

亀裂性岩盤におけるグラウチングシミュレータの開発

研究代表者 京都大学大学院工学研究科 特定助教 三好 貴子

1. 緒言

日本国内におけるエネルギーの安定的供給の維持には、岩盤をはじめとする地下空間の活用が欠かせない。例えば、水力発電で活用されるダムは、ダムの重量に耐えうる強固な岩盤の上に建設される。また、原子力発電における燃料の再処理にて発生する高レベル放射性廃棄物に関しては、地下 300 m 以深での地層処分が検討されている。このように、エネルギー供給を様々な側面から支えている岩盤であるが、その特性の一つとして空隙（亀裂）の存在が挙げられる。地下空間の利用において、岩盤亀裂は遮水性を阻害し、強度低下を招くと考えられている。そのため、ダム建設や地層処分事業においては、岩盤亀裂をセメントミルク等のグラウト材で閉塞することで岩盤を改良する「グラウチング」が実施される（図 1）。

現状のダムグラウチング設計の課題は 2 点あると考えられる。まず、グラウチングの施工位置の選定については、「中央内挿法」と呼ばれる、パイロット孔を基準に一定間隔で規則的にグラウチング孔を設定していく手法が用いられている（図 2）。しかしながら、これ

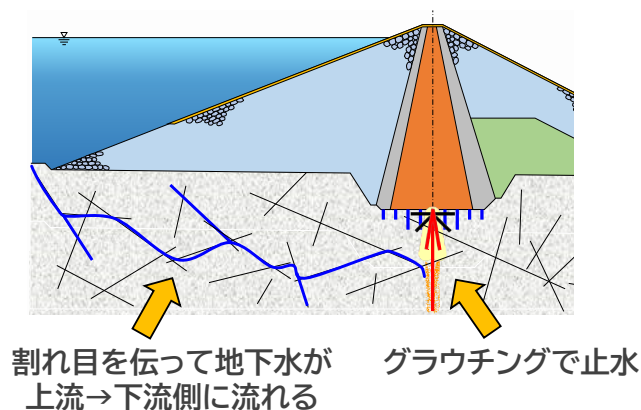


図 1 グ라우チングの概念図

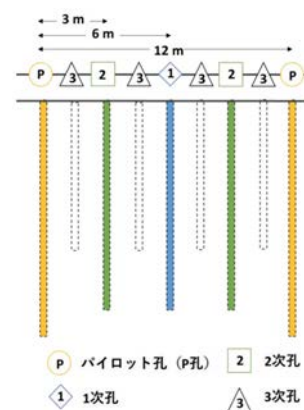


図 2 注入孔の配置例

らグラウチング注入孔の要否ならびに施工位置は透水試験結果に基づいて経験的に判断されているのが現状である。次に、グラウチングの施工方法の選定については、水セメント比や注入圧力を決定する必要がある。日本のダムの場合、水セメント比を薄い配合から濃い配合に段階的に切り替える手法が採用されているが、切り替える水セメント比や注入継続時間に明確な理論的根拠は無い。一方、海外では不必要な水の注入を避ける目的で水セメント比の濃い配合を最初から使用する手法が採用されている[1]。つまり、グラウチングの施工位置および施工方法のいずれの側面においても、岩盤の地質環境特性に応じた合理

化が成されておらず、その結果として所要の止水性や強度が確保できていない可能性がある。そこで本研究では、グラウチングの施工位置と施工方法の合理化を目指して、岩盤亀裂を流れるグラウト材（セメントミルク）のシミュレーション技術の構築を目的とする。

亀裂性岩盤におけるグラウチングの既往研究は、亀裂ネットワークを対象とした巨視的な検討と、単一亀裂を対象とした微視的な検討に区分される。まず、巨視的なグラウト材の流れを考慮できるマクロな検討に着目すると、既往研究では亀裂性岩盤を均質な連続体モデルとした事例がほとんどである。亀裂の分布や方向性、頻度を再現した事例は少なく、これらに起因する岩盤の不均質性は考慮できていない。一方、この背景には、ダム現場にて取得されるルジオン試験結果等から亀裂の分布を総合的に評価する手法が確立されていない点も問題点として挙げられる。

次に、グラウト材の特性をより忠実に検討できる単一亀裂へのグラウチングの解析に着目すると、これまでの検討は大部分がグラウト材の流体特性のみに着目したモデル化に留まっており、グラウト材の通り道となる亀裂の開口幅や粗度といった複雑な形状パラメータを考慮するには至っていない。また、セメント粒子による目詰まり等の複雑な現象をシミュレーションした事例においても、実験との比較は不十分であり、実際の現象を再現しているとは言い難い。そのため、単一亀裂におけるグラウト材の複雑な挙動を理解するには、これらを再現可能なシミュレーション技術と解析結果を検証する実験結果の両方が必要である。

以上を背景として、本研究では以下3点を実施する。

- ① 単一亀裂における亀裂形状を考慮した数値流体力学解析
- ② 単一亀裂におけるグラウチングを模擬した室内実験
- ③ グ라우チング解析を目的とした亀裂ネットワークモデル構築手法の開発

2. 単一亀裂における亀裂形状を考慮した数値流体力学解析

本章では、単一亀裂へのグラウチングにおける亀裂形状とグラウト材の特性を数値流体力学（**C**omputational **F**luid **D**ynamics:CFD）によるシミュレーションを通して評価することを目的とする。まずは、き裂形状を正弦波と仮定して簡易的に2次元での検討を実施することで、各パラメータの影響を把握する。次に、2次元での検討を実際のき裂形状を用いて実施することで、実現場における実装に繋げる。

2.1 粗度として正弦波を用いた検討

本検討では、き裂形状を正弦波と仮定して解析的検討を実施した。亀裂の粗度は正弦波として分解できることが既往研究で分かっており、岩盤地下水流れの研究では亀裂を正弦波と仮定した研究が行われてきたが、セメントミルクでの検討事例は少ない[2,3,4]。正弦波のように簡略化した亀裂形状で検討を実施することで、き裂形状を表す複数のパラメータ（開口幅、起伏の角度等）のうち、影響の大きいパラメータを抽出することが可能とな

る．今回検討した正弦波の形状では，平均開口幅を 1.5 mm で一定であると仮定し，正弦波の波長と振幅の比率を 0.02 ， 0.06 ， 0.1 と変化させることで粗度の程度を表現している（図 3）．次に，流体特性については，水セメント比が $2, 1, 0.8$ の 3 ケースを考慮することとした．水セメント比が 2 を超えるケースについては，既往研究を基に流体特性上大きな差異はないと判断した[5]．既往の粘性測定結果を参考に，それぞれの水セメント比を表現する流体特性をビンガム流体のパラメータとして与えた[6]．注入圧力については実際のグラウチング施工における圧力勾配から， 0.002 MPa から 3 MPa の 9 段階の圧力条件を考慮することとした．セメントミルクは解析領域の一端から圧力制御で注入することとした．解析にはオープンソースの CFD ソフトウェアである OpenFOAM [7]を使用した．

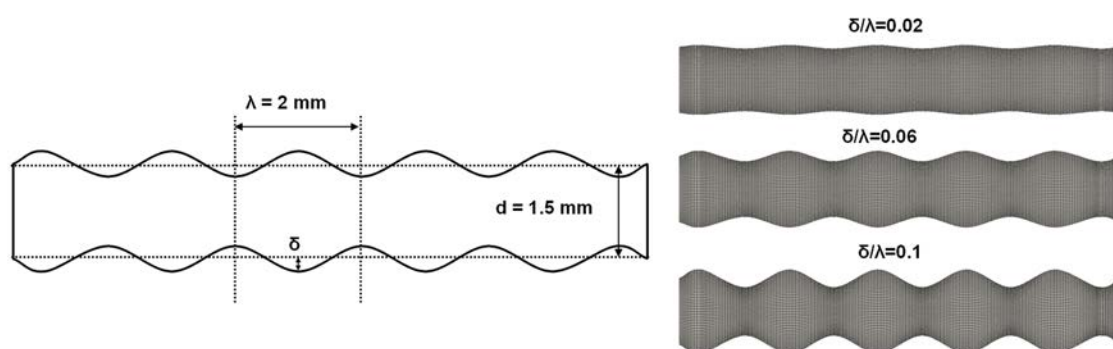


図 3 解析にて考慮した 3 パターンの亀裂形状

本解析によって異なる配合・ラフネスにおける「流れの形態」を把握することができた．図 4 に全ケースにおける摩擦抵抗係数をレイノルズ数で亀裂形状毎に整理した．黒色の点線が平行平板における層流状態の摩擦抵抗係数の理論解を示す．全体的な傾向として，水セメント比が大きい（薄いセメントミルク）ほど，同一圧力で速く流れるためレイノルズ数は大きくなる．

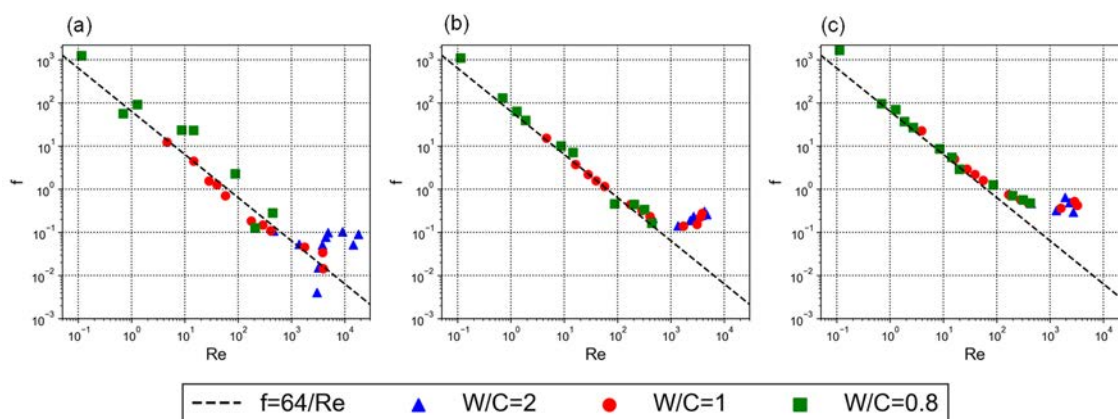


図 4 亀裂形状毎の摩擦抵抗係数 vs レイノルズ数

(a) $\delta/\lambda=0.02$, (b) $\delta/\lambda=0.06$, (c) $\delta/\lambda=0.1$

次に、形状毎の流れの形態について整理する。まず、最も亀裂形状が平行平板に近い図 4 (a) においては、摩擦抵抗係数から推定される流れの形態は、平行平板の摩擦抵抗係数と大きく差異がないことから、水セメント比が 0.8 と 1 のセメントミルクはいずれも層流状態に存在していることが分かる。水セメント比が 2 のセメントミルクについては、レイノルズ数 2000~3000 を境に層流から遷移流に遷移していることが分かる。最も亀裂形状の起伏が大きい図 4 (c) において、摩擦抵抗係数から推定される流れの形態は、いずれの水セメント比においてもレイノルズ数 70 を境に層流から遷移流に遷移している。亀裂形状の起伏が 2 番目に大きい図 4 (b) においては、レイノルズ数 700 を境に層流から遷移流に遷移している。これらの解析結果から、以下 2 点の知見が得られた。

- 亀裂の粗度が大きくなるほど、セメントミルクの流れの形態はより低いレイノルズ数で層流から遷移流に移行しやすくなる
- 水セメント比が大きいほど (薄いセメントミルクであるほど)、セメントミルクの流れの形態はより低いレイノルズ数で層流から遷移流に移行しやすくなる

2.2 実際の亀裂形状を用いた検討

一方、これらの検討は 2 次元での仮想的な亀裂形状を対象に取り組んだものであり、実際の亀裂形状と相関づけることが難しい。そこで、次のステップとして 3 次元の亀裂形状を用いた検討に取り組んだ。本検討では、亀裂生成プログラムである PySimFrac[8]を用い 10 cm × 5 cm の 3 次元亀裂形状を生成し、メッシュを生成することで CFD シミュレーションの実行を可能とした。解析で利用したメッシュと定常解析結果の一例を図 5 に示す。本解析では亀裂の一端 (図の左) から一定流量で流体を流しており、もう一端を出口として設定している。亀裂の開口幅の変化によって速度が大きい領域と小さい領域が存在していることが分かる。また、流体は平面を全体的に流れるのではなく、開口幅の大きい領域を選択的に流れていることも分かる。今後、複数ケースでの解析を行うことで、2 次元で得られた流れの形態に関する定性的な知見を 3 次元において定量化することを目的とする。

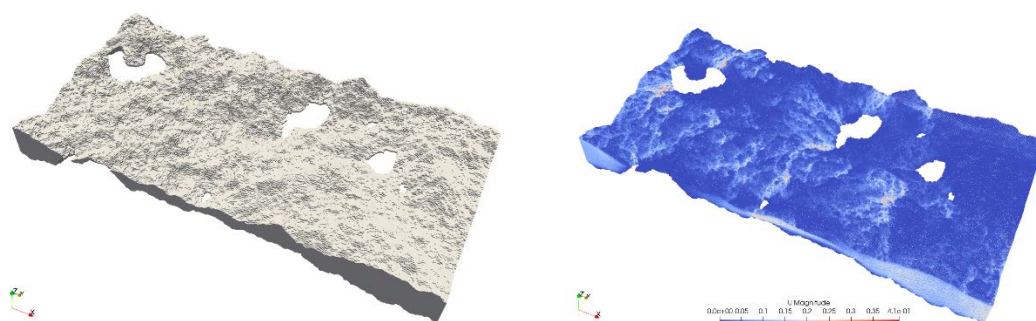


図 5 3 次元亀裂形状メッシュと流体速度の定常解析結果

3. 単一亀裂におけるグラウチングを模擬した室内実験

単一亀裂におけるセメントミルクの流れを模擬するために平行平板実験を実施した。本実験は、平行平板にセメントミルクを流すことで、岩盤亀裂へのグラウチングを模擬する実験である。セメントミルクの配合や平行平板の幅等を変化させることで、亀裂の開口幅とセメントミルクの特性がグラウチングに及ぼす影響を把握する。さらに、平行平板の形状を変化させることで、より複雑な亀裂形状を考慮することが可能となる。今回は、解析との整合性を確認するためのベンチマーク実験として、基本的な条件での平行平板での実験を実施した。また、解析との比較を容易にするために、流体としてガラスビーズと水の混相流を使用することとした。

3.1 実験設備

まず、実験設備の概要について説明する。装置全体の概要を図 6 に示す。実験設備は流

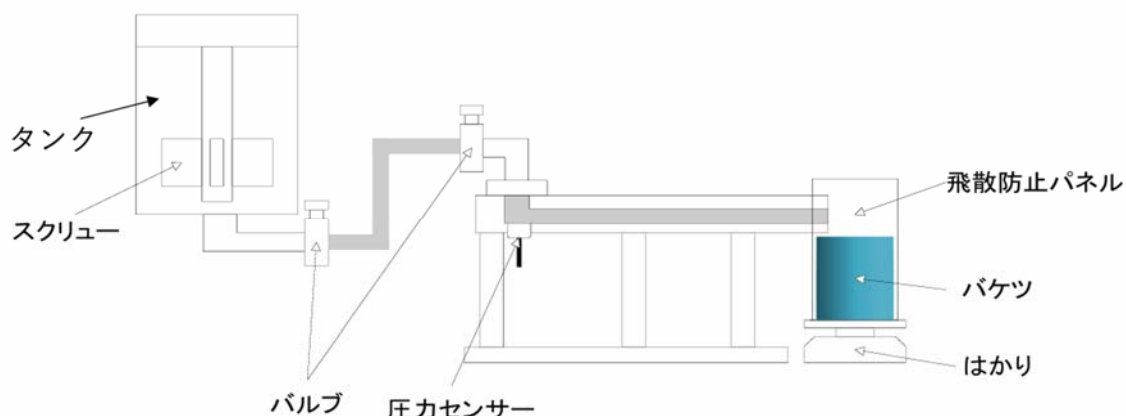


図 6 実験設備の全体図

体をかき混ぜるタンク部分と流体を流す平行平板部分で構成される。まず、タンク部分では、スクリューが内部に設置されたタンクにセメント（もしくはガラスビーズ）と水を投入し、一定時間かき混ぜることでセメントミルクを生成する。平行平板部分の流路長は 50 cm，流路幅は 3 cm であり，開口幅は 1 mm から 5 mm の間で 1 mm 毎に調整可能な仕様となっている（図 7）。平行平板が圧力により浮き上がらないようにボルトで締めて使用する。各開口幅に合わせたパッキンを準備しておき，流体が側面から漏れないようにする。

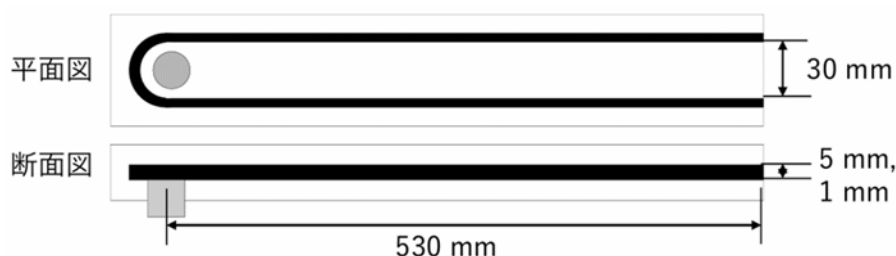


図 7 平行平板流路の平面図と断面図

流体が平行平板内を移動している様子を確認できるよう、平行平板はアクリル板製とした。

タンク部と平行平板部はホースで繋ぎ、ホースの両端にバルブを設けている。タンク部はコンプレッサーと接続しており、圧力制御で流体を注入することが可能である。流路入口部には指定した圧力で流体が注入できているかを確認するために、圧力センサーを設置している。流路出口部にはスケールを設置し、出口部の重量の経時変化を取得する。また、実験中の平行平板部の動画を撮影することでセメントミルクの浸透距離の経時変化を取得する。流路入口部におけるバルブ開閉時の実験の様子を図 8 に示す。



図 8 実験の様子

3.2 実験結果

今回は、水 2.34 kg、ガラスビーズ 1.56 kg の混相体を開口幅 5 mm の平行平板に 0.05 MPa で注入した。浸透距離と圧力測定の結果を図 9 に示す。まず、浸透距離については注入開始から 1 秒未満で出口に到達した。圧力については、反力を発生させるためのひずみが維持されず瞬間的な値として出ているが、おおむね設定した圧力で注入できていることが確認できた。まずは、本ケースをベンチマーク実験として使用することで解析と実験の整合性を確認し、その後よりケース数を増やすことで、より複雑な亀裂形状・注入条件におけるグラウチングの流れを理解する。

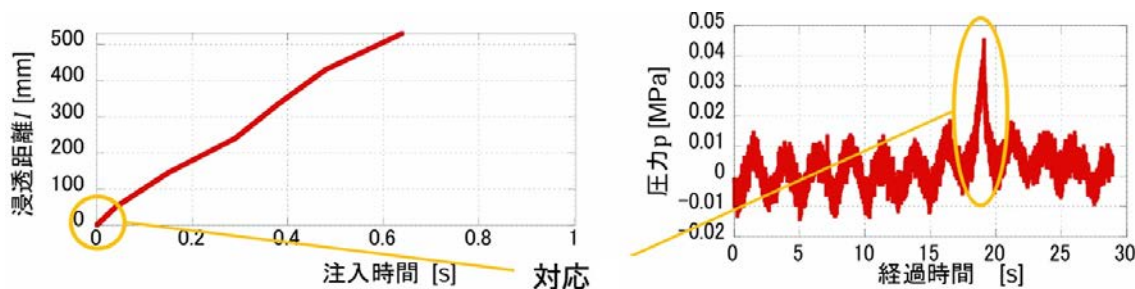


図 9 浸透距離と圧力測定結果

4. 亀裂ネットワークモデル構築手法の開発

前章では、単一亀裂を対象に検討を実施したが、実際の現場では岩盤亀裂は複雑にネットワーク状に存在している。このような亀裂ネットワークを考慮したグラウチング設計を行うためには、現場の地質特性を反映した亀裂ネットワークモデル構築手法の確立が必須である。本章では、東北地方の A ダムを対象として、亀裂ネットワークモデルの構築を行ったので、その構築フローを説明する。

まず、亀裂ネットワークを構築するための現場データとしては、ルジオン試験結果、地表面の地質調査結果、ボアホールテレビカメラ (BTV) から得られた亀裂情報を使用することとした。亀裂情報を整理するうえで、まず重要と考えられるのは広域な透水性に寄与する透水性割れ目を特定することである。透水性割れ目の特定は、ルジオン試験結果と BTV の亀裂データを照らし合わせることで実施した。具体的には、ルジオン値が $5Lu$ 以上の区間に存在する亀裂を透水性割れ目として判定し、モデル化することとした。また本岩盤には低透水層として機能する断層が存在することが事前調査で分かっていたことから、それについても別途モデル化することとした。これら以外の亀裂については、広域の透水性への影響は小さいという判断から、低透水性の亀裂としてモデル領域全体に確率論的に分布させることとした。これらを組み合わせて亀裂ネットワークモデルを構築することとした。構築フローを図 10 に示す。

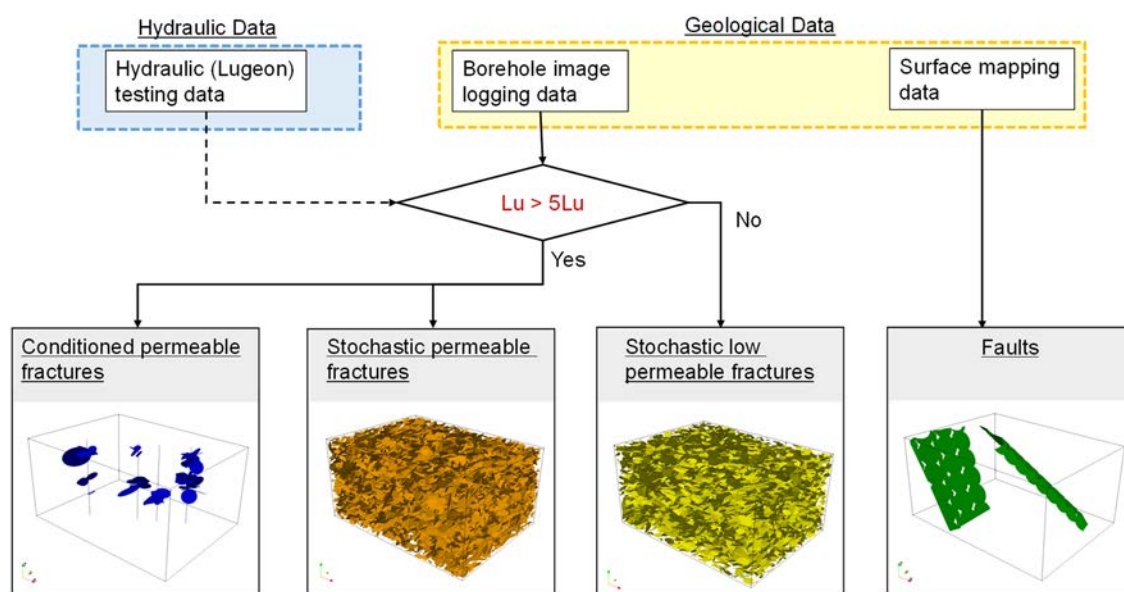


図 10 亀裂ネットワークモデルの構築フロー

各割れ目に付与する透水性については、ルジオン試験結果をクリギングして、区間的な透水性分布を求め、それらを割れ目の大きさに応じて付与する手法を採用した。これにより、現場データと整合する不均質な空間的な透水性分布をモデル上で設定することを可能にした。

5. 結言

本研究では、亀裂性岩盤におけるグラウチングシミュレータを開発するために、単一亀裂を対象とした解析的および実験的検討と、亀裂ネットワークモデルを対象とした解析的検討を実施した。単一亀裂においては、亀裂形状を考慮した数値解析により、異なる水セメント比と亀裂粗度に応じた流れの形態について知見を得た。また、平行平板を用いた単一亀裂における室内実験装置を製作しベンチマーク実験を実施することで、一定の開口幅・流体特性条件におけるセメントミルクの浸透距離を取得することに成功した。亀裂ネットワークにおける検討においては、実現場におけるルジオン試験結果等の施工データを用いて、現場の地質特性を反映させた亀裂ネットワークモデルの構築手法を確立した。今後の展望として、今回得られたセメントミルクの流れの形態に関する知見を3次元の亀裂形状ならびに亀裂ネットワークモデルに展開することで、より実現場に即したシミュレータの確立を目指す。

謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団 技術研究助成の支援を受けて実施いたしました。ここに感謝の意を表します。

成果発表業績

- [1] Takako Miyoshi, Hideaki Yasuhara, Kiyoshi Kishida: CFD Simulation to Study the Grouting Behavior in Rough-Walled Fractures, Proceedings of 58TH US ROCK MECHANICS / GEOMECHANICS SYMPOSIUM, Paper No. ARMA 2024-0220 (2024).

引用文献

- [1] Ewert F, Hungsberg U (2018). Rock grouting at dam sites. Springer.
- [2] Brush D.J, Thomson N.R (2003) Fluid flow in synthetic rough-walled rock fractures: Navier-Stokes, Stokes and local cubic law simulations. Water Resources Research 39(4):1085.
- [3] Zimmerman R. W, Al-Yaarubi A, Pain C. C, Grattoni C.A (2004) Non-linear flow regime of fluid flow in rock fractures. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41(3).
- [4] Zou L, Jing L, Cvetkovic V (2015) Roughness decomposition and nonlinear fluid flow in single rock fracture. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 75: 102-118.

- [5] Shibata I (1992) The flow properties of cement grouts in thin pipe. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 453:107-116.
- [6] Kishi H, Kobayashi K, Kakue T (2018) A consideration based on the grouting-model for fractured rock mass. *Japanese Geotechnical Journal* 13(4): 359-378.
- [7] Weller H G, Tabor G, Jasak H, Fureby C (1998) A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, *Computers in Physics* 12(6):620-613.
- [8] Gultinan E, Santos J E, Purswani P, Hyman J D (2024) pySimFrac: A Python library for synthetic fracture generation and analysis, *Computers and Geosciences* 191(105665).