

亀裂ネットワークにおける マトリックス拡散を考慮した物質移行解析

MASS TRANSPORT ANALYSIS FOR FRACTURE NETWORKS CONSIDERING MATRIX DIFFUSION

山下 亮*・木村英雄**

By Ryo YAMASHITA and Hideo KIMURA

A mathematical model is presented for mass transport in fracture networks. The model is based on particle tracking method and is capable of simulating interactions between rock matrix and fractures. An analytical solution of advective transport equation considering matrix diffusion is used as a probability density function to determine the travel time of particles in each fracture element. By applying the model to some test problems and comparing results with an analytical solution and a solution by finite element method, the proposed model is found to have enough accuracy and reliability. In order to examine the effect of matrix diffusion on mass transport, fracture networks are generated stochastically. The result shows that matrix diffusion has less retardation effect as the distribution of fracture apertures becomes wider.

Keywords: fracture, mass transport, rock hydraulics, matrix diffusion, particle tracking method

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物は数十年の冷却期間をおいた後、地下数百mから千m程度の深い岩盤内に永久処分することが計画されている。長期間のうちには地下水の侵入などによりガラス固化体容器が損傷・劣化し処分場から周辺岩盤中に放射性核種が漏出することが考えられ、漏出した放射性物質が地層中をどのように移行するかを予測することが大きな研究課題となっている。

一般的に岩盤は大小さまざまな不連続面（亀裂部）と不連続面を含んでいない健全な岩石の部分（マトリックス部）から構成されている。したがって、通常均質な多孔質体として取り扱われる土質地盤などは異なり岩盤を対象として地下水流解析や物質の移行解析を行う場合、2つの異なった物理的特性を有する材料からなる複合媒体であることを考慮して解析のモデルを開発することが必要と考えられる。

亀裂性媒体については多くの研究者によって実験的および解析的な研究が行われてきた。Neretnieksら¹⁾は、天然の亀裂を含む花崗岩のボーリングコアを用いて室内カラム実験を行っている。彼らは流速や注入の条件を変

化させてトレーサー実験を行い、その破過曲線（breakthrough curve）を得ている。実験結果を解析した結果、亀裂部とマトリックス部との間の拡散による物質の移行（以後マトリックス拡散とよぶ）が、破過曲線に少なからず影響を与えていると報告している。すなわちパルス注入の場合に破過曲線に長いテール部がみられるのは、注入された物質の一部が亀裂部からマトリックス部へ拡散移行した後、亀裂部の濃度がマトリックス部の濃度より小さくなったときに再び亀裂部に逆拡散し流れに沿って流出してきたためであるとしている。そのため放射性廃棄物を亀裂性岩盤へ処分する場合、マトリックス拡散が核種の移行を遅延させる効果として重要であることを指摘している。

岩盤における地下水流や物質移行の解析手法は①多孔質体モデル、②亀裂ネットワークモデルに大別される。これら2つのモデルの違いは、簡単にいえば亀裂の存在をモデル化する際に陰に表現するか陽に表現するかの違いであると考えられる。

多孔質体モデルは、亀裂の存在が岩盤の物理的特性に与える影響を考慮し等価な一様媒体に置き換えて解析する手法である。このアプローチは考えているスケールに対して亀裂の空間分布に偏りがなく巨視的にみえてある程度一様である場合に、妥当な手法であるとされている。

* 正会員 間組技術研究所（〒338 埼玉県与野市本町西4-17-23）

** 日本原子力研究所（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）

しかし原位置でのトレーサー試験の結果などでは、多孔質体に置き換えたモデルでは説明し難い結果がしばしば生じることが知られている。スウェーデンのストリーバ鉱山において行われたトレーサー試験の結果、注入されたトレーサー溶液は特定の亀裂を選択的に移行しているらしいこと、得られた破過曲線は連続体のモデルにおいて通常採用される移流分散の方程式では再現することが困難であることが報告されている²⁾。このような場合1つ1つの亀裂の幾何形状を調べ、陽にモデル化することを検討することも必要となってくる。

亀裂の形状をそのままにモデル化する亀裂ネットワークモデルについても、理論解による研究および数値解析的な研究が多く行われている。Tangら³⁾の研究は亀裂ネットワークについてのものではないが、単一の亀裂が存在する最も単純な系を考え、亀裂部では移流・分散、マトリックス部では拡散による移行メカニズムを考慮して解析解を求めている。数値解析的な研究としては、たとえば大西ら⁴⁾が上流法を取り入れた有限要素法を用いた解析を行いTangの解析解と良く一致する結果を得たことを報告している。

数値解析によるシミュレーション手法としては、微分方程式を離散化して解く有限要素法や差分法のほかに溶液中の物質を模擬した多くの粒子を流速や分散効果などを考慮して動かすことにより移行現象をシミュレートする方法である粒子追跡法あるいは直接シミュレーション法とよばれる方法がある。有限要素法や差分法ではベクレ数が大きい場合や複雑な亀裂ネットワークにおいて流速の場所的な変化が大きい場合、解が振動して正しい解が得られないことが多いが、このような場合に対しても常に安定に解くことができるといいう長所をもっている。

亀裂ネットワークモデルと粒子追跡法による従来の研究では、移行のメカニズムとして移流だけが取り上げられることが多く、マトリックス拡散については考慮されることがなかった。本論文では、亀裂ネットワークモデルの解析において粒子追跡法に基づいた移流およびマトリックス拡散 (Fig. 1 参照) を考慮することの可能な解析手法を提案する。この手法に基づいた結果と解析解および有限要素法に基づく結果とを比較し、本手法の妥当性を検討する。また亀裂ネットワークでの物質の移行特性にマトリックス拡散が与える影響について考察する。

2. 粒子追跡手法による物質移行の解析

(1) 従来の研究

粒子追跡法は移流分散方程式をシミュレートする方法として、ランダムウォークモデルと組み合わされて地層中の物質移行の問題や大気中での汚染物質の拡散現象の解析など、さまざまな分野で利用されている。放射性廃

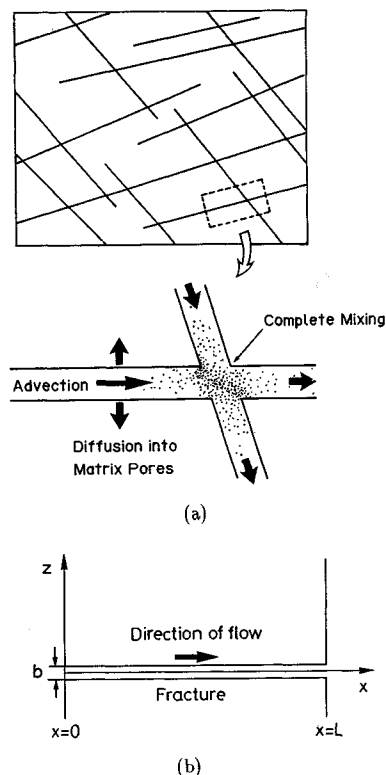


Fig. 1(a) Mass transport through fracture networks.

(b) Local co-ordinate system along a single fracture element.

棄物の処分に関連した研究としては、Washburn⁵⁾らや木村ら⁶⁾の研究がある。木村らは、多孔質体で近似した地層における核種の移行を核種の崩壊連鎖を考慮して解析し、他の手法によって解析された結果と比較しよく一致した結果を得ている。

粒子追跡法を亀裂ネットワークに対して適用した研究としては、たとえばSchwartzら⁷⁾やRobinson⁸⁾のものがある。彼らは、①各亀裂内での分散現象は無視し得るほど小さく粒子は平均流速で移動する、②亀裂の交点では完全混合条件が成立する、ことなどを仮定して計算を行っており、亀裂ネットワークでの物質の移行特性は多孔質連続体における移流分散方程式を解いた解とは異なった特徴を有することを指摘している。一方、Endo⁹⁾は地下水流速が流れと垂直な方向に流速が一樣ではない場合を考え、亀裂の交点では完全混合ではなく層流状態を保ちながらそれぞれの流れ線 (Stream Tube) に沿って粒子は分岐していくものとして解析を行っている。またHullら¹⁰⁾はEndoのモデルにさらに流れに沿った方向および垂直な方向の分子拡散を考慮するためにランダムウォークを取り入れたモデルを開発し、個々の亀裂内部での拡散の考慮の有無や亀裂の交点での混合について

条件を変化させて計算を行い、こうした条件が移行特性に与える影響を調べている。彼らは破過曲線について室内実験結果と比較を行い、流れに垂直な方向の拡散および交点での混合を考慮した場合の方がよく一致したことを報告しており、また放射性廃棄物の地層処分を対象とする場合は、室内実験の場合に比べて亀裂内の流速ははるかに小さいと考えられ完全混合条件を仮定することが妥当であると述べている。

(2) マトリックス拡散を考慮した物質移行解析手法
本研究では以上の観点から次のような仮定を設定したモデルを考えることにする。

- ① 物質の移行メカニズムとしては、移流とマトリックス部への拡散を考慮する。
- ② 亀裂間隔に比べてマトリックス部への拡散による移行深さは十分小さく、ある亀裂からマトリックス部へ移行した物質が他の亀裂へと流出する場合は無視する。
- ③ 亀裂の交点では完全混合条件が成立する。このことは粒子追跡法においては流量の比に応じた確率で粒子を分岐させることによってシミュレートされる。
- ④ 流速は流れと垂直な方向には変化しないとし、平均流速を用いるものとする。
- ⑤ 二次元モデルとし、亀裂部は二次元平面上の線要素として表現する。
- ⑥ 亀裂部分のうちデッドエンドとなっている部分の影響は無視する。
- ⑦ 物質の注入条件としては瞬間注入のみを考える。

ここではまず Fig.1(b) に示すような1つの亀裂要素について考えることにする。マトリックス部への拡散を考慮する場合、簡単のためマトリックス部内部へは亀裂方向に垂直な方向に一次元的に拡散していくと仮定されることが多い。個々の亀裂部において水力学的分散、分子拡散、物質の岩石への吸着および放射性崩壊などを考慮しない場合、移行方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{2\phi D_m}{b} \frac{\partial c'}{\partial z} \Big|_{z=b/2} \dots\dots\dots(1)$$

- ここに、 x : 亀裂部に沿った方向の座標 [L]
 z : 亀裂部に垂直な方向の座標 [L]
 c : 亀裂部における溶液の濃度 [M/L³]
 c' : マトリックス部内での溶液の濃度 [M/L³]
 v : 亀裂部における流速 [L/T]
 b : 亀裂の幅 [L]
 ϕ : マトリックス部の空隙率 [-]
 D_m : マトリックス部の見掛けの拡散係数 [L²/T]

一方マトリックス部内部での支配式は次の拡散方程式

となる。

$$\frac{\partial c'}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 c'}{\partial z^2} \quad z > \frac{b}{2} \dots\dots\dots(2)$$

これらの支配式に対し次の初期条件を用いる。

$$c = c' = 0 \quad (t=0) \dots\dots\dots(3)$$

単位質量の物質が亀裂の入口 ($x=0$) で瞬時に注入された場合を考え境界条件として次式を考える。

$$c = \frac{M_0}{sv} \delta(0) \quad (x=0) \dots\dots\dots(4\cdot a)$$

$$c = c' \Big|_{z=b/2} \dots\dots\dots(4\cdot b)$$

$$c' = 0 \quad (z = +\infty) \dots\dots\dots(4\cdot c)$$

ここに、 M_0 : 単位質量 [M]

s : 亀裂部の断面積 [L²]

ただし、 $\delta(0)$ は $t=0$ 以外では0となるディラックのデルタ関数である。

マトリックス部への拡散深さが十分小さい場合を考えているので、境界条件として近似的に式 (4·c) を用いて良いと考えられる。このときの解析解は Chambré ら¹¹⁾ によると次のようになる。

$$c(x, t) = \frac{M_0 \beta}{sv \sqrt{\pi} (t - t_w)^{3/2}} \exp\left(\frac{-\beta^2}{t - t_w}\right) \theta(t - t_w) \dots\dots\dots(5)$$

$$\theta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

$$t_w = x/v \dots\dots\dots(7)$$

$$\beta = \frac{\phi \sqrt{D_m} t_w}{b} \dots\dots\dots(8)$$

ここで t_w は、マトリックス拡散を考慮しない場合に長さ x の距離を流速 v で移行する時間を表わしている。

マトリックス拡散を考慮した場合単なる遅延効果をもたらすだけでなく、見掛け上分散的效果が生じる。

Fig.2 は、式 (5) の解析解を用いて横軸に時間、縦軸に物質フラックス ($F(x, t) = svc(x, t)$) をとってプロットしたものであるが、マトリックス拡散係数が大き

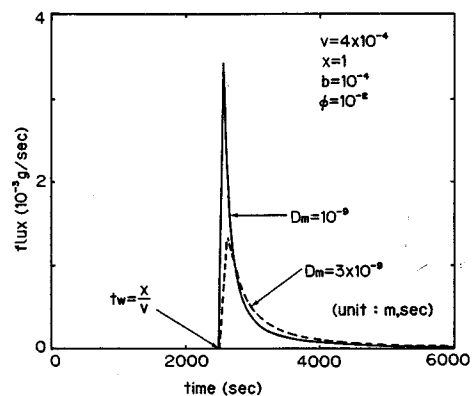


Fig.2 Analytical breakthrough curve in a single fracture.

くなるにつれピークの濃度が低くなり、テール部が長くなるのがわかる。このような見掛けの分散効果を粒子追跡法のアルゴリズムの中で考慮するために次のような方法を提案する。

式(5)の解析解を用い亀裂の出口 $x=L$ での物質フラックスを、時間について積分すると次式が得られる。

$$\int_0^t F(L, t) dt = M_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{\phi L \sqrt{D_m}}{b v \sqrt{t' - L/v}} \right) \dots \dots (9)$$

ここで erfc は余誤差関数であり、上式は $x=L$ において $0 < t < t'$ の間に流出する物質の総量を表わしている。この式において t' を無限大としたとき、積分値は M_0 に収束する。このことは注入された物質は十分時間が経てばすべて出口側から流出することを意味し、また F/M_0 は物質が移行する時間についての確率密度関数であると解釈することができる。そこで粒子追跡法のアルゴリズムにおいては次のように取り扱うことができる。それぞれの粒子に対し、0 から 1 までの一様乱数を発生させ、得られた乱数を $[R]_0$ とする。そして次式を満たすような時間 t' を求めてこれを考えている粒子が長さ L の亀裂要素を通過するのに要する移行時間とする。多くの粒子を用いることによりマトリクス拡散による遅延効果・分散的效果をシミュレートすることが可能であると考えられる。

$$[R]_0 = \int_0^{t'} F(L, t) / M_0 dt \dots \dots (10)$$

ここで、仮定の②の条件が成立しない場合は式(4・c)の境界条件を用いることはできなくなる。その場合次の境界条件を用いることが考えられる。

$$\frac{\partial c'}{\partial z} = 0 \quad z = z_a \dots \dots (11)$$

z_a は亀裂間隔などのデータから適当に決められるべきある有限な値である。この条件での解析解は安¹²⁾が解いているが、解の形は非常に複雑であり、それぞれの要素における粒子の移行時間を計算するための時間が著しく増大することが予想されるため、本研究では近似解として式(5)の解を用いて数値解を計算する。

3. 解析解および有限要素法による解析結果との比較

(1) 解析解との比較

解析手法の精度を検討するために、Fig. 3 に示すような亀裂幅が流れ方向に変化する一次元の系での破過曲線について、解析解との比較を行った。初期条件および境界条件は式(3)および式(4)と同じであるとする。このような場合については、Chambréら¹¹⁾が解析解を得ており次式のようになる。

$$F = P_1(t - t_a, a_3(x_3 - x_2) + a_2(x_2 - x_1) + a_1 x_1) \theta(t - t_a)$$

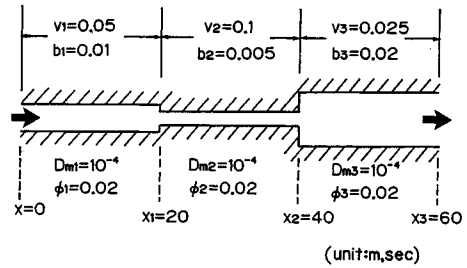


Fig. 3 1-D test model for the comparison with analytical solution.

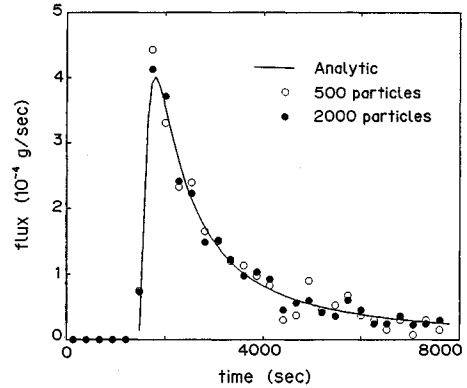


Fig. 4 Comparison of analytical result and simulated result.

$$\dots \dots (12)$$

$$P_i(t; \alpha) = \frac{\alpha}{2\sqrt{\pi t^3}} \exp \left\{ -\frac{\alpha^2}{4t} \right\} \dots \dots (13)$$

$$t_a = \frac{x_3 - x_2}{v_3} + \frac{x_2 - x_1}{v_2} + \frac{x_1}{v_1} \dots \dots (14)$$

$$a_i = \frac{2 \phi_i \sqrt{D_{m_i}}}{b_i v_i} \quad i = 1, 2, 3 \dots \dots (15)$$

ここで、 v, x, b, ϕ, D_m の添え字については図中に示すとおりである。計算結果を Fig. 4 に示す。縦軸には $x=60$ (m) において単位時間当たり流出する物質フラックス (g/s) を取って比較した。粒子追跡法の計算に用いる粒子の数は、500 および 2000 の 2 通りとした。粒子数が 500 の場合でも解析解とかなり良く一致している。粒子数が 2000 になると一致の度合はさらに向上し、ピークの高さの誤差やテール部のばらつきが改善されているのがわかる。したがって亀裂幅に変化がある場合に対して本論文で提案する手法は十分な解析精度をもっていると考えられる。

(2) 有限要素法による解析結果との比較

亀裂の交差点において流れの分岐や合流の存在する簡単な系について有限要素法による解との比較を行った。比較に用いたモデルおよび物性値を Fig. 5 に示す。流入境界 $(x, y) = (0, 0)$ において瞬時に単位質量 (1g) の

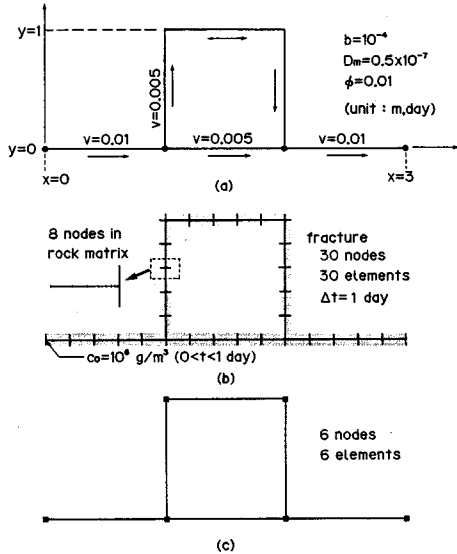


Fig. 5(a) Test model and parameters.
 (b) Grid for finite element method.
 (c) Grid for particle tracking method.

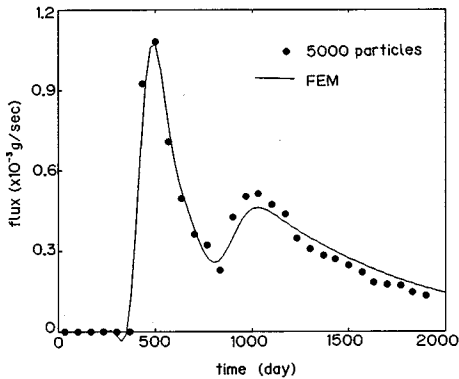


Fig. 6 Comparison of breakthrough curves obtained from finite element calculation and particle tracking calculation.

物質が注入されたとする条件とし、流出境界 $(x, y) = (3, 0)$ で流出する物質フラックスを粒子追跡法および有限要素法によって求めた。有限要素法における解析では式 (1) を離散化した場合解が振動することが予想され、数値解を安定させるため代わりに分散係数 $D_f [L^2/T]$ を考慮した次式を用いた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_f \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{2 \phi D_m}{b} \frac{\partial c'}{\partial z} \Big|_{z=b/2} \dots (16)$$

用いた有限要素法プログラムは、Huyakorn ら¹³⁾ が提案している定式化に従って作成されたもので、一次元の線形要素を用いてガラーキン法により離散化したものである。また有限要素法ではマトリックス部について式 (11) の境界条件を用い、 $z_a = 0.05 \text{ m}$ として、8 個の要

素を用いている (Fig. 5 参照)。マトリックス部の $z = z_a$ における濃度値は亀裂部における濃度値に比べ十分小さいことを確認しており、 $z_a = 0.05 \text{ m}$ とすることは式 (4・c) の境界条件を用いている粒子追跡法の計算結果と比較するうえで問題とはならないと考えられる。流入境界では、単位質量の注入を表わすために次式で濃度を拘束した。

$$c = (\theta(t) - \theta(t - t_b)) / b v t_b \dots (17)$$

ここでは有限要素法での時間積分におけるステップ幅 Δt および t_b はともに 1 day とした。また流出境界では $\partial c / \partial x = 0$ の境界条件を用いた。分散係数 D_f の値は、 $0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ であり流速の値に比べて小さく設定した。

粒子追跡法では、粒子数 n_p を 5000 とし計算を行った。流出境界 $(x, y) = (3, 0)$ における物質フラックスの経時変化を Fig. 6 に示す。移行時間の異なる 2 つの移行経路が存在するため 2 つのピークが存在する。有限要素法による結果は粒子追跡法による結果を平滑化したような形となっている。これは、流速に比べ小さい値ではあるが分散係数を考慮していることによると解釈でき、有限要素法と粒子追跡法の結果は 2 つのピークの位置や高さなどを含めて全体的にかなり良く一致しているといえる。

なお計算に要した時間は、富士通製 FACOM M-780 を用いて有限要素法では約 1.9 秒、粒子追跡法では約 1.2 秒であった。

4. 人工的に作成した亀裂ネットワークでの解析例

マトリックス部への拡散現象が系全体での移行特性にどのように影響するかについて、乱数を用いて計算機上で発生させた亀裂ネットワークを用いてパラメータスタディにより調べた。マトリックス拡散にかかわるパラメータとして亀裂幅およびマトリックス部の拡散係数を選定した。

(1) 亀裂ネットワークの作成および地下水流解析

本論文で用いているモデルでは、個々の亀裂の幾何形状を再現したメッシュを用いて解析が行われるが、実際的には 1 つ 1 つの亀裂の幾何形状の正確なデータを得ることは困難である。こうしたことから個々の亀裂についてのデータを用いる代わりに亀裂系を特徴づける統計パラメータを用いて亀裂ネットワークのメッシュを計算機上で発生させこれを解析することがしばしば行われる。亀裂系を特徴づけるパラメータとしては、①密度 (単位面積当たりの本数) n_f 、②長さ l 、③亀裂幅 b 、④方向 ϕ などがある。

ここでは、長さや密度は有限で一定でかつ亀裂方向が

互いに直交した2方向に卓越する場合を例題として取り上げた。これは Schwartz らが用いているものと同様の亀裂パターンであるが、深成岩で節理が発達しているような場合には比較的良好にみられるパターンと思われる。Schwartz らの研究では亀裂の方向性が物質移行特性に与える影響が調べられているが、本研究ではマトリックス拡散が物質移行特性に与える影響を検討することが目的であるので亀裂の方向については0度(x軸方向)と90度(y軸方向)の方向に固定した場合についてのみ計算を行った。また亀裂の発生位置は一様乱数を用いて設定した。

亀裂幅については、一定である場合とばらつきのある場合を考えた。Snow¹⁴⁾は、天然の岩石試料の観察から亀裂幅の分布が次式のような対数正規分布関数 $f(b)$ で近似できることを報告している。

$$f(b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} b \sigma_b \ln 10} \exp \left\{ -\frac{(\log b - \log b_0)^2}{2 \sigma_b^2} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

ここで b_0 と σ_b はそれぞれ $f(b)$ が最大となる亀裂幅および亀裂幅のばらつきの大きさを表すパラメーターである。

亀裂幅の分布のバリエーションとしては $\sigma_b = 0, 0.25, 0.5$ の3通りを設定した。 b のばらつきを考慮した場合は、平均開口幅 \bar{b} が同じとなるように次式を用いて b_0 を決定した。

$$b_0 = \bar{b} \exp \left\{ -\frac{(\sigma_b \ln 10)^2}{2} \right\} \dots\dots\dots(19)$$

Fig. 7(a) は作成した加工していない亀裂系、Fig. 7(b) は次のステップである地下水流解析および粒子追跡法による物質移行解析のためにデッドエンドとなる部分を削除した亀裂系(メッシュ)を示している。亀裂のデッドエンドとなる部分もマトリックス拡散と同様のメカニズム(亀裂部からの拡散移行と亀裂部への逆拡散)により系全体での物質の移行特性に影響を与える可能性がある。このような影響は亀裂密度が大きくデッドエンド部の体積が大きい場合は無視することができないと考えられるが、本研究で用いた亀裂系ではデッドエンド部の空隙の体積はマトリックス部の空隙の体積の総量に比べて十分小さいのでデッドエンド部の影響は無視し得るとして Fig. 7(b) のメッシュを用いて計算を行った。デッドエンド部の影響を考慮するためにはマトリックス部の拡散係数としてデッドエンド部の影響を含めた等価な拡散係数を求めて解析を行う等の工夫をする必要があると考えられる。

地下水流解析は亀裂の交点を節点とし、節点での水頭値を未知数として有限要素法により行った。ただし、重力場の影響は考慮しておらず、圧力水頭=全水頭となる。

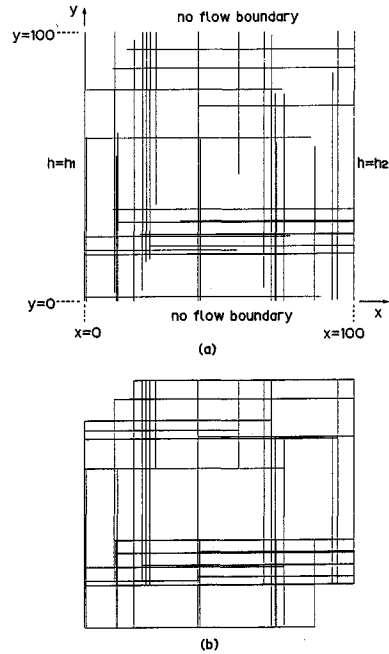


Fig. 7(a) Stochastically generated fractures and boundary conditions for underground water flow analysis.
 (b) Grid for underground water flow analysis and mass transport analysis.

Table 1 Parameters used in the calculation. Fracture Network Generation and Flow analysis

Parameters	Values		
n_F	40		
l (m)	100		
\bar{b} (m)	10^{-4}		
σ_b	0.0	0.25	0.5
b_0 ($\times 10^{-4}$ m)	1.0	0.899	0.654
$h_1(x=0)$ (m)	10.0	13.4	32.5
$h_2(x=100)$ (m)	0		
Q (m^3/sec)	0.9469×10^{-6}		

Mass Transport Analysis

Parameters	Values				
n_p	5000				
D_m ($\times 10^{-10} m^2/sec$)	0.0	0.2	0.4	1.0	2.0
ϕ	0.01				

用いた有限要素法プログラムはガラーキン法により定式化されたもので、節点と節点の間の亀裂部分を1次の線要素で表わして離散化している。それぞれの亀裂において流量 $q [L^3/T]$ と全水頭 $h [L]$ の勾配の関係はダルシー則により与えられるものとする。

$$q = bk \frac{\partial h}{\partial x} \dots\dots\dots(20)$$

ここで k は透水係数 $[L^2/T]$ で、平行平板の流れを仮定して次式で表わされるとした。

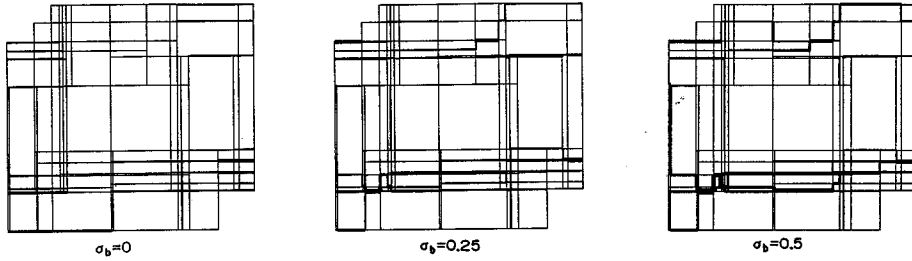


Fig. 8 Flow rate distribution ($\sigma_b=0, 0.25, 0.5$).

$$k = \frac{b^2 \rho g_0}{12 \mu} \dots \dots \dots (21)$$

ここに、 g_0 : 重力加速度 (=9.8 m²/s) [L²/T]
 μ : 水の粘性係数 (=1.005 g/m/s) [M/LT]
 ρ : 水の密度 (=0.998 × 10⁶ g/m³) [M/L³]

地下水流解析における境界条件は Fig. 7(a) に示すように、 $x=0$ および $x=100$ m での全水頭値を拘束している。拘束値はすべてのケースで系全体の流量 Q が同じとなるように与えた。用いたパラメーターの一覧を Table 1 に示す。Fig. 8 は流量の分布を示したもので、線の太さが流量に比例するようにプロットしてある。亀裂幅のばらつきが大きい場合の方が、流量の場所的変化も大きく特定の亀裂に集中して流れる傾向がみられる。

(2) 物質移行特性

初期条件としては、 $t=0$ において領域内に物質は存在しないと仮定した。注入条件としては、 $x=0$ での流入境界から全部で単位質量 (1 g) の物質が瞬時に注入されたものとし、 $x=100$ の流出境界から単位時間に流出した物質の総量の経時変化を求めた。単位質量の物質を n_p 個の粒子で表わし、流入境界につながっている要素の流量に比例した個数の粒子をその要素に投入するものとした。すなわち流入境界につながっている亀裂要素の数を N_i とすると、それぞれの亀裂要素に対して次式によって計算される n_{pi} 個 ($i=1 \sim N_i$) の粒子が $t=0$ に同時に投入されるとした。

$$n_{pi} = n_p q_i / Q \quad (i=1 \sim N_i) \dots \dots \dots (22)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{N_i} q_i \dots \dots \dots (23)$$

ただし、 q_i は流入境界につながっている各要素の流量である。

物質移行の計算に用いたパラメーターは Table 1 に示すように D_m については 5 通りとし、 b の分布については 3 通りを考えているので合計 15 通りの条件で計算を行った。

Fig. 9 に $D_m=0$ のときの物質フラックスの経時変化を示す。Fig. 8 の流量分布の違いからも予想されることであるが、 σ_b が大きい場合の方が立ち上がりやピーク

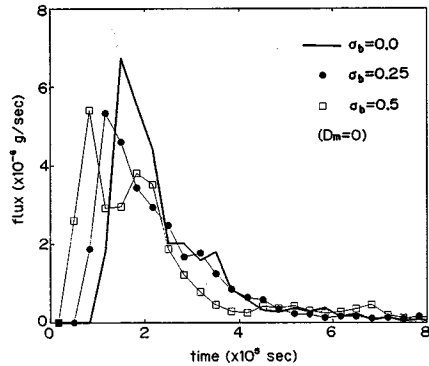


Fig. 9 Breakthrough curves for cases of $D_m=0$.

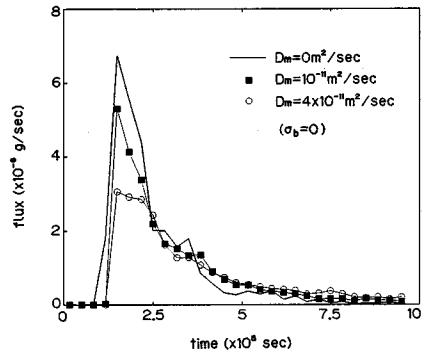


Fig. 10 Breakthrough curves for cases of $\sigma_b=0$.

となる時間が早い傾向がある。これらの破過曲線の特徴は、立ち上がりの勾配が急であることとテール部が長いことである。これは Schwartz らの報告している結果と同様の傾向であり、通常の移流分散方程式の解にはあまりみられない特徴である。亀裂ネットワーク系においては流速の空間的ばらつきが大きく、系全体の移行特性に影響していると考えられる。

D_m を変化させたときの破過曲線を Fig. 10 に示す。 D_m が増大するにつれ物質フラックスはピークが低くなり、テール部が若干増加する傾向にある。ここで移行特性を評価する指標として、注入した物質の 50% が流出

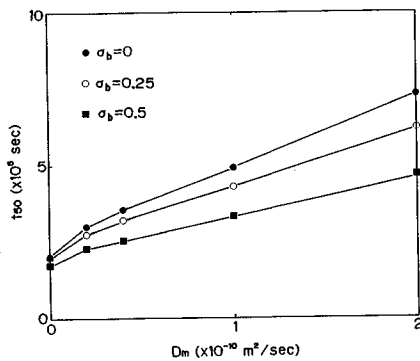


Fig. 11 Relationship between D_m and t_{50} .

するのに要する時間を t_{50} と表わすことにする。Fig. 11 は D_m を変化させたときの、 t_{50} の値をプロットしたものである。 D_m が大きくなるにつれ t_{50} は直線的に増加する。 t_{50} の増加傾向は、 σ_b が大きい場合ほど小さくなる傾向がみられる。これは、次のように考えることができる。 σ_b が大きい場合、流速の場所的ばらつきが大きくなることにより流速の大きな移行経路を通る粒子の数が相対的に多くなる。流速が速い要素より流速の遅い要素においてマトリックス拡散による遅延効果は大きく表われるので、 σ_b が大きい場合では、全体としてマトリックス拡散による遅延効果は小さくなる。放射性廃棄物の処分問題において天然バリアである岩盤の核種に対する閉じ込め性能を考えると、亀裂幅が一定であることを仮定することはマトリックス拡散による遅延効果を実際よりも大きめに見積る可能性があることを示唆していると考えられる。

5. まとめおよび今後の課題

亀裂ネットワークでの物質移行問題において、亀裂部からマトリックス部への拡散を考慮して移行特性を解析することのできる手法を提案した。本手法は粒子追跡法に基づいており、マトリックス拡散を考慮できるよう拡張したものとして位置付けることができると考えている。簡単な系について、粒子追跡法による解と解析解および有限要素法による解との比較を行い、十分に良く一致した結果を得た。また本手法を、人工的に作成した亀裂系に適用してマトリックス拡散が存在する場合と存在しない場合の比較を試みた。本研究で用いた亀裂系ではマトリックス部の拡散係数に応じて遅延効果は大きくなり、この遅延効果は亀裂幅のばらつきが大きい場合の方が小さくなる傾向にあるといった結果が得られた。

亀裂を含む岩盤における核種の移行にかかわる移流およびマトリックス拡散以外のメカニズムとして次のような物理的あるいは化学的事象が考えられる。

- ① 各亀裂内での水力学的分散 (Local Dispersion) および亀裂のデッドエンド部への拡散
- ② 吸着などによる物質の移行の遅延
- ③ 核種の崩壊連鎖

水力学的分散を考慮するためには、ランダムウォークの手法を取り入れることが考えられる。亀裂のデッドエンド部分への拡散が移行特性に与える影響の大きさについては有限要素法を用いたパラメータスタディにより検討しておくことも必要であろう。吸着現象については瞬時平衡を仮定し、流速やマトリックス部の拡散係数としてそれぞれを遅延係数で割った値を用いることによりその効果を表現できる。核種の崩壊連鎖は安全評価を行う場合には必ず考慮しなければならない事象である。粒子追跡法においては簡便な方法として木村らが行っているように崩壊確率に従って親核種から娘核種へと粒子の性質 (崩壊定数や吸着特性など) を変化させる方法がある。ランダムウォークや崩壊連鎖を考慮する場合、考慮しない場合に比べて計算時間が著しく増加することも考えられ、十分な精度を実用的な計算時間内で得ることが可能であるかについては今後検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Neretnieks, I., Eriksen, T. and Tähtinen, P. : Tracer movement in a single fissure in granitic rock : some experimental results and their interpretation, *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 849~858, 1982.
- 2) Abelin, H. *et al.* : 3-D migration experiment-report 3 part 1 performed experiments, results and evaluation, *Stripa project report 87-21*, 1987.
- 3) Tang, D.H., Frind, E.O. and Sudicky, E.A. : Contaminant transport in fractured porous media : analytical solution for a single fracture : *Water Resource Research*, Vol. 17, No. 3, pp. 555~564, 1981.
- 4) 大西有三・塩田卓央・西垣 誠・小林 晃 : 不連続性岩盤における浸透流と核種移行の有限要素解析, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 191~195, 1985.
- 5) Washburn, J.F. *et al.* : Multicomponent mass transport model; A model for simulating migration of radionuclides in ground water, *PNL-3179*, 1980.
- 6) Kimura, H. and Muraoka, S. : Numerical model of radionuclide migration in geologic media, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 20, No. 6, pp. 506~510, 1983.
- 7) Schwartz, F.W., Smith, L. and Crowe, A.S. : A stochastic analysis of macroscopic dispersion in fractured media, *Water Resource Research*, Vol. 19, No. 5, pp. 1253~1265, 1983.
- 8) Robinson, P.T. : Connectivity, flow and transport in network models of fractured media, *Phd. Thesis*, Oxford, 1984.

- 9) Endo, H. K. : Mechanical transport in two-dimensional networks of fractures Phd. Thesis, U.C. Berkeley, 1984.
- 10) Hull, C. H., Miller, J. D. and Clemo, T. M. : Laboratory and simulation studies of solute transport in fracture networks, Water Resource Research, Vol. 23, No. 8, pp. 1505 ~ 1513, 1987.
- 11) Chambré, P. L. *et al.* : Analytical performance models for geologic repositories, LBL-14842 UC-70 Vol. II, 1982.
- 12) Ahn, J. : Mass transfer and transport of radionuclide in fractured porous rock, Phd. Thesis, U.C. Berkeley, 1988.
- 13) Huyakorn, P. S., Lester, B. H. and Mercer, J. W. : An efficient finite element technique for modeling transport in fractured porous media : Water Resource Research, Vol. 19, No. 3, pp. 841 ~ 854, 1983.
- 14) Snow, D. T. : The frequency and apertures of fractures in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 7, pp. 23 ~ 40, 1970.

(1989. 2. 17・受付)
