

II-4

亀裂性岩盤モデルにおける溶質分散の確率的解析

室蘭工業大学大学院 学生員 岩本英規
 室蘭工業大学工学部 正員 藤間 聡

1. はじめに

石油の地下備蓄や高レベル放射性廃棄物の地層処分などの関連で、近年様々な岩盤内の浸透流解析が注目されるようになって来ている。地層処分された廃棄物はいずれ溶け出て、地下水によって地表近くに運ばれ人の生活圏に達する可能性があるが、地下水の動きやその通路となる岩石の亀裂性状などは十分に解明されていないのが現状である。

本研究では、スキャンライン法による亀裂の原位置計測に基づき、亀裂性状を十分に反映しうるモデルを構築した後、亀裂モデル内の溶質分散を確率的に解析するものである。

2. 亀裂のモデル化

亀裂の分布性状を支配する要素として亀裂の方向性、連続性、密度、開口幅が挙げられる。本解析では実岩盤におけるこれらの要素の評価方法を検討し、実態に近い亀裂モデルを構築する¹⁾。なお解析においては、ダルシー則が成立しない長大な亀裂を除いた微細な亀裂のみを対象とする。亀裂性状の計測は、写真-1に示す室蘭市中央町に位置する岩盤露出面の縦10m、横10mの領域で行った。この領域をカメラで撮影した後、写真上で水平方向に実寸法50cm間隔の水平スキャンラインを設定した。このスキャンラインと交差する亀裂の卓越方向、亀裂長及び亀裂間隔を測定し、写し込まれている標尺から実長に変換した²⁾。ここで、後述の流動解析を容易に行うため、亀裂長としてスキャンラインとの交点から亀裂端までのセミトレス長を用いる。図-1はスキャンラインに対する亀裂の卓越方向で、90°と20°の方向に多く分布している。図-2は測定総数744本のセミトレス長を0.1mの間隔で示したヒストグラムと回帰曲線であり、相関係数は0.96である。この結果、セミトレス長 l の分布は次式で示される負の指数関数で近似される。

$$f(l) = 0.32 \exp(-3.7l) \tag{1}$$

図-3は測定総数369の亀裂間隔の分布で相関係数は0.84である。亀裂間隔 s の分布も同様に負の指数関数で近似される。

$$f(s) = 0.48 \exp(-4.8s) \tag{2}$$



写真-1 原位置亀裂岩盤

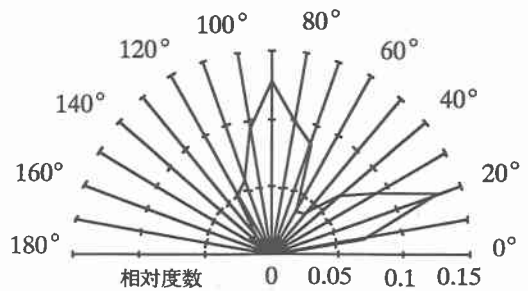


図-1 亀裂の卓越方向

上記の結果に基づき岩盤のモデル化を行う。亀裂系の分布性状を反映させるため、モデル化は以下の手順で行った。

- 1) 10×10 mの正方領域を設定し、全域を0.1m間隔の格子で分割する。
- 2) 0~100までの一様乱数を発生させ、これを亀裂の中心座標とする。
- 3) セミトレース長は指数乱数を発生させ、水平軸に対し 90° と 20° の方向に線分を描く。ここで、指数乱数の発生は、指数分布を0.1m階級の度数分布で近似し、一様乱数から各階級の度数ごとに割り当てる。また計算機で発生させる一様乱数には周期性が存在する。これを避けるため一様乱数を10,000個発生させ、このうち1,000個ずつを取り出し、危険率5%で χ^2 検定を行い χ^2 が最小値となるものを用いる。
- 4) 亀裂発生数は 90° と 20° の方向それぞれ200本ずつとする。
- 5) 再現された亀裂間隔が測定結果に準じているかの検定を行う。

図-4は上述の手法を用いて発生させた亀裂モデルである。発生させた亀裂の中には一端が閉じて不連続なものや、他の亀裂と接続しない孤立亀裂が多数存在する。浸透流が流動できないこのような亀裂は、計算機の容量と計算時間を軽減するために取り除き、図-5のように修正した亀裂モデルを用いる。亀裂の開口幅に関しては、亀裂が長いほど開口幅が大きく、また応力開放の影響を受けて地表に近いほど開口幅は大きくなる傾向があるとの報告があるが、客観的な評価の方法がないため、本解析では開口幅の分布性状が正規分布に従うと仮定し、平均と標準偏差を与えて決定する。

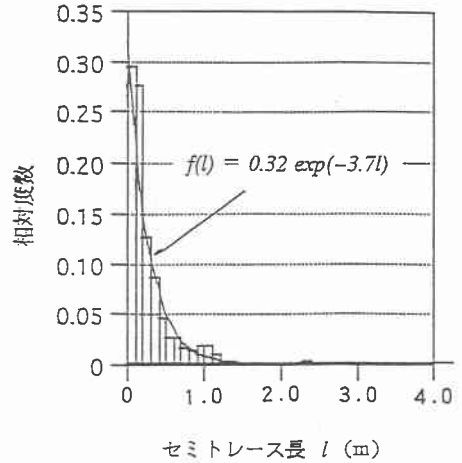


図-2 セミトレース長の分布

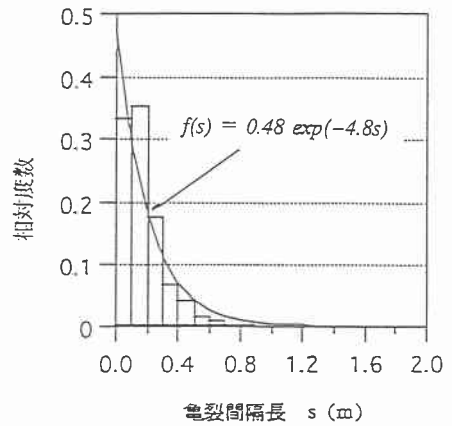


図-3 亀裂間隔の分布

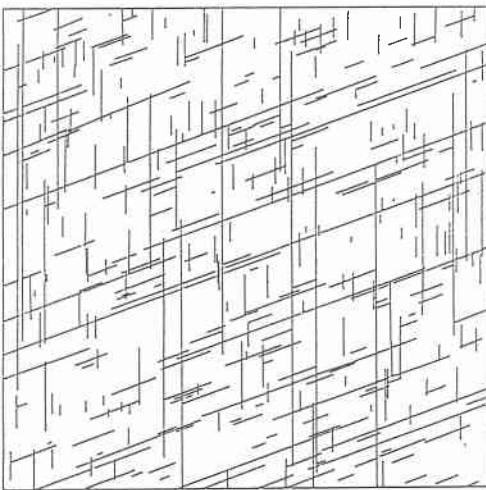


図-4 岩盤亀裂モデル

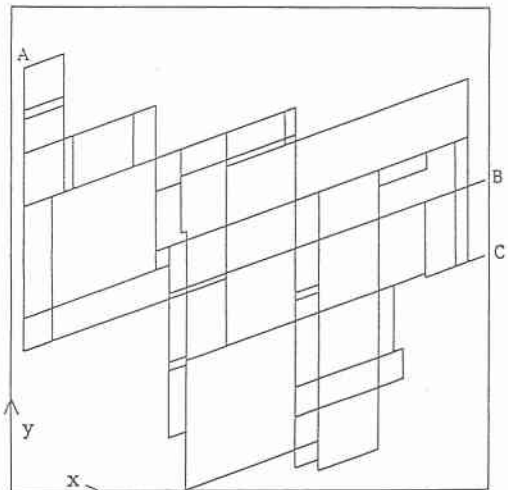


図-5 修正岩盤亀裂モデル

3. 亀裂内の流動解析

岩盤の分散現象は亀裂及び亀裂交点の配置の異方性によってその特性が左右される。この分散は各亀裂の速度変動に基づく分散より規模が大きい³⁾。また、室内透水試験では亀裂のない母岩は一般に非常に小さい透水係数を示すことから⁴⁾、ここでは母岩を不浸透と仮定し亀裂内の流体流動のみを解析する。図-5で示す上流側のA点と下流側のB、C点間に一定の水頭差(1m)を与え、定常状態における亀裂交点での水頭値を有限要素法で求めた。使用した有限要素は4節点アイソパラメトリック要素で、要素が255、節点が404である。亀裂内の流速がDarcy則に従うと仮定すると、透水係数 K は次式で表される。

$$K = \frac{\lambda g t^2}{12 \nu} \quad (3)$$

ここに、 λ は空隙率、 g は重力加速度、 ν は流体の動粘性係数、 t は亀裂開口幅をそれぞれ表す。上式から、透水係数の異方性は異なる方向の亀裂開口幅を変化させることにより導入することができる。開口幅の測定に関しては、一つの亀裂においても測定位置により開口幅が異なり、測定に不確実性が含まれるため、本解析では平均1mm、標準偏差0.5mmの正規乱数を発生させて亀裂の開口幅とした。

4. 亀裂内の分散シミュレーション

本モデルは岩盤内における溶質の分散現象を確率場の一実現値として捉え、既知の水頭値の境界条件のもとで亀裂内の流速を求め、溶質の移行をモンテカルロ法に基づく粒子追跡法を用いて予測するものである。この手法の長所は、亀裂系の空間構造が複雑な場合や長時間にわたる現象をシミュレートする場合には他の解法より簡便で精度よく推定できる。以下に分散シミュレーションの手順を示す。

- 1)有限要素より求められた亀裂交点の水頭値より亀裂両端の水頭勾配を求める。亀裂は浸透流のみで満たされているものとし、(3)式から求めた透水係数を乗じて流速とする。ただし、交点間における亀裂幅は一定とする。
- 2)図-5に示す亀裂系の上流点Aから濃度粒子を10,000個放出する。
- 3)濃度粒子が亀裂交点に達した場合は、図-6に示すようにモンテカルロ法を用いて粒子が次に流下する亀裂を各亀裂の流量 Q_i を重みとした確率 P_i で選択する。

$$P_i = Q_i / \sum_{i=1}^3 Q_i \quad (4)$$

- 4)一定の計算時間間隔ごとに濃度粒子の流動距離を求め、その滞留位置を連続的に追跡し、所与の計算時間に達するまで繰り返す。
- 5)全亀裂を20cmの長さの小区間に分割し、各区内に滞留する相対粒子数のヒストグラムを作成する。このヒストグラムを溶質濃度の空間分布とする。

図-7、8は x 、 y 方向における濃度分布を示したものであり、亀裂幅を変化させた3試行について示してある。原点は左下端にとった。両図より、分布が不連続であることから粒子は限られた亀裂に多く滞留することが分かる。 x 方向の濃度分布からは各試行ごとの共通性は認められず、またピーク値も異なるため亀裂幅の変化による流速の変動の影響を受けているものと思われる。 y 方向の濃度分布は、上流部にのみ集中していることから、粒子は濃度勾配に従い水平方向に流れ、鉛直に流れるものは少ないことが認められる。

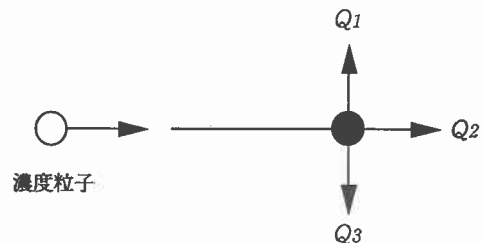


図-6 流下する亀裂の割り当て

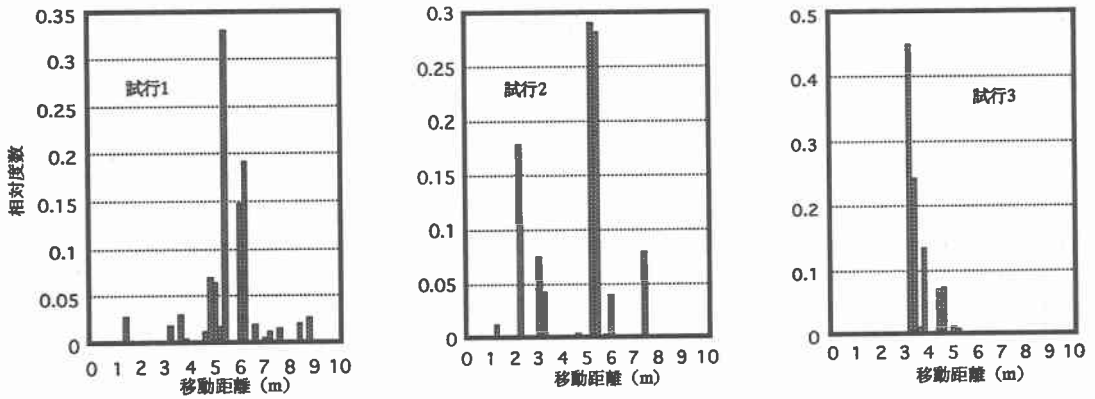


図-7 x方向における濃度分布

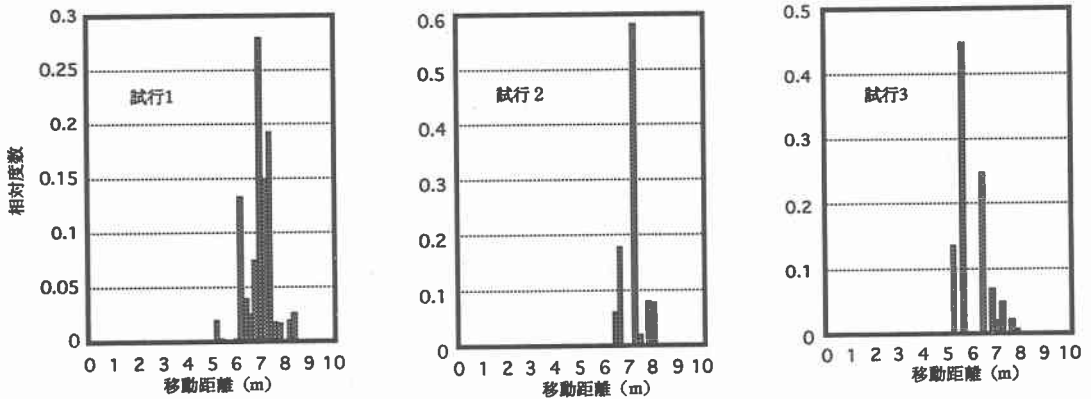


図-8 y方向における濃度分布

5. 結論

本研究は、亀裂性岩盤内の溶質分散を実岩盤の特徴を反映させたモデルを用い、確率的に解析しようとしたものである。溶質の分散は亀裂の開口幅の変化に基づく流速変動に影響を受ける。また、濃度分布は歪みを有することから正規分布型の解を与える移流拡散方程式を用いたオイラー的な解法は不適切である。

参考文献

- 1) 藤間 聡, 亀裂岩盤内における溶質分散の確率的解析, 水工学論文集第36巻, 土木学会, pp417-422, 1992.
- 2) Priest, S.D. and J.A. Hudson, Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scan-line Surveys, Int. J. Rock Mech. Sic. & Geomech. Abstr., 18, pp. 183-197, 1981.
- 3) 藤間 聡, 亀裂性岩盤内における熱・放射性核種輸送に関する研究, 昭和63年度～平成元年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書, pp. 13-14, 1990.
- 4) ゲットマン, R. E. (大西有三・谷本親伯訳), わかりやすい岩盤力学, 鹿島出版, pp. 24, 1984.
- 5) 岩本英規, 藤間聡, 亀裂岩盤内の浸透流流動解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第50号, pp. 404-407, 1994.