

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760686

研究課題名(和文) 粒子流体連成解析によるグラウト浸透現象の解明

研究課題名(英文) CFD-DEM analysis for filtration and penetration 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) 1,600,000円、(間接経費) 480,000円

研究成果の概要(和文)：グラウトの懸濁液の注入はセメント粒子と流体の複雑な連成現象であるため、そのメカニズムには十分に解明されていない部分が多く、実際の設計、施工に際しては多くの実績に基づき経験的に決定されているのが現状である。本研究では、粒子-流体間相互作用を厳密に考慮した粒子-流体連成解析コード(CFD-DEM)の開発を行い、室内試験を対象とした数値解析を実施した。その結果、粒子同士が接触してアーチ構造が形成され、目詰まりが発生する過程を再現できた。これにより、グラウト浸透挙動に大きな影響を与える目詰まり現象について、発生を誘引する要因や、目詰まり発生メカニズムを解明する知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：The filtration and penetration mechanism of cement-based grout have not been clarified sufficiently yet due to complicated physical and chemical processes of grouting. Therefore, the grout material and injection parameters are usually determined empirically by technical experts at the injection site. In this research, to better understand the penetration and filtration mechanism of cement-based grout through rock fractures, a two-dimensional numerical model of coupled Computational Fluid Dynamics and the Distinct Element Method (CFD-DEM) had been developed. As a result, the filtration process during the injection of cement-based grout was successfully reproduced by the CFD-DEM code. Based on these results, the factors that significantly influence on the filtration and penetration mechanism was investigated in detail. The numerical model developed in this research gave a better understanding for filtration and penetration mechanism of cement-based grout.

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：グラウト 数値流体力学 個別要素法 埋め込み境界法 流体-粒子連成解析

1. 研究開始当初の背景

わが国では原子力発電所で使用した燃料を再処理し、ウランやプルトニウムを回収して有効に活用する原子力政策を採択しており、この処理によって高レベル放射性廃棄物 (HLW; High Level radioactive Waste) が残る。HLW は高い放射能を持ち、放射能が自然レベルに落ち着くまで数万年を必要とする。HLW は今後も増加の一途をたどることが予想されており、その処分は、我々人類が取り組まなければならない最重要課題のひとつである。近年では、HLW を地下深部に最終処分する「地層処分」が唯一実現可能性のある方法であるとの国際的な共通認識が得られている。

わが国のように岩盤の割れ目や地下水が多い地質環境を考慮すると、地層処分において大深度地下に多数の地下坑道の掘削・施工を行った場合、多量の湧水が発生することが予想される。このような多量の湧水は施工費用の増大や、処分システムの性能低下を引き起こす可能性がある。そのため、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グラウト技術が必要不可欠となる。グラウト技術は地下空間利用やトンネル工事等において、地下構造物周辺の土質地盤、岩盤の流体浸透挙動を制御する技術の一つであり、セメント系材料を主成分としたグラウト材を岩盤亀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、地層処分だけでなく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、合理的なグラウト設計・注入管理、正確な評価を行うためには、グラウト注入の浸透メカニズムを理解した上で岩盤に浸透したセメント材料の量やその浸透範囲などを把握・評価する必要がある。

この目的のため、近年ではグラウト施工の計画指針となるような種々の数値モデルの開発が行われている。既往の研究ではグラウト浸透のモデル化について、グラウトの懸濁液を粘性流体として取り扱う場合が多いが、実際の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、亀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、亀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、堆積の進行による亀裂の閉塞、それに伴う脱水、凝結等非常に複雑な現象が起きていると考えられる。そのため、岩盤中の亀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十分には解明されていない部分が多く、実際の設計、施工に際しては多くの実績に基づき経験的に決定されているのが現状である。

2. 研究の目的

既存の研究報告において粒子-流体混相流に関する研究例はいくつか存在するが、粒子の回転による影響を考慮しない等、粒子-流体間相互作用を単純化している場合がほとんどであり、具体的な問題の解明には至っていない。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、流体流動と粒状体の相互作用を厳密に考慮した検討ができる数値解析コード (CFD-DEM) の開発を行う。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る。

さらに、開発した解析コードによる解析結果と既存の室内試験結果との比較等を通じ、開発した 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、不明瞭な点の残るグラウトの注入メカニズムについて新たな知見を得ることを目標とする。

地層処分の分野において粒子-流体間相互作用を詳細に検討した研究は世界的に見ても前例がなく、本研究が CFD-DEM 適用の新たな試みとなる。地層処分の分野においては、緩衝材のコロイド流動、流出・浸食等も混相流の問題として考えられ、本研究により開発される解析コードはこのような岩盤亀裂内のコロイド粒子の輸送問題にも応用することが可能である。また、本研究により得られた知見は、地層処分の分野だけでなく、従来のトンネル・地下空間利用においても合理的なグラウト設計・注入管理、正確な評価に資することができる。

3. 研究の方法

本研究においては、これまでの粒状体個別要素法に関する知見を基に、新たに数値流体力学の概念を取り入れた粒子-流体連成解析を実施する。実施項目は以下のとおりである。

(1) CFD-DEM 解析コードの開発

研究の基礎となる基本的な CFD-DEM コードの開発を行う。差分法を用いた基本的な流体流動解析コードを作成し、セメント粒子の挙動追跡を担当する粒状体個別要素法コードと連成させる。粒子-流体間の相互作用力については埋め込み境界法を導入することにより計算する。

(2) CFD-DEM 解析コードの妥当性及び適用性の検討

開発した CFD-DEM コードを用いて、単純な条件のもとでシミュレーションを行い、理論解等と比較することで CFD-DEM コードの妥当性及び適用性を検討するとともに、最適な境界条件を決定するために必要な基礎

的な解析データの蓄積を行う。本研究では、室内試験を解析対象としているため、実際に実験を行った研究協力者から実験装置や使用したグラウト材のデータの提供を受け、シミュレーションに用いる入力パラメータの決定を行う。

(3) 室内試験を対象としたシミュレーションの実施

開発した CFD-DEM コードを用いて、室内試験を対象としたシミュレーションを実施し、実験結果との比較を行う。グラウト注入における目詰まり発生に特に大きな影響を及ぼすと考えられるグラウト材の水-セメント配合濃度、粒子間摩擦係数に着目し、これらを変更したシミュレーションを繰り返すことで目詰まり発生を誘引する要素の抽出およびそれらが目詰まりの発生過程に及ぼす影響の度合いについて検討を行う。

(4) 粒子間作用力の導入等解析コードの高度化

セメント粒子同士の凝集や沈殿・堆積した粒子の固化等に対応できるよう新たなアルゴリズムを導入する。改良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、新たに導入した要素の影響を把握する。

4. 研究成果

グラウト注入中に岩盤亀裂入口にて目詰まりが発生する場合、グラウト材の浸透範囲は非常に狭くなることが予想され、このことはグラウト設計・注入管理に多大な影響を与えたと考えられる。したがって、本研究では特にこの目詰まりの発生に着目し、開発した CFD-DEM コードを用いて、過去に行われた岩盤亀裂を模擬した平行平板定圧注入試験装置“short slot”を用いたグラウト注入室内試験を対象としたシミュレーションを実施した。解析モデルを Fig.1 に示す。Fig.1 に示すように、モデルの上下端は狭窄部を持つ平行平板となっており、モデル左端は流体とセメント粒子の流入境界、右端は流出境界となっている。流体の流入圧力 P_{in} は 1.5MPa であり、流出側の圧力 P_{out} は 0MPa とする。

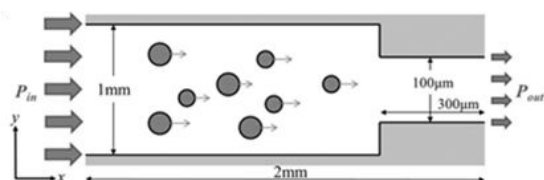


Fig.1 岩盤亀裂を模擬した室内試験を対象とした解析モデル

セメント粒子は最大、最小直径の間で一様乱数によりランダムに直径を選択したのち、流入する流体とセメント粒子の質量比(w/c)が一定となるようにモデル左端に投入する。この時、セメント粒子の y 座標は一様乱数によりランダムに与える。粒子がモデル右端に到達すると、その粒子を消去する。流体として水を想定した。

(1) 目詰まり現象の再現

室内試験を対象としたシミュレーションを実施した結果、粒子同士が接触してアーチ構造が形成され最終的に目詰まりが発生する過程を、開発した CFD-DEM コードにより検討することができた。Fig.2 に亀裂入口付近の流路が急縮小する部分における目詰まりの発生の様子を示す。白色の円はセメント粒子を表し、流速は青から緑、赤の順に流速が大きいことを表している。

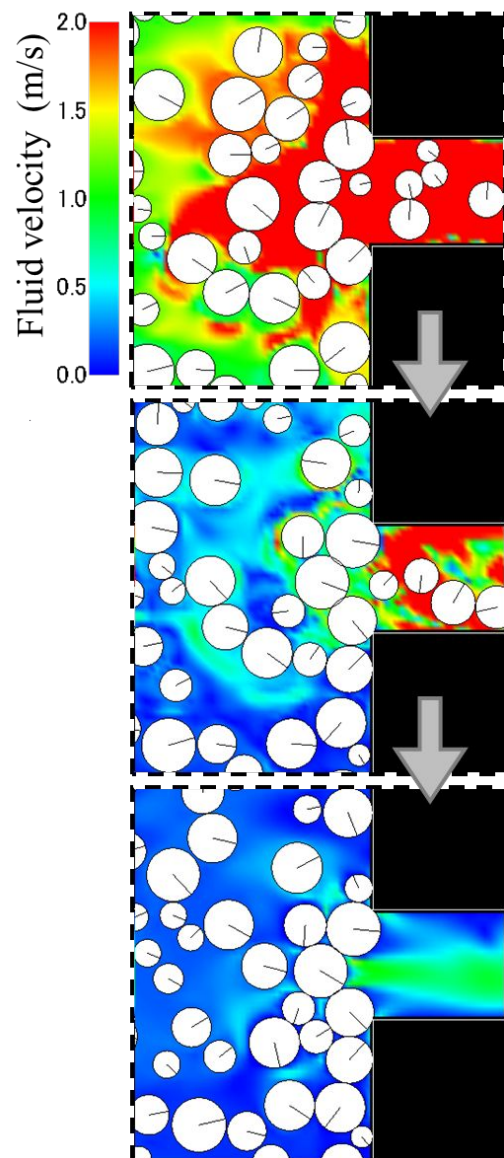


Fig.2 CFD-DEM コードによる目詰まり発生過程の再現

Fig.2 に示すように、モデル右端にある狭窄部付近において流体の速度が速くなっていることがわかる。このような流体の流れに合わせて、多数の粒子が接触しながら狭窄部へと侵入していく。このとき、狭窄部入口で粒子同士が接触してアーチ構造を形成すると、このアーチ構造が左端の流入圧力を支えることになり、流体速度が急激に減少する。このアーチ構造を解消するほどの圧力・流速が作用しない限り、そこへ次々にセメント粒子が送り込まれることで、セメント粒子が堆積し、その結果、アーチ構造が成長し、最終的に目詰まりが生じる。

(2) グラウト注入効率に影響を及ぼす要因の検討

流入する流体とセメント粒子の質量比 (w/c) がグラウトの注入効率に与える影響を検討するため、 w/c を 0.2、0.3、0.5、1.0 と変化させたシミュレーションを行った。流体分を除いたセメント粒子のみの累積注入量の経時変化を w/c ごとに比較したものを Fig.3 に示す。モデル右端に到達したセメント粒子の質量をカウントすることで、グラウト注入量を評価した。

Fig.3 より累積注入セメントの増加率は $w/c = 0.5$ のときが最も大きく、検討ケースの中では、短時間により多くのセメント粒子を注入できる効率的な条件であるといえる。 w/c が小さい場合、セメント粒子数が増大し、セメント粒子の移動が流体に与える影響（相互作用）が大きくなる。さらに、セメント粒子同士の衝突機会が増えることで流体の流れに乱れが生じ、結果として流速が低下することで、セメント注入量が伸びない。一方、 w/c が大きく濃度の薄いグラウトについては、セメント粒子数が少ないため、セメント粒子と流体間の相互作用による影響が小さく、比較的大きな流速を保つことができ、輸送能力は高いが、セメント粒子の絶対数が少ないため効率的な注入にはならないと考えられる。これらの結果から、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。

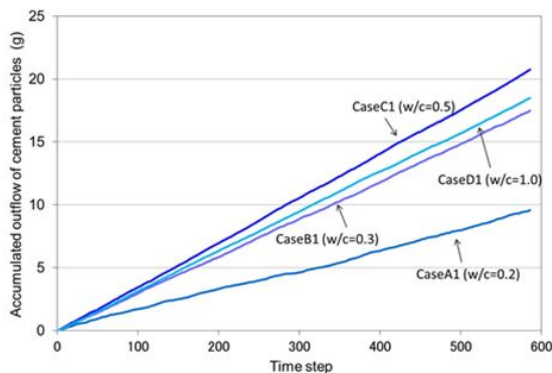


Fig.3 グラウト注入量の経時変化

(3) 粒子間作用力の導入

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には、粒子の凝集や沈殿といった作用が重要であると考えられる。そこで、粒子間に引力を作用させることによりこれらの作用を考慮した。Fig.4 に示すように、粒子間距離 l が最大距離 l_{max} より小さくなったときに、その粒間に引力 F を作用させる。引力 F は、粒子間距離に比例して小さくなり粒子が接触状態にあるときに最も大きく、最大距離 l_{max} より離れると $F=0$ になるとする。

Fig.5 は粒子間の引力を考慮する場合のセメント粒子の流動挙動を示す。本図に示すように、粒子間引力の存在によりセメント粒子が塊状となって流動している様子が見られる。粒子が塊状となっているため、前述した狭窄部入口での粒子によるアーチ構造が形成されやすくなる。さらに、粒子間引力の存在によりアーチ構造の強度も大きくなるため、結果として目詰まりが発生しやすくなることがわかった。

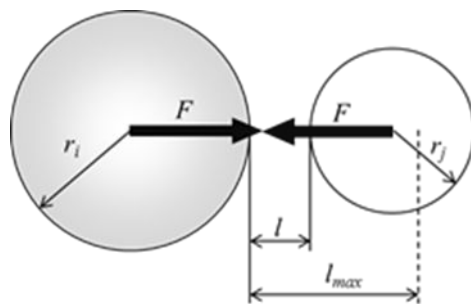


Fig.4 粒子間引力の導入

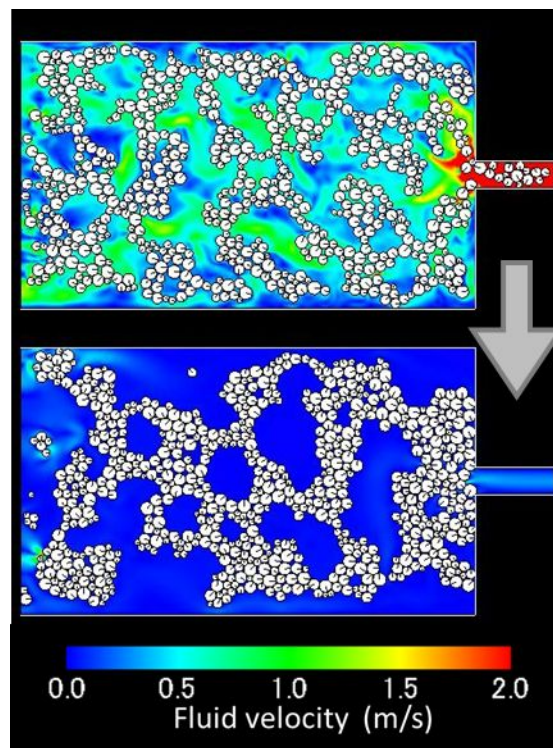


Fig.5 粒子間の引力を考慮する場合のセメント粒子の流動挙動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

清水浩之、小山倫史、セメントグラウトの浸透性に及ぼす粒度分布の影響に関する CFD-DEM 解析、Journal of MMIJ、査読あり、Vol.129、No.7、2013、513-519
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40019740553>

〔学会発表〕(計 6 件)

小山倫史、榊原慎也、清水浩之、CFD-DEM によるグラウト注入シミュレーション - 注入メカニズムの解明および効率的な注入条件の検討、第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木会館、2014 年 1 月 10 日

榊原慎也、小山倫史、清水浩之、CFD-DEM を用いたセメント系グラウトの注入解析 - 注入圧力・水セメント比による影響 -、第 48 回地盤工学研究発表会、富山国際会議場、2013 年 7 月 25 日

T.Koyama、S.Sakakibara、H.Shimizu、CFD-DEM simulation for grout injection test using parallel plate fracture、47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium、San Francisco、アメリカ、2013 年 6 月 26 日

榊原慎也、小山倫史、清水浩之、CFD-DEM を用いたセメント系グラウトの注入解析 - 亀裂開口幅・水セメント比による影響 -、平成 25 年度土木学会関西支部年次学術講演会、大阪市立大学、2013 年 6 月 8 日

清水浩之、小山倫史、粒子間力を考慮した粒子-流体連成解析によるグラウト目詰まり現象の検討、第 47 回地盤工学研究発表会、八戸工業大学、2012 年 7 月 15 日

H.Shimizu、T.Koyama、A.Draganovic、H.Stille、CFD-DEM simulation for filtration and penetrability of cement-based grout、EUROCK2012、Stockholm、スウェーデン、2012 年 5 月 30 日

〔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・流体化学研究所・助教
研究者番号：60610178