

CFD-DEM を用いたセメント系グラウトの注入解析—粒度分布・平均粒径による影響

京都大学大学院 工学研究科 学生会員 ○榊原 慎也, 正会員 小山 倫史
 東北大学 流体科学研究所 正会員 清水 浩之

1. はじめに

グラウチングは岩盤や土壌の遮水性・強度の向上を図る技術であるが、注入過程の把握が困難なため施工における注入条件は現場技術者の経験に依っている。そこで、本研究ではグラウチングにおける効率的な注入条件の設計を目的として、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) と粒状体個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) を組み合わせた 2 次元数値解析手法を用いて、セメント系グラウトの注入過程のシミュレーションを実施した。その際、グラウト材の粒度分布・平均粒径が効率的なグラウト注入に与える影響およびフィルトレーション・目詰まりの発生機構について検討した。

2. 解析手法

グラウト中のセメント粒子の挙動は DEM により計算した。DEM は、粒子の運動を追跡しつつ、接触状態にある粒子を検索し、フックの法則とニュートン第 2 法則を細かいタイムステップで適用し、モデル化された全ての粒子の運動軌跡を計算する手法である¹⁾。また、非圧縮性流れに対する Navier-Stokes 方程式を有限差分法により離散化することで、グラウトの流体部分の流れを計算した。さらに、セメント粒子と流体の相互作用力を考慮するため、体積力型埋め込み境界 (Immersed Boundary, IB) 法を用いた²⁾。IB 法は、流体流動を計算する格子内に占める粒子体積率の関数で表した体積力により、粒子内部にある格子点の速度を強制する手法である。解析手法の詳細は文献³⁾に譲る。

3. 解析モデル

本研究では、解析モデルとして、Draganovic and Stille⁴⁾によって実施された、2 枚の平行平板を用いて岩盤亀裂を模擬した“short slot”と呼ばれる室内グラウト注入実験を対象とした。図 1 に示すようにモデルの左端を流入側、右端を流出側とし、注入圧力 P_{in} は 1.5MPa、流出側の圧力 P_{out} は 0MPa、流出側の亀裂開口幅は 100 μ m とした。また、W/C (水・セメント質量比) は 0.5 で一定とした。

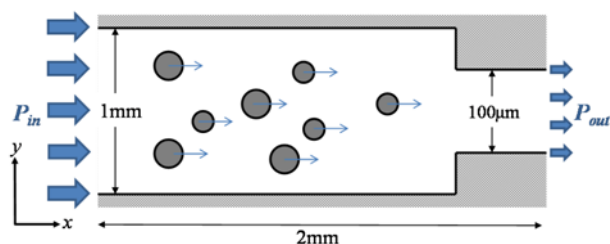


図 1. 解析モデル

セメント粒子の注入位置および直径は乱数によってランダムに決定し、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、注入セメント量を評価した。また、セメントの平均粒径を 35 μ m とし、最小-最大粒径をそれぞれ 20-50 μ m, 25-45 μ m, 30-40 μ m の間で一様に分布するとして 3 パターンに加えて、20 μ m, 35 μ m, 50 μ m で均一とした 3 パターンについて解析を行った。

4. 解析結果と考察

まず、各粒度分布について累積注入セメント量の比較を図 2 に示す。本図において、粒度分布幅 25-45 μ m のケ

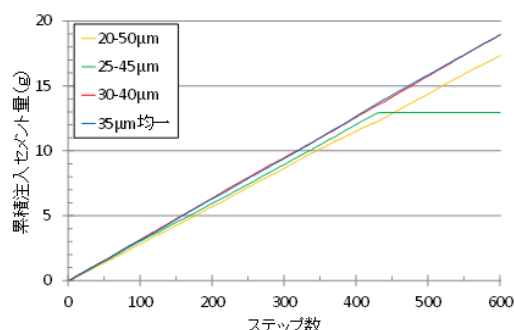


図 2. 各粒度分布の累積注入セメント量

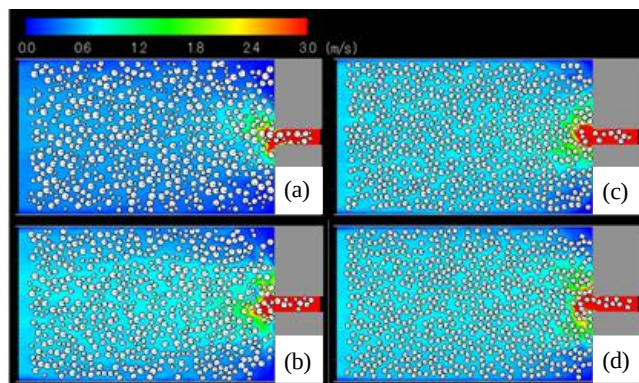


図 3. 各粒度分布の流速分布,

a) 20-50 μ m, b) 25-45 μ m, c) 30-40 μ m, d) 35 μ m 均一

キーワード グ라우チング 数値流体力学 粒状体個別要素法

連絡先〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科ジオフロントシステム工学講座 TEL 075-383-3306

ースで累積注入セメント量が一定となっていることからフィルトレーション・目詰まりが確認できるが、それ以前のステップでの累積注入セメント量を見ると粒度分布幅 20-50 μm と 30-40 μm の間にあることがわかる。このことから、粒度分布幅が大きいほど、累積注入セメント量が減少していることがわかる。図 3 は各粒度分布における流速分布であり、本図より粒度分布幅が大きいほど流速が小さいことがわかる。これは、粒径が大きな粒子ほど、流体との接触面積が増え、流体との相互作用力が大きくなるため、流速が低下すると考えられる。また、粒径が大きな粒子ほど、図 4 のようなアーチ構造が形成されやすく、その際一時的に流速が低下する。アーチ構造の形成および解消が断続的に繰り返されることで、累積注入セメント量が減少すると考えられる。一方、粒度分布幅が小さい場合、亀裂入口でアーチ構造を形成することが少なく、流体は高い輸送力を保ったまま流れ続けるため、より多くのセメントを注入できると考えられる。

次に、各平均粒径について累積注入セメント量の比較を図 5 に示す。本図から平均粒径の小さい 20 μm のケースにおいて、累積注入セメント量が最も多いことがわかる。図 6 は各平均粒径における流速分布であり、平均粒径が小さいほど流速が大きいことがわかる。本検討では、W/C は一定であり、モデル内のセメントの総重量は等しい。よって平均粒径が小さいほど、セメント粒子の数が多くなり、粒子同士が衝突する機会が増加することで、流体に局所的な乱れが生じて流速が低下すると考えられる。一方、平均粒径が大きい場合、流体との接触面積が増え、流体との相互作用力が大きくなるため、流速が低

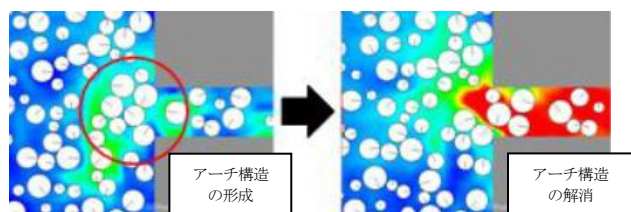


図 4. 浸透過程

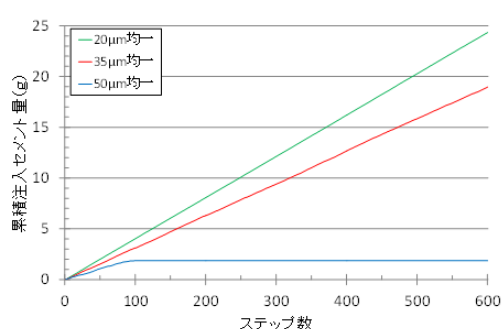


図 5. 各平均粒径の累積注入セメント量

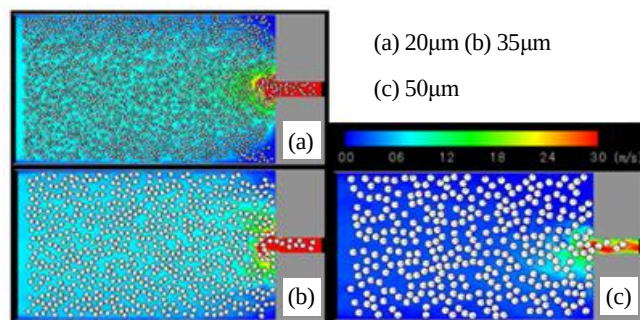


図 6. 各平均粒径の流速分布

下すると考えられる。以上のことを踏まえて、平均粒径 20 μm のケースの流速が平均粒径 35 μm のケースより大きいことから、流速の低下にはセメント粒子同士の衝突よりも流体とセメント粒子の相互作用による力が支配的であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、CFD-DEM を用いたグラウト注入解析を実施し、フィルトレーション・目詰まりの発生機構について検討し、粒度分布・平均粒径が効率的なグラウト注入に与える影響について調べた。まず、粒度分布幅を小さくする、すなわち、粒径を均一にすることで、流速を低下させる要因となる粒径の大きなセメント粒子と流体の相互作用力を低減することができ、より効率的なグラウト注入となることを示した。次に、平均粒径が小さいほど亀裂入口でのフィルトレーション・目詰まりの可能性が小さくなる。さらに、流体との接触面積の減少により、流体が個々のセメント粒子から受ける力が小さくなるため、流れが乱れることなく高い輸送力を保つことができ、結果としてより多くのセメントを注入することができ、より効率的な注入となることがわかった。

参考文献

- 1) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1979; 29(1): 47-65.
- 2) Kajishima, T. and Takiguchi, S.: Interaction between particle clusters and particle-induced turbulence, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 2002; 23(5): 639-646.
- 3) Shimizu, H., Koyama, T., Draganovic, A. and Stille, H.: CFD-DEM simulation for filtration and penetrability of cement-based grout, *In: Proc. of EUROCK2012*, Stockholm, Sweden, 28-30, May, 2012: Paper ID: 90, 1-14.
- 4) Draganovic, A. and Stille, H.: Filtration and penetrability of cement-based grout, Study performed with a short slot, *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 2011; 26: 548