# CFD-DEM によるセメント系グラウトの動的注入の シミュレーションおよび最適な注入条件の検討

# 保木 勇介<sup>1</sup>·小山 倫史<sup>1\*</sup>·清水 浩之<sup>2</sup>

#### <sup>1</sup>関西大学社会安全学部(〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-1) <sup>2</sup>東北大学流体科学研究所(〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1) \*E-mail: t-koyama@kansai-u.ac.jp

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.近年,効率的かつ効果的なグラウト注入が社会的な要請となっており,さまざまな注入工法が検討されている.注入圧を脈動させて注入を行う動的注入はその一つである.しかし,注入過程の把握が困難なため施工における注入条件(注入圧の振幅や周波数など)は現場技術者の経験に大きく依存しているのが現状である.そこで本研究では,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次元数値シミュレーションにより,動的注入時のセメント系グラウトの浸透メカニズムの解明をとおして,動的注入における最適な注入条件について検討する.

*Key Words* : grouting, dynamic injection, computational fluid dynamics (CFD), Distinct Element Method (DEM), numerical simulation

## 1. はじめに

グラウチングはグラウト材を岩盤亀裂へ加圧注入する ことで岩盤や土壌の遮水性・強度の向上を図る技術であ る. グラウチングは、トンネル掘削やダム建設など、地 下空間を利用する様々な場所で利用されており、放射性 廃棄物地層処分場への適用もその一つである.

近年、建設サイトの地質条件の多様化に加え、環境負 荷の低減などの社会的要請により、効率的かつ効果的な グラウチングが求められている. すなわち, グラウト材 を改良が必要な範囲により多く短時間で注入でき、その 結果、所定の遮水性および力学強度を発揮すること、さ らに、注入予測・注入効果の検証ができることが必要と されている. グラウト注入に際しては、欧米とわが国で は配合・注入圧の設計において基本的な考え方に相違が みられ、亀裂が少なく比較的強固な岩盤が多く分布する 欧米では、高濃度のグラウト(例えば、水・セメント重 量比,W/C=0.5程度)を高圧で注入する傾向にあり,一 方,多数の亀裂を含む岩盤が広く分布するわが国では, 低濃度のグラウトを比較的低圧で注入するのが一般的で ある. また, わが国でも高濃度のグラウトを低圧で注入 する高濃度-低圧型グラウチング工法(HTLP工法)の 有用性も検証されている<sup>1</sup>. 一方, 効率的にグラウチン グを行うため、注入中にW/Cが大きいものから小さいも

のへ段階的あるいは連続的に変化させる配合切替<sup>3</sup> (W/Cが大きいほどグラウトは高濃度となり,通常, W/C=10,8から注入を開始しW/C=6,4,2,1と変化させ る)や注入圧力を5~30Hz程度で規則的に脈動させる動 的注入<sup>359</sup>といった新しい注入技術も適用されており,

それぞれ有用性が報告されている.

しかし、グラウチングは地中の注入孔から複雑な岩盤 の割れ目あるいは地盤に注入するため、グラウト注入効 果の検証は容易ではない.グラウト注入過程において、 種々の物理・化学的現象が複雑に絡み合っており、グラ ウトの注入・浸透・閉塞(目詰まり、フィルトレーショ ン)の過程・メカニズムは未だ十分に解明されていない. したがって、注入圧力・配合などの施工パラメータに関 しては、論理的な裏付けがなく、未だ現場技術者の経験 に依存しているのが現状である.

本研究では、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)と粒状体ベースの個別要素法(Distinct Element Method, DEM)を組み合わせた2次元数値解析手 法(CFD-DEM)<sup>®</sup>を用いて、動的注入時のセメント系グ ラウトの浸透メカニズムの解明をとおして、動的注入に おける最適な注入条件(注入圧力の振幅および周波数の 組み合わせ)について検討を行った.

## 2. 解析手法および解析モデル

#### (1) CFD-DEMの概要<sup>6</sup>

本研究で用いる計算手法では、グラウト材のうち、セ メント粒子の挙動は個別要素法 (DEM) <sup>7</sup>により計算す る. 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、全ての粒子の運動軌跡 を計算する手法である".一方,グラウト材の流体部分 に関しては、岩盤亀裂中の流れを数値流体力学(CFD) を用いて解析する. 非圧縮性流れに対する支配方程式で あるNavier-Stokes方程式を直角座標系でのスタッガード 格子を用いて、有限差分法により離散化し、フラクショ ナルステップ法8%を用いて、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 力については、体積力型埋め込み境界法 (Immersed Boundary method, IB method)<sup>10</sup>を用いた.体積力型埋め込み 境界法では、粒子-流体間の境界を取り扱う方法として、 流体流動を計算するセルと呼ばれ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.以上,解析手法の詳 細(定式化など)については、文献のに譲る.

#### (2) 解析モデルおよび注入条件

解析対象は, Draganovic and Stille<sup>11)</sup>によって実施された 岩盤亀裂を模擬した2枚の平行平板(円盤)を用い た"short slot"と呼ばれる室内グラウト注入実験(図-1参 照) である. この実験ではグラウト注入孔から岩盤亀裂 にグラウトが浸透する入口の急縮部において発生する目 詰まりの現象の把握および各種注入条件(セメント粒子 の粒度分布,W/C,注入圧力, 亀裂狭窄部の形状および 分散剤の有無など)がグラウト注入量に与える影響につ いて評価することを目的としている.本解析では、実際 の注入実験装置のうち、岩盤亀裂にグラウトが浸透する 入口の急縮部 (図-1 中の点線内) のみをモデル化した (図-2 参照).上下 2 枚の剛体壁により構成され、幅 2.0mm (x 方向), 高さ 1.0mm (y 方向) である. x, y 方 向の格子数はそれぞれ 200, 100 とし,格子は幅 10µmの 正方形とした. モデル右端の狭窄部の長さは 300um と し、狭窄部の開口幅は 100µm に固定した.動的注入の圧 力に関するパラメータには、定常圧とそれに付加する振動 圧の振幅および周波数がある.本検討では、注入圧力につ いて, 定常圧を 1.5MPa とし, 振動圧の振幅を±0.5, ± 1.0, ±1.5MPaの3パターン,周波数を25,50,100, 200Hzの4パターンを考慮(計12ケース)し、モデル左 端に注入圧力 Pm として作用させた. なお, 右端の流出 圧力 Pout to MPa とした. 解析に用いたパラメータを表-1にまとめる. なお, グラウトの W/C (水・セメント質



図-1 "Short-slot" 室内実験装置の概略図 10/こか準



図-2 解析モデルおよび境界条件

表-1 解析に用いたパラメータ

$P_{\rm in} = 1.5$	$\pm 0.5, 1.0, 1.5$ (MP	a) 粒子の密度	$=3150 (kg/m^3)$
$P_{\text{out}} = 0.0 (\text{MPa})$		粒子のヤング率	= 500 (MPa)
	米	立子のポアソン比	= 0.3
流体の粘性	$= 1.0  (mm^2/s)$	最小粒径/セル	= 5.0
流体の密度	$=1000 (kg/m^3)$	最小粒径/セル	= 2.0
		壁のヤング率	= 1000 (MPa)
格子分割数	=200×100	壁のポアソン比	=0.3



図-3 グラウト注入圧力の経時変化

量比)は 0.5 で固定し、粒子の直径は最小・最大粒径 20µm・50µmの間を一様に分布するものとした. セメン ト粒子には重力および流体から受ける力のみを作用させ、 亀裂の壁面における吸脱着および、注入中のセメント粒 子同士の電気的反発、凝集・結合などの化学反応は考慮 しないものとする. 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.計算タイムステップは 5×10<sup>5</sup>sec とし、解 析結果は図-3 に示すように全ての周波数において 800 ステップで周期的に 1.5MPaに到達することから、800 ス

# 3. 解析結果

図-4 に周波数が 200Hz,振幅が±1.5MPa のケースの 流速分布の変化(すなわち,0,1.5,3.0MPa 時の流速分 布)を示す.本図より,注入圧力は周期的に流体に伝わ っており,注入圧力が高くなるほど流体の流速が大きく なる.

次に、各振幅において振動数を変化させた場合の累積 注入セメント量を図-5に示す.本図では、静的注入、す なわち注入圧が1.5MPaで一定で注入したケースもあわせ て示す.本図より、動的注入のケースでは注入圧力の変 化に合わせて、注入セメント量も脈動していることが分 かる.表-2に脈動している注入セメント量に対して、線 形近似したグラフより800ステップ時点での注入セメン ト量を計算し、静的注入における注入セメント量と比較 したものを示す.線形近似においては、各ステップでの 累積注入セメント量との差の二乗和が最小となるように 原点を通る近似直線を引き傾きを決定した. 800ステッ プ直前で目詰まりが生じたケース(周波数が100Hz,振 幅が±0.5MPaのケースおよび周波数が100Hz,振幅が± 1.0MPaのケース)については目詰まりが生じる以前のス テップまでの注入セメント量で線形近似を行った.また, 早い段階で目詰まりが生じたケース(周波数が200Hz, 振幅が±1.0MPaのケース)については線形近似を行わな いこととした(表-2において×印がついているのはその ためである). なお、本表で網掛けした各ケースにおい ては、静的注入よりも注入セメント量が多くなっている ことを示す. 本表より, 注入圧の振幅が大きくなるほど 注入セメント量が減少していることが分かる. 図-6に周 波数が200Hz,振幅が±1.5MPaのケースにおけるセメン ト粒子の速度ベクトルを示す.本図より,注入圧力が小 さくなる時に速度ベクトルが通常流れる方向(モデルの 左から右へ)ではなく,逆方向や重力方向に向いている 粒子が存在していることがわかる. これは、注入圧力が 低下するにつれて流速も低下し、その結果、粒子の速度 も小さくなるためである.特に、本ケースでは瞬間的に 注入圧力がゼロとなり、セメント輸送能力が大幅に低下 するとともに、セメントの移動速度も限りなくゼロに近 づく. その後, セメント粒子の速度ベクトルを通常の方 向に戻すためには、流体からセメント粒子に対して力を 与える必要がある.このとき、流体に対しても粒子から の抵抗力が発生するため、流体の流れが妨げられる. そ のため、振幅が大きい場合、全体として流速が小さくな り、注入セメント量も減少すると考えられる.また、表 -2より,振幅が大きい場合(±1.0MPa, ±1.5MPa),周



図-4 流速分布の変化(周波数: 200Hz,振幅:±1.5MPaの場合), a)00 MPa時, b)1.5 MPa時, c)3.0 MPa時.



図-5 各振幅における注入セメント量の経時変化, a) 0.5 MPa, b) 1.0 MPa, c) 1.5 MPa.

表-2800ステップ時点での注入セメント量.

振幅	周波数(Hz)				
(MPa)	25	50	100	200	
$\pm 0.5$	23.23	23.51	23.03	23.10	
±1.0	23.94	23.18	22.65	×	
±1.5	22.95	22.18	21.61	21.18	
				単位:g	

静的注入: 22.82(g)

波数が大きくなるほど注入セメント量が減少しているこ とが分かる.振幅が大きいほど,先述したように,粒子 の速度が大きく低下し,再び粒子の速度を戻すために流 体にも抵抗力が発生する.周波数が高い場合,低圧にな る頻度が多くなるため,流体の流れが妨げられる回数も 多くなり,注入セメント量が減少したと考えられる.

図-7に周波数が200Hz,振幅が±1.5MPaのケースの累 積注入セメント量を示す. 本図の赤丸で囲まれたステッ プにおいて、短いタイムステップ間ではあるが、目詰ま りが発生したものの、注入圧の変化(減圧)により粒子 のアーチが解消されている.静的注入の場合, 亀裂入り 口部において複数のセメント粒子がアーチを形成し、そ の後ろにセメント粒子が堆積し始めると、アーチは成長 し目詰まりが発生する.しかし、動的な注入圧力を作用 させた場合、粒子のアーチ形成後、注入圧力の変化によ りアーチの解消が確認された. 図-8に目詰まりが解消さ れる際の流速分布の変化を示す.本図より、注入圧が減 少したときに亀裂入口付近でセメント粒子によって形成 されていたアーチ構造が破壊される様子が分かる. 図-9 に複数のセメント粒子によって形成されたアーチにおけ る粒子間接触力の変化を示す. 亀裂入り口部において, セメント粒子のアーチが形成されると、その後も流れて くる流体およびセメント粒子による力が粒子に作用し, アーチに作用する粒子間接触力が増大する.しかし、動 的注入において、注入圧力が小さくなる瞬間が存在する と、アーチに作用していた粒子間接触力が弱くなり、セ メント粒子が回転・移動し、応力の伝達経路が変更され ることで、アーチ構造が解消され、セメント粒子が押し 流される.静的注入の場合には、常に一定の圧力がかか るため、一度、目詰まりが生じるとアーチに作用する粒 子間接触力は増加する一方で、目詰まりが解消されるこ とはないものと考えられる.

次に、静的注入と動的注入における目詰まりの発生回 数について検討した. すなわち, それぞれの注入方法に 対して、本節と同様のモデルのもとで、セメントの初期 注入位置を変更した解析を行った.動的注入において最 も効率的であった周波数・振幅がそれぞれ、50Hz・± 0.5MPaのケースについて、セメント粒子の初期注入位置 を変更した10ケースの解析を実施した. なお、初期位置 は乱数によりランダムに決定される. その他の解析パラ メータは変更せず、静的注入では500ステップまで、動 的注入は 1000ステップまで解析した. ここで, 動的注 入と静的注入では、セメント粒子の初期流入位置は同じ であることに留意する.図-10に静的・動的注入におけ る累積注入セメント量それぞれを示す.本図より、目詰 まりのは静的注入では8回、動的注入では3回発生してお り、動的注入により目詰まりの発生回数が大幅に減少し、 目詰まりが抑制されたといえる.なお、本図において、



図-6 セメント粒子の速度ベクトル(周波数:200Hz,振幅:±1.5MPaのケース), a)高圧時, b)低圧時.



図−7 注入セメント量の経時変化(周波数:200Hz,振幅: ±1.5MPaのケース).



図-8 目詰まりが解消される際の流速分布の変化(周波数: 200Hz,振幅:±1.5MPaのケース).



図-9 目詰まりが解消される際のアーチ部における粒子間 接触力の変化(周波数:200Hz,振幅:±1.5MPa).



図-10 累積注入セメント量の経時変化の比較, a) 静的注入 (注入圧力: 1.5MPa), b) 動的注入(平均注入圧: 1.5MPa,周波数: 50Hz,振幅: ±0.5MPa)

累積注入セメント量が頭打ちになっていることが目詰ま りを表している.

最後に、伊達ら<sup>5</sup>が行った低透水性岩盤への動的注入 実験の結果とあわせて、動的注入における注入条件(周 波数・振幅) について考察する. 本実験では, 動的注入 時の周波数として0,5,10,20,30Hzについて検討しており, 低周波数(5,10 Hz) ほど注入効率が高くなり、逆に高 周波数(20,30Hz)では、注入効率が低下する傾向を示 している.この結果を本解析と比較すると、周波数が高 くなると注入効率が低下する点で定性的な一致が見られ る. ただし、本解析では25Hzよりも小さい周波数につ いては計算ステップが多くなり、計算時間が大幅に増加 することから検討していない. 今後, 周波数の小さいケ ースについて検討する予定である.また、伊達らりは動 的注入時の振幅について、注入圧力の最小値を固定し、 最大値を変化させることで、振幅と注入効率との関係を 調べている.本解析では、各周波数に対して振幅を与え て解析を行ったが、振幅を大きくしてもそれに比例して 注入効率が上がるとは限らない。むしろ、振幅は小さい 方がより効率的であることが分かった.このことは、実 験より得られた結果と異なるが、本論文と振幅の与え方 が異なる(平均注入圧が実験では変動するが、本解析で は一定である)ため、単純な比較は困難である.

#### 4. まとめ

本論文では、数値流体力学と粒状体個別要素法を組み 合わせた2次元数値シミュレーションにより、微視的な 観点から、動的注入時のセメント系グラウトの浸透メカ ニズムについて解明し、動的注入における注入条件(周 波数,振幅の組み合わせ)について検討した.以下に、 本研究より得られた知見をまとめる.

- 動的注入を用いることで目詰まりの解消・抑制が見られ、注入セメント量としても静的注入よりも効率的であった。
- 動的注入においては、一度、目詰まりが発生しても 変動する注入圧により(特に、注入圧が減少する 際)、亀裂入り口付近で形成されていいたセメント 粒子のアーチに作用する粒子間接触力が減少し、粒 子が回転・移動することで目詰まりが解消される。
- 注入圧に大きな振幅および高い周波数を与えた場合は、注入セメント量は伸びず、静的注入よりもむしろ少ない注入量となり、効率的なグラウト注入には、注入圧において最適な振幅・周波数の組み合わせが存在することがわかった。
- 本解析手法のような微視的な観点からの検討により、 様々な注入工法・亀裂形状での効率的な条件を検討 することが可能である.

また、今後の課題としては以下の点が挙げられる.

- 本解析は2次元であるため、目詰まりが発生すると 同時に注入セメント量が頭打ちとなるが、実際の現 象は、目詰まりが発生すると流出側で徐々にグラウ トの濃度が薄くなり、最後に目詰まりが発生する.
  このような現象を忠実に表現するためには、3次元の解析<sup>10</sup>が必要である.
- 本研究では、亀裂の壁面における吸脱着および、注入中のセメント粒子同士の電気的反発、凝集・結合などの化学反応は考慮していないが、これらが目詰まりの発生機構や注入セメント量やに与える影響を調べる必要がある。

#### 参考文献

- 武藤光, 菊池宏吉, 水戸義忠, 鈴木哲也, 平野勇:高 濃度-低圧型グラウト注入工法(HTLP 工法)の提案 と検証, ダム工学, Vol.9, No.3, pp.201-214, 1999.
- 2) 青山太洋,秋山謙,中村剛,小林翼:滝沢ダムの基礎処理 工における新技術(逐次配合切替工法)施工結果,ダム技 術, No.239, pp.49-60,2006.
- 3) 内田善久,蓮本清二,平治,大橋昭,西垣誠,高田 徹:動的グラウチング工法の開発とダム基礎処理への 適用,土木建設技術シンポジウム論文集,pp. 283-290, 2002.
- 4)村上麻優子、川端淳一、森澤惣、山本拓治、グラウト動的注入方のメカニズムに関する基礎的検討、第41

回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 59-64, 2012.

- 5) 伊達健介,山本拓治,粂川政則,大場康信,青木謙治. 低透水性岩盤における動的注入工法の適用結果,第 11回岩の力学国内シンポジウム,G01,2002
- 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、岩盤工学特集号、129(7)、513-519、2013.
- Cundall, PA. and Strack, ODL.: A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*. 29(1), pp.47-65, 1979.
- 8) Temam, R.: Navier-Stokes Equation. *Theory and Numerical Analysis*, Amsterdam, North-Holland, 1984.
- 9) Chorin, AJ .: Numerical Solution of the Navier-Stokes

Equations. *Mathematics of Computation*. 22(104), pp.745-762, 1968.

- Kajishima, T. and Takiguchi, S. :Interaction between particle clusters and particle-induced turbulence. *Int. J. Heat and Fluid Flow.* 23(5), pp.639-646, 2002.
- Draganovic, A. and Stille, H.: Filtration and penetrability of cement-based grout:Study performed with a short slot, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 26, pp.548-559, 2011.
- 12) Shimizu, H. and Koyama, T. 3D CFD-DEM Modeling for Clogging Process of Cement-based Grout. In: Proc. of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS8), Sapporo, Japan, 14-16, October, 2014, paper ID: RW1-4, pp. 1-7.

# CFD-DEM SIMULATIONS FOR DYNAMIC INJECTION OF CEMENT-BASED GROUT - GROUT INJECTION MECHANISM AND SUITABLE INJECTION CONDITIONS

# Yusuke YASUKI, Tomofumi KOYAMA, Hiroyuki SHIMIZU

Grouting is a widely used method to seal and reduce hydraulic conductivity of fractured rock masses around underground structures. Recently, dynamic injection with variable injection pressure is proposed as one of the efficient and effective grouting. However, injection parameters are usually determined empirically by technical experts, because the filtration and penetration mechanism of grout have not been clarified sufficiently yet. In this paper, the 2-D numerical model of coupled Computational Fluid Dynamics and the Distinct Element Method (CFD-DEM) was developed to investigate injection mechanism of cement-based grout and the suitable injection conditions for dynamic injection.