

京都大学工学部地球工学科	学生員	○大橋	英紀
京都大学大学院工学研究科	正会員	小山	倫史
水文技術コンサルタント (株)	正会員	高橋	健二
(株) 環境総合テクノス	正会員	片山	辰雄
京都大学大学院工学研究科	正会員	大西	有三

1. はじめに

グラウチングでは、地中で注入孔から複雑な岩盤の割れ目に注入するため、グラウトの注入・浸透・閉塞の過程は未だ十分に解明されていない。また、注入圧力などの施工パラメータに関しても、論理的な裏付けがなく、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、溶液型グラウトの浸透メカニズムの解明および対象岩盤の注入予測を目的として、グラウト注入の解析モデルの構築および注入過程の数値シミュレーションを実施した。

2. グラウト注入解析に用いる理論

グラウトをニュートン流体と仮定し、有限要素法 (FEM) により 3 次元非定常の浸透流解析および移流・分散解析を組み合わせることで解析を行う。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。

$$\partial_t(\rho\theta) = (K_{ij}h_{,j})_{,i} - q \quad (1)$$

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

ここに、 K_{ij} : 透水係数テンソル、 h : 全水頭、 q : 流出量、 ρ : 流体の密度、 θ : 体積含水率 ($\theta = nS_w$, n : 間隙率, S_w : 飽和度)、 C : グラウト濃度、 D_{ij} : 分散テンソル、 V_i : 実流速、 Q_c : 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 **Step 2, 3** を所定の時間まで繰り返す。

本解析では、グラウトの注入・浸透・閉塞の過程を浸透流解析における透水係数の低減として扱う。

ある時間 t における透水係数 $k(t)$ はグラウト注入による透水係数の低減について粘性係数の経時変化に伴う透水係数の低減関数 C_f を用いて次のように表現できる。

$$k(t) = K \frac{\gamma}{\mu(t)} = \frac{K\gamma_0}{\mu_0} \cdot \frac{\gamma(t)}{\gamma_0} \cdot \frac{\mu_0}{\mu(t)} = k_0 \cdot C_f \quad (3)$$

ここに、 γ_0 : 初期単位体積重量、 k_0 : 初期透水係数である。

3. 溶液型グラウトの粘性の計測および低減係数の算出

使用した溶液型グラウトはコロイダルシリカ、硬化促進剤、水で構成されており、シリカ濃度 24.7%、ゲルタイム 120 分である。回転式粘度計を用いて、粘性の経時変化を測定し、計測結果を指数関数でフィッティングした。¹⁾ グラウトの粘性の経時変化による低減係数は濃度の関数でもある。ここでは、1 種類の濃度の溶液型グラウトのみで試験を行っているため、純水の粘性係数との間を線形補完することで低減関数を図-1 のように求めた。

4. 多孔質媒体モデルの作成

本研究では、亀裂が多数存在する花崗岩を対象としているため、多孔質媒体モデルを用いることとす

る。モデルの作成範囲は注入孔およびボーリング孔を含む幅 20m, 高さ 20m, 奥行き 36m の直方体の領域である。

初めに、調査ボーリング孔で実施されたボーリングコア・BTV 観察により、亀裂の密度、長さ、走向、傾斜、亀裂開口幅などの幾何学的情報を得る。これらの情報に基づき、解析対象領域の 3 次元空間に亀裂を統計・確率論的に発生させ、亀裂ネットワークモデル (DFN) を作成する。統計的に発生させる亀裂の形状は円盤とし、亀裂の中心 (円盤の中心) 位置は一様分布、トレース長さ (円盤の直径) をべき乗分布、走向・傾斜はフィッシャー分布にそれぞれ従うものとする。また、亀裂間隔は亀裂密度により決定し、亀裂開口幅は、原位置透水試験の結果から逆解析的に求めた。また、直接観察・計測された亀裂については、決定論的に 3 次元解析モデルに組み込む。

次に、試験エリアを 1 辺 50cm の立方体の要素に

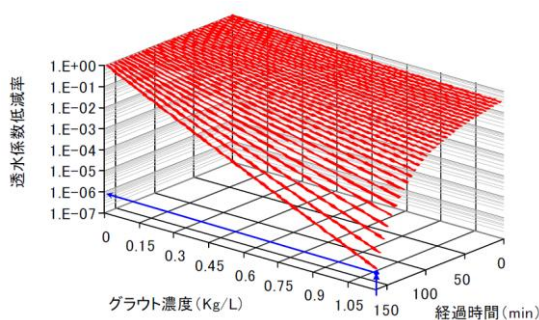


図-1：透水係数低減関数

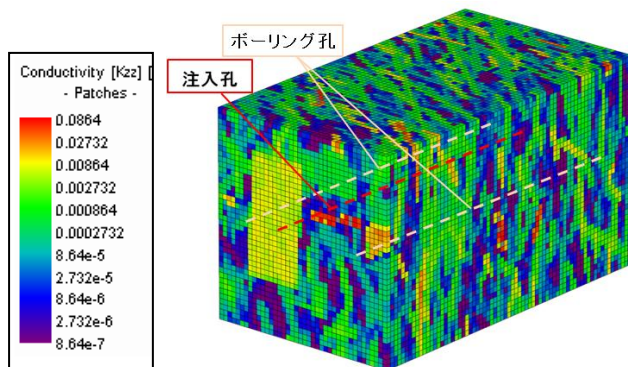


図-2：作成した多孔質媒体モデル

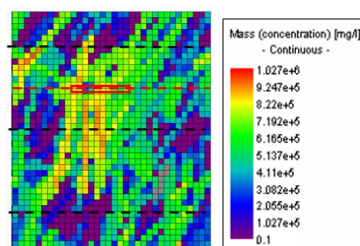


図-4：透水係数分布図

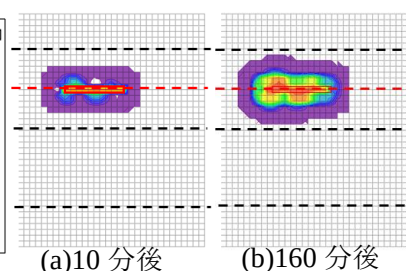


図-5：濃度分布

分割し、個々の要素の透水係数テンソルを求めることにより、DFN から多孔質媒体モデルを作成する。

上記の操作により、各小要素の透水異方性を評価することができ、試験エリア全体としての透水異方性も評価することができる。作成したモデルの透水係数分布図を図-2 に示す。モデルの手前方向は坑道になっており、モデル側面の境界は不透水境界とした。

5. グラウト注入解析

解析において、注入範囲は坑道から 25~30m とし、注入濃度は経過時間によらず一定とする。また、注入圧力は図-3 のとおりである。注入部付近のグラウト注入孔、ボーリング孔を含む水平方向の透水係数分布図を図-4 に示す。

注入開始後(a)10 分、(b)160 分の水平方向のグラウト濃度分布および透水係数低減率分布を図-5、図-6 に示す。ただし、結果は注入部付近のみを示す。

6. まとめ

透水異方性を考慮したことにより、グラウトの浸透現象にばらつきが見られた。注入開始 160 分後、グラウトは注入孔より最大 3m 程浸透し、1~1.5m の範囲で透水係数が 1 オーダー程度改良された。

参考文献

- 1) Kobayashi S and Stille H. Design for rock grouting based on analysis of grout penetration, ISSN 1402-3091, SKB Report R-07-13, 2007

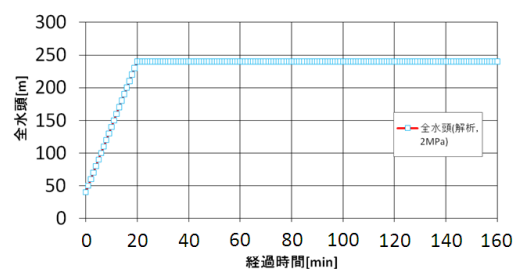


図-3：注入圧力

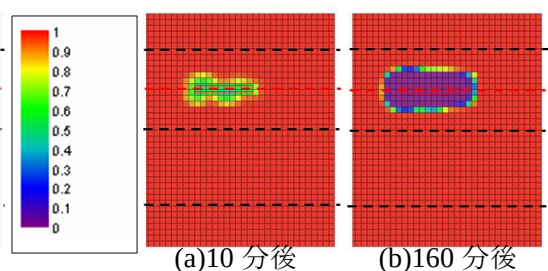


図-6：透水係数低減率分布