

岩盤の亀裂における 地下水中コロイドの挙動と亀裂閉塞の可能性に関する研究

○東京大学 学生会員 テグーシスワント
東京大学 正会員 井上 純哉

1. 背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分の建設に関して、天然バリアとしての大深度岩盤の役割を評価しなければいけない。特に、核種が地下水中コロイドに収着しやすいことから、コロイドの影響を評価する研究が多くなってきた。従来のコロイドの影響評価において、コロイドの移流と拡散のみ考慮されるが、特別に長期的な安全評価を行うには、それだけでなく、コロイドを粒子として考慮し、その影響を評価すべきである。

そこで、この研究では、コロイドの挙動を単一水平亀裂において解析することによってその挙動の性質を把握することと、コロイドの挙動に関連する亀裂の閉塞の可能性を検討することを目的としている。

2. 地下水コロイド

この研究では、地下水コロイドの挙動を2つに分ける。

- 地下水コロイドの移行。これには(1)地下水の移流と共に進行する移行(移流)、(2)ブラウン運動で自己拡散する移行と(3)重力で行われる移行がある。このとき、コロイドの移行によるコロイド濃度の時間変化は次のように表されている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left\{ \left(-\mathbf{v} + D \cdot \frac{\nabla h}{h} + D \cdot \nabla \right) \cdot \nabla - \frac{v_s}{h} \right\} C \quad \text{ここで、} C: \text{コロイド濃度、} \mathbf{v}: \text{流速、} D: \text{コロイド拡散係数、} h: \text{開口幅、} v_s: \text{コロイド重力方向速度である。}$$

- コロイドは粒子として次のような性質を持っている。
ア) 衝突によるコロイドの集合。その衝突確率を支配する要因には(1)コロイドのブラウン運動、(2)流速勾配によるコロイド相対運動と(3)コロイド粒径の相違による重力方向の相対運動がある。

ロ) コロイドの生成過程。それは(1)イオン交換反応で新しい小さいコロイドが生成される過程と(2)沈殿したコロイドが外乱で脱着する過程である。

コロイドの集合と生成によるコロイド濃度の時間変化は次の式に計算されている。

$$-\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{\partial C_j}{\partial t} = \frac{\partial C_{i+j}}{\partial t} = K \cdot C_i \cdot C_j \quad \frac{\partial C_0}{\partial t} = k_c$$

$$k_b = \frac{2}{3} \cdot \frac{kT}{\eta} \cdot \frac{(d_1 + d_2)^2}{d_1 \cdot d_2} \quad k_{sh} = \frac{(d_1 + d_2)^3}{6} \cdot G \quad k_s = \frac{\pi \cdot g \cdot (\rho - 1)}{72\eta} \cdot (d_1 + d_2)^3 \cdot (d_1 - d_2)$$

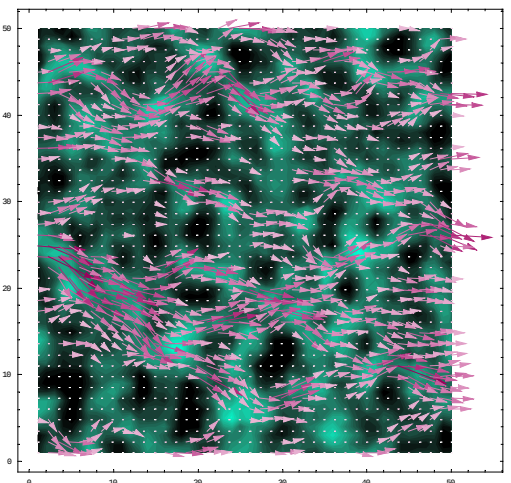


図1 亀裂の開口幅状態と地下水流れ

ここでは、 $K=k_b+k_{sh}+k_s$:衝突係数、 k_b :ブラウン運動による衝突係数、 k_{sh} :流速勾配による衝突係数、 k_s :重力による衝突係数、 k :Boltzman定数、 T :絶対温度、 η :水の絶対粘性、 d_i :第*i*種コロイドの平均粒径、 G :平均流速勾配、 g :重力加速度、 ρ :コロイドの密度、 k_c :生成係数である。

以上の式を離散的に立て直してコロイドモデルを作成した。そして、水平亀裂の開口幅をランダムで作成し、現場計測の地下水流速に合うように流速を計算した亀裂モデル(図1)にモデルを代入して解析を行った。

キーワード 高レベル放射性廃棄物 コロイド 亀裂 閉塞

連絡先 東京都文京区本郷7丁目3番1号 東京大学工学部土木工学科 TEL

4. 解析結果

- このコロイドモデルでは、時間軸に対して濃度が安定した時、コロイド濃度分布は経験則の Pareto 則に従うことが確認された(図 2)。そして、開口幅に対して濃度を比較したところ、小さいコロイド濃度は開口幅に関係なくほぼ一定であるが、大きいコロイドは広い開口幅ほど濃度が高いことがわかった。
- コロイドの沈殿で開口幅が狭くなるが、生成によって開口幅が広がる。この開口幅の変化量(沈殿-生成)は全要素において正であることが確認された。また、開口幅とその変化量は強い線形的な関係を持つことがわかった。(図 3 流速 1 倍)。この結果によって、長期的に亀裂がほぼ均等に閉塞されることが考えられる。
- 処分場の建設の影響で地下水の流速は現在より速くなることが推定される。そのために、解析では流速を 100 倍に設定して解析を行った。結果として、流速 1 倍で得られた開口幅と変化量の関係がなくなることがわかった(図 3 流速 100 倍)。高速流動の場合、沈殿が流動の分岐点、または曲がる点、つまり流速の減少するところに集中することが観察できる(図 4)。発生した局所的に大量沈殿によって、均等な閉塞ができなくなる。これはつまり、地下水の流動が速い亀裂ネットワークが長期的に閉塞されない可能性があると考えられる。

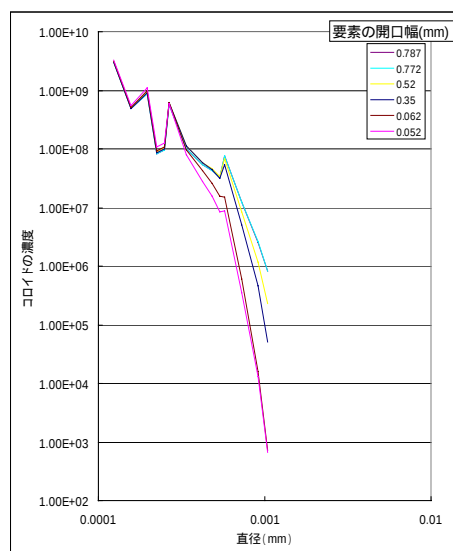


図2 コロイドの粒径分布

$$\text{Pareto 則: } \log\left(\frac{d\chi}{d\Phi}\right) = a + b \cdot \log \Phi$$

$d\chi / d\Phi \cdot d\Phi$: 粒径 $\Phi \sim (\Phi + d\Phi)$ のコロイド数
 a, b : 定数で、 $b < 0$

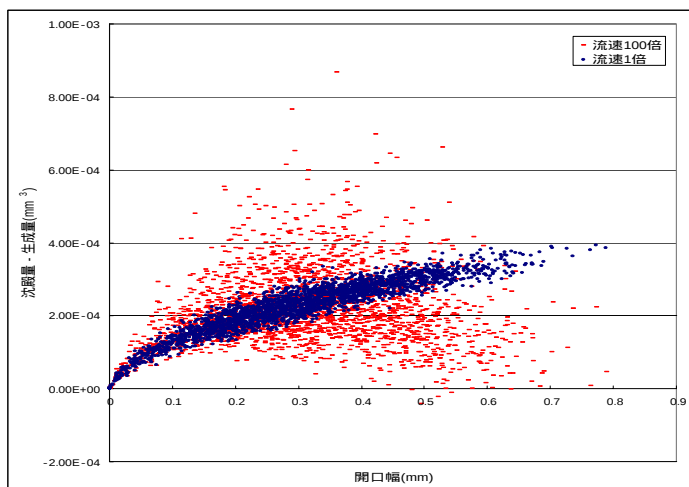


図3 開口幅とその変化量の関係

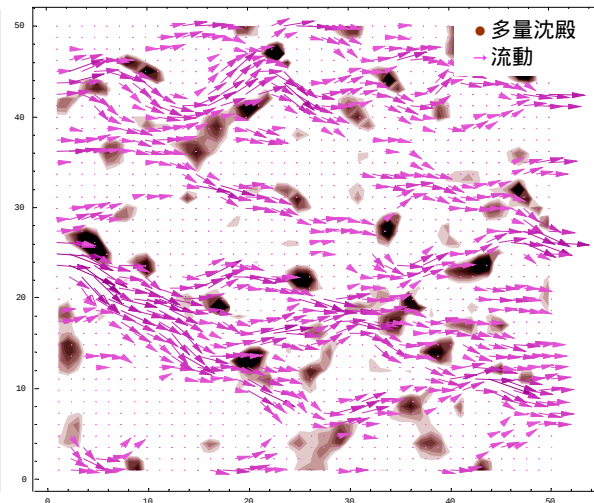


図4 高速流動における開口幅の閉塞の局所化

5. まとめ

- コロイドの挙動を考慮することで、コロイド濃度が一定に保たれるのはコロイドの移行ではなく、コロイドの沈殿と生成がバランスを取ることが主役であることが考えられる。その結果、コロイドの濃度が一定といっても、流動に伴って地下水に存在するコロイド粒子が沈殿して新しく生成された粒子に変わる。
- 解析より、自然岩盤ではコロイドの挙動によって亀裂が閉塞する。しかし、処分場の建設の影響で流速が高くなると、コロイドの沈殿が局所的になり、閉塞の可能性が低下する。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構：地層処分研究開発第2次取りまとめ
- Werner Stumm：Chemistry of the Solid-Water Interface: Processes at the Mineral-Water and Particle-Water Interface in Natural Systems, Wiley, New York, 1992