

平成 30 年 4 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18299

研究課題名(和文)高精度三次元CFD-DEMによるグラウト粒子-流体連成挙動の解明

研究課題名(英文)3D CFD-DEM simulation for the analysis of injection of Cement-based Grout

研究代表者

清水 浩之(Shimizu, Hiroyuki)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：60610178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：グラウト浸透挙動に大きな影響を与える目詰まり現象の発生過程を検討するため、数値流体力学(CFD)と粒状体個別要素法(DEM)を連成させることにより、粒子-流体間相互作用を厳密に考慮し、さらに粒子の三次元的な流動挙動をも再現可能な三次元CFD-DEMコードの開発を行った。開発した解析コードにより、室内試験を対象としたシミュレーションを行い、グラウト浸透挙動に影響を与える要因の一つとして、セメント粒子の粒度分布の影響を検討した結果、大粒子が密集することによる流動阻害とそれによるき裂内セメント粒子濃度の増加が、流出するグラウト濃度に大きく影響していることがわかった。

研究成果の概要(英文)：A 3D numerical model of coupled Computational Fluid Dynamics and the Distinct Element Method (CFD-DEM) had been developed, and a laboratory scale grout injection experiment was simulated to better understand the penetration and filtration mechanism of cement-based grout. The simulation results agree qualitatively well with the actual experimental results, and the clogging process during the injection of cement-based grout was successfully reproduced by the 3D CFD-DEM. The simulation results also indicate that the filtration of cement-based grout caused in case of large particle size increase the density of cement particles in the fracture, and the density of the cement particles influence on penetration of the grout.

研究分野：岩盤工学

キーワード：三次元CFD-DEM グラウト浸透

1. 研究開始当初の背景

グラウト技術はセメント系材料を主成分としたグラウト材を岩盤き裂へ加圧注入することで岩盤内部の空隙を充填し、岩盤の透水性や力学特性を改良することを目的としている。グラウト技術は、トンネル掘削やダム建設等、地下空間を利用する様々な分野で利用されており、近年では高レベル放射性廃棄物 (HLW ; High Level radioactive Waste) を地下深部に最終処分する「地層処分」で想定されるような地下深部の高水圧下で適用できる高度なグラウト技術の開発が求められている。

グラウトの懸濁液の注入はセメント粒子と流体の混在した混相流であり、粒子と流体の相互作用により、き裂幅とセメント粒子の粒径、粘性の関係による目詰まりの発生、き裂入口からの距離の延伸に伴う流速の低下によるグラウト粒子と水との分離、および粒子の沈降、堆積、堆積の進行によるき裂の閉塞、それに伴う脱水、凝結等非常に複雑な現象であると考えられる。そのため、岩盤中のき裂や水みちなどの推定やグラウト材の浸透・硬化の過程等のグラウトの注入メカニズムについては論理的な裏付けがなく、実際の設計、施工に際しては現場技術者の経験に基づき決定されているのが現状である。

過去の研究においては、上記のような流体流動と粒状体の相互作用を検討できる二次元 CFD-DEM コードの開発を行い、開発した二次元 CFD-DEM により、従来の数値モデルでは対応できなかった流動する流体中を浮遊する粒子の挙動を詳細に追跡することが可能となった。その結果、き裂入り口付近で比較的大きなセメント粒子がアーチ構造を形成・成長することで目詰まりが発生する過程を再現することに成功した。また、高濃度のグラウトを注入することが必ずしも効率的ではなく、効率的なグラウト注入に最適な水・セメント重量比が存在することを示すことができた。しかし、これまでの研究における二次元解析では奥行き方向への粒子や流体の流動が表現できないため、き裂入り口付近で粒子がアーチ構造を形成すると、瞬時に流動が停止するという問題点が明らかになった。実際のグラウト注入試験では出口より流出するグラウトの濃度が徐々に薄くなり最後に目詰まりを起こす現象が確認されており、より詳細な評価を行うためには三次元の解析が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、流体流動を計算する数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics、CFD) と粒状体の挙動を追跡する粒状体個別要素法 (Distinct Element Method、DEM) を連成させることにより、粒子-流体間相互作用を厳密に考慮し、さらに粒子の三次元的な流動挙動をも再現可能な三次元 CFD-DEM コードの

開発を行い、岩盤中のグラウト流動挙動の解析を行う。これにより、不明瞭であったグラウト流動挙動を詳細に把握および制御することが可能となり、合理的な設計・評価に資することができる。

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者らのこれまでの二次元 CFD-DEM による成果を基に、新たに三次元 CFD-DEM によるグラウト流動解析を行う。高精度な三次元解析を行うことにより、不明瞭な点の残るセメント系グラウトの注入過程における目詰まりの発生機構を明らかにする。さらに、過去に行われた岩盤き裂を模擬した平行平板定圧注入試験装置“short slot”を用いた室内試験を対象とした三次元 CFD-DEM シミュレーションを行う。開発した三次元解析コードによる解析結果と室内試験結果との比較等を通じ、CFD-DEM モデルの妥当性及び適用性の検討を行なうとともに、グラウト材の水-セメント配合濃度やセメント粒子形状等が効率的なグラウト注入に与える影響について解析結果と既存の室内試験結果との比較等を通じて検討することで、合理的なグラウト設計・注入管理、正確な評価に資する知見を得ることを目指す。

4. 研究成果

グラウト浸透挙動に大きな影響を与える目詰まり現象の発生過程を検討するため、3D CFD-DEM コードにより、室内試験を対象としたシミュレーションを行い、グラウト浸透挙動に影響を与える要因の一つとして、セメント粒子の粒度分布が目詰まり現象に与える影響について検討した。

解析対象となる実験装置の概要を図1に示す。同図に示すように、二枚の金属製円盤を合わせることで岩盤内亀裂の狭窄部を模擬する“slot”を形成する。グラウト材は圧力一定条件で圧入され、slot を通過するグラウト量が測定された。本研究ではこの“short slot”を対象としたシミュレーションを実施した。

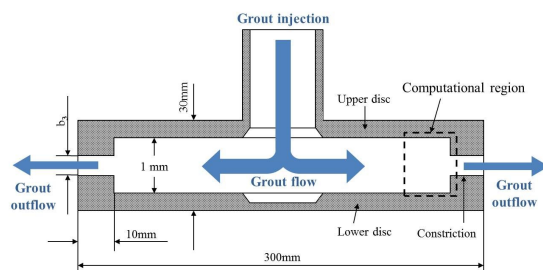


図1 試験装置 “short slot” の概要

シミュレーションは三次元で行われ、対象となるのは図1に破線四角で示した矩形領域である。室内試験を対象として構築した3D CFD-DEM モデルを図2に示す。モデルは、上下二枚の剛体壁により構成されており、幅2000 μm (x 方向)、高さ1000 μm (y 方向)、奥行き1000 μm (z 方向)である。同図右端の狭窄部の長さは300 μm であり、狭窄部の開口幅は100 μm である。 x 方向、 y 方向、 z 方向の格子数は200 \times 100 \times 100、格子は幅10 μm の正方形となっている。

モデル x 方向両端の境界は圧力一定条件となっており、 x 軸負側境界面における流入圧力 P_{in} は 0.1MPa、 x 軸正側境界面の流出圧力 P_{out} は 0MPa とする。モデル y 方向両端の剛体壁面は no-slip 条件である。モデル z 方向両端は周期境界条件となっている。重力は y 方向下向きに作用する。本研究では、流体として水を想定している。

グラウト浸透解析においては、粒子半径の取りうる値が異なる三種類の場合についてシミュレーションを行った。Case1 は粒子サイズが最も小さく、粒子半径は 25 μm で一定である。Case2 は最大・最小粒子半径はそれぞれ 25 μm 、50 μm である。各セメント粒子の半径は最大粒子半径と最小粒子半径の間で一様乱数によりランダムに選択される。Case3 は粒子サイズが最も大きく、粒子半径は 50 μm で一定である。セメント粒子は流入する流体とセメント粒子の質量比 (w/c) が 0.5 となるように x 軸負側の流入境界面に投入される。この時、セメント粒子の y, z 座標は一様乱数によりランダムに与える。粒子が x 軸正側の流出境界面に到達すると、その粒子を消去する。

Case1、Case2、Case3 におけるセメント粒子の流動挙動を図3に示す。同図は xy 平面断面図であり、各粒子の x 方向の流動速度を色で表示している。赤い粒子は x 方向速度が大きく、青い粒子は速度が小さい。同図に示すように最小の単一粒径である Case1 では、多くの粒子が安定して流動していることがわかる。流出側の狭窄部内においては流体の速度が速くなっているため、このような流体の流れに合わせて粒子速度も加速している。

大小の粒子が混在する Case2 においては、モデル内の粒子速度に偏りが見られる。 y 方向負側境界(床面)付近において粒子速度の低下が見られるが、これは重力により粒子が下方へと落下し床面と接触したためであると考えられる。また、比較的大きな粒子が互いに接触しながら狭窄部へと侵入していくため、狭窄部入口周辺での粒子速度が大きく低下していることがわかる。

最大の単一粒径である Case3 では、Case2 で見られた傾向がより強く出ている様子が見られた。Case3 では大きい半径の粒子のみが存在するため、重力の影響が大きく、また狭窄部入口付近で粒子同士が衝突する確率が大きかったためであると考えられる。

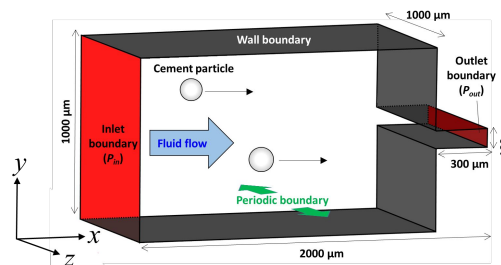


図2 3D CFD-DEM 解析モデルの概念図

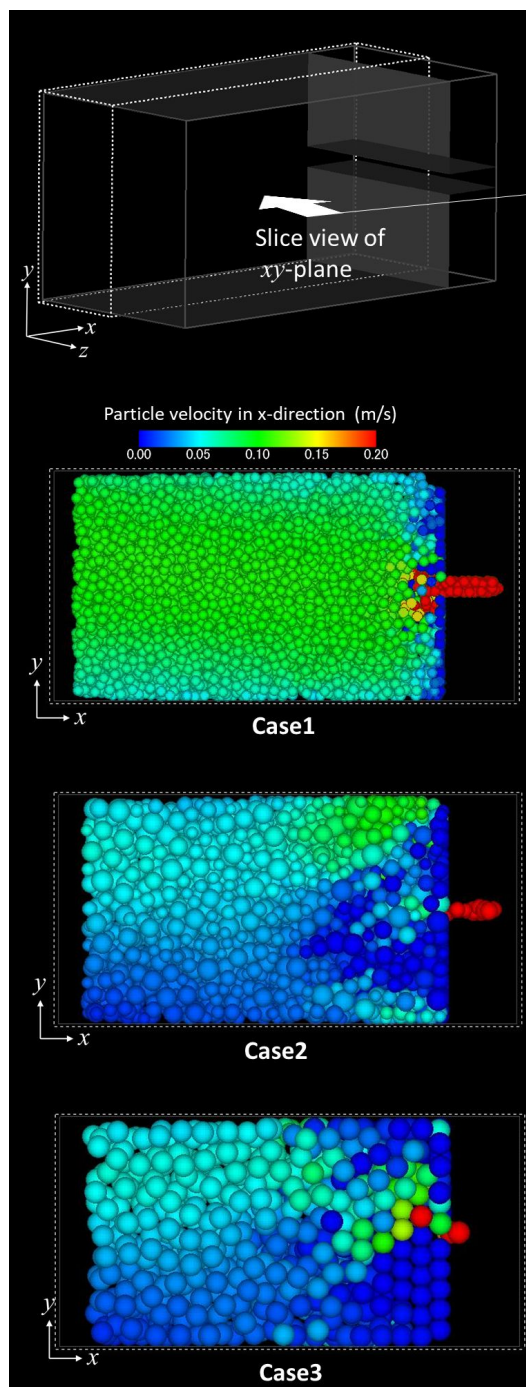


図3 セメント粒子の x 方向速度分布の xy 平面断面図

各解析ケースにおいて流出側の狭窄部から流出したセメント粒子の累積質量の経時変化を図4に示す。解析の結果、グラウト注入試験で観察されたように、出口より流出するグラウトの濃度が徐々に薄くなり最後に目詰まりを起こす現象を再現することができた。また、流出側のグラウトの w/c の変化を比較したところ、大粒子が密集することによる流動障害とそれによるき裂内セメント粒子濃度の増加が、流出するグラウト濃度に大きく影響していることがわかった。

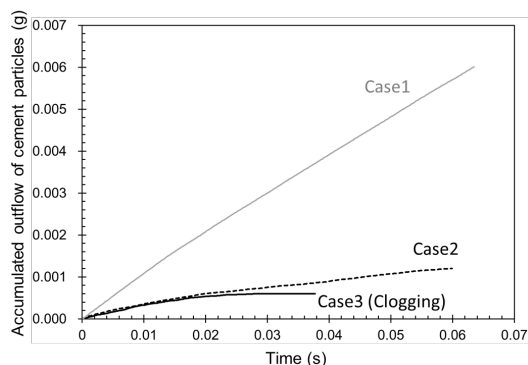


図4 グラウト流出量の経時変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計3件)

清水浩之: 粒状体個別要素法による水-応力-化学連成解析手法の構築と現場での活用に向けた試み, 第4回岩の力学に関する若手研究者会議, pp.39-41, 2017年

清水浩之, 小山倫史: 三次元CFD-DEMによるセメント系グラウトの目詰まり現象の検討, 講演番号3505, 資源・素材学会平成28年度秋季大会, 2016年

清水浩之: 粒状体個別要素法を用いた数値解析による水-応力連成現象の解明, 第2回岩石力学・岩盤工学に関する若手研究者会議, pp.103-105, 2015年

〔図書〕(計0件)

該当なし

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

清水 浩之 (SHIMIZU, Hiroyuki)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号: 60610178