

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760690

研究課題名(和文) 流体移動の可視化と音響トモグラフィによる岩盤内水理物質移動特性評価の高度化

研究課題名(英文) Evaluation of fluid flow and transport processes in rock masses by using visualization technique and acoustic tomography

研究代表者

李 博(LI, Bo)

長崎大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80578427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)： 実岩盤亀裂の賦存状態を再現した境界条件における亀裂のせん断 - 透水・可視化同時特性試験を実施し、単一亀裂の力学・水理学連成特性を評価した。亀裂内の流れの数値解析を行い、亀裂の表面粗度と流れのレイノルズ数の影響を考慮した力学的開口幅と水理学的開口幅の関係式を提案した。複数の人工的割れ目を取り入れたガラス材を用いて、亀裂ネットワークモデルを試作し、着色したトレーサーによる室内透水試験を行い、亀裂の幾何学的分布特性とネットワークの透水特性との関係を調べた。実岩盤内の亀裂分布に基づいて亀裂ネットワークモデルを構築し、数値解析よりその水理・物質移行特性を評価した。

研究成果の概要(英文)： Coupled shear-flow and visualization tests were conducted on single rock fractures under boundary conditions reproduced from stress environment of actual rock masses, in order to estimate the hydro-mechanical characteristics of rock fractures. Prediction equations of the relation between mechanical aperture and hydraulic aperture taking into account the influences of surface roughness and Reynolds number were proposed based on numerical simulations on the fluid flow through rock fractures. Flow and tracer tests were conducted on models containing several intersecting fractures manufactured by glass plates to estimate the influence of geometrical distribution characteristics of fractures on the hydraulic behavior of fracture networks. Flow and mass transport properties of fracture networks were evaluated through numerical simulations on models with fracture distributions measured from real rock masses.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、地球・資源システム工学

キーワード：亀裂性岩盤 せん断 透水 物質移行 可視化

### 1. 研究開始当初の背景

放射性物質の一種である高レベル放射性廃棄物は、長年にわたり人間の生活環境から遠ざける必要があり、安定な地層中に処分する「地層処分」が最も有効な処分方法であることが、国際的に共通の認識となっている。処分場の人工バリアを構成する材料の特性のほか、天然バリアである不連続性岩盤の諸特性、特に力学 - 水理学連成特性を把握することは地層処分の安全評価において重要な課題である。

亀裂性岩盤の透水特性を評価する際に、単一亀裂を平行平板でモデル化し、三乗則を用いるのが一般的であったが、実際の亀裂内の空隙構造が複雑で、開口幅や接触領域が不均質に分布しているため、三乗則の予測と乖離する実験や解析結果が多く報告されている。一方、単一亀裂の表面特性や流れのレイノルズ数を考慮した亀裂ネットワークの水理・物質移行特性を総合的に評価する手法は未だ立てられていないのが現状であった。

### 2. 研究の目的

室内実験および数値解析を通じて、亀裂内の構造変化とチャンネル形成メカニズムを把握するとともに、亀裂表面の粗度および流れのレイノルズ数の影響を考慮した平行平板モデルの修正則を提案する。その修正則を亀裂ネットワークモデルに適用し、亀裂の分布特性および亀裂の表面粗度がモデルの水理・物質移行特性に与える影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

画像可視化計測システムを用いて、せん断過程における亀裂表面の接触状態の変化とチャンネル構造の形成メカニズムを観察評価する。実岩盤亀裂の賦存状態を再現した境界条件における亀裂のせん断 - 透水・可視化同時特性試験を実施し、単一亀裂の力学・水理学連成特性を定量的に評価する。複数の人工的割れ目を取り入れたガラス材を用いて、亀裂ネットワークモデルを試作し、着色したトレーサーによる室内透水試験を行い、亀裂の幾何学的分布特性とネットワークの透水特性との関係を調べる。音響透水トモグラフィを活用して計測された実岩盤内の亀裂分布に基づいて亀裂ネットワークモデルを構築し、数値解析よりその水理・物質移行特性を評価する。

### 4. 研究成果

室内せん断 - 透水・可視化試験および単一亀裂や亀裂ネットワークを流れる流体の数値解析を行った結果、以下のような知見が得られた。

(1) せん断過程における亀裂内部構造の変化および流れ場の分布特性の変化により、それぞれの特徴を持つ3つのステージに分けて評価することができる。図-1 にせん断過程にお

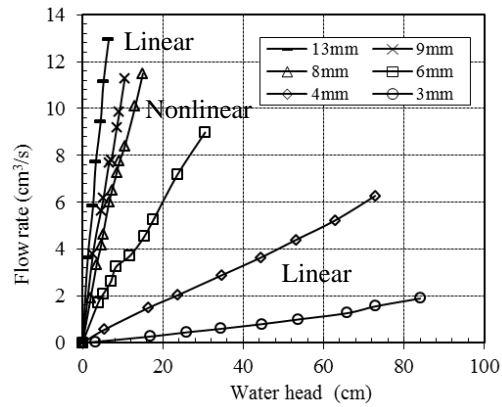
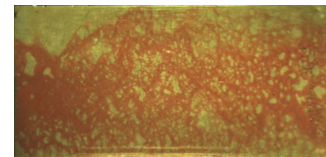
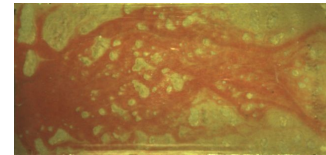


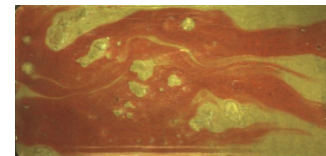
図-1 せん断 - 透水試験から得られた流速と水頭差の関係の一例



(a) 2 mm



(b) 6 mm

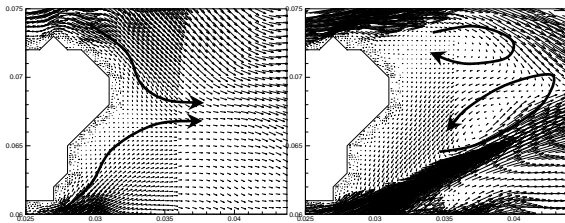


(c) 13 mm

図-2 可視化システムにより撮影した異なるせん断変位における流れ画像

ける水頭差と流量の関係の一例を、図-2 に可視化システムにより撮影した流れ画像の一例を示す。ステージ 1 (例えばせん断変位 0~4mm) では、接触率が大きいいため流路の形成が限られ、流れが存在しない、もしくは僅かな流体が微小な隙間の中を屈曲しながら流れる。流量と水頭差の関係は線形から非線形へ遷移しやすい状態である。しかし、この段階では流速が遅くてレイノルズ数も非常に小さいため、今回の実験では流量と水頭差との間は線形関係を保つことができた。つぎに、ステージ 2 (例えば 4~8mm) は主な流路が形成し始める段階であり、供試体のダイレーションが顕著に発生し、開口幅の増加に伴い流量が急増する。水頭差 (レイノルズ数) が大きい場合では流量と水頭差の関係が線形から外れていく。ステージ 3 (例えば 8mm~) では図-2 に示すように、点在していた接触領域が集中し、これまで複雑だった流路が次第に単純化することになり、流量と水頭差の関係は徐々に線形に戻るようになる。

(2) 図-3 に亀裂内接触領域の右端を拡大した



(a) Re=0.07 (b) Re=97.9  
 図-3 接触領域付近の流速ベクトル分布図

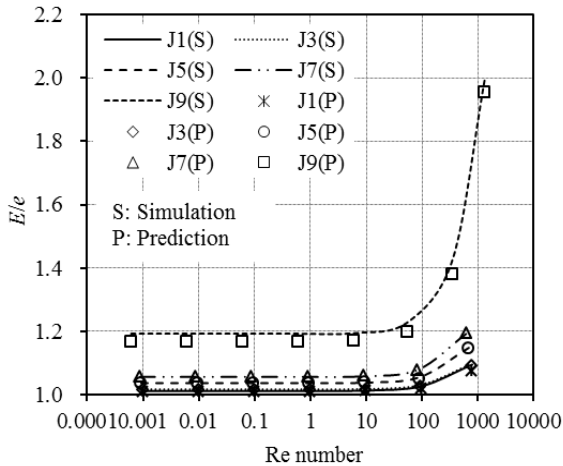


図-4 異なる表面粗度を有する亀裂における  $E/e$  とレイノルズ数との関係。J1 から J9 に向けて亀裂の表面が粗くなっていく

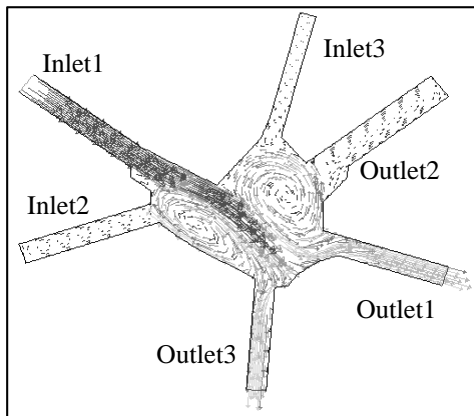


図-5 レイノルズ数が高い場合に、亀裂交差部で発生する流れの屈曲および渦の形成

数値解析による流速ベクトル分布を示す。レイノルズ数が小さい場合 ( $Re=0.07$ ) は、流速ベクトルが上流側から下流側に向っており、せん断方向に反する流速ベクトル(逆流)がほとんど存在しなかった。それに対し、レイノルズ数が高い ( $Re=97.9$ ) 場合は、せん断方向に反する流速ベクトルが現れ、接触領域の先端で渦の発生が確認された。このように高レイノルズ数で流れの速度や方向が急激に変わる箇所で生じる流れの乱れは、大きな水頭ロスを生じさせ、結果的に計測された流量は 3 乗則の評価値より小さくなる。

(3) 亀裂の表面が粗いほど、またレイノルズ数が 1 を超えた量が大きいほど、流線の屈曲度が増え、渦の形成のような慣性効果による

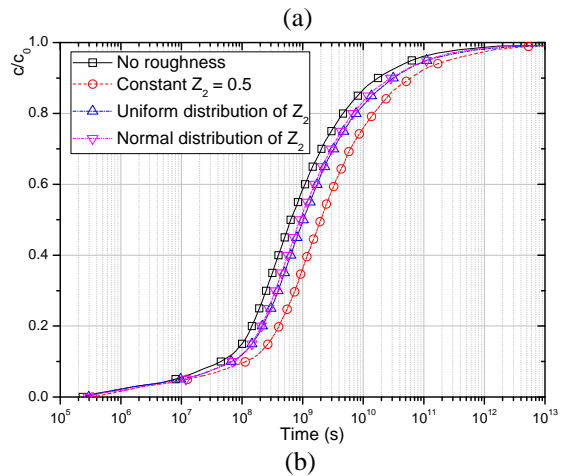
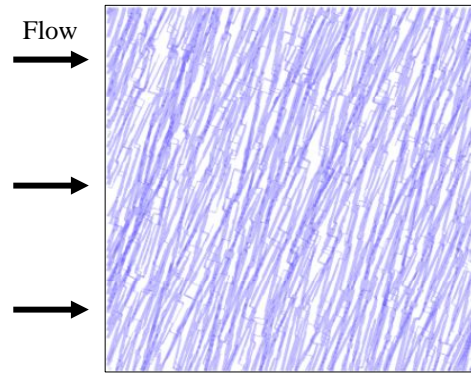


図-6 (a)亀裂ネットワーク中の流速分布図; (b)亀裂の表面粗度( $Z_2$ )を考慮しないと考慮する場合におけるネットワーク内の物質濃度と時間との関係図

現象もより多く発生し、結果として亀裂の透水係数が減り、力学的開口幅  $E$  と水理学的開口幅  $e$  の差が大きくなる(図-4)。レイノルズ数が 1 より小さい場合における力学的開口幅と水理学的開口幅の差はすべて亀裂の表面粗度に起因するものである。レイノルズ数が増加して 1 を超えると、慣性効果が益々顕著となり、力学的開口幅と水理学的開口幅の差はさらに拡大していく。力学的開口幅と水理学的開口幅の関係は粗さを表す指標の一つである  $Z_2$  を用いて、以下の式より表すことができる。

$$E/e = 1 + Z_2^{2.25} \quad Re < 1 \quad (1a)$$

$$E/e = 1 + Z_2^{2.25} + (Re-1) \times (0.00006 + 0.004 \times Z_2^{2.25}) \quad Re \geq 1 \quad (1b)$$

この式による予測値と解析値との比較は図-4 に示す。

(4) レイノルズ数が高い場合に(例えば 10 より大きい) 単一亀裂内のみならず、亀裂ネットワーク内に存在する亀裂の交差部でも渦の形成のような流体の慣性効果による現象が発生し(図-5) ネットワーク全体の水理・物質移行特性を大きく影響する。その影響の大きさは交差部をつながる各亀裂の開口幅や交差部の形状などの要素に関係して

いる。

(5) 亀裂表面の粗度を考慮するケースと考慮しないケースとの比較により、亀裂ネットワークモデル内における主な流れ場の分布パターンが表面粗度にほとんど影響されないが、透水係数や物質の滞留時間が粗度と関係していることがわかった(図-6)。亀裂性岩盤の透水・物質移行特性は主に亀裂の幾何学的分布特性、亀裂交差部の特性、流れのレイノルズ数および構成要素である単一亀裂の開口幅や表面粗度などの特性に影響されることが明らかになった。これらのすべての要素と亀裂性岩盤の水理・物質移行特性との関係式を見出し、統括的な評価モデルを構築していくことが将来の重要な研究課題である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Zhao Z., Li B. and Jiang Y. Effects of fracture surface roughness on macroscopic fluid flow and solute transport in fracture networks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 査読有, 2014, DOI:10.1007/s00603-013-0497-1. (In press)

Wang G., Huang N., Jiang Y., Li B., Wu X. and Zhang X. A new stochastic strength model of rough rock joint surfaces and its application. Rock and Soil Mechanics, 査読有, Vol.35, No.2, 2014, pp.497-503.

Wang G., Huang N., Jiang Y., Li B., Wu X. and Zhang X. Research on seepage calculation model of single rough joint considering fractal characteristic. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 査読有, 2014. (In press)

李博、蒋宇静. JRC 値とレイノルズ数の影響を考慮した岩盤亀裂内における流動機構の定式化. Journal of MMIJ, 査読有, Vol.129, 2013, pp.479-484.

〔学会発表〕(計 4 件)

Wang X., Jiang Y., Li B., Liu R. Numerical study of directional permeability of fractured rock masses using two-dimensional discrete element method. 48th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, Minneapolis, USA, 4<sup>th</sup> June 2014, No.14-7353.

Liu R., Jiang Y., Li B., Wang X. and Huang H. Experimental and numerical study of fracture aperture estimation and characteristics of non-linear fluid flow through artificial fracture intersections. The 2014 ISRM European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2014), Vigo, Spain, 28<sup>th</sup> May 2014, pp.393-398.

Jing L., Koyama T., Zhao Z. and Li B. Stress and shear effects on fluid flow and

solute transport in rock fractures (Keynote lecture). 3rd ISRM Symposium on Rock Mechanics, Shanghai, China, 19<sup>th</sup> June 2013, pp.33-44.

Liu R., Jiang Y., Li B. and Gao Y. Numerical study of hydraulic properties of rock masses using stochastic discrete fracture network model. 12th Joint Symposium of Jeju National University and Nagasaki University on Science and Technology, Jeju, Korea, 5<sup>th</sup> June 2013, pp. 86-89.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

李 博 (LI, Bo)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号: 8 0 5 7 8 4 2 7