

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03506

研究課題名(和文) 流体移動過程の可視化を活用した岩盤内三次元き裂ネットワーク水理物質移動特性の評価

研究課題名(英文) Hydraulic transfer characteristics of 3D crack network in rocks by utilizing visualization of fluid transfer process

研究代表者

蒋 宇静 (JIANG, Yujing)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：50253498

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：き裂性岩盤内の貯留層の設計や施工においては、密閉性を確保し、貯留される液体やガスの流失経路を遮断することが重要である一方、岩盤構造体としての密閉性は、岩盤内に必然に存在するき裂ネットワークに大きく依存する。本研究では、岩盤不連続面の三次元ネットワークの複雑な分布特性と非線形的流動機構を解明するために、室内透水実験に基づき汎用性のある三次元ネットワーク浸透流解析モデルを開発した。また、岩盤き裂ネットワークを構成する個々のき裂の開口幅の分布が岩盤内の流れに及ぼす影響と優先流路の形成メカニズムを明らかにするとともに、き裂の幾何学的分布特性とスケール効果についても詳細に考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

き裂性岩盤内の貯留層や高レベル放射性廃棄物地層処分施設の設計と施工においては、密閉性を確保し、貯留される油やガスの流失、または放射性核種の拡散経路を遮断することが重要であり、岩盤構造体としての密閉性は、岩盤内に必然的に存在し分布が複雑なき裂ネットワークに大きく依存する。本研究は岩盤不連続面の三次元ネットワークの複雑な分布特性と非線形的流動機構を解明するために汎用性のある数値解析モデルと室内実験手法を確立したものであるため、き裂性岩盤の透水係数など水理学的特性の解明において大きく寄与するとともに、高レベル放射性廃棄物地層処分や地下備蓄施設などの設計と安全性評価においても大いに参考となる。

研究成果の概要(英文)：Fracture networks play a more significant role in conducting fluid flow and solute transport in fractured rock masses, comparing with that of the rock matrix. Accurate estimation of the permeability of fracture networks would help researchers and engineers better assess the performance of projects associated with fluid flow in fractured rock masses. In this study, in order to evaluate the complex distribution characteristics and nonlinear flow mechanism of the three-dimensional network of fractured rock masses, a three-dimensional network flow model was developed based on the laboratory permeability experiments. In addition to clarifying the influence of the aperture distribution of individual cracks on the flow and the formation mechanism of the preferential channel, the geometric distribution characteristics of the cracks and the scale effect have also been investigated in detail.

研究分野：岩盤工学

キーワード：単一き裂 き裂ネットワークモデル 透水試験 き裂の空間分布特性 水理物質移行特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震に起因した福島第一原子力発電所の事故では、多量の放射性物質が外部に漏れていた。その後、一部の地域の地層においても放射性物質が検出され、核種が地下水の流れとともに移行し、き裂性岩盤で構成する深部地層へ到達した可能性が示唆された。核種の移行速度、到達範囲などを正しく評価するためには、核種移行の経路となる岩盤き裂ネットワークの水理物質移行特性を理解することが重要である。また、原子力発電により発生する高レベル放射性廃棄物は、長期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。一方、地熱・油ガス貯留層の開発といった資源工学分野においても地下資源の開発効果を向上させるために、本研究の対象である岩盤内三次元き裂ネットワークの水理物質移行特性の理解と評価が必要不可欠である。

岩盤中のき裂の透水特性を評価する際に、単一き裂(図-1(A))に対し平行平板モデルを適用し、三乗則を用いるのが一般的である。単一き裂のせん断-透水同時試験により、き裂表面のラフネスが透水性に与える影響が次第に解明されるにつれ、き裂の表面摩擦効果を考慮した修正三乗則が示されるとともに、不連続面の接触などによるチャンネル構造の形成と流れの非線形性を考慮すべきことが指摘され、いくつかの研究報告が出された。一方、岩盤内のき裂分布は、平面的にも空間的にもランダム性を有し、そのモデル化がかなり複雑なものであるため、二次元き裂分布モデル(図-1(B))が主に用いられている。しかし、前述のような、き裂の間隙構造や交差部(図-2)による流れの非線形的挙動は十分に解明されたとは言えず、三次元き裂ネットワークの流れの非線形性の評価は、未踏な領域といっても過言ではない。

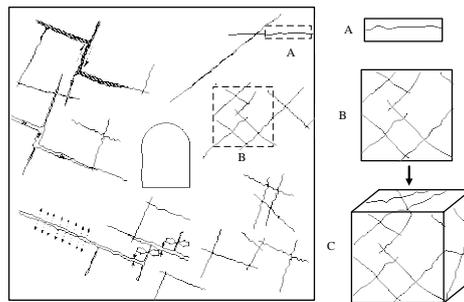


図-1 岩盤内き裂のモデル化：(A)単一き裂；(B)二次元き裂分布モデル；(C)三次元ネットワーク分布モデル

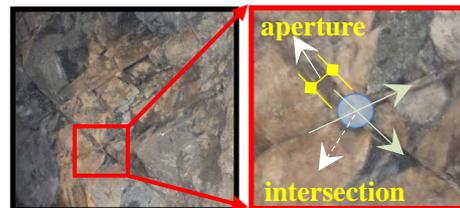


図-2 実岩盤内のき裂の開口と交差

2. 研究の目的

地下水の移行経路にあたる岩盤内き裂ネットワークの水理物質移動特性は、地層中における核種移行特性や地熱・油ガス貯留層の開発効果の予測評価において重要な要素である。実際の岩盤き裂の間隙構造と分布形態は複雑であり、それらが岩盤の水理物質移動特性に与える影響を反映した評価手法はまだ確立されていないのが現状である。本研究は、き裂ネットワークの分布モデルとその中の流れを可視化する手法を提案し、先端微流体技術を用いた蛍光トレーサー試験(二次元)、室内x線CT可視化透水試験(三次元)により、き裂内の非線形的流れの挙動を考察し、それに基づいた提案モデルを組込んだ数値解析を実施することにより、き裂の間隙構造と空間分布特徴を反映した岩盤内三次元き裂ネットワーク水理物質移行特性を定量的に評価する。

3. 研究の方法

き裂性岩盤の水理物質移行特性を解明するために、室内実験と数値解析手法を併用して研究を進めた。まずは、き裂ネットワークにおける交差部をつなげる各き裂の開口幅や交差部の形状の影響を、独自に開発した流れの可視化システムにより詳細に考察し、き裂ネットワーク内の水理・物質移動挙動を微小な時間間隔において把握する。つぎに、DFN(Discrete Fracture Network)法におけるき裂の長さを変化させてスケール効果を数値解析的に明らかにするとともに、これまで構築してきた単一き裂の連成特性モデルおよびき裂表面ラフネスと透水係数の関係式を、三次元き裂ネットワークモデルに取り入れて、き裂の間隙構造と空間分布特性を考慮したき裂性岩盤のマルチスケール水理物質移行特性評価モデルを提案し、その有用性の検証を行う。

4. 研究成果

本研究の遂行によって得られた成果には、岩盤き裂ネットワークの流れの可視化システムとき裂中の流れの制御システムの設計、き裂ネットワークモデルの構築と水理物質移行機構の解明及びき裂ネットワークにおける水理物質移行特性評価モデルの構築が含まれる。

(1) 岩盤き裂ネットワークの流れの可視化システム

様々な表面形状と空間分布の三次元岩盤き裂ネットワークをモデル化し、アクリル板または高強度ガラス板を使って、設計載荷経路に従い面内に圧縮載荷することにより、様々な開口幅と交差角を有するき裂を発生させることに成功した。次に、所定の垂直応力を加えながら、流れに多数の粒子マーカーを注入して流れを可視化し、粒子の運動が局所の流体運動と同一であることを仮定して、流体速度を計測したところ、表面ラフネスと交差部が流れの非線形的挙動に与えるミクロ的影響を詳細に観察・記録・評価することができた。

(2) シリンジポンプを用いたき裂中の流れの制御システム

岩盤き裂中の流体の流速と圧力を精度よく制御するために、シリンジポンプと CCD カメラによる流れの制御計測システムを設計した (図-3)。シリンジポンプの精度は、流量 0.001mL/min, 圧力 0.01kPa であるので、高精度な透水試験が実現でき、特に、き裂ネットワークモデルの供給側と出水側との水頭差を差圧計で計測することにより、き裂ネットワークを流れている流量を正確かつリアルタイムに把握することを可能にした。

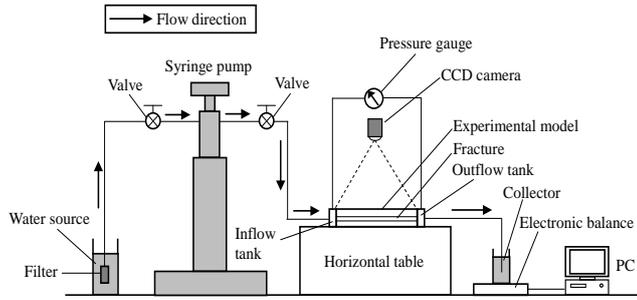


図-3 シリンジポンプを用いた流れの制御計測システム

(3) き裂ネットワークモデルの構築と水理物質移行機構

き裂ネットワークモデルを構築するために、き裂の空間的分布の異方性とスケール効果について DFN (Discrete Fracture Network) 法におけるき裂の長さや角度を変化させてスケール効果を数値解析的に明らかにした (図-4)。

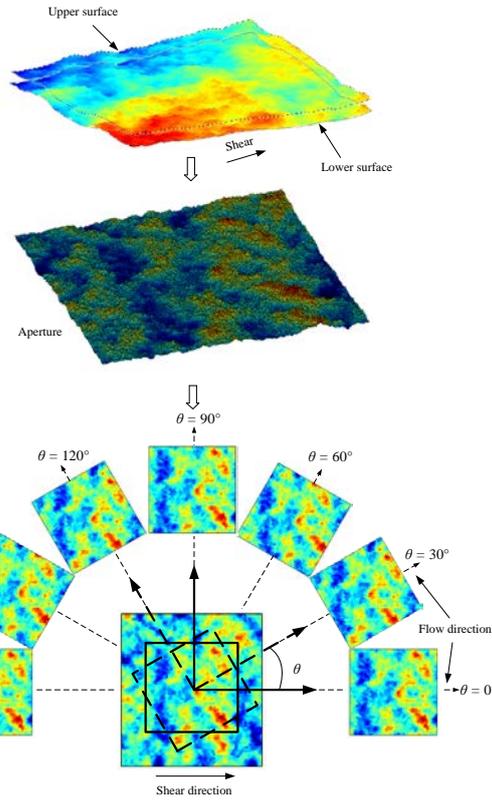


図-4 き裂表面形状のモデル化と方位角による異方性

次に、垂直応力一定下で実施した岩盤不連続面のせん断透水試験の結果をもとに再現解析を行い、表面ラフネスと透水係数との関係式を提案し、平行平板モデルによって定常流れである岩盤不連続面内の浸透特性を解析した。その結果、単一岩盤不連続面の透水性が主にランダム性を有するき裂の表面ラフネスと開口幅に支配されることを明らかにするとともに、それらの影響度合いの評価式を提案した。また、岩盤き裂ネットワークの透水性と表面ラフネスとの関係を表す関係式も示し、せん断透水実験結果との比較を行い、両者の一致を確認した。

また、岩盤内の交差き裂内の流体の流れとせん断に伴う変化を数値シミュレーションにより調べるために、交差き裂モデルを構築し、レイノルズ方程式を解き、交差き裂内の幾何学的分布特性と流動機構との相関を詳細に調べた。また、交差き裂の透水性と幾何学的パラメータ (き裂の開口幅、表面ラフネス、せん断変位) との関係について詳細に考察し、き裂の表面ラフネスとせん断変位が交差き裂の透水係数に及ぼす影響を定量的に評価することができた。

(4) き裂ネットワークにおける水理物質移行特性評価モデルの高度化

空間的に分布するき裂ネットワークを有する岩盤内の非線形流動特性を解明するために、確率論的に離散化したき裂ネットワークモデルの生成方法を示し、汎用性のある三次元ネットワーク浸透流解析モデルを開発した。図-5-図-7 は試算した解析結果の一部であり、き裂の交差部で発生する流れの屈曲や渦の形成などの非線形的挙動を表している。

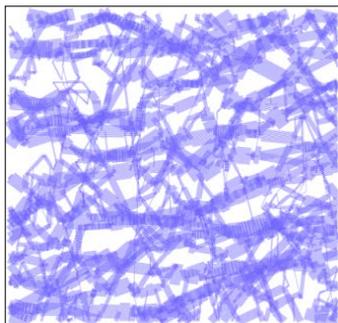


図-5 試算した二次元き裂ネットワーク中の流れ場

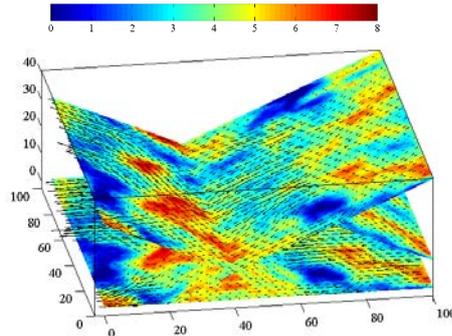


図-6 試算した三次元き裂ネットワーク中の間隙幅の分布

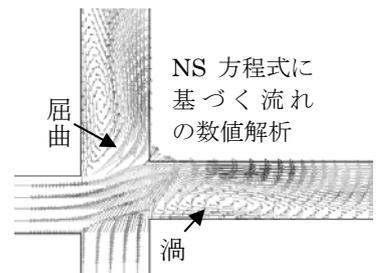


図-7 き裂の交差部で発生する流れの屈曲と渦の形成

空間的に分布するき裂ネットワークを有する岩盤内の非線形流動特性を解明するために、確率論的に離散化したき裂ネットワークモデルの生成方法を示し、汎用性のある三次元ネットワーク浸透流解析モデルを開発した。図-8 は三次元き裂ネットワーク形成におけるき裂の長さによる影響を示しているが、き裂の長さ（サイズ a ）によって空間的分布密度と連結が大きく変わり、流れチャンネルも異なってくるので、その結果、ネットワーク全体の透水係数がサイズ a によって指数的に低下していくことが分かる（図-9）。

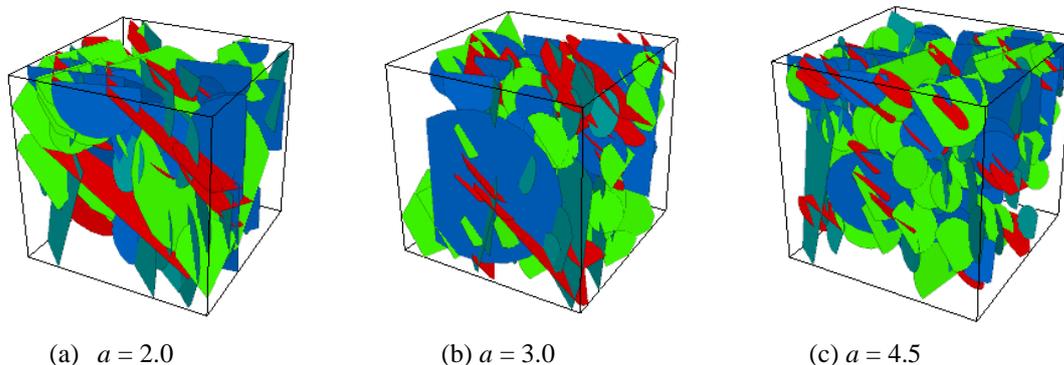


図-8 三次元き裂ネットワーク形成におけるき裂の長さの影響

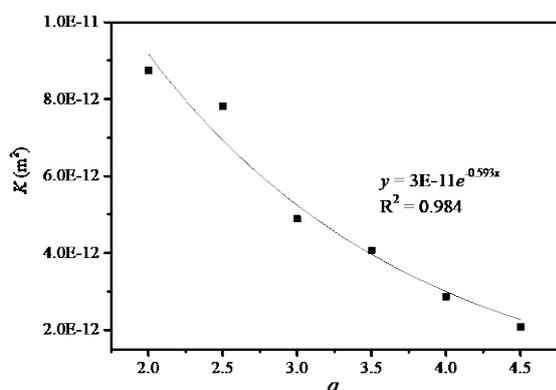


図-9 き裂長さと透水係数との関係

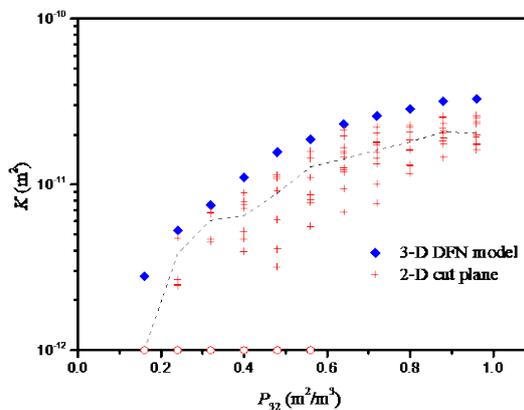


図-10 2D と 3D モデルによる透水係数の比較

本研究によって確立したき裂ネットワーク浸透流解析プログラムを活用することにより、き裂の幾何学的特性がき裂ネットワークの透水係数に及ぼす影響について詳細な考察を行い、岩盤き裂の幾何学的パラメータと透水係数との相関式を示すとともに、岩盤き裂ネットワークを構成する個々のき裂の開口幅の分布が岩盤内の非線形的流れに及ぼす影響と優先流路の形成メカニズムを解明した。特に、三次元き裂ネットワークモデルを二次元モデルに単純化させる場合は、透水係数が約 19.2～43.6%と過小評価されること（図-10）を確かめることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 5件）

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Huang Na, Liu Richeng, Jiang Yujing, Li Bo, Yu Liyuan | 4. 巻 113 |
| 2. 論文標題 Effects of fracture surface roughness and shear displacement on geometrical and hydraulic properties of three-dimensional crossed rock fracture models | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Advances in Water Resources | 6. 最初と最後の頁 30~41 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.advwatres.2018.01.005 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Richeng Liu, Na Huang, Yujing Jiang, Hongwen Jing, Bo Li, Yuxuan Xia | 4. 巻 2018 |
| 2. 論文標題 Effect of shear displacement on the directivity of permeability in 3D self-affine fractal fractures | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Geofluids | 6. 最初と最後の頁 1-12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1155/2018/9813846 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Richeng Liu, Yujing Jiang, Hongwen Jing, Liyuan Yu | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 Nonlinear flow characteristics of a system of two intersecting fractures with different apertures | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Processes | 6. 最初と最後の頁 1-10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3390/pr6070094 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Xuezen Wu, Yujing Jiang, Bin Gong, Tao Deng and Zhenchang Guan | 4. 巻 110 |
| 2. 論文標題 Behaviour of rock joint reinforced by energy-absorbing rock bolt under cyclic shear loading condition | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences | 6. 最初と最後の頁 88-96 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.07.021 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Richeng Liu, Liyuan Yu, Yujing Jiang | 4. 巻 50 |
| 2. 論文標題 Quantitative Estimates of Normalized Transmissivity and the Onset of Nonlinear Fluid Flow Through Rough Rock Fractures | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering | 6. 最初と最後の頁 1063-1071 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s00603-016-1147-1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Richeng Liu, Bo Li, Yujing Jiang, Liyuan Yu | 4. 巻 111 |
| 2. 論文標題 A numerical approach for assessing effects of shear on equivalent permeability and nonlinear flow characteristics of 2-D fracture networks | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Advances in Water Resources | 6. 最初と最後の頁 289-300 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.022 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名 Huang, Yujing Jiang, Richeng Liu, Bo Li and Zhenyu Zhang | 4. 巻 25 |
| 2. 論文標題 A predictive model of permeability for fractal-based rough rock fractures during shear | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Fractals | 6. 最初と最後の頁 1750051-1-14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218348X17500517 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Na Huang, Richeng Liu, Yujing Jiang | 4. 巻 45 |
| 2. 論文標題 Numerical study of the geometrical and hydraulic characteristics of 3D self-affine rough fractures during shear | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Natural Gas Science and Engineering | 6. 最初と最後の頁 127-142 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2017.05.018 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 R. Liu, Yujing Jiang |
| 2. 発表標題 Experimental study on solute removal through a large-scale fracture plane |
| 3. 学会等名 The 10th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS10), Singapore (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 N. Huang, Yujing Jiang |
| 2. 発表標題 Influence of heterogeneous aperture distribution on hydraulic characteristics of three-dimensional discrete fracture networks |
| 3. 学会等名 The 10th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS10), Singapore (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 C. Wang, Yujing Jiang, R. Liu, J. Liu, Z. Zhang and S. Sugimoto |
| 2. 発表標題 Experimental study on the two-phase hydraulic properties of the intersecting fracture |
| 3. 学会等名 The 10th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS10), Singapore (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Chen Wang, Yujing Jiang, Richeng Liu |
| 2. 発表標題 Experimental Study on the Bubbly Flow in Intersecting Fractures |
| 3. 学会等名 Proceeding of 2017 ISRM Young Scholars ' Symposium on Rock Mechanics (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Na Huang, Yujing Jiang |
| 2. 発表標題 Modeling fluid flow in three-dimensional stochastic discrete fracture networks |
| 3. 学会等名 The 12th Japan-China Joint Seminar for the Graduate Students in Civil Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 佐藤 晃 (SATO Akira) (40305008) | 熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授 (17401) | |
| 研究分担者 | 杉本 知史 (SUGIMOTO Satoshi) (60404240) | 長崎大学・工学研究科・准教授 (17301) | |