

亀裂岩盤内における溶質分散の確率的解析

A stochastic Analysis of Macroscopic Dispersion in Fractured Rock

藤間 聡*

by Satoshi TOHMA

A stochastic modeling technique has been developed to investigate mass transport in a network of discrete fractures. In order to characterize rock mass geometry for modeling, fracture lengths and spacings were measured on the planar rock face at the site. Fracture lengths and spacing values follow negative exponential distributions. A network is generated using probability density function. The mass transport was calculated using the Monte Carlo simulation procedure. Results shows that mass dispersion have complex patterns. These patterns arise from the limited number of fractures for mass to migrate the through the fracture network.

Keywords: Fracture Network modeling, Monte Carlo Method, Particle Tracking Technique, Macroscopic Dispersion.

1. はじめに

亀裂岩盤内における物質の分散問題は、放射性廃棄物の地中処分や石油地下備蓄の計画及び実施に伴い強い関心を集めている。亀裂岩盤の透水性については水理学的に等価多孔体に置換してその特性を解析するモデル化が一般的である¹⁻²⁾。しかし、Mainiの原位置透水試験³⁾を初めとする多数の調査から、浸透流の流動可能な亀裂は全亀裂のごく一部に限られ、かつ亀裂分布の性状が流体流動に及ぼす影響は極めて大きいことが知られており、亀裂岩盤内の物質移行解析に等価多孔体モデルを適用することは適切とはいえない。

本研究は、岩盤の原位置調査から評価した亀裂性状を十分に反映しうるモデルを構築した後、モデル化された亀裂系における物質移行をモンテカルロ法で解析し、その基本的な特性を把握しようとするものである。

2. 亀裂モデルの概要

実岩盤では、断層のような長大な割れ目から微細な割れ目までスケールの異なる多数の亀裂が存在するが、ここでは長大なものを除き、流体が飽和状態で流動可能なスケールの亀裂を解析対象にする。原位置における亀裂の分布性状を把握するには、Priestが提示した統計的手法⁴⁾を用いる。この手法はスキャンラインと称される走査線を岩盤露出面または写真上に設置した後、このスキャンラインと交わる亀裂の長さや間隔を測定して分布性状の確率密度関数を決定し、平均及び分散等の統計的特性値を求めるものである。

* 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科
(〒050 室蘭市水元町27-1)

解析対象の亀裂性岩盤は、写真-1で示す北海道登別市の太平洋沿岸に位置する海食崖露頭面である。この面において高さ10m、幅12mの範囲をカメラで撮影し、191×245mmに引き伸ばした写真上で実寸法1.0m間隔でスキャンラインを縦12本、横10本設置した。これらのスキャンラインで捕捉されたセミトレス長を写真中に写し込まれているスケール(測量ポール)から実長に変換してその分布性状を求めた。ここで、セミトレス長とは、亀裂の一端からスキャンラインとの交点までの長さを表し、二つのセミトレス長の和が亀裂全長となる。図-1は総数816本のセミトレス長を0.1mの階級で分級したヒストグラムであり、最小二乗法で求めた回帰曲線を併せて図示している。この結果、本調査対象のセミトレス長 l の分布は次式で示される負の指数関数で表される。

$$f(l) = 0.192 \exp(-1.9l) \quad (1)$$

セミトレス長の分布が指数関数に従うことは、短い亀裂が多数存在し、長い亀裂が少数であることに起因する。次に、測定総数422の亀裂間隔の分布を図-2に示す。亀裂間隔 s の分布もセミトレス長の分布と同様に負の指数関数で近似できる。

$$f(s) = 0.183 \exp(-1.8s) \quad (2)$$

岩盤亀裂系のモデル化は、亀裂を長さで開口幅に分布をもつ平行滑面間隙のネットワークで表し、原位置の分布性状に応じて解析領域に配置する方法を用いた。モデル化の手順は以下の通りである。

- ①解析領域を10×10mの正方領域と想定し、縦、横0.10m間隔の格子網で全域を分割する。
- ②発生させる亀裂は、原位置における亀裂系の方向がほぼ水平、鉛直方向に卓越していることから互いに直交する1組の亀裂系を考える。亀裂数は水平、鉛直方向にそれぞれ100本ずつとする。
- ③(2)式に従う2個の指数乱数を発生させ、これを亀裂中心の位置座標として所定の格子点へ割り当てる。
- ④(1)式に従う亀裂長を格子網に沿って発生させ、手順③で求めた中心点に亀裂中心を合致させる。
- ⑤以上の手順で構築した亀裂モデルのほか、直交亀裂系の一方の卓越方向に水平軸に対して30°、45°、60°の3種の傾斜角を仮定し、亀裂軸の方向性による溶質濃度分布の相違を検討する。

計算機で発生させる疑似一様乱数は周期性を有する。これを避けるため発生させた10,000個の一様乱数の中から1,000個ずつを取り出し、危険率5%で χ^2 検定を行って χ^2 が最小値となるものを指数乱数に変換した。

図-3は相互に直交する縦、横各100本ずつの亀裂を上記の手法を用いて発生させた亀裂モデルの例示である。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を取り除き、図-4に示すような不連続性および死水域が存在しないように修正した亀裂モデルを分散シミュレーションに用いる。

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



写真-1 原位置岩盤亀裂 (北海道登別市)

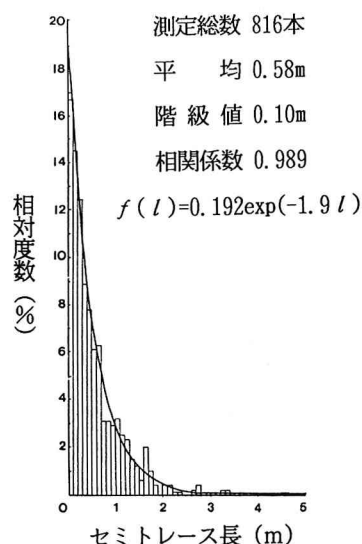


図-1 セミトレス長のヒストグラム

なる傾向があるとの報告⁵⁾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。

亀裂岩盤内の分散は、亀裂密度の大小、亀裂の連続性及び亀裂の卓越方向と主流方向との角度に依存する。図-4に示した亀裂モデルは、連続した亀裂が解析領域の右下方部分に限定されており、不均質かつ異方性が強い亀裂系を再現したことになる。ここで、図-5に示すように亀裂の発生本数のみを各方向300本に増加させ、亀裂密度と連続性を高めたモデルを改めて構築し、亀裂岩盤の分散特性に与える亀裂幾何特性の影響について比較検討を加える。

3. 岩盤亀裂内浸透流の数値シミュレーション

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⁶⁾、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。

亀裂を平行滑面間隙で表現できると仮定すると、亀裂内の非圧縮粘性流体の流速は、流動が層流状態であるならば次式で与えられる。

$$v = KJ \quad (3)$$

ここに、 v は亀裂内の流速、 K は透水係数、 J は全水頭（ポテンシャル）勾配をそれぞれ表す。

一方、亀裂内の定常浸透流の連続の式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial h}{\partial y}) = 0 \quad (4)$$

ここで、(3)、(4)式中の透水係数 K は次式で与えられる。

$$K = \rho g b^2 / 12\mu \quad (5)$$

ここに、 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 μ は流体の粘性係数、 b は亀裂の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容易に導入することができる。亀裂開口幅の決定に関しては、一本の亀裂においても測定位置により開口幅が異なり、測定値に不確実性が含まれるため、本解析では平均 0.10mm、標準偏差 0.025mm の正規乱数を発生させて亀裂の開口幅とし、(5)式から透水係数を決定した。

図-4に示す亀裂モデルにおいて、交点間の各亀裂をそれぞれ4節点2次元要素として取り扱った有限要素法により所与の境界条件で亀裂交点の全水頭値を求める。ここで、全要素数は252、全節点数は406である。2次元要素を用いたのは、亀裂開口幅は応力履歴と作用応力の大きさに依存すると言われる⁵⁾、今後の研究でこの特性を考慮に入れるためである。

亀裂交点における全水頭値を算定するため、(4)式を重み付き残差法により定式化を行う。本解析で使用した重み付き

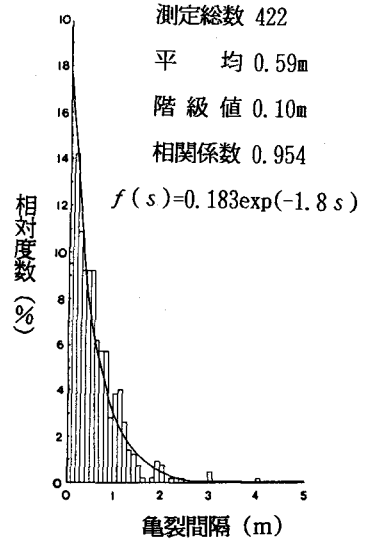


図-2 亀裂間隔のヒストグラム

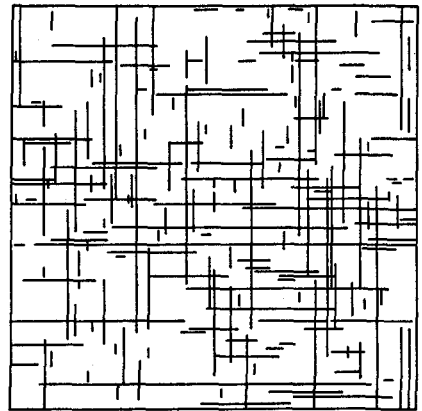


図-3 岩盤亀裂モデル

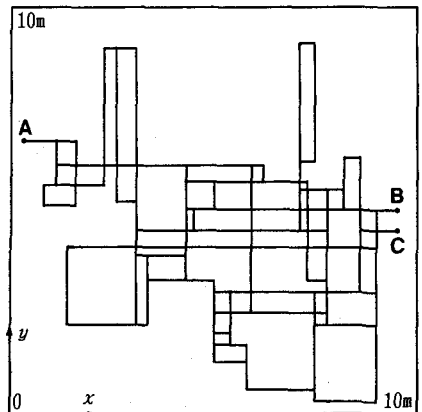


図-4 修正岩盤亀裂モデル

残差法はガラーキン法である。要素節点における全水頭値を用いて、要素内部の任意点の全水頭値を補間する試行関数は次式で与えられる線形関数を用いる。

$$\hat{h}(x, y) = \sum_{j=1}^4 N_j h_j \quad (6)$$

ここに、 $\hat{h}$ は近似値を示し、添字 j は一要素において反時計回りに付けた 1 から 4 までの節点番号を表す。ガラーキン法により次式で示される (4) 式の離散化方程式を得る。

$$\sum_{e=1}^m \int_R \left[K \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + K \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] h_i dx dy = 0 \quad (7)$$

ここに、 e は要素番号、 m は要素総数、 i, j は節点番号を表す。

境界条件として図-4のA点とB、C点間に全水頭差50cmを与え、(7)式を用いて各要素節点における全水頭を求める。

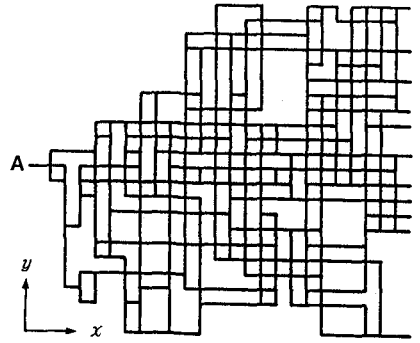


図-5 修正岩盤亀裂モデル

4. 粒子追跡法による溶質分散シミュレーション

亀裂岩盤内における溶質分散現象は、亀裂長や卓越方向の分布性状及び亀裂交点の配置に起因する空間的な不均質性と異方性によって規定される。このような溶質分散を巨視的分散と呼称する。

分散現象を解析するには、移流拡散方程式を解析的または数値的に解くオイラーの方法と濃度粒子の流動位置を時間とともに追跡するラグランジュの手法が挙げられる。本解析では、空間的に不均質で異方性な亀裂系を対象とするためラグランジュの方法を用い、濃度粒子追跡法により分散機構を考察する。

分散シミュレーションの手順を概説すると、以下の通りである。

- ①図-4に示す亀裂系の上流点Aから濃度粒子を順次放出する。放出する濃度粒子の総数は1,000個とする。
- ②濃度粒子が滞留する亀裂の両端交点の全水頭値から全水頭勾配を求め、亀裂は浸透流のみで満たされると仮定し、(5)式から求めた透水係数を乗じて流速を求める。ただし、交点間における亀裂幅は一定とする。
- ③所与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する。
- ④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。

$$P_i = Q_i / \sum_{i=1}^n Q_i \quad (8)$$

ここに、 Q_i は亀裂 i の流量、 n は交点から分岐する亀裂数を表す。

- ⑤所与の計算時間に達するまで上記の計算ステップを繰り返し、総数1,000個の濃度粒子について同様の追跡を行う。
- ⑥全亀裂を20cmの長さのセルに分割し、各セル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。

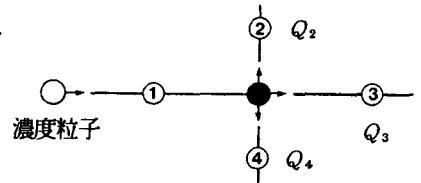


図-6 流下亀裂の割り当て

5. 解析結果

図-7は地下水流の主流方向が水平軸と一致する場合の x 方向(主流方向)の濃度分布を表すもので、亀裂開口幅 b を発生させる正規乱数を変えた3試行について図示している。ただし、 xy 座標の原点を放出点に変換している。濃度粒子は亀裂系の約80%の領域に分散し、放出した粒子の半数が放出点近傍の限定された亀裂に滞留しており、流下距離とともにほぼ一様な分布形を示すことが認められる。本解析で発生させた亀裂ネットワークは、粒子放出点近傍の上流部領域では亀裂数が少ないため濃度粒子が流下する亀裂が限定され、特に亀裂が長く全水頭勾配の緩やかな部分に滞留する傾向が見られる。一方、中・下流部領域ではネットワークを構成する亀裂数が増加し、流下方向の異方性が減少するため濃度分布は一様になると考えられる。

図-8は y 方向(主流に直角方向)の濃度分布を示す。図中の各試行は図-7の試行に対応するものである。粒子の濃度分布は各試行ごとに異なり共通の傾向は認められない。 x 方向の濃度分布と比較すると、 y 方向の分散に寄与する亀裂が放出点より上方領域では非常に少ないため、分散幅は狭いものとなっている。また、中・下流部の亀裂ネットワークにおいて、 y 方向の亀裂数が x 方向に比較して少なく、主流方向の速度変動にตอบสนองして試行ごとに異なる濃度分布形を示すものと考えられる。

図-9は試行2において、流出点BとCを通過する濃度粒子数を累加して得た濃度破過曲線を示す。流出する粒子は、半数の500個が比較的短時間で領域外に流出するのに対し、残りの500個は長時間後も領域内に滞留していることが認められる。この原因は図-7(試行2)の x 方向濃度分布が上流部にピークを有しており、粒子の半数がこの領域に滞留しているためと考えられる。

水平軸に対して 30° 、 45° および 60° の傾斜角をもつ亀裂ネットワークについても同一の条件で解析を行ったが、浸透流速が 0° のネットワークに比較して微小となり、放出点近傍のみに濃度粒子が滞留するため、領域全体の傾向は把握できなかった。

次に、ネットワークを構成する亀裂数に起因する濃度分布の相違を考察するため、水平、鉛直方向それぞれに300本ずつの亀裂を発生させたネットワークにおける濃度分布を求めた。

図-10は図-5に示す亀裂モデルで得られた x 方向の濃度分布を示す。図-7に示す濃度分布に比較して正規分布形に近づくが、いずれの試行においてもまだ歪みを有している。このネットワークは、上流部と周辺部の亀裂発生に異方性が見られるが、中央部は多数の小正方形から構成され、亀裂の交点配置はほぼ等方性となすことができる。しかし、得られる濃度分布は歪みを有することから交点の空間的な配置のみから濃度分布を予想することは困難であることを示している。本例では亀裂開口幅の変化に基づく局所的な流速変動の影響を濃度粒子が強く受けていると考えられる。従って、本解析に正規分布型の解を与える移流拡散方程式を適用した場合は、不正確な結果を与えようと考えられる。

図-11は y 方向の濃度分布を示す。濃度分布はいずれも多峰分布型を示しており、濃度粒子は亀裂ネットワークの全域に広く分布している。多峰分布は領域の周辺部において、 y 方向の構成亀裂数が多いため滞留しやすく、またこの方向に分散が卓越するものと考えられる。

6. 結 び

本研究では、亀裂岩盤内の溶質分散の水理学的基礎を明らかにすることを目的に、原位置岩盤の亀裂長、亀裂間隔の分布性状を反映させたモデルを構築し、モンテカルロ法を用いて分散解析を行った。

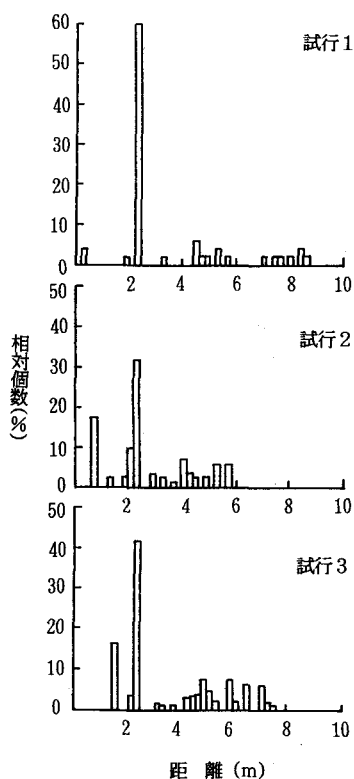


図-7 x 方向の濃度分布

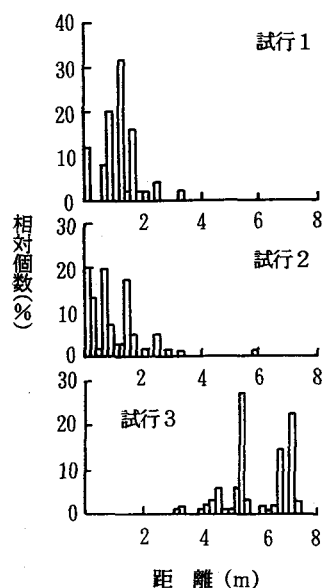


図-8 y 方向の濃度分布

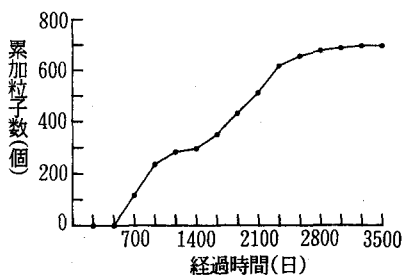


図-9 流出点における濃度破過曲線

得られた結果は、次のように要約される。

- 1) 亀裂岩盤内における溶質分散は、溶質の流下可能な亀裂の幾何学的な分布性状と開口幅の変化に基づく流速変動に起因して生ずる。
- 2) 溶質の濃度分布は、亀裂密度および亀裂交点の空間的な不均質、異方性と流速変動に起因する歪みを有する。従って、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よりラグランジェの解法が有効であると考えられる。
- 3) 亀裂数が増加するとともに、亀裂の空間的配置が均質、等方性に近づく、その濃度分布は正規分布に従う傾向を示す。

今後は、本モデルを更に汎用性の高いものとするため、亀裂系の三次元的表現法、開口幅と応力との連成などの検討を進める必要がある。

最後に、数値計算と解析結果の整理に助力を頂いた本学建設システム工学科卒業生佐藤聖嗣(日本製鋼所)、院生井形淳の両君に謝意を表します。

参考文献

- 1) Sager, B. and A. Runchal, Permeability of Fractured Rock: Effect of Fracture Size and Data Uncertainties, Water Resour. Res., 18(2), pp. 266-274, 1982.
- 2) Huyakorn, P. S. et al., An Efficient Finite Element Technique for Modeling Transport in Fractured Porous Media 1. Single Species Transport, Water Resour. Res., 19(3), pp. 841-854, 1983.
- 3) Maini, T. G. and G. Hocking, An Examination of The Feasibility of Hydrologic Isolation of A High-Level Waste Repository in Crystalline Rock, Geol. Soc. Am., Abstr., 1977.
- 4) 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.
- 5) 永井博史, 稻生道裕, 加藤克行, 上野勇武, 岩盤中の節理分布性状の定量的評価とモデル化に関する検討, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 127-132, 1984.
- 6) グットマン, R. E. 著(大西有三・谷本親伯訳), わかりやすい岩盤力学, 鹿島出版, p. 24, 1984.

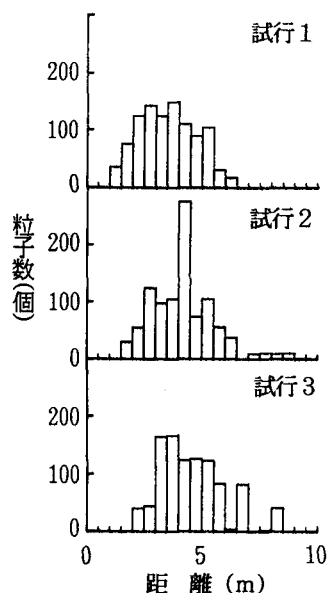


図-10 x方向の濃度分布

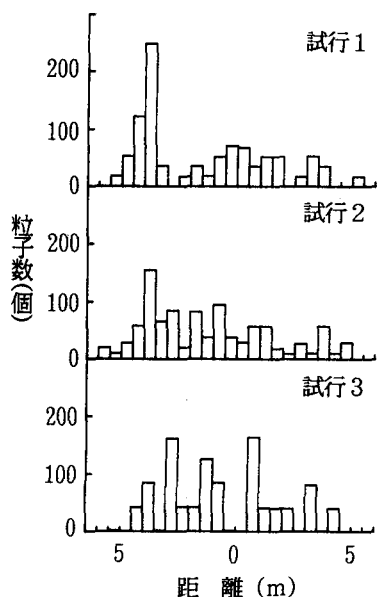


図-11 y方向の濃度分布