岩盤不連続面のせん断時における透水性および物質移行に関する研究

小山倫史[1, 2*]・Lanru Jing[2]・大西有三[1]

[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]Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden（Teknikringen 72, 100 44 Stockholm, Sweden）
*E-mail: koyama@kth.se

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計測データをもとに，せん断時における不連続面内の開口幅の変化を推定し，各せん断変位において流体の流れおよび物質移行のシミュレーションを行った．有限要素法により流れの支配方程式であるレイノルズ方程式を解き，物質移行のシミュレーションには，粒子追跡法を用いた．解析により得られた透水流量は実験で計測されたものと比較を行い，物質移行特性はブレイクスルーカーブ，ペクレ数などで評価した．せん断に伴う透水流量の変化は実験と解析とでよく一致し，せん断に伴う流体の流れおよび物質の移行経路の変化およびその異方性を捉えることができた．

Key Words : *Rock fractures, coupled shear-flow test, fluid flow, particle transport, finite element method(FEM), particle tracking method*

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分あるいは各種エネルギーの貯蔵施設に代表される，岩盤自体が有する剛性，密閉性，隔離性といった特徴を最大限に生かす岩盤構造物の設計，施工および維持管理のためには，岩盤の諸特性を精度良く把握することが必要である．花崗岩などの結晶質岩では，岩盤の力学および水理学的挙動は，内在する不連続面のそれらに大きく支配されるため，岩盤不連続面の力学・透水およびそれらの連成特性の適切かつ詳細な把握が重要である．

岩盤不連続面のせん断－透水同時試験に関しては，これまで数多くの事例[1)-7)]が報告されており，最近では，垂直剛性一定下で試験を実施した例[4)]，上部に透明な供試体を配置し，流れの可視化を試みた例[5)]，さらにはトレーサー試験を実施した例[6), 7)]などが挙げられる．しかし，せん断時の垂直変位（ダイレーション）および鉛直応力の変化に伴う，岩盤不連続面内の空隙分布および接触状況の変化が，流体の流れおよび物質移行特性に与える影響について，定量的に評価した事例はこれまで報告されていない．一方，不連続面内の流体の流れおよび物質移行の数値解析に関しても，数多くの解析例[8)]が報告されているが，せん断による接触領域の変化またそれに伴う流れの場の変化を物質移行のシミュレーションに反映させた解析はほとんど行われていない．

そこで，本研究では，長崎大学で実施した岩盤不連続面のせん断―透水同時試験より得られた計測データをもとに，不連続面内の開口幅の分布およびせん断時におけるその変化を推定し，各せん断変位において流体の流れおよび物質移行のシミュレーションを行い，物質移行特性についてブレイクスルーカーブ，ペクレ数などで定量的に評価を行った．

2. せん断－透水同時試験

(1) 供試体の作成および表面形状の計測

本研究では，図1に示すように，表面形状の異なる3種の天然岩盤不連続面を採取し，せん断－透水同時試験に用いる石膏供試体（配合比，石膏：水：遅延材＝1 : 0.2 : 0.005）の作成に用いた．石膏供試体のサイズは，長さ200mm×幅100mm×高さ100mmである．供試体の作成方法の詳細は文献[4)]に譲るが，ペアとなる片方の不連続面はもう片方のそれを型枠にして作成しているため，本研究で作成した石膏供試体は、初期状態（せん断前の状態）で上下の不連続面は非常によく噛み合っており，接

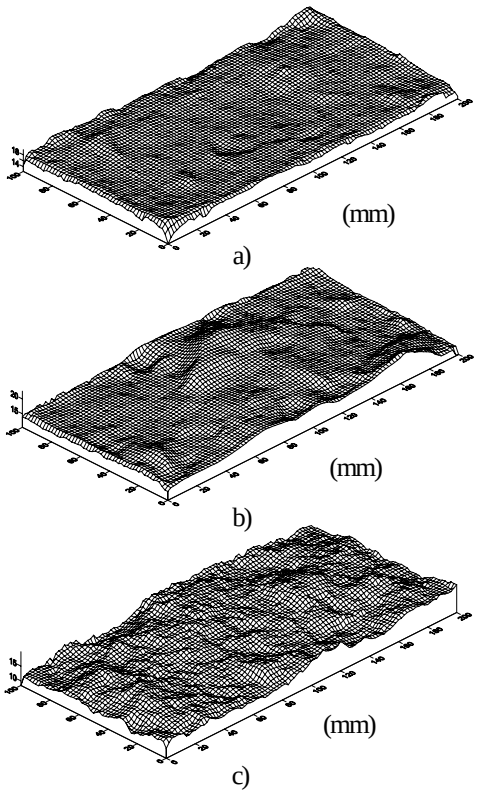

図-1 本研究で用いた 3 種の不連続面の表面形状，a) J1 (JRC=0-2)，b) J2 (JRC=12-14) および c) J3 (JRC=16-18)

触率（接触領域と供試体の面積比）はほぼ1である．表面形状は非接触型の3次元レーザー変位計システム（±20μmの鉛直方向の精度，±10μmの分解能）により，x, y両方向それぞれ0.2mm間隔で計測を行った[4]．

(2) せん断－透水同時試験

本研究では，長崎大学で新たに開発されたせん断－透水同時試験装置を用いて，3種類の不連続面供試体について1MPaの一定鉛直応力下でせん断－透水同時試験を実施した．試験装置の詳細は文献[4]に譲る．せん断変位は1mm間隔で最大18mmまで与え，各せん断変位において上・下流端の水頭差を0.1mとした定水位透水試験を実施した[4]．なお透水方向はせん断方向と平行である．また，不連続面の上下面のサイズが同じであるため，せん断中に透水長は短くなり，動水勾配は一定ではなく，わずかに大きくなる（0.5から0.55）．

(3) 不連続面の開口幅分布の計測

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良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，測定した供試体の表面幾何学形状，計測により得られた初期力学開口幅（せん断前のある一定応力作用下における力学的開口幅）およびせん断変位－垂直変位関係（ダイレイション曲線）を用いて以下に示す関係式[1]に基づいて，力学的開口幅，b_mを算定した．

$$b_m = b_0 - \Delta b_n + \Delta b_s \tag{1}$$

ここに，b_0，Δb_nおよびΔb_sはそれぞれ，初期力学的開口幅，せん断時の鉛直応力の変化に伴う力学的開口の変化（垂直応力一定下ではゼロ）およびせん断による力学的開口幅の変化（ダイレーション）である．初期力学的開口幅は，せん断試験前に実施した繰り返し鉛直載荷試験により得られた鉛直方向の応力－変位曲線を双曲線近似することにより得られる．

3. 流れおよび物質移行のシミュレーション

(1) 支配方程式

不連続面内の非圧縮性流体の定常の流れの支配方程式は，流速が遅く，不連続面の表面形状が比較的滑らかである場合，三乗則を適用し，次式のレイノルズ方程式で記述できる[9]．

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

ここに，ρ，μは流体の密度および粘性係数，bは不連続面の局所開口幅，gは重力加速度，hは全水頭である．本研究では，流体として純水を用い，水温 10°Cにおける密度および粘性係数の値はそれぞれ，ρ=9.997×10^{2}kg/m^3，μ=1.307×10^{3}Pa･sであり，重力加速度はg=9.807m^2/sである．

上記の支配方程式は有限要素法の汎用ソフトウェアであるCOMSOL Multiphysics[10]を用いて，次節に示す境界条件の下で解いた．各せん断変位において不連続面の開口幅分布は，式(1)を用いて推定し，不連続面の透水量係数（$T=\rho g b^3/12\mu$）は三乗則により要素ごとに局所的に決定した．

(2) 境界条件および接触領域の取り扱い

図2に示すように，不連続面の上・下流端に水頭差0.1mを与え，せん断方向に平行（図2a）あるいは垂直（図2b）な方向への一方向流を考慮した．なお，せん断方向に平行な流れは，室内で実施したせん断－透水同時試験と同じ条件である．供試体の止水が技術的に困難なため，せん断方向に垂直な流れを考慮したせん断－透水同時試験の成功例は，これまでほとんど報告されていない．

接触領域（開口幅がゼロの領域）は，解析領域から取り除き，接触領域内に流れが生じないようにするため，接触領域の周囲には境界条件，$(\nabla h)\cdot \mathbf{n} = 0$ を与えた[11]．ここに，$\mathbf{n}$は接触領域の境界の外向きの法線ベクトルで

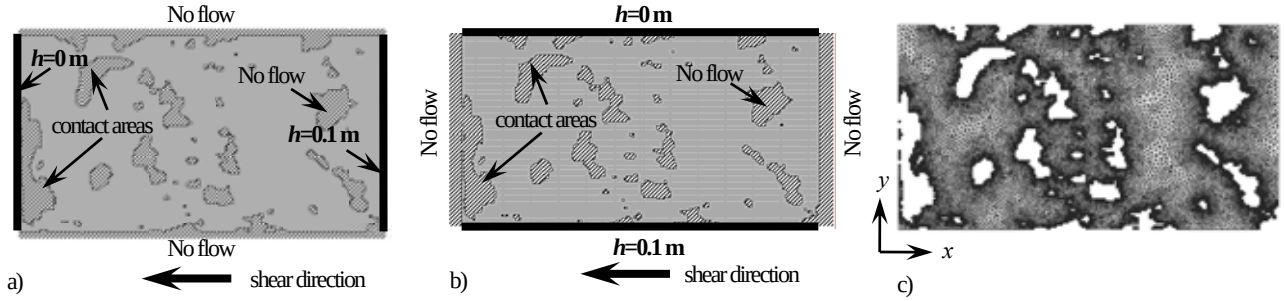

図-2 境界条件，および解析領域の有限要素分割図

ある．この操作により，人為的に微小な開口幅を接触領域に与えることなく，より現実的な数値解析モデルを作成した．

(3) 物質移行のシミュレーション

物質移行のシミュレーションでは，粒子が流線，すなわち各要素の流速ベクトルに沿って移動する粒子追跡法を用いた．この際，粒子の拡散および吸着，分解などによる遅延効果は考慮しないものとする．また，粒子は上流端に沿って1mm間隔に配置した注入口より注入し，注入する粒子の数は各注入口における流量により局所的に（粒子数が流量に比例するように）決定した．シミュレーションにより得られた粒子到達時間の推移（ブレイクスルーカーブ）により，物質移行特性は，次式で定義されるペクレ数[12]を用いて評価した．

$$Pe = 2\left(\frac{\bar{t}}{\sigma_t}\right)^2 \qquad (3)$$

ここに，$\bar{t}$ および σ_t はそれぞれ粒子到達時間の平均値および標準偏差である．

4．結果

(1) 実験および解析結果の比較

図3に数値シミュレーションの結果，すなわち透水量係数，流速ベクトルの分布およびせん断に伴うそれらの変化を示す．図中の白色の領域は接触領域を表す．本図より，いずれの場合もせん断初期の段階（せん断変位2mmまで）で接触領域は急激に減少し，局所化していく様子がわかる．流体は接触領域を迂回するように流れ，主要な流路は透水量係数の高い領域に限られる．この現象は「チャンネル効果」と呼ばれている[13]．

図4に実験および解析によって得られた透水流量の比較を示す．透水流量がゼロの場合（せん断変位1mmにお

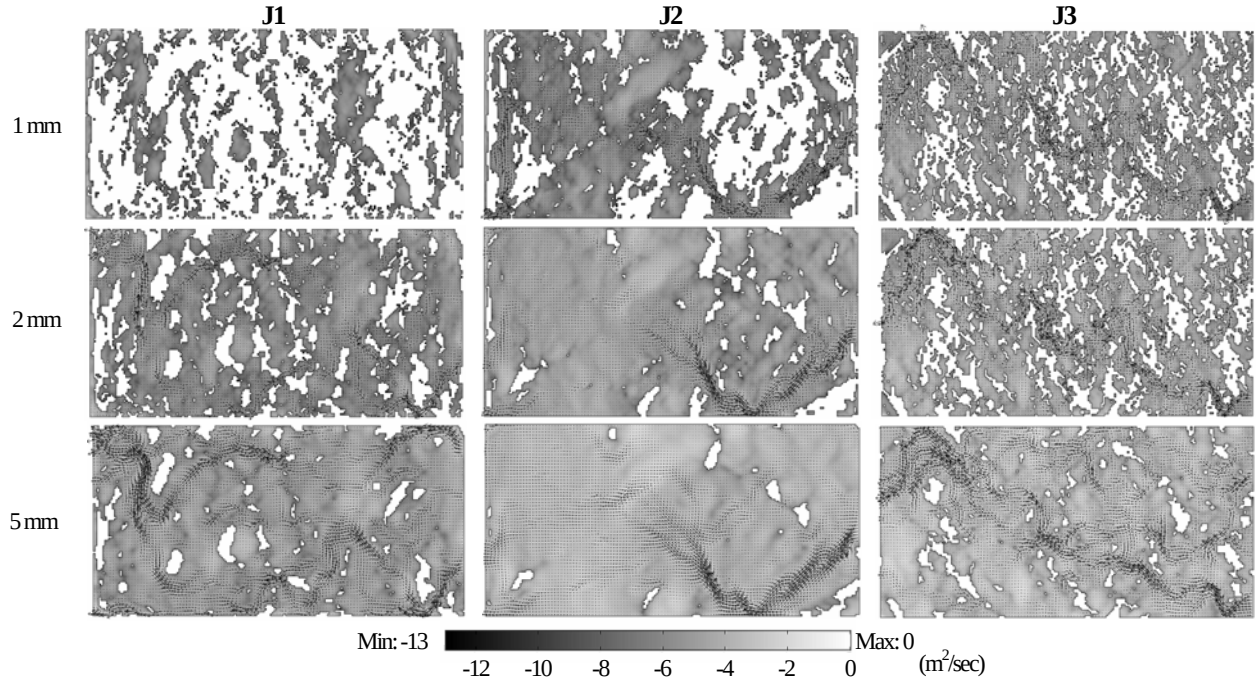

図-3 各せん断変位における透水量係数および流速ベクトルの分布（せん断方向に平行な流れ）

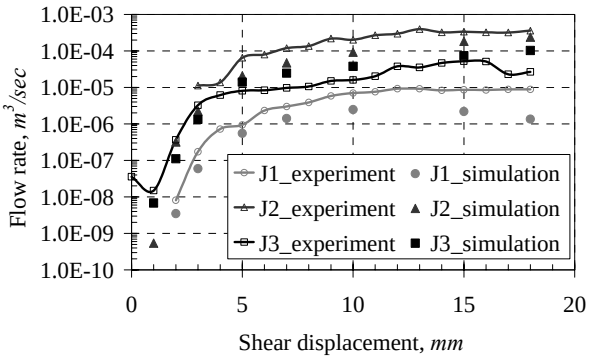

図-4 実験および数値解析より得られた透水流量の比較

ける供試体J1，J2の実験値および供試体J1の計算値，せん断変位2mmにおける供試体J2の実験値）は，対数軸を用いているためプロットされていないことに留意されたい．接触領域を適切に処理することにより，接触領域が流体の流れを完全に遮断するケース（例えば，せん断変位1mmにおける供試体J1）についても正確に表現することが可能である．透水流量はいずれのケースもせん断変位3mmまでに数オーダー急激に増加し，その後，増加の割合は小さくなる．せん断後の最終的な透水流量は供試体J2で最大で$10^{-4}m^3$/secよりも高い値を示し，次に供試体J3が10^{-5}～$10^{-4}m^3$/sec程度，滑らかで平らな表面を有する供試体J1は最も小さく，$10^{-5}m^3$/sec程度である．

また実験で計測された透水流量と数値解析により得られたものは，供試体J3ではよく一致しているが，供試体J2とJ1では相違（数値解析により得られた流量は実験で計測されたものより常に小さい）がみられる．この相違は主に以下に挙げる理由によるものと考えられる．すなわち， 1) 実験において，数値モデルで考慮していないせん断時の局所的なアスペリティの破壊・損傷，あるいは一様でないダイレーションが生じているの可能性，2) 数値解析と実験の初期状態（初期の噛み合わせの状態）が一致していない（特に表面形状が滑らかな場合）．これらは今後，計測の精度を上げ，数値解析モデルに反映することにより改善されると考える．

(2) せん断に伴う透水異方性のシミュレーション

図5にせん断方向に垂直な流れのシミュレーションの結果を示す．接触領域がよりせん断方向に垂直な方向に分布するため，せん断方向に垂直な流れは，平行な流れ（図3）と比較して，直線的で屈曲した流れにならない．

不連続面供試体の長さと幅が異なるため，数値解析により得られた流量は正規化（単位動水勾配，透水幅あたりの流量に換算）し，せん断方向に平行および垂直な流れについて比較を行った．比較の結果を図6に示す．正規化した流量はせん断方向に垂直な流れの方が平行な流れより常に数倍から1オーダー程度大きいことがわかる．これは，高透水量係数領域のチャンネルがよりせん断方向に垂直な方向に顕著に現れることによる．

(3) 物質移行のシミュレーション

供試体J1について，各せん断変位における粒子の移動経路を図7に，粒子の到達時間の推移（ブレイクスルー

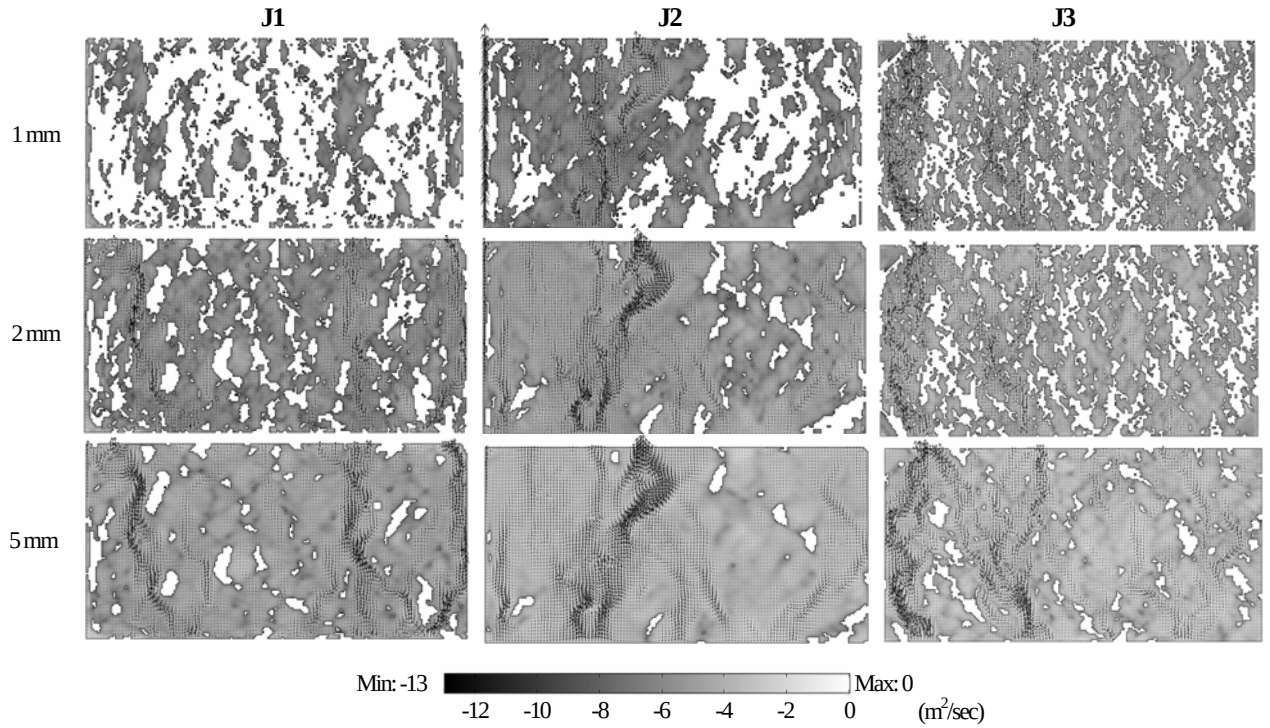

図-5 各せん断変位における透水量係数および流速ベクトルの分布（せん断方向に垂直な流れ）

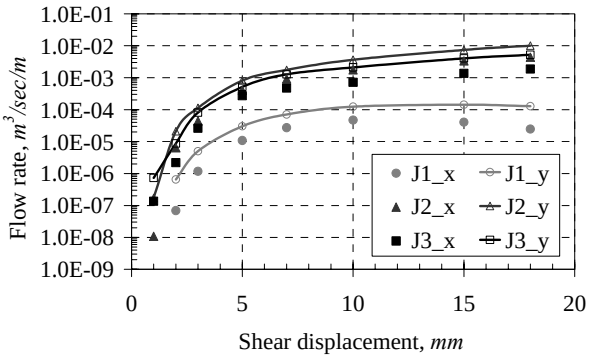

図-6 せん断に平行および垂直な流れについて正規化した流量の比較

カーブ）を図8に示す．粒子は接触領域を迂回するように移動し，せん断方向に平行な流れ（図7, 上）において，より屈曲した移動経路をたどる．粒子の到達時間は，せん断による透水性の増加に伴い減少し，特にせん断初期において，急激に減少する．また，注入した粒子のいくらかは流速の遅い領域，特に接触領域の周辺でトラップされ，トラップされる粒子の割合は，せん断変位が3mm以下のときに特に大きい．同様の現象は供試体J2，J3においても観察された．粒子のトラップは，有限要素分割をさらに細かくすることである程度は避けることが可能であると考えられるが，今後，粒子の拡散など，より複雑な物質移行のメカニズムを考慮したモデル（例えばランダム・ウォークなど）の導入により，トラップされる粒子をより適切に取り扱う必要があると考えられる．

全ての供試体について，各せん断変位における粒子の到達時間の平均値および標準偏差，さらに，式(3)を用いてペクレ数を算出し，図9にプロットした．ペクレ数はせん断に伴い減少し，流れがせん断方向に平行なときの方が垂直なときよりも常に大きな値をとる．このことは，せん断に伴う接触領域の局所化により，粒子の移行経路の違いによって生じる分散 (streamline/velocity dispersion) が大きくなり，また，流れがせん断方向に垂直なときに，この現象がより卓越することを示唆している．

5. まとめ

本研究より得られた知見を以下にまとめる．

- せん断に伴い不連続面の透水性は高くなり，特にせん断初期において数オーダー上昇する．
- せん断による透水性の増加に伴い，粒子の到達時間は短くなり，分散が卓越するようになる．
- せん断に伴う複雑な空隙の分布の変化は，不連続面

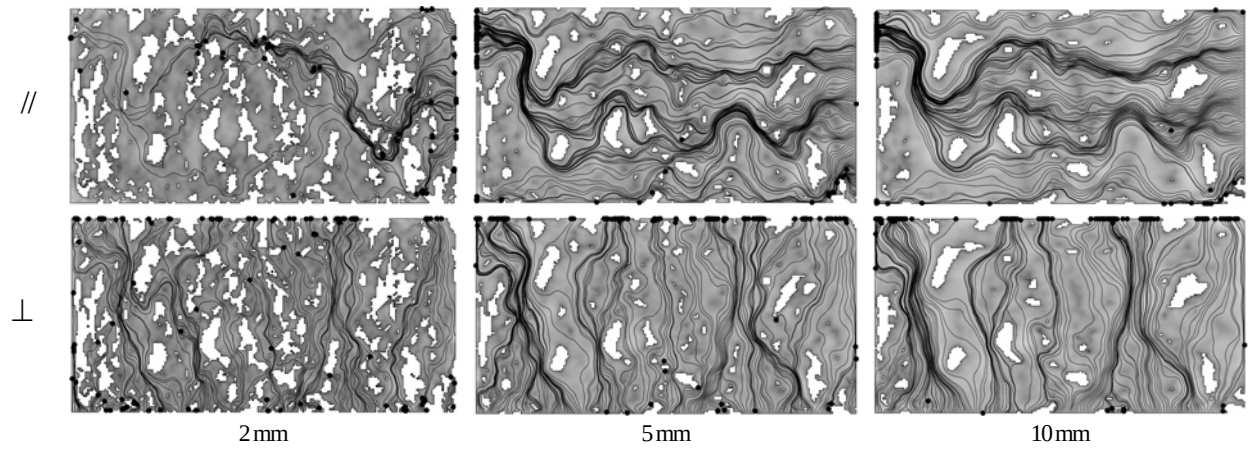

図-7 供試体 J1 における粒子の移動経路およびせん断に伴うその変化

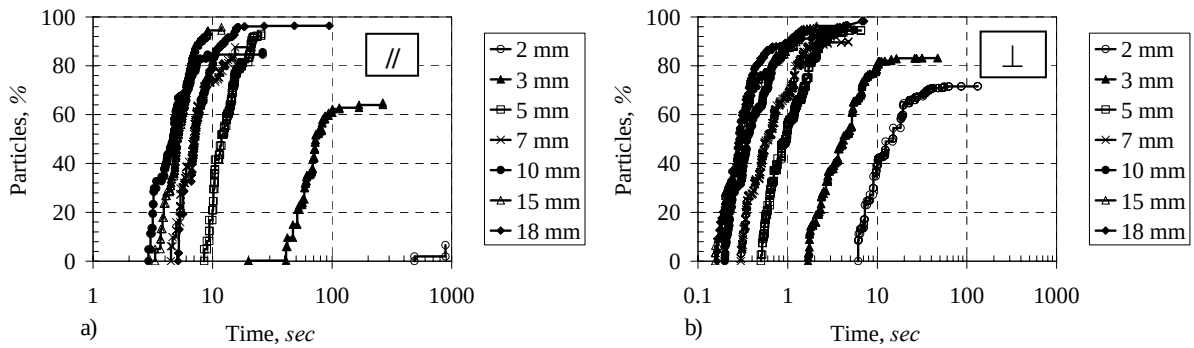

図-8 供試体 J1 における粒子の到達時間の推移（ブレイクスルーカーブ）およびせん断に伴うその変化

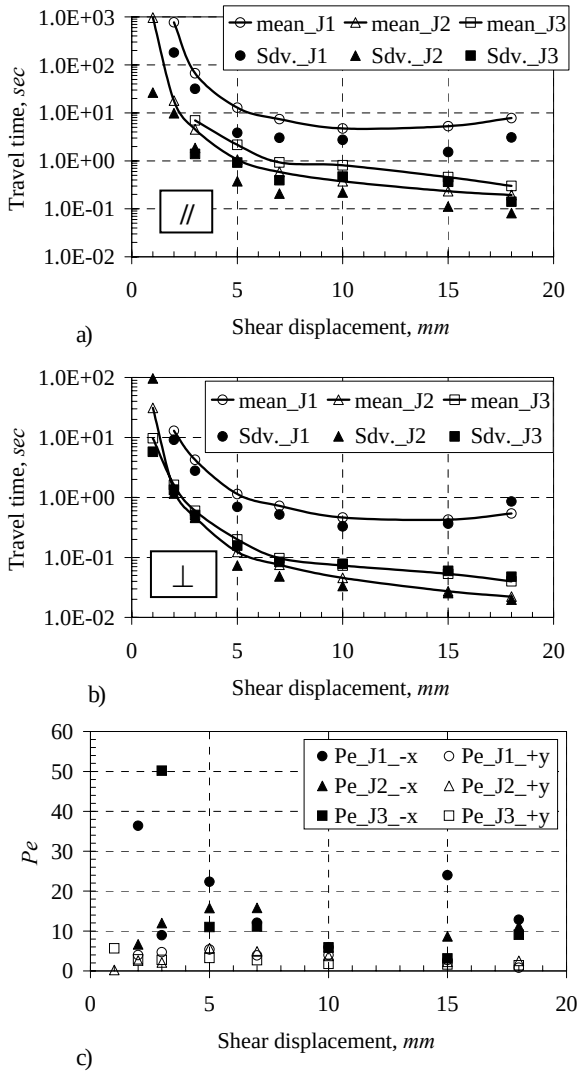

図-9 せん断に伴う粒子の到達時間の平均値，標準偏差およびペクレ数の変化

の透水性さらには物質移行特性に大きく影響を及ぼし，ともに顕著な異方性を示す.

- 接触領域の適切な取り扱いにより，不連続面内の接触領域を迂回する複雑な流体の流れ，また，せん断過程でのその変化を捉えることができた.

謝辞：本研究の遂行にあたり，長崎大学工学部社会開発工学科，蒋宇静准教授および李博君よりせん断一透水同時試験の実験データの提供など多大なる協力を得た．ここに謝意を表する.

参考文献

1) Esaki, T. et al.: Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36, pp 641-50, 1999.
2) Lee, H. S. and Cho, T. F.: Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load. *Rock Mech. Rock Eng.*, 35, pp 299-318, 2002.
3) Hans, J. and Boulon, M.: A new device for investigating the hydro-mechanical properties of rock joints. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 27, pp 513-548, 2003.
4) Li, B., et al.: Experimental study on hydro-mechanical behaviour of rock joints by using parallel-plates model containing contact area and artificial fractures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, doi:10.1016/j.ijrmms. 2007.06.004, 2007 (in press).
5) 矢野孝樹，李　博，佐保亮輔，棚橋由彦，蒋　宇静：流れの可視化技術による岩盤不連続面のせん断一透水同時特性の実験的評価．土木学会全国大会第 62 回年次学術講演会概要集，pp 583-584, 2007.
6) Plouraboue, F. et al.: Experimental study of the transport properties of rough self-affine fractures. *J. Contam. Hydrol.*, 46, pp 295-318, 2000.
7) Auradou, H. et al.: Permeaqbility anisotropy induced by the shear displacement of rough fracture walls. *Water Resour. Res.*, 41: W09423, doi: 10.1029/2005WR003938, 2005
8) Cheng, H., et al.: Hydrodynamic control of tracer retention in heterogeneous rock fractures. *Water Resour. Res.*, 39(5), 1130, doi: 10.1029/2002 WR001354, 2003.
9) Zimmerman, R. W. and Bodvarsson, G. S.: Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transp. Porous Media*, 23, pp 1-30, 1996.
10) COMSOL AB.: COMSOL Multiphysics Ver.3.3, Stockholm, 2006. H
11) Zimmerman, R. W. et al.: The effect of contact area on permeability of fractures. *J. Hydrology*, 139, pp79-96, 1992.
12) Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering. 3rd edn. Wiley, New York, 1999.
13) Tsang, Y. W. and Tsang, C. F. : Channels model of flow through fractured media. *Water Resource Res.*., 23(3), pp 467-479, 1987.

NUMERICAL MODELING FOR FLUID FLOW AND PARTICLE TRANSPOT IN ROCK FRACTURS DURING SHEAR

Tomofumi KOYAMA, Lanru JING, and Yuzo OHNISHI

The fluid flow and tracer transport in a single rock fracture during shearing processes has been an important issue in rock mechanics and is investigated in this paper using Finite Element Method (FEM) and streamline particle tracking method, considering evolutions of aperture and transmissivity with shear displacement histories under different normal stresses, based on laboratory tests. The simulation results agreed well with the flow rate data obtained from the laboratory tests, showing that complex histories of fracture aperture and tortuous flow channels with changing normal stresses and increasing shear displacements.