

地層処分におけるグラウト技術の高度化開発 (その 7)

ーサンドカラム試験によるグラウトの目詰まり特性の評価ー

京都大学大学院 学生会員 ○大橋英紀, 正会員 小山倫史
 (株) 環境総合テクノス 正会員 蓮井昭則, 片山辰雄
 (独) 日本原子力研究開発機構 正会員 葛葉有史

1. はじめに

亀裂性岩盤へのグラウティングにおいて、浸透・充填・閉塞の過程は十分に解明されておらず、また、使用されるグラウト材は、その利用対象や目的、対象地盤の透水係数、亀裂の大きさなどにより異なる。本研究では、溶液型グラウトおよび超微粒子球状シリカグラウトを対象として、グラウト浸透モデル（等価多孔質媒体モデル）作成^{1,2)}に必要なグラウトの流動・目詰まり特性の評価のため、粘性試験およびサンドカラム注入試験を実施した。

2. グラウト注入における透水係数の低減

多孔質媒体では、グラウトの注入・浸透・閉塞の過程を透水係数の低減として扱う。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する。これら低減関数は、時間の関数であるとともにグラウトの濃度の関数であることに留意する。

$$k(t) = K(t) \frac{\gamma(t)}{\mu(t)} = \left(\frac{K_0 \gamma_0}{\mu_0} \right) \cdot \left(\frac{\gamma(t)}{\gamma_0} \cdot \frac{\mu_0}{\mu(t)} \right) \cdot \left(\frac{K(t)}{K_0} \right) = k_0 \cdot C_f \cdot C_s \quad (1)$$

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、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。

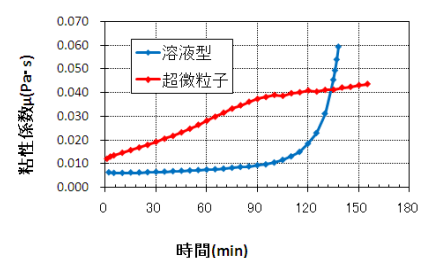
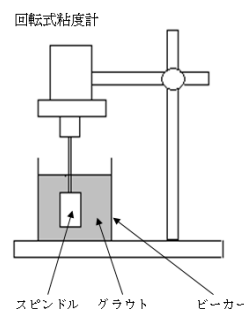
一方、目詰まりに起因する透水媒体の、ある時刻 t における固有透水係数の低減率については、グラウト注入中の間隙率の経時変化を測定できれば、Kozeny-Carman の式 ((2)式) を用いて、(3)式より求めることができる。

$$K = C \frac{n^3}{(1-n)^2} d^2 \quad (2), \quad \frac{K(t)}{K_0} = \frac{n(t)^3}{(1-n(t))^2} \cdot \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \equiv C_s \quad (3)$$

ここに、 C ：定数、 d ：多孔質媒体の平均粒径、 n ：間隙率、 $n(t)$ ：時刻 t における間隙率、 n_0 ：初期間隙率である。なお、グラウト注入時の多孔質媒体の平均粒径の増加は無視できると考え、また、ここで得られる透水係数の低減関数は、等価多孔質媒体モデルでの事前解析(その 8)*に適用される。

3. グラウト粘性の経時変化の測定

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、ゲルタイム 120 分のものを使用した。また、超微粒子球状シリカは、シリカポール（主剤・硬化剤）・混和剤・水で構成されている。図-1 に示す回転式粘度計を用いて粘性係数の経時変化を測定した。測定結果を図-2 に示す。



4. サンドカラム注入試験

グラウトの注入中の多孔質媒体の目詰まり特性の

図-1 粘性試験の概念図

図-2 粘性試験の結果

把握のために、サンドカラムを用いたグラウト注入試験を実施した。供試体はアクリル製モールド（内径 15cm × 高さ 30cm）を用い、珪砂 8 号（粒径 0.2～0.05mm）を締め固めて作製した（初期間隙率 0.42，初期透水係数 $3 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ）。試験装置は図-3 に示すとおりである。鉛直に設置し、水で飽和した円柱供試体下部より一定流量（0.15l/min）でグラウトを注入し、注入圧力が注入ポンプの限界である 1.0MPa を超えた時点で注入を終了した。試験終了までの、排出液密度、供試体の増加重量および、注入圧力・流量の経時変化をそれぞれ図-4～7 に示す。

溶液型グラウトは、注入開始後、供試体中をほぼ均等に浸透し、初期間隙に存在した水がグラウトと置換された後、原液とほぼ同じ密度の排出液が確認され、供試体の重量の増加は小さいものであった（図-4 参照）。また、注入終了後の供試体を解体することによりグラウト材の浸透程度を観察したが、全体に均一に浸透しており、透水媒体において、注入中の目詰まりの発生はなかったことが確認された。

一方、超微粒子球状シリカでは、水がグラウトと置換された後も、供試体の重量は増加し続け、原液より小さな密度の排出液が確認された（図-5 参照）。これは、超微粒子球状シリカが供試体内にトラップされていることを意味している。また、局所的な水みちの発生も確認できた。発生した水みちの様子を図-8 に示す。溶液型グラウトと比較すると、注入圧力は注入開始時から急激に上昇し、透水媒体における目詰まりの発生に起因するものと考えられる。また、グラウト粘性の経時変化（図-2 参照）より、超微粒子球状シリカは溶液型グラウトに比して粘性が高く、超微粒子球状シリカの平均粒径が $0.3 \sim 0.8 \mu\text{m}$ と溶液型グラウトの粒径（10～20nm）より大きいことが供試体の目詰まりの要因であると考えられる。

5. まとめ

異なる 2 種類のグラウト材を用いたサンドカラム注入試験より、グラウト浸透のメカニズムの相違がみられた。すなわち、溶液型グラウトでは透水媒体の目詰まりは発生せず、供試体に均等に浸透し、ゲルタイム（ゲル化する時間）付近の急激な粘性の増大により透水係数が低減するのに対し、超微粒子球状シリカの場合、溶液型グラウトと比べて粘性が高いことに加えて目詰まりの発生による透水係数の低減が大きく影響していることがわかった。したがって、本試験によるグラウト浸透特性の把握は、グラウト浸透モデル(等価多孔質媒体モデル(その 8)*)のパラメータを適切に評価する上で重要である。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。

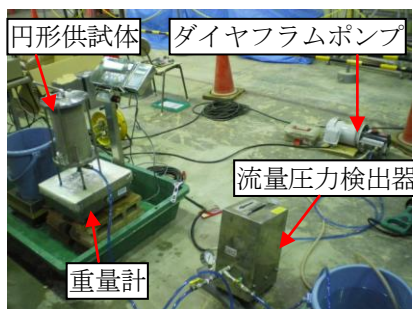


図-3 注入試験図

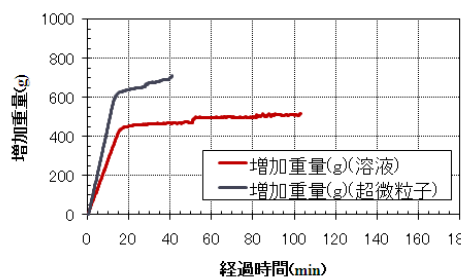


図-4 増加重量

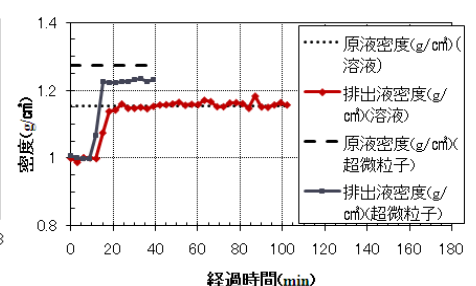


図-5 排出液密度

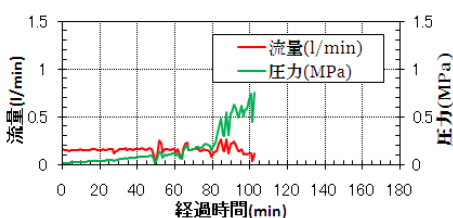


図-6 注入圧力・流量(溶液型)

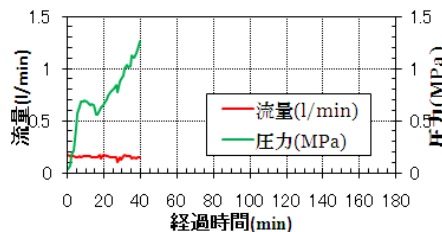


図-7 注入圧力・流量(超微粒子)



図-8 水みちの様子

参考文献

- 1) Ki-Bok Min., Lanru Jing, Ove Stephanspn : Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic REV approach, Method and application to the field data from Sellafield, 2004.
- 2) 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, pp149-154, 2009.