

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

小山 倫史^{1*}・榊原 慎也¹・清水 浩之²

¹京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4)

²東北大学 流体科学研究所 未到エネルギー研究センター (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1)

*E-mail: koyama@geotech.kuciv.kyoto-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、注入圧力一定下で、水・セメントの重量比 (W/C) 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。

Key Words : *computational fluid dynamics(CFD), distinct element method (DEM), grout injection, cement-based grout, injection pressure, water/cement (W/C) ratio*

1. はじめに

グラウチングとは、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することで、岩盤の透水性や力学特性を改良し、地下構造物周辺の地盤・岩盤の流体浸透挙動を制御する技術の一つである。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。

グラウト材は、大別すると溶液型、粒子を含む懸濁型があり、その目的や対象地盤・岩盤の透水係数、亀裂開口幅・空隙の大きさによって異なる材料が選択される。懸濁型グラウトの代表であるセメント系では、普通ポルトランド、早強セメント、高炉セメントなどの汎用セメントが比較的安価であり、耐久性に優れ長期的な恒久性も期待できる。しかし、粒径が10 μm 程度と比較的大きく、開口幅の小さな岩盤亀裂や小さな間隙が存在する地盤を対象とした場合、目詰まりやフィルトレーションの発生により、グラウト注入が困難な場合が生じる。また、粒径が数 μm 程度の超微粒子セメントなど新材料の開発・実用化の検討も進んでいるが、汎用セメントに比べ高価であることや、現場保管の際、大気中の水分と反応するなど品質管理が難しいという問題が存在する。一方、

水ガラス系や水ガラスを改良した特殊シリカ系に代表される溶液型グラウト (シリカゾル、コロイダルシリカなど) は粒径が非常に小さく (10~20nm程度) で比較的容易に注入できるため、適用可能な地盤・岩盤の範囲は広いが、注入による改良後の強度があまり期待できず、長期的な耐久性に劣るとされている。

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压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压で注入する高濃度-低压型グラウチング工法 (HTLP工法) の有用性も検証されている¹⁾。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²⁾
(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³⁾といった新しい注入技術も適用されている。

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。また、グラウト注入過程にお
けるグラウトのフィルトレーション・目詰まり、凝集、
吸脱着、加圧脱水など種々の物理・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。

そこで、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
追跡する個別要素法⁴⁾(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
検討することのできる数値解析コード(CFD-DEM)の
開発⁵⁾を行い、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、目詰まり・フィルトレ
ーションの発生機構およびW/Cがグラウト注入過程に与
える影響について検討した。

2. CFD-DEMの概要

(1) セメント粒子の運動の計算

本研究では、グラウト材のうち、セメント粒子の挙動
を粒状体個別要素法(DEM)を用いて計算する。DEM
は、P.A.Cundallにより1978年に提唱された解析手法であ
り⁴⁾。DEMでは、円形粒子である各要素を剛体と仮定し、
接触状態にある粒子間の相互作用を図-1a)のようにVoigt
モデル(ばね・ダッシュポット)によって表現し、多数
の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の第2法則を細かい時間
刻みで適用することで、モデル化された全ての粒子の運
動軌跡を計算により求めていく。

図-1b)に示すように、ある時刻 t における xy 座標上の二
つの粒子 i, j について考える。粒子 i, j それぞれの中心
座標を (x_i, y_i) , (x_j, y_j) とし、粒子半径をそれぞれ r_i , r_j とす
ると、2つの粒子が接触するとき次式を満たす。

$$L_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \leq r_i + r_j \quad (1)$$

ここに、 L_{ij} は粒子 i, j の中心間距離である。

粒子同士が接触すると、接触点に法線方向ばねと接線
方向ばねが挿入され、これにより法線方向の反発力 f_n と

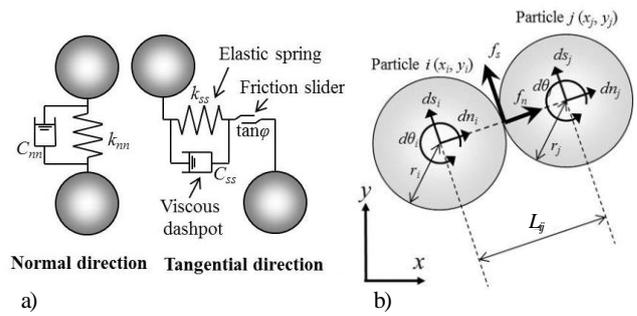


図-1 粒状体個別要素法における粒子間相互作用, a) Voigt
モデル, b) 粒子に作用する力および変位

接線方向の作用力 f_s が作用する。なお、接触していない
場合、その粒子間には接触力は作用しない。それぞれの
作用力は要素間の相対変位から次式より求める。

$$f_n = k_{nn}(dn_j - dn_i) \quad (2)$$

$$f_s = k_{ss}\{ds_j - ds_i - (r_j d\theta_j + r_i d\theta_i)\} \quad (3)$$

ここで、 k_{nn} , k_{ss} はそれぞれ法線方向および接線方向ばね
のばね定数を示す。 dn , ds , $d\theta$ はそれぞれ法線方向、接
線方向、回転変位を示す。

また、要素間の接触における法線方向のばね定数 k_{nn} を、
Hertzの弾性接触理論⁶⁾⁷⁾に基づいて圧縮力 F に応じてそれ
ぞれ次式で与える。

$$k_{nn} = \frac{\pi E_p}{2(1-\nu_p)^2 \left(\frac{2}{3} + \ln \frac{4r_i}{d_{contact}} + \ln \frac{4r_j}{d_{contact}} \right)} \quad (4)$$

$$d_{contact}^2 = \frac{32(1-\nu_p)^2}{\pi E_p} \cdot \frac{r_i r_j}{r_i + r_j} \cdot F \quad (5)$$

ここに、 $d_{contact}$ は接触幅、 E_p , ν_p はそれぞれ要素に与えた
ヤング率とポアソン比である。個別要素法では、各粒子
や壁面は剛体とし、それ自体は変形しないものとしてい
るが、上記のように接触ばね定数を計算するため、粒子
および壁面にヤング率とポアソン比を設定する。

接線方向ばね定数 k_{ss} については要素に与えたヤング率
 E_p とせん断弾性係数 G の比 s を用いて、次式のように法線
方向の定数倍で与える。

$$k_{ss} = s \cdot k_{nn} \quad (6)$$

$$s = \frac{G}{E_p} = \frac{1}{2(1+\nu_p)} \quad (7)$$

要素間接触のダッシュポットの粘性係数は、臨界減衰
条件による値を用いており、法線方向および接線方向の
粘性係数 C_{nn} および C_{ss} はそれぞれ次式で与える。

$$C_{nn} = 2\sqrt{m_{ij} \cdot k_{nn}} \quad (8)$$

$$C_{ss} = C_{nn}\sqrt{k_{ss}/k_{nn}} \quad (9)$$

ここで、 m_{ij} は要素*i*および要素*j*の質量 m_i および m_j より次式で得られる。

$$m_{ij} = 2 \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \quad (10)$$

次に、粒子間接触点におけるすべりの発生について考える。摩擦力 f_s がクーロンの摩擦の法則から最大静止摩擦係数 $f_{s,max}$ を上回る場合、すべりが発生する。このとき、摩擦力 f_s は $f_{s,max}$ として与えられる。最大静止摩擦係数 $f_{s,max}$ は、粒子間摩擦係数 $\tan \varphi_p$ と法線方向の反発力 f_n から次式で与えられる。

$$f_{s,max} = \tan \varphi_p \cdot f_n \quad (11)$$

実際の計算では一つの粒子の周りに多数の粒子が接触するので、着目粒子*i*に接触するすべての粒子*j*からの接触力を同様に計算し、これらを重ね合わせた合力が粒子*i*に作用する接触力となる。この接触力を用いて運動方程式を解き、微小時間後の粒子の加速度、速度、変位（または位置）を決定し、全ての粒子についてこの過程を繰り返すことで、セメント粒子群の挙動を表現する。

(2) 流体流動の計算

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) により表現する。流れの数値計算は、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って行う。流れの基礎方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_f \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_f \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g \quad (14)$$

ここに、式(12)は非圧縮性流体の連続の式であり、式(13)、(14)は2次元非圧縮性流れに対するNavier-Stokes方程式である。また、 u 、 v はそれぞれ*x*、*y*方向の流体速度、 p は流体圧力、 ν_f は流体の動粘性係数、 ρ_f は流体の密度、 g は重力加速度である。なお、流体の動粘性係数 ν_f および流体密度 ρ_f は一定とする。

本研究では、計算アルゴリズムとしてフラクショナルステップ法^{8,9)}を用いた。フラクショナルステップ法は、Navier-Stokes方程式を等価な三つの方程式群に分離し、それぞれの式を1つずつ3段階の処理を行って求めるべき

流速場を計算する。フラクショナルステップ法における具体的な計算方法については文献^{8,9)}に譲る。

(3) セメント粒子と流体の相互作用

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¹⁰⁾ (Immersed Boundary method, IB method)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格子（以下、セルと呼ぶ）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。粒子表面に及ぼす相互作用力の表面積分を、粒子を含む領域の体積積分に置換することで、移動する粒子周辺の流れを簡単に効率良く計算することが可能となる。以下、体積力型埋め込み境界法の概要について述べる。

まず、セル内の体積平均速度ベクトル \mathbf{u} を、セルにおける粒子の体積率 α を用いて次式で定義する。

$$\mathbf{u} = (1 - \alpha)\mathbf{u}_f + \alpha\mathbf{u}_p \quad (15)$$

ここに、 \mathbf{u}_f はセルの流体速度ベクトル、 \mathbf{u}_p は粒子内部の点の速度ベクトルを表す。図-2に示すように、 α は粒子を含まないセルでは $\alpha=0$ 、界面では $0 < \alpha < 1$ 、粒子内部では $\alpha=1$ の値を持つ。粒子内部点の速度ベクトル \mathbf{u}_p は、粒子の並進速度ベクトル \mathbf{v}_p 、物体の角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_p$ 、粒子の中心から粒子表面までの相対位置ベクトル \mathbf{r} を用いて次式より求められる。

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{v}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{r} \quad (16)$$

粒子表面でno-slip条件を仮定すると、速度 \mathbf{u} に対しても連続の式(12)が成立する。セルが流体、界面、粒子内のいずれにあるかに関わらず（粒子の体積率 α の値に無関係に）、流体運動をするものと仮定してNavier-Stokes方程式を解くことで、予測される部分段階速度 \mathbf{u}_i を求める。最後に、部分段階速度 \mathbf{u}_i を次式で与えられる相間相互作用力 \mathbf{f}_p により式(15)を満たすように修正する。

$$\mathbf{f}_p = \alpha(\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_i) / \Delta t \quad (17)$$

ここに、 Δt は時間刻みである。相間相互作用力 \mathbf{f}_p は、粒子の存在しない流体のみのセル($\alpha=0$)では0となる。流体

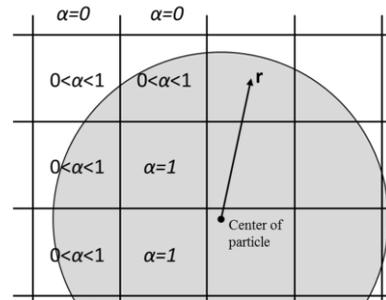


図-2 IB法における計算格子および粒子体積率¹⁰⁾

から粒子に作用する力の合力は、その粒子の存在するセルにおける相間相互作用力 f_p の反力の合計として計算することができる。

3. 解析モデル

本研究では、解析モデルとして、Draganovic and Stille¹¹⁾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。実験装置の概要を図-3に示す。本図に示すように、2枚の金属製円盤を合わせ、岩盤内亀裂の狭窄部を模擬する”slot”を形成する。グラウト材は圧力一定条件で注入し、slotを通過するグラウトの質量を測定する。シミュレーションは図-3に破線四角で示した矩形領域を対象とした2次元で実施した。図-4に解析モデルを示す。解析モデルは、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10 μ mの正方形とした。モデル右端の狭窄部の長さは300 μ mとし、狭窄部の開口幅は100 μ mに固定した。モデル右端と左端の境界は圧力一定条件とし、左端における注入圧力 P_{in} は1.5MPa、右端の流出圧力 P_{out} は0MPaとした。モデル上下端の剛体壁面はno-slip条件を与え、重力はy方向下向きに作用させ、亀裂の壁面における吸脱着、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。さらに、室内実験と同様、実際の岩盤亀裂の表面に見られるラフネス形状についても考慮しないものとする。セメント粒子は、規定の最大・最小粒

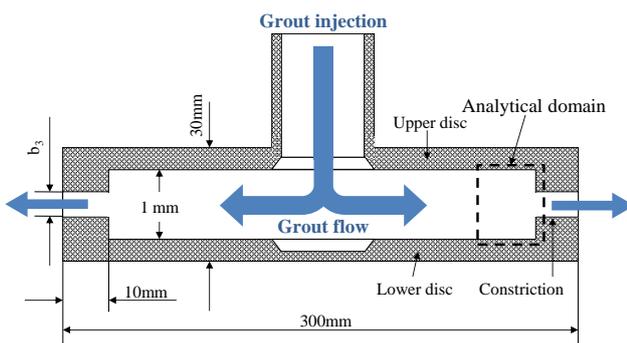


図-3 室内グラウト注入試験 “short slot” experiment¹¹⁾

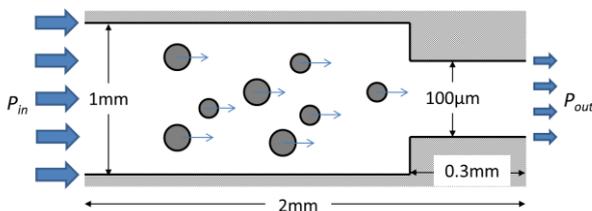


図-4 解析モデルおよび境界条件

子直径の間 (20-50 μ m) 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W/Cが一定 (0.3から0.1刻みで1.0まで計8パターン) となるようにモデル左端より投入される。なお、実際の室内注入実験¹¹⁾で使用されたセメントは20 μ m以下の細粒分を含んでいるが、計算の効率化を図るため、解析では20 μ m以下の細粒分は考慮しないものとする。また、セメント粒子の初期投入位置 (y座標) は一様乱数によりランダムに与えた。ただし、初期投入位置が注入過程に与える影響を調べるため、各W/Cで10パターンずつ粒子の初期投入位置を変化させて解析を実施した。また、室内注入実験が実施されたスウェーデンでは、高濃度のグラウトを高圧で注入するという設計思想のもとで施工されるため、我が国で通常用いられる値よりもW/Cは小さな値、注入圧力は大きな値を用いた。解析に用いたパラメータを表-1にまとめる。

4. 解析結果および考察

(1) 水セメント比が注入セメント量に与える影響

表-2に各W/Cにおける目詰まり発生状況を示す。本表より、W/Cが小さくなる、すなわちグラウト濃度が高くなるほど、目詰まりの発生頻度が増加する。次に、図-5にW/Cが0.3, 0.5, 1.0のときの流速分布を示す。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。本図より、注入孔では、中央部の流速が最も速く、流速分布は放物線型になる。また、亀裂への入口で流路が急縮小することにより、亀裂内部における流速が速くなっていることが分かる。また、W/Cが小さいグラウトの濃度が高いほど、流速は小さくなっている。これは、W/Cが小さくなることで、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) が大きくなり、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、結果として流速を低下させたことが原因であると考えられる。また、図-6に累積注入セメント量の経時変化を示す (ただし、初期投入位置を変化させた10パターンのうち注入セメント量の増加率が最大のものを示した)。本図より、目詰まりが発生すると、累積注入セメント量は頭打ちとなる。図-7に目詰まりを考慮しない場

表-1 解析に用いたパラメータ

P_{in}	= 1.5 (MPa)	Particle density	= 3150 (kg/m ³)
P_{out}	= 0.0 (MPa)	Particle Young's modulus	= 500 (MPa)
		Particle Poisson's ratio	= 0.3
Fluid viscosity	= 1.0 (mm ² /s)	$D_{max}/cell$	= 5.0
Fluid density	= 1000 (kg/m ³)	$D_{min}/cell$	= 2.0
		Wall Young's modulus	= 1000 (MPa)
$n_x \times n_y$	= 200 × 100	Wall Poisson's ratio	= 0.3

表-2 目詰まりの発生頻度(10 ケース中)

W/C	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
発生回数	10	10	8	5	3	3	0	0

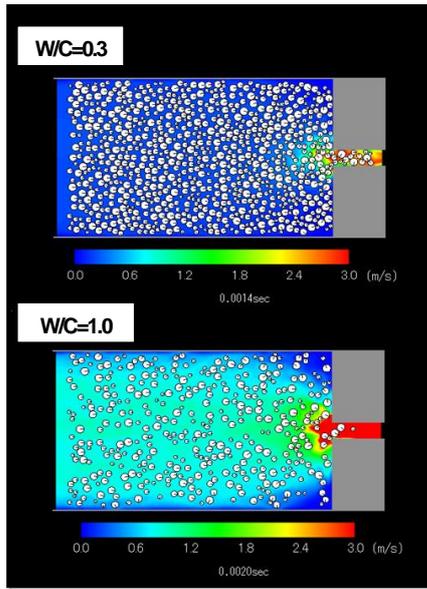


図-5 流速分布 (W/C=0.3, 1.0 の場合)

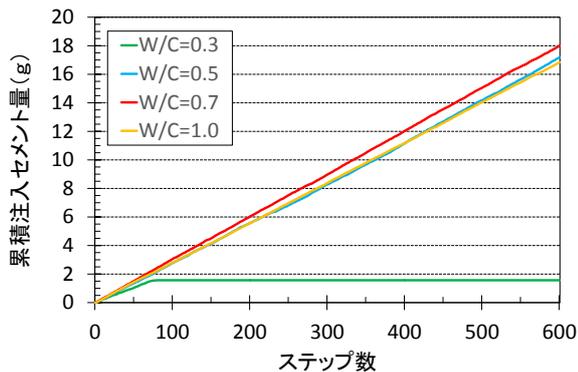


図-6 累積注入セメント量の推移 (W/C=0.3, 0.5, 0.7, 1.0)

合の累積注入セメントの増加率を示す。本図より累積注入セメントの増加率はW/C=0.7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。このことは、W/Cが小さく濃度の高いグラウトを注入することが必ずしも効率的ではないことを意味している。すなわち、W/Cが小さい場合、セメント粒子と流体の相互作用が流体の流れに及ぼす影響が大きくなり、流れに局所的な乱れが生じ、流速が低下することで、セメント注入量が伸びないものと考えられる。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。効率的な注入に関しては、本章(3)節で目詰まりを考慮してさらに検討する。

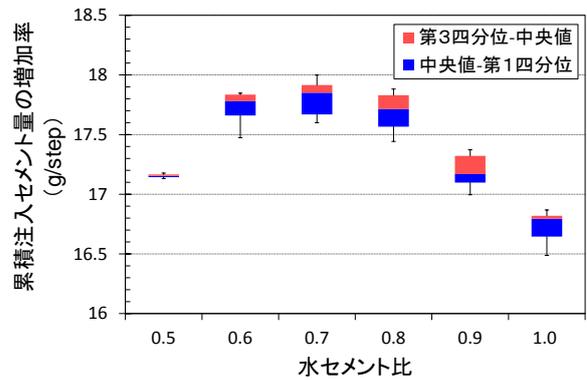


図-7 各 W/C における累積注入セメント量の増加率

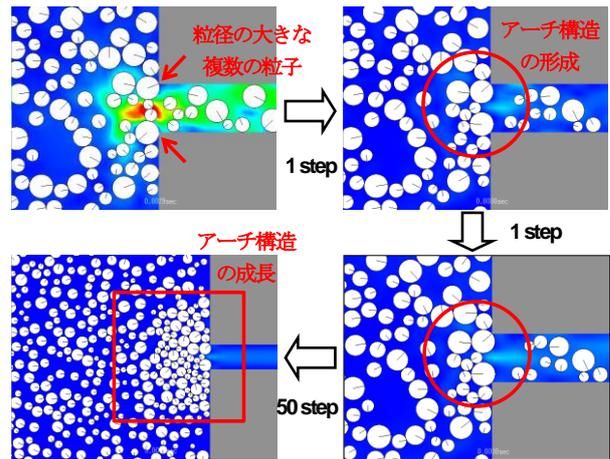


図-8 アーチ構造の形成・成長と目詰まりの発生

(2) 目詰まりの発生機構に関する考察

図-8に亀裂入口付近の流路が急縮小する部分におけるフィルトレーション・目詰まりの発生の様子を示す。比較的大きな粒径の粒子が複数同時に亀裂に入り込もうとすることで、亀裂入口付近にアーチ構造を形成し、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、次々に送り込まれる粒子によりアーチ構造が成長し、その結果、フィルトレーション・目詰まりが生じる。また、アーチ構造の形成には粒子間の摩擦が大きな影響を及ぼしており、粒子間の摩擦が大きいほど、アーチ構造が形成されやすい。

(3) 効率的なグラウト注入のためのW/Cの検討

図-9に目詰まりの影響を考慮して、累積注入セメント量の増加率を評価したものを示す。ここでは、目詰まりの発生確率を考慮し、累積注入セメント量の増加率を期待値として評価した。ただし、目詰まりが発生する場合は累積注入セメント量の増加率はゼロとした。本図より、目詰まり発生の確率を考慮すると、より効率的なグラウト注入のためには、目詰まりが発生しにくいW/Cが大きくなり濃度の低いグラウト(W/C=0.9)を使用することが望ましいことがわかる。

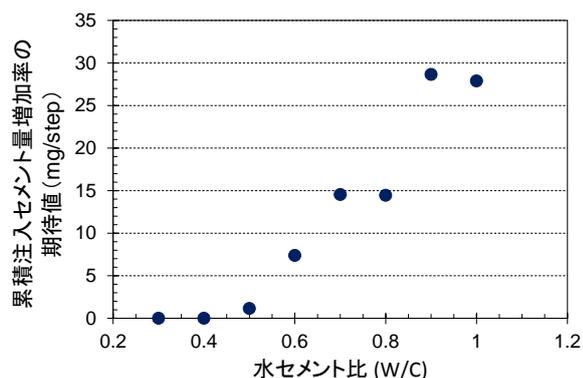


図-9 各 W/C での累積注入セメント量増加率の期待値

5. まとめ

本研究では、数値流体力学 (CFD) と粒状体個別要素法 (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、フィルトレーション・目詰まりの発生機構および W/C が効率的なグラウト注入に与える影響について検討した。本研究より得られた知見を以下にまとめる。

- W/C が小さい、すなわちグラウト濃度が高い場合、セメント粒子数が多いため、粒子同士の衝突機会が増えるとともに、流体とセメント粒子の相互作用による影響が大きくなり、流体の流れを乱し流速を低下させるので、フィルトレーション・目詰まりが発生する確率が高い。
- 亀裂入り口付近で比較的大きな粒子がアーチ構造を形成・成長することで目詰まり・フィルトレーションが発生する。
- W/C が小さく濃度の高い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 W/C が存在する。
また、今後さらに検討すべき点を以下に示す。
- 実際のグラウト注入試験¹¹⁾では出口より流出するグラウトの濃度が徐々に薄くなり最後に目詰

まりを起こす現象が確認されているが、このような現象は2次元の解析では表現できず、3次元の解析が必要である。

- 本研究では、亀裂表面への吸脱着、セメント粒の凝集・結合などの化学反応および亀裂表面のラフネスの影響は考慮していないが、今後これらの影響を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 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) Cundall, PA. and Strack, ODL.: A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*. 29(1), pp.47-65, 1979.
- 5) 清水浩之, 小山倫史: セメントグラウトの浸透性及ば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.
- 6) Roark, R.J. and Young, W.C.: *Formulas for Stress and Strain*, 5th Edition, New York, McGraw-Hill Book Company, 1975.
- 7) Landau, LD and Lifshitz, EM.: *Theory of Elasticity*, Oxford: Pergamon Press, 1986.
- 8) Temam, R.: *Navier-Stokes Equation. Theory and Numerical Analysis*, Amsterdam, North-Holland, 1984.
- 9) Chorin, A.J.: Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations. *Mathematics of Computation*. 22(104), pp.745-762, 1968.
- 10) 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.
- 11) 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.

CFD-DEM SIMULATIONS FOR GROUT INJECTION - GROUT INJECTION MECHANISM AND SUITABLE INJECTION CONDITIONS

Tomofumi KOYAMA, Shinya SAKAKIBARA and Hiroyuki SHIMIZU

Grouting is a widely used method to seal and reduce hydraulic conductivity of fractured rock masses around underground structures. Recently, the efficient and effective grouting has been required from environmental and economical points of view. However, injection parameters such as injection pressure and water/cement ratio 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 the suitable injection conditions and injection mechanism of cement-based grout.