

粘性の経時変化を考慮したグラウト注入過程の 数値シミュレーション

小山 倫史^{1*}・高橋 健二²・田村 晴彦¹・小林 翼³・龍田 圭亮³・大西 有三¹

¹京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4)

²株式会社 水文技術コンサルタント (〒160-0004 千葉県千葉市美浜区高洲)

³株式会社 環境総合テクノス 土木部 (〒541-0052 大阪市中央区安土町1-3-5)

*E-mail: koyama@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

近年、社会資本整備に対するコスト縮減といった社会的要求が高まる中、グラウチングについても所定の止水性を確保した上で経済性が要求されるようになってきた。新たに考案したグラウチングシステムはセメントミルクの比重、すなわち、水とセメントの配合(水・セメント比, W/C)を段階的に大きいものから小さいものへと切り替えていく従来の方法と違い、連続的にセメントミルクの比重を変化させて注入する方法であり、効率的かつ経済的なグラウト注入工法として各種岩盤に適用が試みられている。本研究では、数値シミュレーションにより岩盤内へのグラウト材の流動メカニズムを明らかにし、新たに考案したグラウチングシステムの従来の工法に対する優位性を定量的に検証した。

Key Words : *grouting, numerical simulations, time-dependent material properties, injection methods*

1. はじめに

ダムなどの岩盤構造物の建設においては、構造物に要求される性能を満足するため、厳密な地下水制御を行う必要がある。地下水制御のためには、対象岩盤を所要の透水性を持つ岩盤に改良することが必要であり、代表的な工法としてグラウチングを挙げることができる。グラウチングとは、岩盤に掘削したボーリング孔より水にセメントを混入したグラウト材を加圧して注入し、亀裂を充填・シーリングする工法である。また、近年、岩盤構造物の建設サイトの地質条件の多様化とともに、社会資本整備に対するコスト縮減といった社会的要求が高まる中、グラウチングについても所定の止水性を確保した上で経済性が要求されるようになってきている。これまで、グラウチングシステムにおいては、効率的にセメント注入を行うため、水とセメントの配合、すなわち、水・セメント比(W/C)が大きいものから、小さいものへと段階的に切り替えていく工法(以下、段階配合切替え)が採用されることが多い。今回、新たに考案したグラウチングは、従来の方法と違い、セメントミルクの比重を連続的に変化させて注入する方法(以下、連続配合切替え)であり、すでに効率的かつ経済的なグラウト注入工法として、各種岩盤に適用が試みられている。本研究では、数値シミュレーションにより、岩盤内へのグラウト

材の流動メカニズムを明らかにするとともに、新たに考案した連続配合切替えによるグラウチングシステムの従来工法に対する優位性を定量的に検証した。なお、数値解析においては、グラウト材をニュートン流体と仮定し、有限要素法(FEM)を用いて、2次元の非定常の浸透流および移流・分散解析を行う。なお、グラウトの注入過程をモデル化するにあたり、以下の2点について特に注目した。

- グラウト材の粘性の経時変化およびその濃度・密度による違い(グラウト材の物性)
- 施工時のグラウト注入圧スケジュール(境界条件の変化)

2. 室内実験によるグラウト材の粘性の計測

(1) 計測方法

グラウト材の粘性の時間経過に伴う変化を計測するために、回転式粘度計(ブルックフィールド社製デジタル粘度計DV-II+Pro)を用いた。この粘度計は図-1のように液体中で一定速度で回転するスピンドルに働く液体の粘性抵抗トルクを測定して粘性係数(粘度)を測定する。

グラウト材は高炉B種セメントと水温20℃の蒸留水を配合したものをを用いた。これらを配合し、家庭用ミキサ

一で3分間攪拌した後、ビーカー（500 ml）にとり、スピンドルをグラウト材中に挿入して粘性係数を測定した。その後10分間隔で粘性係数を測定し、時間経過に伴う変化を調べた。また、測定誤差を減らすため、スピンドルは毎回測定後に洗浄した。このようにして6種類の水セメント比（W/C=1, 2, 4, 6, 8, 10）で測定を行った。水セメント比の違いにより粘度が大きく異なり、同じスピンドルと回転数で6種類を測定することは困難なため、W/C=1, 2の時とW/C=4, 6, 8, 10の時ではスピンドルとその回転数を変えて、後者の方がより低粘性領域を測定できるようにした。原位置におけるグラウト材の注入後の状態を想定し、測定と測定の間はビーカー内はそのままにしておいたが、W/C=4, 6, 8, 10ではブリージングが大きいいため、測定前に軽く掻き混ぜてから測定を行った。

(2) 計測結果

上述の方法で測定したグラウトの粘性係数は時間 t (≤ 3600 sec) を変数として次式で表される指数関数^{1), 2)}で近似した。

$$\mu(t) = Ae^{Bt} \quad (1)$$

ここに、 μ は粘性係数[Pa·s]、 A および B は定数。ただし、 A は初期粘性係数($=\mu_0$)である。

6種類の異なる濃度・密度のグラウトについて粘性係数の経時変化を、表-1にまとめる。本表より、式(1)中

表-1. グラウトの粘性係数の経時変化

水セメント比 W/C	粘度 $\mu=Ae^{Bt}$ (Pa·s)	
	A	B
1	0.054155	0.000511
2	0.043547	0.000340
4	0.005808	0.000048
6	0.005137	0.000031
8	0.004881	0.000030
10	0.004535	0.000023

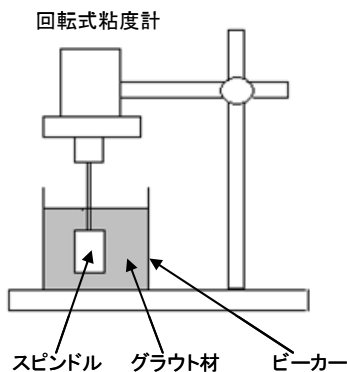


図-1 実験装置の概念図

の初期粘性係数 (A) および粘性係数変化の時間係数 (B) のいずれも水・セメント比の大きなもの、すなわちグラウトの濃度・密度が大きいほど大きな値を示す。また、測定方法の違いによりW/C=1, 2の時とW/C=4, 6, 8, 10の時で粘度に大きな差が出たが、グラウト材の注入の過程において粘性が効くのは濃度が大きい時であるため、特に問題ないと考えられる。

3. グラウト注入過程の数値シミュレーション

(1) 解析の方法

グラウト材はニュートン流体を仮定し、有限要素法 (FEM) により、2次元の非定常の浸透流解析および移流・分散解析を行う。浸透流の支配方程式は、質量保存則 (連続式) およびDarcy則により、以下のように導かれる。

$$\partial_t(\rho\theta) = (K_{ij}h_{,j})_{,i} - q \quad (2)$$

ここに、 K_{ij} は透水係数テンソル、 h は全水頭、 q は流出入量、 ρ は流体の密度、 θ は体積含水率 ($\theta=nS_w$, n : 間隙率, S_w : 飽和度) である。

また、移流・分散の支配方程式は次式で表される。

$$\partial_t(\rho\theta C) = (\rho\theta D_{ij}C_{,j})_{,i} - (\rho\theta V_i C)_{,i} + Q_c \quad (3)$$

ここに、 C は濃度、 D は分散テンソル、 V_i は実流速、 Q_c は流出入量である。

なお、本解析は以下に示すプロセスを経ることで、岩盤が経時的に改良されていく状態を順次追跡し、計算 (順解析) を行う。

Step 1: 時間 $t=0$ で注入を開始

Step 2: 時間差分 dt 後の注入モデルを作成する。まず、グラウト濃度および粘性の変化 (物性の変化) による透水係数の低減、グラウト注入圧の変化 (境界条件の変化) を考慮して、式(2)を解き、得られた流速を式(3)の右辺第2項に用いる。

Step 3: Step 2で作成したモデルを用いて、式(3)を解き、得られたグラウトの濃度分布から透水係数分布を再構築し、次の時間ステップのモデルを作成する。

Step 4: 以下Step2,3を所定の時間まで繰り返す。

(2) 解析モデル

解析モデルは、実際のグラウト注入現場の地質データを基に作成した。対象の岩盤のうち幅30m、深さ60mの2次元の軸対称モデルを考える。地上から18mのところ地下水位を設定し、グラウト材は深さ20 mまで削孔した注入孔より深さ方向に6mの幅 (注入区間: 地上から14~20 m) で注入した。図-2に解析領域を示す。

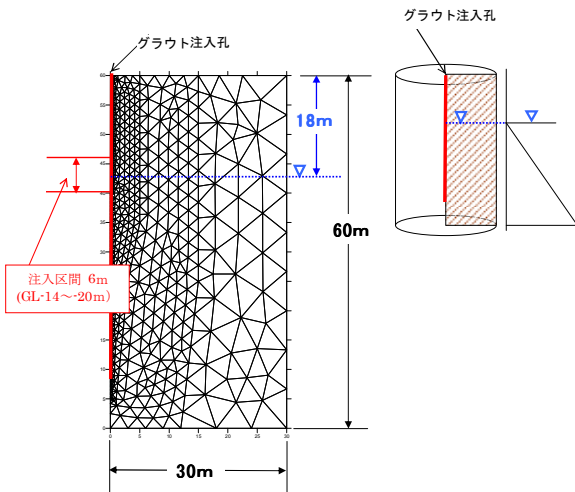


図-2 解析モデル

なお、対象領域である岩盤の初期の透水係数は 1×10^4 cm/sec (10Lu) である。

(3) グラウト材の粘性の経時変化を考慮したモデル

本節では、前節で計測したグラウト材の粘性の経時変化を岩盤の透水係数の低減として扱うことを考える。

亀裂性岩盤を等価な連続体に置き換えると、その透水係数 K は固有透水係数 K_{int} (透水媒体固有の値)、流体(グラウト)の単位体積重量 γ ($=\rho g$)、および粘性係数 μ を用いて次式で定義される。

$$K = K_{int} \gamma / \mu \quad (4)$$

ここで、式(1)で表される粘性係数の経時変化を考慮すると、式(4)より、ある時間 t における透水係数 $K(t)$ は次式で表される。

$$K(t) = \frac{K_{int} \gamma(t)}{\mu(t)} = \frac{K_{int} \gamma_0}{\mu_0} \frac{(\gamma(t)/\gamma_0)}{e^{Bt}} = C_f \cdot K_0 \quad (5)$$

ここに、 K_0 、 γ_0 はそれぞれ初期透水係数、グラウトの初期の単位体積重量であり、 C_f は粘性係数の経時変化に伴う透水係数の低減率である。

ただし、粘性係数変化の時間係数、 B について、段階配合切替えでは、各グラウトの水・セメント比について表-1の値を、連続配合切替えでは、表-1の値を各グラウトの濃度(水・セメント比より容易に計算が可能)で線形補間したものを用いる。

(4) グラウト注入圧、配合切替えスケジュール

グラウト注入圧および、配合切替えスケジュール(時間変化)については図-3に示すように原位置で実施したグラウト注入試験より得られたものを用いる。なお、注

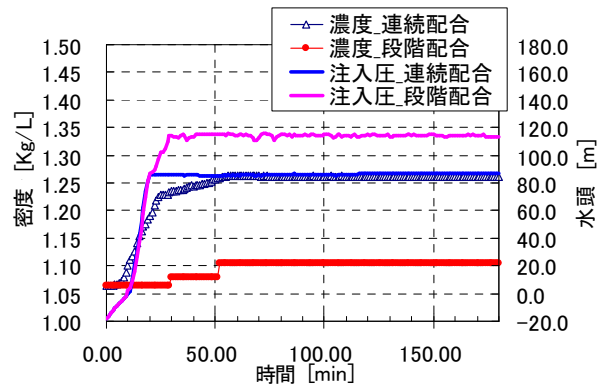


図-3 グラウト注入圧、配合切替えスケジュール

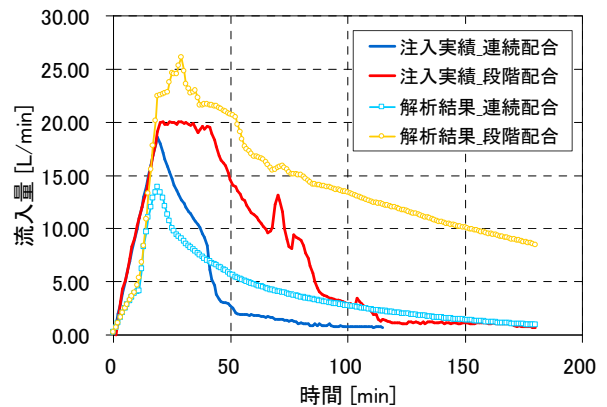


図-4 グラウト注入量の時間変化の比較

入工法の比較のため、新たに考案した連続配合切替えと従来の段階配合切替えの両方の工法でグラウト注入試験を実施した。なお、数値解析においては、注入圧の時間変化は、水頭(圧力水頭)固定境界として与え、注入圧スケジュールに従い時々刻々変化させる。数値計算により求められたグラウトの注入量は原位置での注入試験の結果と比較を行う。また、グラウト注入量とグラウトの濃度から換算した注入セメント量についても、比較を行う。

(5) 解析結果

図-4にグラウト注入量の比較を示す。本図より、数値計算の結果は比較的良好に実測値(注入実績)と合っており(特にグラウト注入量がピークに達するまではよい一致を示している)、より濃度の高い配合に切り替わる際に、注入圧は一定に保っているにもかかわらず、急速に注入流量が減少するという現象を表現できている。ただ、グラウト注入量の急激な低下の程度には、解析と実測値では乖離が見られる。これについては、次節で考察を加える。また、段階配合切替えについて、原位置の試験ではグラウトの注入量が20 l/minを超えないような制御がかかっているが、数値解析では現段階ではこの制御の影

響を考慮していない。そのため、数値解析では注入圧の上昇とともに、より多量のグラウトが注入されることとなり、注入流量のピーク値に差異が生じたものと考えられる。

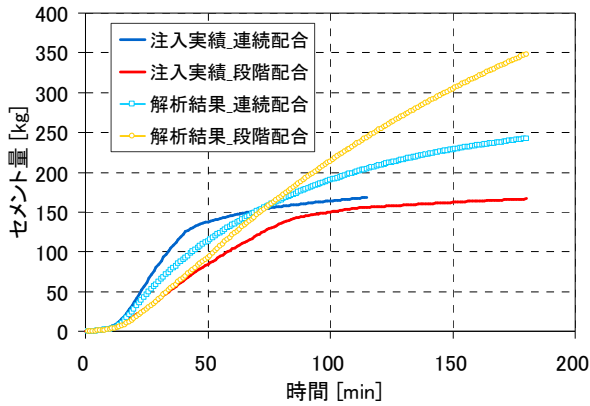


図-5 注入セメント量の時間変化の比較

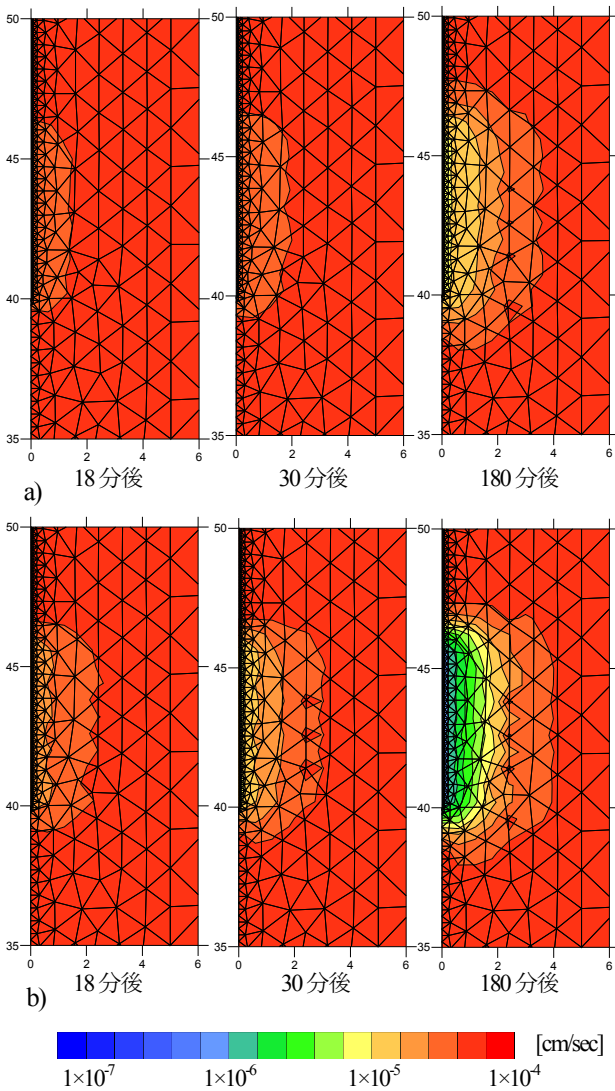


図-6 グラウト注入後の透水係数分布の変化、a) 段階配合切替え、b) 連続配合切替え。

図-4のグラウト注入流量をグラウトの濃度を用いて注入セメント量に換算したものを図-5に示す。本図より、段階配合切替えに比べ連続配合切替えの方が、より短時間に多くのセメントを注入することができることがわかる。すなわち、新たに考案した連続配合切替え工法は従来の工法に比べより効率的な工法であるといえる。

図-6、図-7に各工法の注入後18分、30分、180分後の透水係数およびグラウトの濃度の分布をそれぞれ示す。図-6より、先に注入された濃度の薄いグラウトは時間とともにより広域に広がりゆっくり硬化するのに対し、後から注入される濃度の濃いグラウトが注入孔付近でより早く硬化することで、最終的にグラウト注入量が急激に減少し、それ以上グラウトが入らなくなることを示している。そして最終の透水係数の改良範囲（透水係数が 1.0×10^{-5} 以下すなわち $1.0 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ 以下を確保できている領域）はおよそ2mである。図-7より、連続配合切替えの方が、段階配合切替えに比べ、より早い段階で濃度の濃いグラウトが注入されることにより、より短時間でより多くのセメント量を注入することが可能となる（図-5参照）。

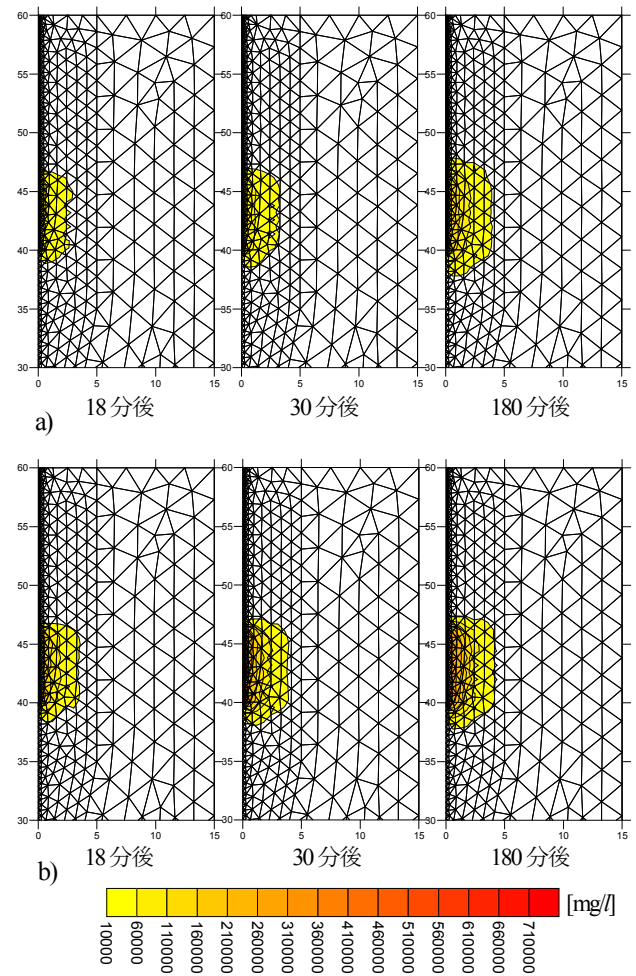


図-7 グラウトの濃度分布の変化、a) 段階配合切替え、b) 連続配合切替え。

4. 考察

前節では、グラウトの粘性の経時変化のみを考慮したモデルを提案し、原位置で得られたグラウト注入履歴を用いて解析を行い、現場の注入実績との比較を行った。先にも述べたとおり、グラウト流入量について、解析結果と実測値とでピークの値を示した後の挙動（すなわち、一定の注入圧がかかっているにもかかわらず、グラウト流入量が急激に減少する現象）に相違が見られ、これに伴い、注入セメント量についても相違が見られた（図-4および図-5参照）。このグラウト注入量の急激な減少は、グラウトの粘性の経時変化のみでは十分な説明ができないと考えられる。そこで、以下では、透水媒体である亀裂性岩盤の空隙にセメント粒子が目詰まりを起こすことによる透水係数の低減を新たに式(5)に導入することを試みる。すなわち、式(5)において透水媒体の固有透水係数 K_{in} がセメント粒子の目詰まりによって変化するとする。

多孔質媒体において、間隙率 n と固有透水係数 K_{in} の関係には次式で表されるKozeny-Carmanの式がよく知られている。

$$K_{int} = C \frac{n^3}{(1-n)^2} d^2 \quad (6)$$

ここに、 d は多孔質媒体の平均粒径、 C は定数である。

多孔質媒体の固有透水係数の経時変化は、主に、間隙率の経時変化、すなわちセメント粒子の目詰まりによる間隙の減少によるものと考えられる。よって、ある時間における固有透水係数 $K_{int}(t)$ の初期固有透水係数 $K_{int}^0(t)$ に対する比はある時刻における間隙率 $n(t)$ および初期間隙率 n_0 を用いて次式で表される。

$$\frac{K_{int}(t)}{K_{int}^0} = \frac{n(t)^3}{(1-n(t))^2} \cdot \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \equiv C_s \quad (7)$$

すなわち、式(5)にさらに、式(7)で表される空隙の目詰まりに起因する透水係数の低減を考慮することで次式を得る。

$$K(t) = C_f \cdot C_s \cdot K_0 \quad (8)$$

目詰まりによる透水係数の低減は理論上は式(7)を用いて計算することが可能であるが、これまで、目詰まりによる間隙率の経時変化すなわち間隙率の減少について、室内試験などで計測した例はなく、本研究では、目詰まりによる透水係数の低減率 C_s を粘性経時変化による低減率と同様に指数関数で与えられると仮定した。

本節で新たに提案した粘性の経時変化および空隙の目詰まりによる透水係数の低減を考慮したグラウトのモデルを用いて前節と同様の解析を行った。図-8にグ

ラウト注入量の比較を、図-9に注入セメント量の比較を

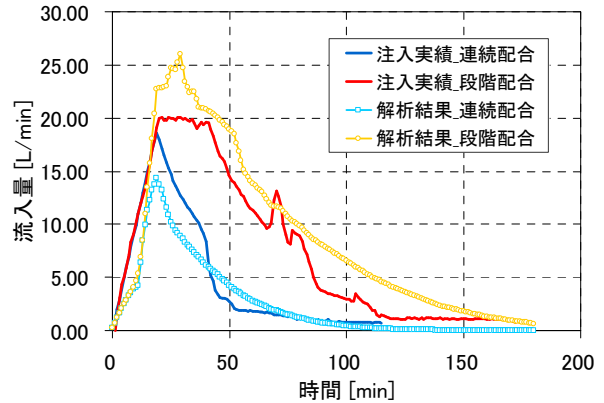


図-8 グラウト注入量の時間変化の比較

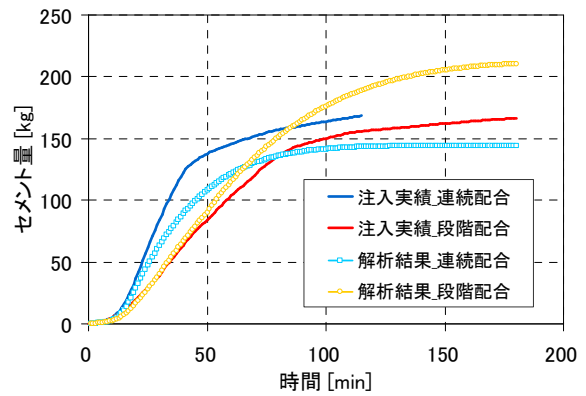


図-9 注入セメント量の時間変化の比較

ぞれ示す。これらを図-4および図-5とそれぞれ比較すると、新たに考慮した目詰まりによる透水係数の低減により、解析結果、すなわちグラウト注入量の時間変化は、連続・段階配合切替ともに注入実績（実測値）により近いものとなった。特に、ピークに達した後のグラウト流入量の急激な減少がよりよく表現されている。注入セメント量についても、解析結果と実測値がよく一致している。以上より、グラウトの注入流量がピークに達するまでは、粘性の経時変化が、ピーク後の急激な低下には、目詰まりが大きく関与しているといえる。

今回は、セメント粒子の空隙の目詰まりによる岩盤の透水係数の低減率が指数関数に従う仮定したが、今後は、セメント粒子の目詰まりによる空隙の変化を室内試験などで定量的に評価し、透水係数の低減モデルを構築する必要がある。

5. まとめ

本研究では、グラウト材の粘性の経時変化およびその濃度依存性を考慮した数値解析モデルを作成し、原位置でのグラウト注入試験をもとにシミュレーションを行った。以下に本研究より得られた知見をまとめる。

- グラウトの粘性の経時変化を考慮した数値解析モデルにより、グラウトの注入のメカニズムの解明が可能となった。
- 従来の段階配合切替えに比べ新たに考案した連続配合切替えの方が、短時間により多くのセメント量を注入することができ、より効率的な工法であることが、数値解析、および、原位置におけるグラウト注入試験により明らかになった。
- 解析モデルについては、今後、粘性の経時変化による透水係数の低減のみならず、セメント粒子の

目詰まりによると透水係数の低減を考慮したモデルを構築する必要がある。

参考文献

- 1) Hässler, L.: Grouting of rock – Simulation and classification. *Ph. D thesis, Div. of Soil and Rock Mech, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 1991*
- 2) Kobayashi, S and Stille, H.: Design for rock grouting based on analysis of grout penetration – Verification using Äspö HRL data and parameter analysis. *SKB report R-07-13. 2007*

NUMERICAL SIMULATIONS OF GROUT INJECTION PROCESS CONSIDERING TIME-DEPENDENT MATERIAL PROPERTIES OF GROUT

Tomofumi KOYAMA, Kenji TAKAHASHI, Haruhiko TAMURA,
Akira KOBAYASHI, Keisuke TATSUTA and Yuzo OHNISHI

In this study, to investigate the grout injection mechanism, numerical simulations were carried out considering the time-dependent grout properties and the two different injection methods. The simulation results were compared with the one obtained from the grout injection tests in the field. Results clearly show that the viscosity of grout material becomes higher, especially for the grout with high density and as a result, lower hydraulic conductivity area distributed close to the injection holes. The numerical simulation results also show that the newly proposed injection method with changing density of the grout continuously will be more effective way to inject cement in a shorter time than the conventional method.