

グラウト浸透モデルの構築および現場グラウト注入試験への適用

京都大学大学院工学研究科 正会員 ○小山 倫史 田村 晴彦
 水文技術コンサルタント 正会員 高橋 健二
 環境総合テクノス 正会員 片山 辰雄 小林 翼 景山 学 泉 敦
 京都大学 正会員 大西 有三

1. はじめに

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、新たに構築したグラウト浸透モデルを組み込んだ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。

2. 支配方程式

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。浸透流および移流・分散の支配方程式は次式のとおりである。

$$\partial_t(\rho\theta) = (K_{ij}h_{,j})_{,i} - q \quad (1) \quad \partial_t(\rho\theta C) = (\rho\theta D_{ij}C_{,j})_{,i} - (\rho\theta V_i C)_{,i} + Q_c \quad (2)$$

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（ $\theta = n \cdot S_w$, n : 間隙率、 S_w : 飽和度）、 C は濃度、 D_{ij} 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。すなわち、**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(1)を解き、得られた流速を式(2)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(2)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（透水係数の低減）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。

3. 粘性および透水媒体の目詰まりを考慮したモデル

本解析では、亀裂性岩盤を等価な連続体に置き換え、グラウト注入による岩盤の透水係数の低減をグラウト（流体）の粘性(μ)および岩盤（透水媒体）の固有透水係数(K_{int})の経時変化として取り扱う。すなわち、ある時刻 t における岩盤の透水係数 $K(t)$ は透水係数の低減率を用いて次式で記述できる。

$$K(t) = \frac{K_{int}(t)\gamma(t)}{\mu(t)} = \frac{K_{int}^0\gamma_0}{\mu_0} \cdot \frac{K_{int}(t)}{K_{int}^0} \cdot \frac{\mu_0}{\mu(t)} \cdot \frac{\gamma(t)}{\gamma_0} \equiv C_f \cdot C_s \cdot K_0 \quad (3)$$

ここに、 K_0 , γ_0 , μ_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および粘性係数であり、 C_f , C_s はそれぞれグラウトの粘性の経時変化および透水媒体の固有透水係数の変化による透水係数の低減率である。

本研究では、グラウト材として高炉B種セメントと水温20°Cの蒸留水を配合したものをを用い、粘性の経時変化は、回転式粘度計を用いて異なる濃度のグラウトについて計測し、計測結果は指数関数でフィッティングした。すなわち、式(3)における C_f を時間および濃度の関数として表した。また、透水媒体の固有透水係数の変化による低減率 C_s についても同様に時間に関する指数関数で表わし、注入実績により試行錯誤的に決定した。

キーワード グラウト, 連続配合切換え工法, 数値解析, 有限要素法

連絡先 〒615-8540 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻ジオマネジメント工学講座 TEL 075-383-3306

3. 現場グラウト注入試験への適用

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のところを地下水位を設定し、グラウト材は深さ20m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14~20m)で注入した(図1)。

なお、対象領域の岩盤の初期透水係数は 1×10^{-4} cm/secである。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た(図2)。注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工法でグラウト注入試験を実施した。なお、数値解析では、注入圧の時間変化は圧力水頭固定境界として与え、注入圧のスケジュールに従い時々刻々変化させた。数値計算により求められたグラウトの注入量と原位置での注入試験の結果との比較を図3に示す。本図より、数値計算の結果は実測値とよく合致しており、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。図4に各工法の注入後30分、180分後の透水係数の分布を示す。本図より、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、それ以上グラウトを注入できなくなることを示している。最終の透水係数の改良範囲(透水係数が 1.0×10^{-5} cm/sec以下を確保できている領域)はおおよそ2mとなった。この結果は現場で行ったチェックボーリングの結果と一致した。以上の結果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グラウトを注入することが可能となることわかる。

4. まとめ

本研究では、新たに構築したグラウト浸透モデルを用いて、原位置グラウト注入試験のシミュレーションを行った。グラウト注入量および改良範囲は原位置試験の結果とよく一致し、本モデルの妥当性が示された。また、連続配合切替え工法が従来工法に比べ優位であることが示された。

参考文献

小山他. 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. 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2009, pp. 149-154.

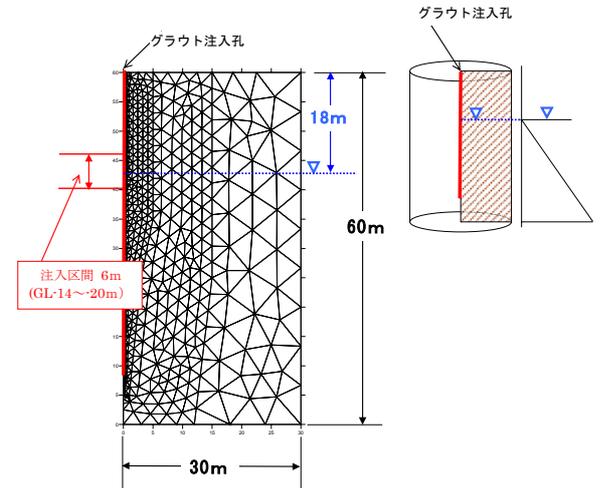


図1 解析モデル

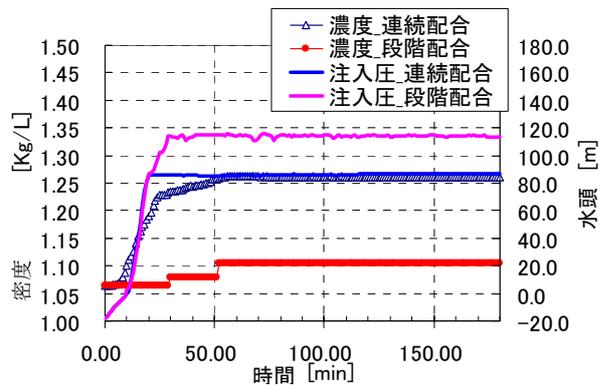


図2 グラウト注入圧, 配合切換えスケジュール

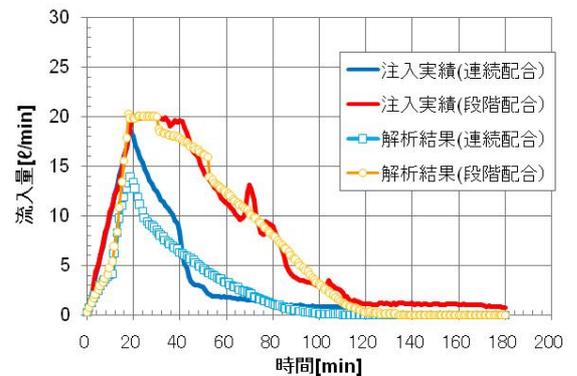


図3 グラウト注入圧, 配合切換えスケジュール

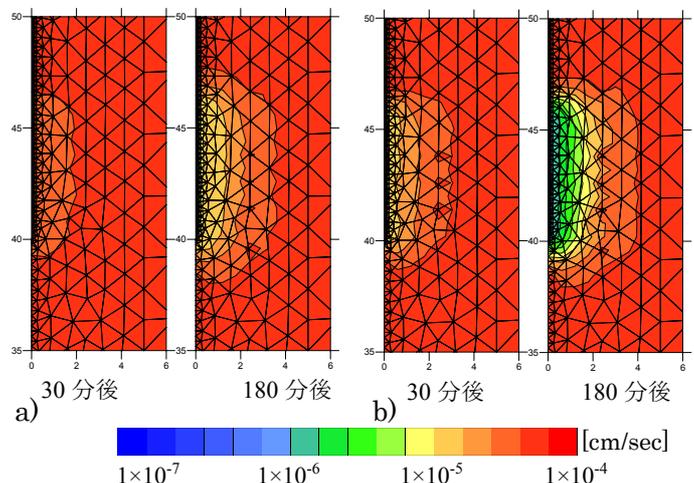


図4 グラウト注入後の透水係数分布の変化, a) 段階配合切替え, b) 連続配合切替え