるが, これは, 実験における初期状態(せん断変位ゼロ)を解析で精度よく再現できていない可能性がある. すなわち, 解析ではせん断前の状態で不連続面の上下面がよくかみ合っていると仮定したことによると考えられる.

Fig. 6に3次元解析により得られたある (x, y) 平面における開口幅方向(z 方向)の定常状態における流速分布を示す(灰色部は岩盤領域). 本図より, 開口幅方向の流速分布は開口幅が急激に変化しない領域では, 放物線に近い形をしており(例えば, Fig. 6b), 開口幅が急激に広がる・あるいは狭まる領域(例えば, Fig. 6c, d)では, 放物線とはならず, 渦(循環領域)が生じている(流速の値がマイナスになっていることがこのことを示している). 式(2)で表されるレイノルズ方程式はその導出の過程で, 不連続面を2枚の平行平板に置き換え, 流速の放物線分布を仮定している. しかし, Fig. 6は水頭差0.1mを与え, 実験としては比較的小きな動水勾配(初期の不連続面供試体長さが0.2mなので動水勾配が0.5)を与えているにもかかわらず, 明らかに開口幅方向の放物線流速分布が成立していない領域が存在することを示している. このことは, 不連続面を流れる流体の流量などの水理特性のみならず, 物質移行特性にも大きな影響を与えるものと考えられる. 例えば, グラウトあるいはセメントミルクを注入する際, Fig. 6でみられたような循環領域では, セメント粒子の堆積などが生じ, 注入実績に大きな影響を及ぼすと考えられる.

5 ま と め

本研究では, 垂直応力一定下で実施した岩盤不連続面のせん断一透水試験の結果をもとに, 岩盤不連続面内の流体の流れおよびせん断に伴うその変化を数値解析(3次元モデルおよび2次元の局所平行平板モデル)によりシミュレーションを行った. 得られた結果(不連続面を流れる流量およびせん断に伴うその変化)は, 実験結果との比較を行った. 数値解析の結果は実験の結果と比較的よく一致し, ナビエ・ストークス方程式を解くことによって得られた流速分布は, 局所三乗則で仮定される放物線流速分布とは大きく異なっていることが分かった. この差異は不連続面の水理学特性のみならず物

質移行特性に大きな影響を与える可能性があることを示した.

本研究の一部は, 私学・学術フロンティア推進事業「ホリスティックアプローチによる計算科学の新展開」による支援を受けている. 3次元数値解析は, 東北大学サイバーサイエンスセンターのSX-9によって実施した.

参 考 文 献

- 1) R. W. Zimmerman and G. S. Bodvarsson, "Hydraulic conductivity of rock fractures", *Transport in Porous Media*, Vol.23, pp.1-30 (1996).
- 2) S. R. Brown, H. W. Stockman and S. J. Reeves, "Applicability of the Reynolds equation for modeling fluid flow between rough surfaces", *Geophysical Research Letters*, Vol.22 No.18, pp.2537-3540 (1995).
- 3) V. V. Mourzenko, J. F. Thovert and P. M. Adler, "Permeability of a single fracture: Validity of the Reynolds equation", *Journal de Physique II France*, Vol.5, pp.465-482 (1995).
- 4) D. J. Brush and N. R. Thomson, "Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes and Local cubic law simulations", *Water Resources Research*, Vol.39 No.4, p.1085 (2003), doi:10.1029/2002WR001346.
- 5) Y. Jiang, T. Koyama, B. Li, Y. Tasaku, R. Saho and Y. Tanabashi, "Numerical modeling of fluid flow in single rock fracture during shear with special algorithm for contact areas", *Journal of MMIJ*, Vol.124, pp.129-136 (2008).
- 6) F. Kawamura, Y. Seki, K. Iwamoto and H. Kawamura, "DNS of heat transfer in turbulent and transitional channel flow obstructed by rectangular prisms", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.28, pp.1291-1301 (2007).
- 7) C. S. Peskin, "Flow patterns around heart valves: A numerical method", *Journal of Computational Physics*, Vol.10, pp.252-271 (1972).
- 8) E. A. Fadlun, R. Verzicco, P. Orlandi and J. Mohd-Yusof, "Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations", *Journal of Computational Physics*, Vol.161, pp.35-60 (2000).
- 9) J. Mohd-Yusof, "Combined immersed-boundary /B-spline methods for simulations of flow in complex geometries," *Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs*, pp.317-327 (1997).
- 10) T. Esaki, S. Du, Y. Mitani, K. Ikusada and L. Jing, "Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.36, pp.642-650 (1999).
- 11) R. W. Zimmerman, D. W. Chen and N. G. W. Cook, "The effect of contact area on the permeability of fractures", *Journal of Hydrology*, Vol.139, pp.79-96(1992).