

地層処分におけるグラウト技術の高度化開発 (その 8)

— 等価多孔質媒体モデルを用いた注入事前解析 —

(独) 日本原子力研究開発機構 正会員 ○葛葉有史, 岸 裕和

(株) 環境総合テクノス 正会員 蓮井昭則 片山辰雄

京都大学大学院工学研究科 正会員 小山倫史

1. はじめに

岩盤グラウチングでは、複雑な岩盤の割れ目にグラウト材を注入するが、その注入・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諸元に関しても、現場技術者の経験に依存しているのが現状である。本研究ではスイス・Nagra の地下研究施設グリムゼル岩盤研究所（以下、GTS）での地質調査に基づき作成した割れ目モデルに対するグラウト材の浸透状況を評価するために、グラウト浸透モデルとして等価多孔質媒体モデルを用い解析理論や解析コードの改良を行うとともに、室内試験で得られたグラウト材料の特性を使用して、GTS で予定するグラウト注入試験の事前解析を実施した。本報ではグラウト注入解析および結果の一部について報告する。

2. グラウト注入解析の流れ

等価多孔質媒体モデルは、構築された割れ目モデル(その 6)*を変換して作成した。割れ目モデルの領域を 50cm の立方体で要素分割し、個々の亀裂を含む要素に対し規定された x-, y-, z-軸方向より動水勾配を作用させ、要素の各面から得られる透水量より透水テンソルを求めることで、各要素の透水テンソルが異なる透水異方性を評価することが可能な等価多孔質媒体モデルを作成した。

解析はグラウト材料をニュートン流体と仮定し、有限要素法 (FEM) を用いた 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ものである。浸透流解析の支配方程式は、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。

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

ここに、 K_{ij} は透水テンソル、 h は全水頭、 q は流出入量、 ρ は流体の密度、 θ は体積含有率 ($\theta = n \cdot S_w$, 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わされる。

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

ここに、 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。

この解析では、グラウト材の粘性の経時変化と透水媒体の目詰まりによる固有透水係数の低減傾向を、透水係数の低減関数として取り扱っている(その 7)*。ある時刻 t における透水係数 $k(t)$ はグラウトの粘性係数の経時変化に伴う透水係数の低減関数 C_f および目詰まりによる透水媒体の固有透水係数の低減関数 C_s を用いて次式で表現できると仮定する。

$$k(t) = K(t) \frac{\gamma(t)}{\mu(t)} = \left(\frac{K_0 \gamma_0}{\mu_0} \right) \cdot \left(\frac{\gamma(t)}{\gamma_0} \cdot \frac{\mu_0}{\mu(t)} \right) \cdot \left(\frac{K(t)}{K_0} \right) = k_0 \cdot C_f \cdot C_s \quad (3)$$

ここに、 γ_0 : 初期単位体積重量、 $\gamma(t)$: 時刻 t における単位体積重量、 k_0 : 初期透水係数、 $k(t)$: 時刻 t における透水係数、 K_0 : 透水媒体の初期固有透水係数、 $K(t)$: 時刻 t における透水媒体の固有透水係数、 μ_0 : 初期粘性係数、 $\mu(t)$: 時刻 t における粘性係数、である。グラウトの粘性係数の経時変化に伴う透水係数の低減関数 C_f は通常は異なる濃度のグラウトを用いて粘性係数の経時変化を計測することにより求めるが、今回解析に用いたグラウト材料は GTS 事前調査(その 4)*より溶液型グラウト材料(ゲルタイム 120 分)としており、濃度は 1 パターンであるため、純水の粘性係数との間を線形補完することで C_f を求めた。一方目詰まりによる透水媒

キーワード 解析, 等価多孔質媒体モデル, グ라우チング, グラウト材料, 注入

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村松村 4-33 (独)日本原子力研究開発機構 TEL029-282-1133 FAX029-282-1098

体の固有透水係数の低減関数 C_s はサンドコラム試験等により、グラウトが間隙内で目詰まりを起こす現象を計測して求めることが考えられる。

解析の概略流れは、時間 $t=0$ で注入を開始し、①時間差分 dt 後のグラウト注入圧または注入流量を考慮して浸透流解析を行う。②得られた流速を用いて移流拡散解析を行い、グラウト材の濃度分布を、さらに③濃度分布から透水係数の低減を算定し、時間差分 dt 後の透水係数分布を算定する。そして④ dt 経過後の注入モデル(次の時間ステップのモデル)を作成し、以上の手順を所定の時間まで繰り返す。

3. グラウトによる透水特性の低減

解析では溶液型特殊シリカ系のグラウト材料(以下、溶液型グラウト)を想定した。この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%で、設定ゲルタイムは 120 分である。またニュートン流体に近い材料と考えられるため、溶液型グラウトによる媒体中の透水係数低減は、材料の粘性変化によるものと仮定し、ゲルタイム付近で粘性の急激な増大(その 7)*を反映する透水係数低減関数を設定した。解析に使用した透水係数低減関数を図-1 に示す。

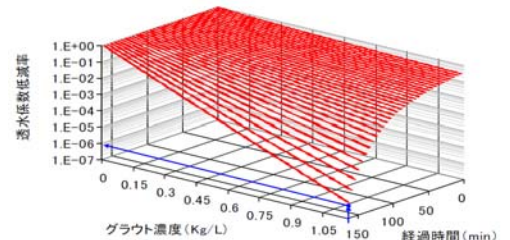


図-1 透水係数低減関数

4. 解析モデル(等価多孔質媒体モデル)

解析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 35m の直方体の領域である。図-2 に注入孔と y 方向透水係数の分布を示す。なお、モデルの手前方向側面は

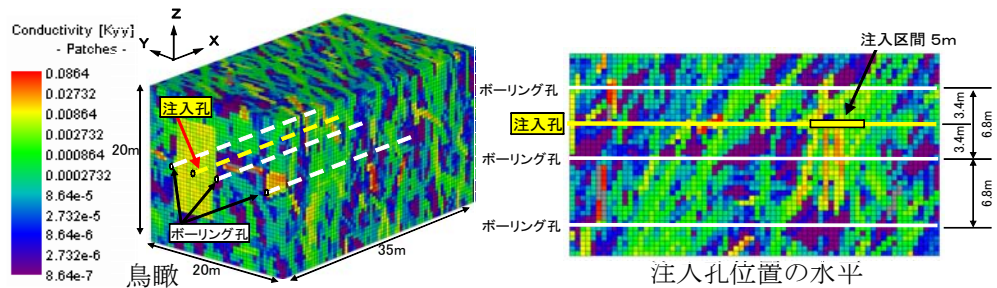


図-2 解析モデルおよび y 方向透水係数分

坑道で境界条件は大気圧解放になっており、奥側側面は 30m の水頭固定、モデル上下面および側面の境界は不透水境界とした。グラウト注入区間は図-2 に示すように、通水確認試験結果(その 4)*より通水性が確認された位置に設定した。グラウト注入区間は深度 23m~28m の 5m間をとり、注入圧力は開始から毎分 0.1MPa ずつ増加させ 2MPa で一定圧注入とした。

5. 解析結果

溶液型グラウトの注入開始 10 分、120 分後での注入孔位置水平面におけるグラウトによる透水係数低減割合を図-3 に示す。注入孔から 2m 範囲で透水係数が改良されていることが分かる。

この結果から、本年度実施予定の GTS におけるグラウト注入現位置試験では、注入孔に対し

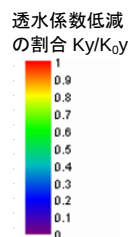


図-3 透水係数低減の割合

2m 離れた位置に観測孔を削孔した上でグラウト注入を実施し、事前解析結果と実際に観測されたグラウトの到達時間を比較検討することで、等価多孔質媒体モデルの適用性を評価する予定である。

なお、本研究は経済産業省資源エネルギー庁「平成 22 年度地層処分技術調査等委託費(高レベル放射性廃棄物関連: 地下坑道施工技術高度化開発)」の一部として実施したものである。

(*) : シリーズ発表の表題中の(*)を示す。詳細は該当の予稿を参照されたい。

参考文献

- 1) 小山倫史, 高橋健二, 田村晴彦, 小林翼, 龍田圭亮, 大西有三. 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回岩盤力学シンポジウム講演集 pp. 149-154, 2009.