

## グラウト工法の効果の評価を目的とした亀裂内固液二相流解析

香川大学 学生会員 ○安岡佐知子  
香川大学 フェロー 吉田秀典

### 1. はじめに

現在、我が国では数多くのインフラ整備が行われており、山岳トンネルやダム等の岩盤構造物の建設および放射性廃棄物の地層処分事業等の岩盤空洞の利用の際に、湧水に対する止水性や基礎岩盤の改良を行う手法として、グラウチングは極めて重要な工法の一つである。岩盤内の亀裂にグラウトを充填することで、岩盤の力学的特性および遮水性を改良することを目的としている。

一方、岩盤内は多数の不連続面が内在し、亀裂形状は不規則であることから、グラウト細粒分が岩盤亀裂内でどのように挙動し、かつ、どのように目詰まりが発生するかについては依然、不明な点が多く適切な注入圧力の設定が難しいのが現状である。グラウト工法において効率の良い施工をするには、グラウト細粒分の挙動を把握することが重要であるが、対象とする岩盤内亀裂の形状が多様であるため、グラウト注入のメカニズムが十分に解明されておらず、全ての亀裂形状のパターンを把握することは困難である。そこで、本研究では、単相流である亀裂内浸透流解析という視点ではなく、細粒分も解析に反映させた固液二相流解析を実施するために、粒子群の挙動の追跡が可能な解析ツールである OpenFOAM を用いる。その上で注入圧力や細粒分の粒径および粒子数が与える影響について考察することを目的とする。

### 2. 解析手法

#### 2.1. OpenFOAM

OpenFOAM は、圧縮・非圧縮流体の定常および非定常解析や、混相流解析等の様々な流体解析を行うことが可能な 3 次元流体力学解析ツールである。計算手法として有限体積法を中心としているため、収束性しやすく計算時間を短縮できる。また、OpenFOAM の標準ユーティリティである blockMesh を使用することで任意のメッシュ作成や細かい制御が可能な上、安定して計算を行うことができるため、本研究ではこれを採用した。

#### 2.2. 格子形状

OpenFOAM では、常に 3 次元直交座標系で動くため、全てのジオメトリを 3 次元で生成する。メッシュ生成においてブロック頂点の座標配置は極めて重要である。点は、3 次元空間における位置であり、メー

ル単位のベクトルによって定義される。図 1 のように、任意の多角形の面に囲まれた 3 次元で定義される任意の多面体セルによってメッシュを定義するため、セル面の数は無制限であり、その面においても辺の数は無制限で配列についても制約がなく、非常に汎用性が高い。

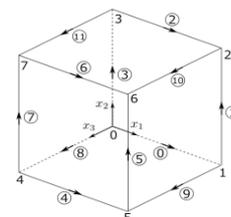


図 1 メッシュのブロック構造

### 3. 準備解析

本章では、解析ツール OpenFOAM を用いて、どの程度、実現象が再現可能であるかを検証する。今回は単純なモデルを作成し、粒子を自由落下運動させることで反発係数を検証した。壁の反発係数をそれぞれ  $r=1$  (完全反射) と  $r=0$  (不完全反射) と設定し物理現象に叶っているかを確認する。同時刻における解析結果を図 2 および図 3 に示す。

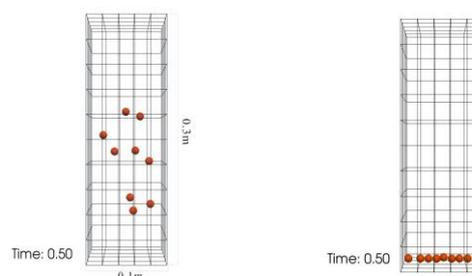


図 2 反発  $r=1$  ( $T=0.5s$ ) 図 3 反発  $r=0$  ( $T=0.5s$ )

解析結果より、図 2 の反発係数  $r=1$  は落下前の初期位置とほぼ同じ位置まで粒子が反発した。一方で、図 3 の反発  $r=0$  では、底面に落下した際に全く反発しなかった。また、自由落下運動の公式に距離と時間の値を代入して手計算を行うと、概ね同等の値となった。よって、実現象の挙動で見られる一般的な傾向と類似している点も多く、解析結果は概ね妥当であると考えた。

### 4. 亀裂内固液二相流解析

岩盤内亀裂は形状が多様であるため、グラウト注入のメカニズムが十分に解明されておらず、実際の施工の際には、過去の工事によって得られたデータを基に作成された規定や技術者の経験則によって行われているのが現状である。本研究では、亀裂内固液二相流解析ということで、実際のグラウチングを簡易的に

模擬し、亀裂内におけるグラウトの注入圧力を考慮した粒子の挙動解析を行う。解析ツールとして OpenFOAM を用いるが、形状を複雑にして検証を行うことから計算は発散しやすい傾向があるため、これを回避するために複数のグラウト薬液のパラメータを用いるのではなく、計算が安定しやすいように単一流体（本解析では水のパラメータを用いる）のみを扱う。また、固液二相流のいずれにも初期条件として、流速を与えるのではなく注入圧力のみで粒子の挙動を追跡するものとする。

解析結果の一例として、複雑な亀裂内における注入圧力を変化させ、同時刻の粒子位置を注入圧力が  $100\text{m}^2/\text{s}^2$  を図 4、注入圧力が  $1000\text{m}^2/\text{s}^2$  を図 5 にそれぞれ示す。

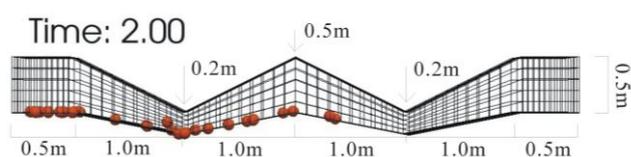


図 4 粒子位置の時間変化 ( $P: 100$ ,  $T: 2.0\text{s}$ )

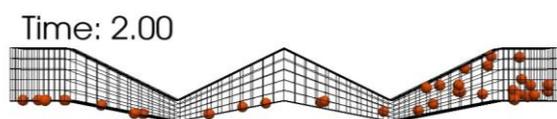


図 5 粒子位置の時間変化 ( $P: 1000$ ,  $T: 2.0\text{s}$ )

解析結果より、注入圧力を大きくすると粒子は亀裂の奥へ速く到達することがわかる。このことから、グラウト施工において注入圧力を変化させた場合は適切な傾向がみられた。

次に、目詰まりの検証についての解析を行った。亀裂内で目詰まりが発生するとグラウト材の液相部のみが亀裂最深部に到達し、細粒分は到達していない状態になると、グラウチングの十分な性能が得られない。そこで、グラウト細粒分の粒径と粒子数に着目し、解析結果を図 6、図 7 に示す。

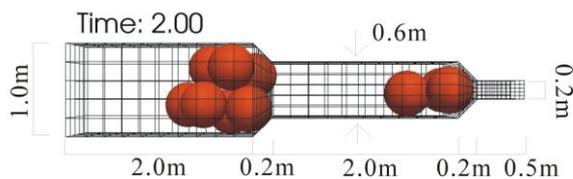


図 6 粒子の目詰まり状況 (粒径:  $0.5\text{m}$ ,  $T: 2.0\text{s}$ )

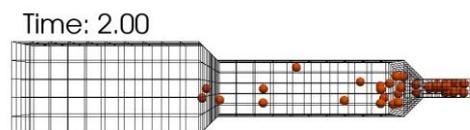


図 7 粒子の目詰まり状況 (粒径:  $0.1\text{m}$ ,  $T: 2.0\text{s}$ )

図 6 より、粒径が大きいと途中で目詰まりが発生

し、液相部のみが最深部に到達している。一方で、図 7 より、粒径を小さくすると、全ての粒子が最深部まで到達していることがわかる。つまり、目詰まり現象に直接的な関係があるのはグラウト細粒分の粒径であることが解析結果よりわかった。

## 5. まとめ・今後の課題

本研究では、グラウトの亀裂内を想定した固液二相流解析を行った。1つ目は、複雑な亀裂内においてグラウトの注入圧力のみを変化させて粒子の挙動を確認した。解析結果より、注入圧力が小さいと粒子は亀裂の最深部まで到達せずにくぼみに停滞していたが、圧力を大きくすると、ほとんどの粒子はくぼみに停滞することなく最深部に到達した。2つ目は、目詰まりが発生する条件を検証する。粒径を大きくして粒子数を少なくしたパターンと、粒径を小さくして粒子数を増やしたパターンでそれぞれ解析を行った。解析結果より、粒径が大きいと途中の開口部で粒子が詰まり、液相部のみが最深部に到達している。一方で、粒径が小さいと粒子数も多くとも途中で目詰まりすることなく細粒分と液相部が最深部まで到達した。つまり、目詰まり現象の原因としては、粒径の大きさが最も関係していると思う。そのため、実際の工事を行う際にもグラウト材の粒径を配慮することで目詰まりを発生させることなく、適切なグラウチングが行えるのではないかと考える。

今後の課題として、メッシュ作成において非常に複雑な形状を作成して同様に解析を行おうとすると、粒子が非現実的な挙動を示し、一瞬で解析が発散してしまったため、最後まで解析を行うことができなかった。そのため、メッシュ作成は標準ユーティリティである blockMesh ではなく CAD を用いて円管メッシュや、現実の施工で見られるような形状のメッシュを詳細に作成して解析を行う必要がある。また、今回の研究では設定しなかったが、本来のグラウト材における液相部は非ニュートン流体であるため、これを用いることでより現実的な固液二相流解析が行えるのではないかと考えた。

## 参考文献

- 1) 延藤遵ほか：注入圧力によるグラウトの目詰まり現象抑制効果，土木学会論文集 C, Vol.64, No.4, pp.813-832, 2008
- 2) 宇津木慎司：グラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関する実験的研究，京都大学学術情報リポジトリ, pp.1-26, 2012