

動水勾配が岩盤不連続面内の透水特性に与える影響に関する数値解析的研究

小山 倫史^{1*}・塚原 隆裕²・松本 拓真¹・李 博³・蔣 宇静³

¹京都大学大学院 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)

²東京理科大学 理工学部機械工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

³長崎大学 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

*E-mail: koyama@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究では、長崎大学で実施したせん断-透水同時試験より得られたデータをもとに、せん断時における不連続面の開口幅を推定し、各せん断変位において動水勾配を変化させ、流れの数値解析を行った。有限差分法により流れの支配方程式であるナビエ・ストークス方程式を離散化して解き、三乗則を基本とした局所平行平板モデルの解析結果と比較した。動水勾配が岩盤不連続面の透水特性に与える影響について、各動水勾配における透水流量および流速場を比較することで評価を行った。低動水勾配下では、両解析手法により計算された透水流量は実験結果とよく一致したが、高動水勾配下では透水流量および流速場に顕著な差異がみられた。このことは、高動水勾配下において局所平行平板モデルの適用の限界を示している。

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、CO₂の地中貯留などのプロジェクトが特に注目を浴びている。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、地下空洞掘削に伴う掘削影響領域における透水・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は変化する。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とも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⁾。しかし、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じる。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大きな影響を与えられられる。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性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・空隙構造の変化に伴う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。

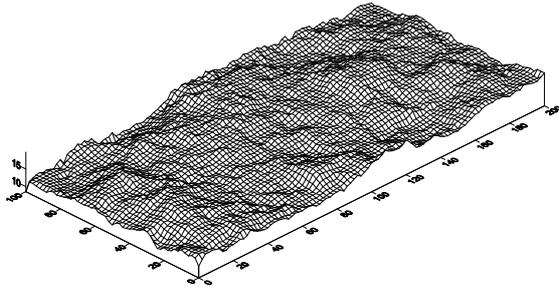


図-1 供試体J3の表面形状 (JRC=16-18)

本研究では、長崎大学で実施した岩盤不連続面のせん断一透水同時試験（垂直応力一定下）結果をもとに、以下の2つの異なる数値解析モデルを用いて流体の流れのシミュレーションを行い、実験結果との比較を行った。

- 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.
- 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.

また、異なる3種類の動水勾配を考慮することで、動水勾配が不連続面内を流れる流体の流量および流速場を与える影響について調べ、レイノルズ方程式および局所平行平板モデル（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一透水同時試験

(1) 試験装置の概要

本研究では長崎大学で開発された一面せん断一透水同時試験装置を使用した。装置の特徴および詳細については文献⁵⁾に譲る。

(2) 供試体作成および一面せん断一透水同時試験

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、非接触型三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⁹⁾。図-1 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

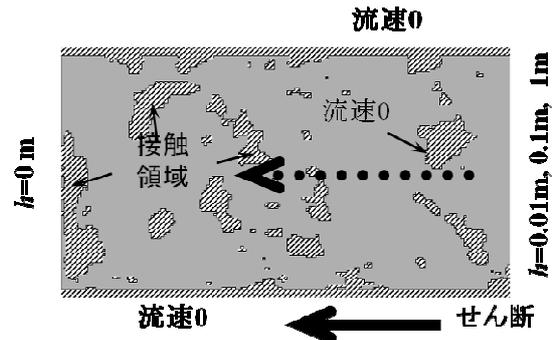


図-2 水理境界条件 (3次元モデル)

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。

せん断一透水同時試験は 1.0 MPa 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、動水勾配の計算の際は注意を要する。供試体の作成方法、せん断一透水同時試験の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一透水同時試験

(1) 支配方程式

岩盤単一不連続面内の流体の流れは一般的に、三次元のナビエ・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。

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

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} は後述する埋込境界法 (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である。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⁶⁾。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などの利点が挙げられる。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

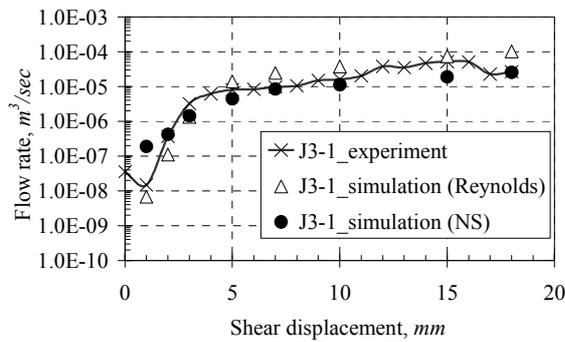


図3 実験結果と解析結果 (NS 方程式とレイノルズ方程式) の下流端透水流量

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、有限要素法により支配方程式を離散化し、2次元の流体の流れのシミュレーションを行った。

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

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後述するとおり、各せん断変位ごとに計算し、不連続面の透水量係数($T = \rho_f g b^3 / 12\mu$)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°C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 $\rho_f = 9997 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\mu = 1307 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ である。また、重力加速度は $g = 9.807 \text{ m/s}^2$ とした。せん断試験中に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。

(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 は一定値である。

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、供試体がせん断試験中に傾く現象(チルティング)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。

(3) 境界条件

各せん断変位において、下流端の水頭を0 mで固定し、上流端の水頭を0.01, 0.1, 1 mと変化させ、せん断方向と平行な一方向流とした。また、3次元モデルでは、亀裂の上下壁面や接触領域に沿って、埋め込み境界法によって nonslip 境界条件を適用し(図-2参照)、一方、局所平行平板(2次元)モデルでは、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、接触領域に流体が流入・流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))を与えた¹¹⁾¹²⁾。

4. 解析結果

図-3にせん断-透水同時試験で得られたせん断に伴う不連続面の透水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, 3 mm)で、急激に2~3オーダー程度上昇し、せん断変位が5 mm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、放物線流速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際に生じる圧力抵抗や壁面摩擦の局所的かつ急激な変化を表現できない。そのため、それに関わる水頭のロスを表現できず、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

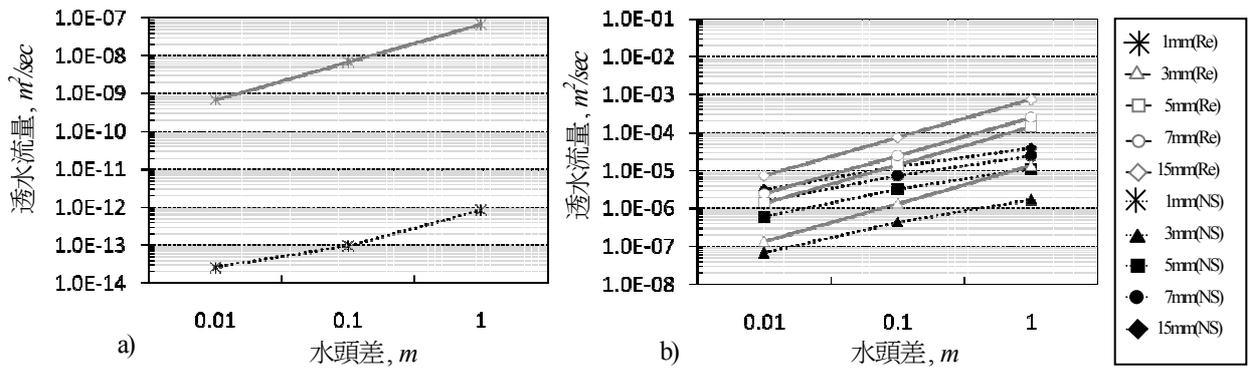


図4 各せん断変位における3次元モデルと局所平行平板モデルの下流端透水流量の比較, a) せん断変位1mm, b) せん断変位, 3, 5, 7, 15mm.

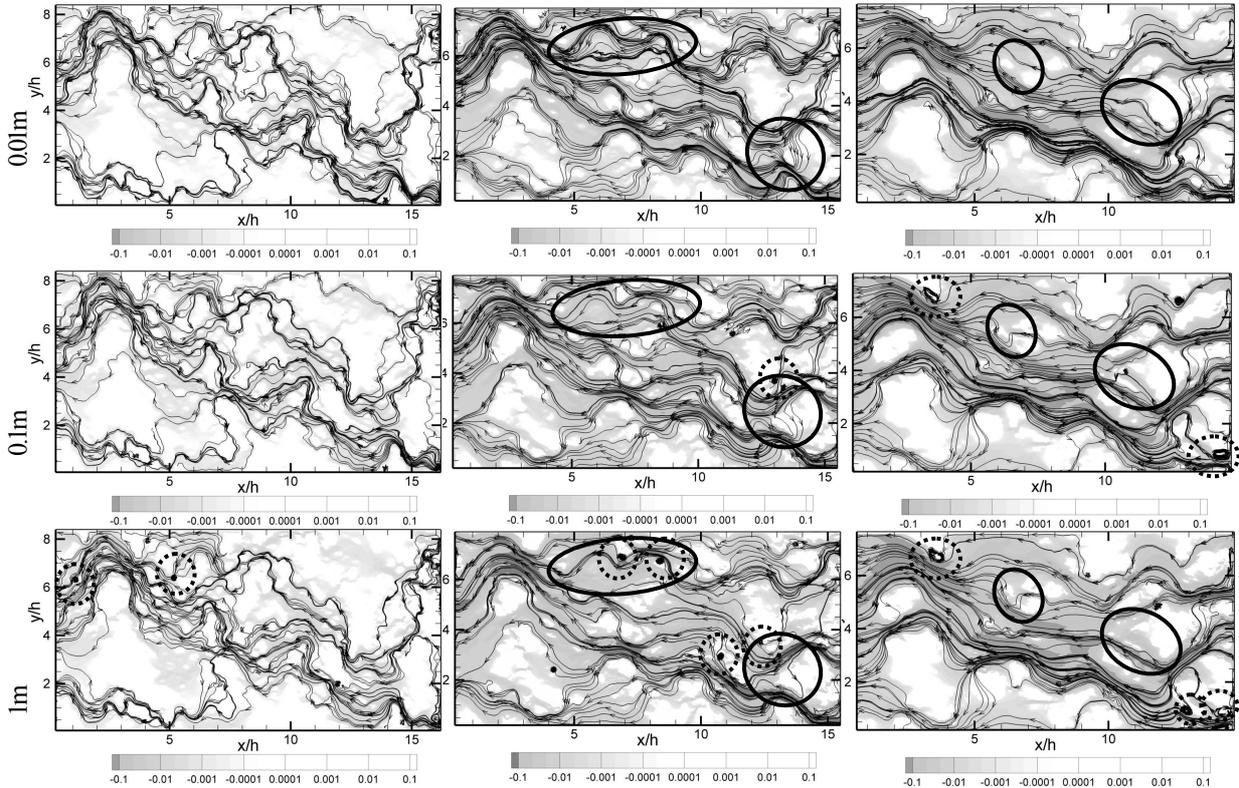


図5 各せん断変位における主方向平均流量 (m^2/sec) と流線分布. 左: せん断変位3mm. 中: せん断変位7mm. 右: せん断変位15mm. 上段から, それぞれ水頭差0.01m, 0.1m, 1.0mにおける解析結果.

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.

図4に各せん断変位において計算した下流端での透水流量を動水勾配ごとにまとめた. 局所平行平板モデルにおいては流速が局所的に動水勾配に比例するため, 全体としても透水流量はほとんど動水勾配に比例し, 水頭差が10, 100倍になれば透水流量も10, 100倍となるが, 3次元モデルにおいては, 本図より, 局所平行平板モデルのような動水勾配と透水流量の比例関係にはなっておらず, 特に, 高動水勾配下において, 比例関係からの逸脱は顕著である. このことは, 高動水勾配下で流速が速

くなり, 不連続面開口幅が急拡大・縮小する部分で大きな水頭ロスが生じているためであると考えられる. 一方, せん断変位が1mm (図4a参照) では, 3次元モデルにおいても透水流量は動水勾配にほぼ比例していることが分かる. これは, せん断変位が1mmでは流れが非常に遅く, レイノルズ数が十分に小さいことに起因していると考えられる. 図5に各せん断変位ごと (せん断変位: 3mm, 7mm, 15mm) に, 動水勾配を変化させて (水頭: 0.01m, 0.1m, 1m) 3次元のナビエ・ストークス方程式で計算した, 主方向平均流量と流線分布を示す. せん断に伴って接触領域が減少し, 接触領域の局在化が生じると, 不連続面の流体の流れは, 接触領域を避けるように

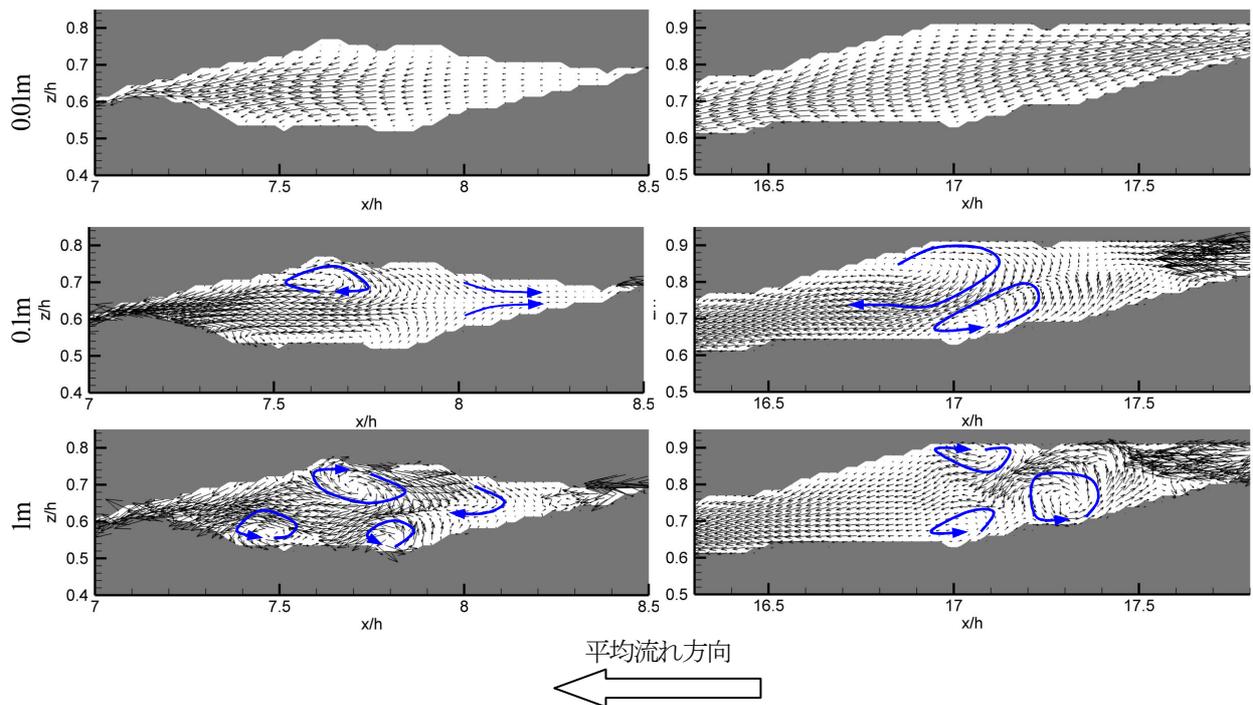


図-6 セン断変位7mmでの xz 平面内における流速分布. 上段から、それぞれ水頭差0.01m, 0.1m, 1.0m.

屈曲した流れとなり、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、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（図-5での点線円内）。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。また、動水勾配の増大に伴い、流れの渦が生じている箇所の増加や、新たな流路の形成（図-5での実線円内）といった現象が確認できた。また、図-6に3次元解析により得られたある開口幅方向（ z 方向）の断面における流速分布を示す（図中の灰色部は岩盤基質部）。本図より、開口幅方向の流速分布は低動水勾配下においては、流路が急拡大・縮小する場所においても、局所平行平板モデルでモデル化で仮定している放物線に近い形をしている。一方、動水勾配が大きくなるにつれ（水頭差が0.1mですでに）流路が急拡大・縮小する場所では、開口幅方向の放物線型の流速分布は崩れ、渦（時には逆流）が生じている。この高動水勾配下で生じる流れの乱れ（渦）は、大きな水頭ロスを生じさせ、全体として透水流量の低下が起こる（図-4参照）。

低動水勾配下においては両解析手法により計算された流速場およびせん断に伴うその変化はよく一致しているが、高動水勾配下では、両手法で計算された流速場に顕著な差異がみられた。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、開口幅方向に流速の放物線分布を仮定しているため、高動水勾配下では、流れの渦が透水流量を実験値よりも過大評価してしまう原因となっていると考えられる。

以上、数値解析により得られた結果より、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岩盤不連続面内に注入する際、図-6でみられたような乱流領域では、セメント粒子の堆積¹⁹⁾などが生じ、グラウト注入実績に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

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、各せん断変位において動水勾配を変化させ、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）により計算した。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）について、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、高動水勾配下で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。この差異はこれまで行われてきたせん断一透水同時試験の試験条件（すなわち試験で与える動水勾配）および局所平行平板モデルを用いた数値解析における問題点を示唆している。

6. 謝辞

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。三次元数値解析は、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。

7. 参考文献

- 1) Zimmerman R.W., Bodvarsson G.S.: Hydraulic conductivity of rock fractures, *Transp Porous Media*, vol. 23, p. 1-30(1996).
- 2) Brown S. R., Stockman H. W., Reeves S. J.: Applicability of the Reynolds equation for modeling fluid flow between rough surfaces, *Geophys Res Lett*, vol. 22 no. 18, p. 2537-3540(1995).
- 3) Mourzenko V. V., Thovert J. F., Adler P. M.: Permeability of a single fracture: Validity of the Reynolds equation, *J Phys II France*, vol. 5, p. 465-482 (1995).
- 4) Brush D. J., Thomson N. R.: Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes and Local cubic law simulations, *Water Resour Res*, vol. 39 no. 4, p. 1085(2003), doi:10.1029/2002WR001346.
- 5) Jiang Y., Koyama T., Li B., Tasaku Y., Saho R. and Tanabashi Y.: Numerical modelling of fluid flow in single rock fracture during shear with special algorithm for contact areas, *Journal of MMLI*, vol. 124, p. 129-136 (2008).
- 6) Kawamura F., Seki Y., Iwamoto K., Kawamura H.: DNS of heat transfer in turbulent and transitional channel flow obstructed by rectangular prisms, *Int. J Heat and Fluid Flow*, vol. 28, pp. 1291-1301(2007).
- 7) Peskin C. S.: Flow patterns around heart valves: A numerical method, *J Comp Phys*, vol. 10, p. 252-271(1972).
- 8) Fadlun E. A., Verzicco R, Orlandi P., Mohd-Yusofz J.: Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations, *J Comp Phys*, vol. 161, p. 35-60(2000).
- 9) Mohd-Yusof, J.: 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) Esaki T., Du S., Mitani Y., Ikusada K., Jing L.: Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, *Int. J Rock Mech Min Sci*, vol. 36, p. 642-650 (1999).
- 11) Zimmerman R. W., Chen D.W., Cook N.G.W.: The effect of contact area on the permeability of fractures, *J Hydrology*, vol. 139, p. 79-96(1992)
- 12) Koyama, T., Li, B., Jiang, Y., and Jing, L.: Numerical modeling of fluid flow tests in a rock fracture with a special algorithm for contact areas, *Computers and Geotechniques*, 36(1-2): 291-303 (2009).
- 13) 青木謙治, 水戸義忠, 張傳聖, 藤原崇行, 清水靖: 粒状体個別要素法を用いた動的注入におけるグラウト充填機構の検討, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 299-304, 2007.

NUMERICAL SIMULATION OF FLUID FLOW IN A ROCK FRACTURE UNDER DIFFERENT HYDRAULIC GRADIENT

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

The fluid flow in rock fractures during shearing processes is 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 with different hydraulic heads, three-dimensional Navier-Stokes (NS) and two-dimensional Reynolds (local cubic law) are solved numerically and simulation results are compared.