

1. はじめに

岩盤内の地下水流れにともなう物質移行特性および、従来の分散モデルの岩盤への適用性についての知見を得ることは、放射性廃棄物の地層処分等の安全性評価を行なう際に重要である。岩盤実質部の透水性が非常に低い節理性岩盤においては、開口した節理が主たる通水経路となると考えられるため、これまで、節理系を対象とした物質移行の予測手法が提示されてきた。Krizek et al.¹⁾ は単一節理に対する移流方程式を基に、最小二乗法により節理系内の物質移行を計算する手法を提案した。彼は、この手法を、無限の長さを有する節理系に適用し、その分散特性が、流れの状態（層流、乱流）および節理交叉部における混合条件にあまり影響を受けず、節理方向に大きく支配されるという結果を得た。Robinson²⁾ や Schwarz³⁾ は、流れの中に投入された多量の粒子の移動を追跡する粒子追跡法を採用している。Schwarz は、有限長の節理から成る直交節理系を対象とした解析により、ある時刻における物質の空間分布は、空隙体モデルで仮定される正規分布と非常に異なる分布を示すという結果を得た。Roberts⁴⁾ は、有限要素法を用いて、節理開口幅の分布、連続性等の節理分布特性や、分子拡散、吸着等物質移行特性に与える影響について調べた。Endo⁵⁾ は、節理系内のあらゆる点において層流状態が保たれるという仮定に立った流管法という独自のモデルを提唱した。彼は、縦方向分散長さ α_L が、節理の方向性に依存する事を明らかにするとともに、湾曲度(tortuosity)の概念を示した。本報告では、上記の結果の一般性および、節理系内の物質移行に及ぼす種々の要因について系統的な検討を行なうため、節理系を対象とした物質移行解析手法を新たに提示し、他の手法による結果との比較を行なうとともに、本手法を用いた解析結果から得られたいくつかの知見について述べる。

2. 計算手順と手法

節理系内の物質移行特性に関する解析的検討を系統的に行なうため図-1に示すような、4段階からなる手順を考えた。以下に各段階について説明を行なう。

(Step 1. 節理系の発生) 流れの計算および、物質移行の計算に用いるための節理系を、2次元領域内で発生させる。手法は、文献6に示したものと基本的に同じであり、必要なデータは、節理密度、方向、長さおよび開口幅等の分布であるが、新たに、節理長と開口幅の間に相関を考慮できるようにした。発生した領域の内部において、以下の計算に用いられる正方形領域を取り出す。

(Step 2. 流れの計算) Step 1で得られた節理系内の定常流れを有限要素法により解析する。境界条件としては、流れの主方向を既定するため、一組の相対する境界を既知水頭境界とし残りの一組を不透水境界とする(図-1)。本ステップでは、流れの主方向の平均透水係数および、物質移行の計算に必要な各節理内の流量および流速を計算する。

(Step 3. 物質移行の計算) 節理性岩盤内の物質移行の解析において考慮すべき要因としては、①各節理毎の、流体流速の差異に因る移流分散 ②単一節理内の分子拡散、水理学的分散、チャンネルング等 ③吸着、イオン交換等 ④岩盤実質部への拡散 ⑤減衰等、数多く挙げられるが、以下に提示する計算手法は、①の移流に着目したものであり、単一節理内の分散や遅延効果は考慮しない。

本計算手法は、次のような仮定によっている。①節理系の流れは定常である。②節理は平行板でモデル化され、その中の流れは三乗則に従

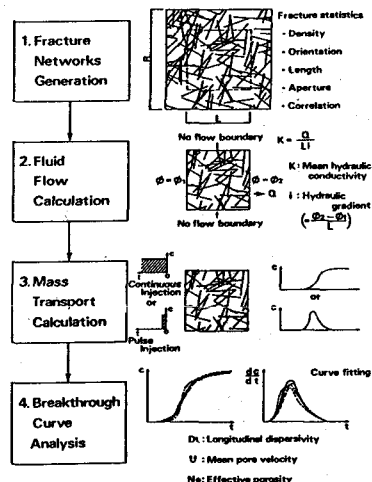


図-1 計算のフロー

う。③単一節理内では Taylor 分散が成立し、物質濃度は、断面方向に一様であり、かつ平均流速とともに移動する。④節理交叉部では、完全混合条件が成立する。④の仮定の妥当性は、Krizekらが室内実験において確かめているが、実際の岩盤内で、この条件が成立するか否かについては、今後検討が必要である。今、節理系内の交叉部（以下節点と呼ぶ） i, j, k と、その間の経路 ij, ik を取る。分子拡散を考えない場合、節点 i における濃度変化 $C_i(t)$ は、上流側の節点における濃度変化、濃度変化 $C_j(t), C_k(t)$ のみから、以下の式により計算される。

$$C_i(t) = \frac{\left\{ \sum_{j=1}^N q_{ij} \cdot C_j(t - \Delta t_{ij}) + q_{io} \cdot C_{io}(t) \right\}}{\left\{ \sum_{j=1}^N q_{ij} + q_{io} \right\}} \quad (1)$$

ここに、 N は、節点 i に流体を供給する隣接節点の数（例では、 j と k の2個）、 Δt_{ij} は、経路 ij 間を物質が移行する時間（ $=l_{ij}/v_{ij}$ ）、 v_{ij}, q_{ij} はそれぞれ、経路 ij 間の流量および平均実流速、 $q_{io}, C_{io}(t)$ は、節点 i に外部から注入される流体の流量と物質濃度である。

図-3に示すように、 $C_i(t)$ は、Stepwiseな時間の関数として表わされる。図-4に、節理系内の濃度を系統的に計算するための手順を示す。水頭値の高い節点から低い節点へと計算を進めることにより、効率よく、全節点における濃度変化を求めることができる。Breakthrough曲線は、流出境界上の節点における濃度変化に、流量で重みをつけることにより、次式を用いて計算する。

$$C(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} q_i \times C_i(t)}{\sum_{i=1}^{N_b} q_i} \quad (2)$$

ここに、 N_b は、流出境界上の節点数である。本手法は、他の手法に比べて以下のような利点を有している。①空間的、時間的な離散化が必要でなく、節理系内の流速が、広い範囲に分布している場合においても、粒子追跡法におけるタイムステップの選択の問題や、有限要素法等における数値拡散の問題が生じない。②粒子追跡法とは異なり、物質は、すべての経路を通過する。③境界条件は任意の時間の関数として与えることができる。④節理系内のすべての点における物質濃度の変化を計算できる。一方、本手法の欠点は、節理数の増加とともに、通過する経路が増え、その結果として、節点濃度 $C_i(t)$ を構成するデータが非常に増加することである。この問題には、次の2方法により対処する。1つめは、計算の途中で、その後必要とされない濃度データを逐時除去することである。2つめの方法は、平均化である。今、ある節点における、濃度計算過程において、(1)式により計算されたある時間ステップ間の濃度変化 $\Delta C_i = C_i(t_k) - C_i(t_{k-1})$ が、予め定められた許容値 ΔC^* より小さい場合には、このデータはストアしない。その代り、質量保存則を満足するため次式による平均化

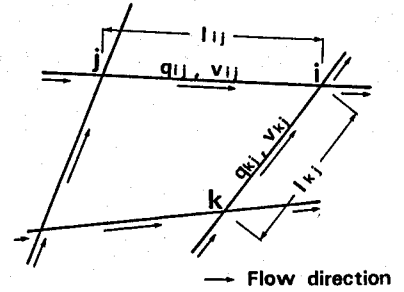


図-2 節理交叉部

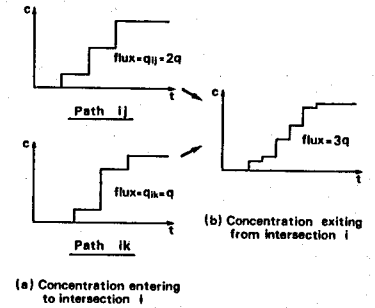


図-3 濃度の計算

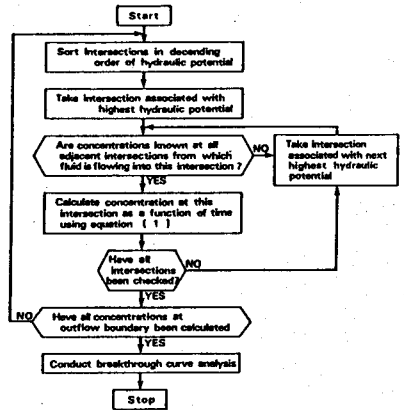


図-4 物質移行計算の手順

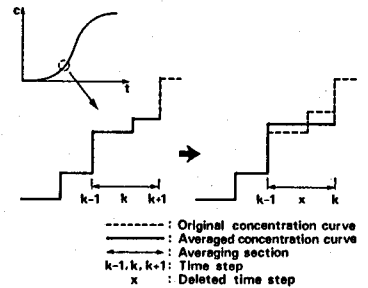


図-5 濃度の平均化

を行なう(図-6)。

$$C_i^*(t_{k+1}) = C_i(t_{k+1}) + \{C_i(t_k) - C_i(t_{k+1})\} \frac{t_k - t_{k+1}}{t_{k+1} - t_{k-1}} \quad (3)$$

この平均化により、例えば、 $\Delta C^* = 0.01$ とすると、各節点の濃度変化は、約100個のデータで表されることになる。この平均化手法の妥当性については、後に検討する。

(Step 4. breakthrough曲線の解析) 第4段階では、前段階で得られたbreakthrough曲線を解析し、従来の理論の適用性を含めた節理系内の物質移行特性を調べる。一次元移流分散方程式は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial X} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (4)$$

ここに C : 濃度 (L^3/L^3)、 U : 平均空隙流速 (L/T)、 D_L : 縦方向分散係数 (L^2/T) である。連続注入条件 $C = C_0$; $X = 0$, $t \geq 0$ のもとでの(4)式の解は、次式で表わされる。

$$C/C_0 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{-(x - Ut)}{4 D_L t} \right\} \quad (5)$$

また、流出境界 $x = L$ において、単位時間に、物質が到達する割合は(5)式を時間で微分することにより、

$$R/C_0 = \frac{d}{dt} (C/C_0) \Big|_{x=L} \\ = \frac{1}{2 \pi D_L t} \exp \left\{ \frac{-(L - Ut)}{4 D_L t} \right\} \cdot \frac{L + Ut}{2 t} \quad (6)$$

を用いて計算される。与えられたbreakthrough曲線から、(5)式または、(6)式を用いて、縦方向分散係数 D_L および平均空隙流速 U を計算する主な方法としては、①最小二乗法を用いる方法 ②breakthrough曲線上の2点において、理論解と一致させる方法。例えば、25%および75%濃度に対応する時間を用いる場合は、次式により D_L 、 U を計算できる。

$$t_{25} \cdot t_{75} = L^2/U^2, \quad t_{25} + t_{75} = 2L/U + 0.91D_L/U^2 \quad (7)$$

③ breakthrough曲線を時間微分して得られる曲線の、 n 次のモーメントのうち、2種類を選び、(6)式から計算される、対応するモーメントと比較する。もし、これらの異なる方法で計算された D_L 、 U の値に大きな違いがなければ、従来の移流分散モデルの節理系への適用が可能である事を示し、そうでない場合は、適用上に問題があることを意味する。

3. 手法の比較と、計算結果の検討

(他の手法との比較検討) 提示した手法の妥当性を吟味するために、Robinsonの粒子追跡法と、Endoの流管法の両手法との計算結果の比較を行った。表-1に計算条件と結果の一覧を示す。表より粒子追跡法と、提示した手法

表-1 物質到達時間

Model	Particle tracking method	Stream tube method	Concentration tracking method
Model developer	Robinson	Endo et al.	Shimo et al.
Conditions of Calculation	Flow region: $180^\circ \times 80^\circ$ Fracture density: $\lambda = 0.0444 \times 2 = 0.0888$ Fracture length: $L = 20$ (constant) Fracture orientation: Normal distribution set 1: $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 20^\circ$ set 2: $0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 20^\circ$ Hydraulic gradient: 1.0×10^{-2} Viscosity: 1.0×10^{-2} Specific gravity: 1.980.0		Concentration tolerance value: $\Delta C^* = 0.001$ (0.01)
	Number of particles: $N = 3,162$ (316)		
$t=0$	1.14×10^6 (1.40)	1.12×10^6	1.23×10^6 (1.33)
$t=10$	1.92	1.70	1.90
$t=25$	2.25	2.19	2.26
$t=50$	2.72	2.54	2.74
$t=75$	3.35	3.24	3.36
$t=90$	4.09	4.25	4.09
$t=95$	4.64	5.58	4.69
$t=100$	2.54×10^7 (5.62)	2.50×10^7	2.55×10^7 (5.67)

(節理系内の移流分散に関する検討) 節理系内の物質移行に対する従来

の移流分散モデルの適用性に関する知見を得るために、図-6に示すような節理系内の物質移行計算を行った。節理分布および流れに関する条件は、同図中に示してある。図-7は、連続注入条件のもとで得られた breakthrough 曲線であり、図-8は、それを時間で微分したものである。両図には4種類の方法による、理論解近似曲線が示してある。節理系に対して得られた breakthrough 曲線は、①初期の濃度上昇が不連続かつ急激である。②長いテイル部を有する。など近似された理論曲線と異なった特徴を有している。この相違は、節理系内の流速分布と、連続性に大きく関係しているものと考えられる。すなわち、breakthrough 曲線の初期の部分においては、まず流速の速い連続した経路を通った物質が到達した後、残りの経路を通過した物質が順次到達し、大半の物質が到達した後で、流速が非常に小さく、また数多くの経路を通過して来た物質が、長い時間をかけて流出していくものと推測される。従って節理系における物質の空間分布は、(4)式の移流分散方程式から得られるような、正規分布ではなく下流方向にピークが移動した非対称分布をしているものと考えられる。これはSchwarzらの結果と一致している。図-8に示す物質到達率曲線においては、理論解との相違が、さらに如実に示されている。すなわち、物質到達率は、初期到達時に最大となり、その後、単調に減少しており、理論解から得られる曲線とかなり異なっている。本計算に用いた、節理系においては、節理長と節理幅との間に相関を持たせている(図-6)ので、流量の卓越した、連続性の高い経路ができ、上記の現象を助長しているものと考えられる。表-2に理論解近似により計算された、縦方向分散係数および、平均空隙内流速を示す。これによると、近似法の違いにより、 D_L の値には、2倍以上の開きがある。一方、平均空隙流速については、手法による大きなバラツキは見られなかった。以上の計算結果のみから、節理系内の物質移行に対する従来の移流分散モデルの適用性について、結論的な事は述べられないが、少なくとも、今後、節理分布特性が、節理性岩盤内の物質に与える影響等について詳細に検討する必要があることが明らかとなった。

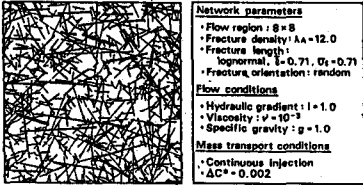


図-6 計算データ

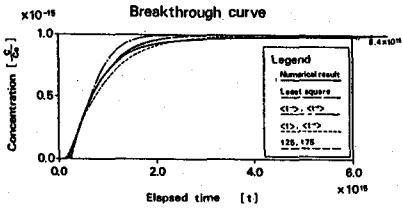


図-7 Breakthrough曲線

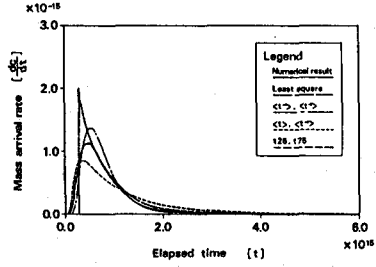


図-8 物質到達率

表-2 分散パラメータ

Method	Longitudinal dispersivity D	Mean pore velocity U
Least square method	1.81×10^{-14}	1.15×10^{-14}
$\langle t^2 \rangle / \langle t \rangle^2$	1.22	1.20
$\langle t^3 \rangle / \langle t \rangle^3$	2.58	1.03
t_{95} / t_5	1.94	1.15

4. おわりに

本報告では、節理系内の物質移行を解析するための新しい手法を示した。今後、提示した手法を用いて、節理分布特性や解析領域の分散特性に与える影響を調べるとともに、従来の分散理論の節理系への適用性についてさらに検討を加えたい。また、移流以外の分散メカニズムについても考慮できるよう手法を発展させる所存である。

5. 謝辞

本報告の作成にあたっては、AECL, HARWELL 研究所の Robinson 博士および、旧 L B L の Endo 博士に御協力頂いた。ここに感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1) Krizek et al., Theoretical Study of Dispersion in a Fractured Rock Aquifer, J. Geophys. Res, 1973
- 2) Robinson, Disper-Computer Program to Calculate the Transport of Contaminant in Networks, AERE-R 10914, 1983
- 3) Schwarz et al, A Stochastic Analysis of Macroscopic Dispersion in Fractured Media, W.R.R., 1983
- 4) Roberts, Simulating Flow and Advective-Dispersive Transport in Stochastically-Generated Fracture Networks, M.S. Thesis, Univ. of Waterloo, 1984
- 5) Endo, Mechanical Transport in Two-Dimensional Networks of Fractures, Ph.D. Thesis, U.C. Berkeley, 1984
- 6) Long, Investigation of Equivalent Porous Medium Permeability in Network of Discontinuous Fractures, Ph.D. Thesis, U.C. Berkeley, 1983

(79) Numerical Study on Mass Transport through Fracture Networks

Taisiei Corporation

Michito Shimo

Katsumi Kamemura

Lawrence Berkeley Laboratory J. C. Long

ABSTRACT

The study of mass transport mechanism through fracture networks is necessary for the safety evaluation of disposal of toxic waste, such as nuclear waste, in a geologic formation.

Since permeability of a fracture is expected to be much higher than that of rock matrix, the characteristics of fluid and mass transport through a rock mass will be affected by fracture distribution. The applicability of classical diffusion dispersion model to fracture networks shall be, therefore, examined.

In this paper, systematic methods for the study of mass transport through fracture networks are proposed. The procedures of study consist of four steps. Those are ; 1. fracture networks generation, 2. fluid flow calculation, 3. mass transport calculation and 4. breakthrough curve analysis.

The proposed method for mass transport calculation takes only convection into consideration and based on the following assumptions ; 1. steady state flow condition, 2. cubic law for the relationship between velocity and head loss in each fracture, 3. uniform concentration along a fracture intersection, 4. complete mixing at each fracture intersection. Based on these assumptions, the concentration at the intersection is calculated using total flux and total mass flowing into the intersection. The calculation is efficiently carried out in descending order of potentials at intersections.

This method has following advantages over other existing methods ;
1. breakthrough curves are calculated without numerical dispersion since a discretization in time domain is not required in this method. 2. mass is conveyed through all paths in the proposed method unlike the particle tracking method in which particles take selected paths. 3. the boundary condition for mass injection is applied as an arbitrary function of time. 4. concentrations can be calculated at any intersection in the networks as a function of time.

The results on longitudinal dispersion by the proposed method were compared with those by other methods such as particle tracking method (Robinson) and stream tube method (Endo) . It was found that the breakthrough curves by the proposed method is almost identical with that by particle tracking method. It was also found that, by the comparison with the results using stream tube method, the mixing conditions at intersections do not affect much the longitudinal dispersion in fracture networks.

From the breakthrough curve analysis, an unique analytical curve fitting was not obtained. The reasons of this discrepancy between the analytical and numerical solutions were thought to due to two main features in the breakthrough curve obtained for fracture networks. One is the initial steep increase of concentration and the other is a long tail. These results suggest that mass distribution in the fracture networks is not Gaussian as assumed in a classical diffusion-dispersion theory but negatively skewed.

The necessity of further efforts to investigate the mass transport mechanism through fracture networks is suggested.