

格子ボルツマン法によるグラウチングの評価に関する基礎的研究

香川大学 ○岡田淳, フェロー会員 吉田秀典
富山大学 瀬田剛

1. はじめに

山岳トンネルやダム等の岩盤構造物の建設, 高レベル放射性廃棄物の地層処分事業などの岩盤空洞の利用に際して, 湧水に対する止水性を確保するための方策として, グ라우チングは重要な工法の一つである¹⁾.

空洞などを埋めるために注入する流動性の液体のことをグラウト(薬液)といい, グラウトを注入する作業をグラウチング(薬液注入)という. 上向きのグラウト施工や高粘性グラウトの使用時は, 薬液中の細粒分が亀裂の奥まで注入されず, 施工場所によっては十分な性能が得られない場合がある. グラウト工法において適切な効果を得るためには, 薬液の挙動を把握することが重要であるが, 実験的な手法では, 様々な特性を有する薬液のすべてについてグラウトの挙動を把握することは困難である.

そこで, 本研究では, 固液二相流解析を得意とする格子ボルツマン法(以下, LBM)をベースに, 特に, 細粒分の挙動に主眼を置いて数値解析的検討を行うこととした.

2. 格子ボルツマン法

2.1. 基礎理論

LBM とは流体を微小な仮想粒子の集合体として近似した領域に均一な格子を配置し, その格子に沿って衝突・並進といった粒子運動を追跡することで連続体としての流体の運動を計算する手法である. LBM の特徴として, コーディングおよびベクトル化・並列化の容易性, 境界条件の設定の簡便性, 混相流モデルへの拡張性の高さなどが挙げられる. なお, 本研究における格子形状には, 図1に示すような2次元9速度モデルを適用することとする. 格子点ごとに, ある方向の速度成分を持つ仮想粒子が存在すると考え, 各粒子はタイムステップが1つ進むと隣接した格子点に移動し, 同じ格子点に移動してきた粒子はお互いに質量を保存しながら衝突する. 仮想粒子の衝突および並進が繰り返されることで計算が進行する.

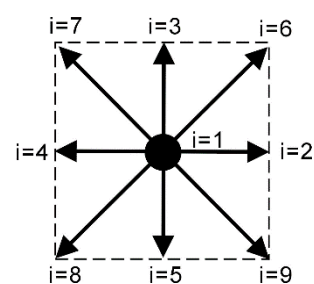


図1 2次元9速度モデル

2.2. 固液二相流への応用

二相の定義としては, それぞれの相を比較した場合, 密度が違うことと粘性係数が違うこと等が挙げられる. 固液二相流であるグラウト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, 地下水の亀裂内における浸透解析のような単相流の解析では対応が困難である²⁾. そこで, 瀬田らの提案する手法である, 埋め込み境界法を用いた Lattice Kinetic スキームを適用する. これは, 従来の計算手法において発生していた境界上の流速の滑りなどの問題を解決したものであるため, 固液二相流解析において精度の高い解析結果を得ることができる³⁾.

3. 実現象と比較した多粒子の沈降解析

本研究において構築された計算手法が, どの程度, 実現象の再現が可能かを検証するため, 単純なモデルを解析した. 実現象としては, ビーカーに純水を満たし, そこに豊浦標準砂を少量落とすことで, 純水中の砂粒子の沈降を表現する. 同時刻における, 実現象および解析による粒子位置を, 図2および図3に示す. 解析による粒子位置の時間変化が実現象の挙動と非常に類似したものとなり, さらに, 実現象にも見られたドラフティング・



図2 実現象による粒子位置

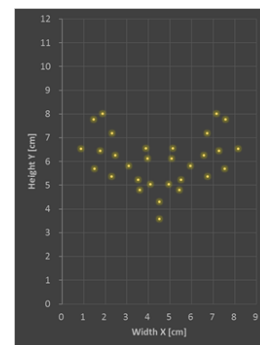


図3 解析による粒子位置

キッシング・タンブリング現象とよばれる複数の粒子間における相互作用の発生も見られたため、LBM を用いて固液二相流解析を行うことが可能であると判断した。

4. グラウトの注入圧力を考慮した解析結果

亀裂性岩盤へのグラウト注入における注入仕様は、仕様規定や現場の経験則より決定されているのが現状であるため、より合理的なグラウチングのためには、適切な注入仕様の確立が必要である。本章では、図4のようにトンネル背面の空洞に対する横向きのグラウト施工を簡易的に模擬し、パッカー内を想定した平行平板におけるグラウト注入の解析を行う。本研究では、LBM を用いて固液二相流解析を行っているが、現状では圧力と加速度の双方を考慮したパラメータの設定ができない。したがって、注入圧力としてのパラメータについては、簡易的に重力加速度の整数倍として定義し、その際にベースとなる圧力を基本注入圧力と呼び、水平方向にのみ与える。なお、垂直方向の加速度については、重力加速度のみを与え、横向きのグラウト注入を再現する。解析結果の一例として、水平方向にかける基本注入圧力を変化させた場合における同時刻の粒子位置を図5、図6に示す。解析結果より、基本注入圧力を大きくすると粒子は遠くへ到達することがわかる。このことから、横向きのグラウト施工において注入圧力とみなした横向きの加速度を変化させた場合についても一般的な傾向がみられた。

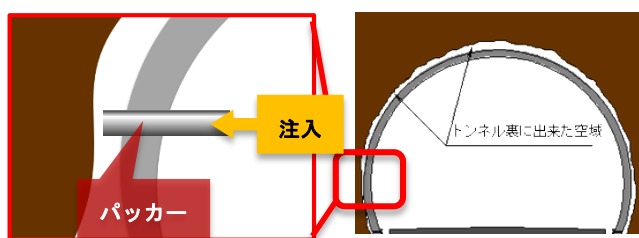


図4 トンネルにおける横向きグラウト施工の概念図

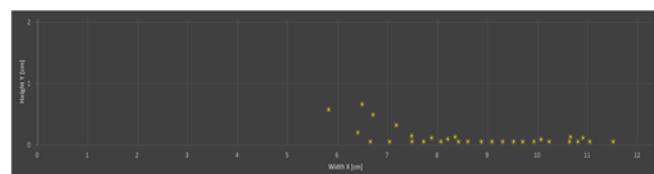


図5 粒子位置（水平方向に基本注入圧力を与える）

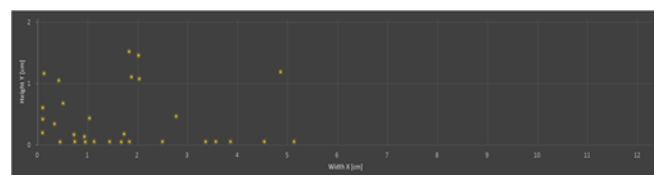


図6 粒子位置（水平方向に6倍の基本注入圧力を与える）

5. まとめ・今後の課題

本研究では、薬液としてセメントスラリーやベントナイトスラリーのようなスラリー状の固液混合物を想定し、パッカー内に薬液の液相部を満たした状態から固相部を圧入する際の固液二相流における粒子群の挙動について評価を行うことを目的として解析を行い、概ね実際の現象を再現できた。しかしながら、本研究では、平行平板内における固液二相流の挙動に関する単純なモデルを用いており、さらには加速度を注入圧力として簡易的に定義しているため、実現象を完全に模擬しているとは言いがたい。したがって、今後の課題としては、LBM については、本来の注入圧力をパラメータとして組み込む必要があることと、粒子同士の距離を考慮して粒子間に与える仮想的な反発力を変化させるようプログラムを改良することが挙げられる。

さらに、今回の研究では、著者らが所有する計算機のうち最も容量の大きなもので解析を行ったが、これより解析容量の大きいスーパーコンピュータなどを用いることで、より多くの粒子数や、より大きなサイズの平行平板、複雑な亀裂形状を用いて解析することができ、その結果、目詰まり現象等の実現象をうまく表現できると考える。

参考文献

- 1) 柴田功：ダム基礎岩盤用セメントグラウトの細管における流動特性，土木学会論文集，No.453，V1.17，pp.107-116，1992.
- 2) 大槻敏：格子ボルツマン法と個別要素法を用いた固液二相ハイブリッドシミュレーションの資源工学分野への応用，京都大学大学院博士学位論文，p.68，2010.
- 3) 瀬田剛，吉田秀典：埋め込み境界法を用いた Lattice Kinetic スキームによる非ニュートン流体内部固液二相流解析，計算数理工学論文集，Vol.14，pp.25-30，2014.