

(40) 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

京都大学工学部 正会員 大西有三
京都大学工学部 学生 塩田卓央
岡山大学工学部 正会員 西垣 誠
(株)間組 正会員○小林 晃

1. まえがき

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、その処分地から人間の生活圏内にどの様に核種が移行するかということが極めて重要な問題である。特に岩盤内の不連続面内を流れる地下浸透流が核種の移行にどのような影響を与えるかについては、現在も欧米諸国において、現地地下実験等、種々の実験や研究が繰り返されており、解析手法についても多くの研究がなされている。本論文では、岩盤を割れ目ネットワークとマトリックスに置き換え、この中を核種が浸透流とともに移動する様子を有限要素法を用いて解析する方法について検討を加えた。また移流速度が大きい場合の拡散問題では解析上大きな問題があるが、本論では上流法 (up-stream method) を用いて対処している。

2. 浸透流と核種移行の有限要素解析

本手法ではまず、地下水流速を計算する為に浸透流の計算を行う。そして、求めた各要素での流速を入力データとして、核種移行の解析を行う。

① 浸透流解析

岩盤中の浸透流解析の研究は、現在も精力的に行われているが、割れ目のモデル化の困難さなど多くの課題を持っている。本論では、連続体解析と不連続体解析の折衷解析として主な割れ目をジョイント要素で表した有限要素解析を試みた。つまり岩盤を多くの不連続性を持った一つの連続体として捉えるのである。この手法は、微小亀裂を含むマトリックス中の透水性の決定に、統計的手法を導入する等の拡張が可能であると思われる。連続体内の流れはダルシー則を用いて、以下の様に表す。

$$\text{Ss} (K_{ij} \text{Ss} h) = \text{Ss} \text{Ss} h - q \quad (1.1)$$

h : 全水頭

Ss : 貯留係数

K_{ij} : 透水係数テンソル

q : 降雨等による流入量あるいは揚水等による流出量

また、割れ目内の流れは割れ目方向のみに発生すると考え、ジョイント要素の局所座標系による1次元の式で表す。

$$\text{Ss} (K^* \text{Ss} h) = \text{Ss} * \text{Ss} h - q \quad (1.2)$$

x : 割れ目に沿う局所系座標

$\text{Ss} *$: 割れ目の貯留係数

K^* : 割れ目の方向の透水係数

② 核種の移行解析

岩盤中での核種移行では、分子拡散と水力学的分散が考えられる。本論では、水力学的分散にFickの法則を適用し分子拡散に付加的なものと仮定して(2.2)の様に扱った。さらに岩マトリックス中にも実質的な透水性がある場合を想定し、浸透流による対流拡散の影響を考えた。以上により移行・拡散方程式を次の様に表す。

$$\text{Ss} (D_{ij} \text{Ss} C_n) - v_i \text{Ss} C_n = \text{Ss} (\phi R_n C_n) + \phi R_n \lambda_n C_n \quad (2.1)$$

$$- \sum_{m=1}^M \phi R_m \lambda_m C_m - q (C_n^* - C_n)$$

λ_n : 核種 n の減衰定数

M : 核種 n に壊変する親核種の数

C_n : 核種 n の濃度

ϕ : 有効空隙率

R_n : 核種 n の遅延係数

C_n^* : 注入された流体内の核種濃度

ξ_{nm} : 核種 n に壊変する核種 m の重量百分率 v_i : ダルシー流速

C_m : 核種 n の親核種 m の濃度

$$D11 = \varepsilon L (v_1)^2 / |v| + \varepsilon T (v_2)^2 / |v| + D^0 \quad (2.2)$$

$$D22 = \varepsilon L (v_2)^2 / |v| + \varepsilon T (v_1)^2 / |v| + D^0$$

$$D12 = D21 = (\varepsilon L - \varepsilon T) v_1 v_2 / |v|$$

εL : 縦方向の分散係数 v_1 : x_1 方向のダルシー速度成分 (入力データ)

εT : 横方向の分散係数 v_2 : x_2 方向のダルシー速度成分 (入力データ)

D^0 : 分子拡散係数 $|v|$: $|v| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$

また、割れ目内の移行方程式は、地下水の場合と同様に、以下の様な1次元の方程式で表す。

$$\frac{d}{dt} (D^* \phi C_n) - v^* \phi C_n = \phi (\phi R_n C_n) + \phi R_n \lambda_n C_n \quad (2.3)$$

$$- \sum \xi_{nm} \phi R_m \lambda_m C_m - q (C_n^* - C_n)$$

D^* : 水力学的分散係数 $D^* = \varepsilon L v^*$ v^* : 割れ目のダルシー流速ベクトル

[3] 核種の崩壊について

核種は、次々と崩壊を繰り返して異なる核種に壊変して行き、一般的にFig.1 の様な崩壊系列を形成している。本論では、その崩壊系列の n 番目の成分を核種 n と呼んでいる。また、 ξ_{nm} は例えば③から④' 或いは④'' へ移る③の割合を示しており λ_n は n の半減期より決まる減衰定数である。なお、遅延係数 R_n は、核種が岩盤に吸着することによる拡散の遅れを示している。

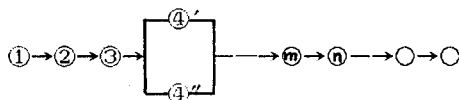


Fig.1 Chain reactions of radionuclide

[4] 上流法について

本論では前述の様に流速の大きい流れ場でも、移行・拡散方程式の安定な解を得る為に上流法を用いた。つまり、(2.1), (2.3) 式の空間微分の項を重み付けする関数として、Fig.2 の様な非対称の重み関数を用い、時間の微分の項には一般的な形状関数を用いた。以下にその上流重み残差式を示す。

$$\int_R W_i \left[\frac{d}{dt} (D_{ij} \phi C_n) - v_i \phi C_n \right] dR$$

$$- \int_R N_i \left[\phi (\phi R_n C_n) + \phi R_n \lambda_n C_n - \sum \xi_{nm} \phi R_m \lambda_m C_m - q (C_n^* - C_n) \right] dR = 0 \quad (2.4)$$

R : 解の領域

$C_m = N_j C_{mj}(t)$

N_i : 一般的な形状関数

C_{mj} : 核種 n の親核種成分の濃度 C_m の節点値

W_i : 非対称の重み関数

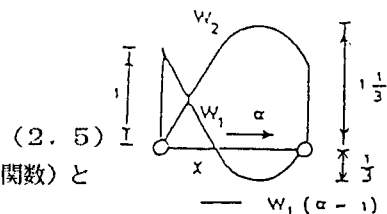
例えば、1次元要素についての W_i を以下に示す。

$$W1 = (1 - x/h) + 3\alpha (x^2/h^2 - x/h)$$

$$W2 = x/h - 3\alpha (x^2/h^2 - x/h)$$

$\alpha = 0$ の時、 W_i は N_i (一般的な Galerkin 法の形状関数) と

同じになる。



[5] 境界条件

① 浸透流

$$h = \tilde{h} \quad \text{on } B1$$

$$-T_{ij} \phi_{,j} h \cdot n_i = \tilde{q} \quad \text{on } B2$$

② 核種の移行

$$C_n = \tilde{C}_n \quad \text{on } S1$$

(2.6)

Fig.2 Upstream Weighting Function

$$v_i n_i C_n - (D_{ij} \frac{\partial C_n}{\partial x_j}) n_i = \tilde{q} \tilde{C}_n \quad \text{on } S_2$$

n_i :境界で外部に向かう法線ベクトル

ただし、BとSはそれぞれ地下水流れと核種の移行の境界とする。また、核種 n の発生と崩壊の為、 C_n は時間に依存し、次の様なBatemanの常微分方程式で表される質量保存則を満足する。

$$\frac{dC_n}{dt} = -\lambda_n C_n + \sum_{m=1}^n \lambda_m C_m$$

3. 解析例

① ジョイント要素を用いた岩盤浸透流解析

Fig.3aの様なモデルで割れ目にジョイント要素を用いて本手法で計算した。結果をFig.3bに示す。bはGringartenらによる解析解と比較したものであり、これによると、計算結果は解析解と良い一致を示している。

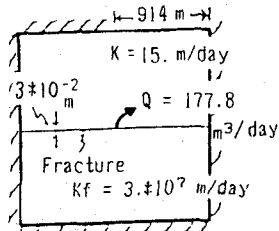


Fig.3a Schematic Diagram

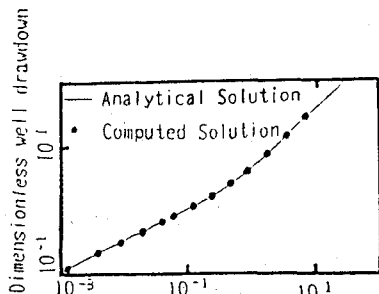


Fig.3b Dimensionless time Comparison Between Computed Result and Analytical Solution

② 核種移行解析 (I)

Fig.4aの様なモデルで割れ目にジョイント要素を用いて計算した。核種は亀裂上流端より流入し、流れは、亀裂内のみ存在し、マトリックス内はゼロである。Fig.4b,cにTangらによる解析解と比較した結果を示す。これによると、マトリックス部への分散現象を見ることができ、解析解とも良い一致を示していることがわかる。

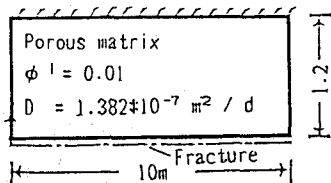


Fig.4a

Schematic Diagram

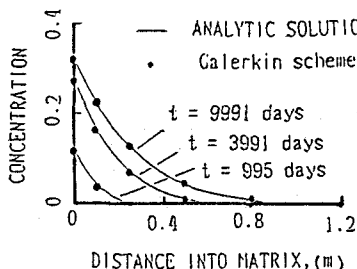


Fig.4b

Concentration Profiles in the Porous Matrix

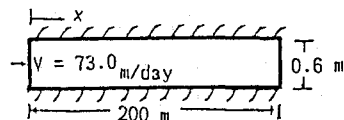


Fig.5a Schematic Diagram

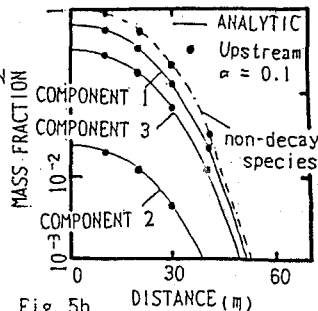


Fig.5b

Concentration Profiles showing Comparison Between Computed Result and Analytical Solution

③ 核種移行解析 (II)

3番目の娘核種まで壊変する場合の核種移行解析を1次元均質多孔体領域で計算した (Fig. 5a)。計算結果をLesterらによる解析解と比較したものをFig. 5.bに示す。ここでも、解析解との良い一致が得られた。

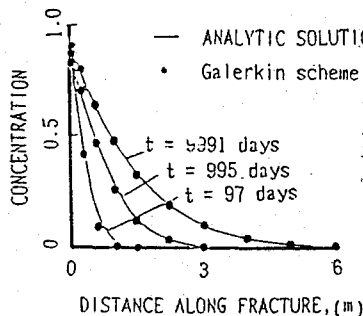


Fig.4c

Concentration Profiles in the Fracture

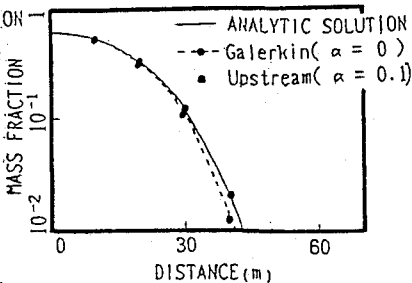


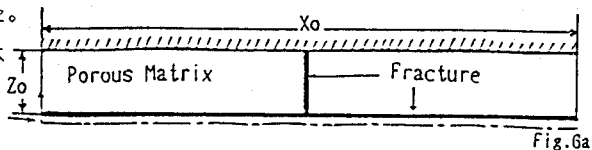
Fig.5c

Comparison of Galerkin and Upstream Weighting Schemes

4. 上流法の有効性

3. ③の解析において、上流法を用いた時 (Wi の α を0.1) の解と、一般的なGalerkin法

を用いた時 (α を 0) の解を、解析解と比較した。結果を Fig. 5c に示す。これによると、上流法により正確な解を求めることができることがわかる。



5. 交差割れ目の例

3. により本手法による浸透流解析・核種移行解析の妥当性が確認されたわけであるが、この手法が現実に対してどれ程の有効性を持つかは現段階では言えない。そこで、今回はケーススタディとして割れ目が交差する領域で核種がどのように移行して行くかを考えてみた。

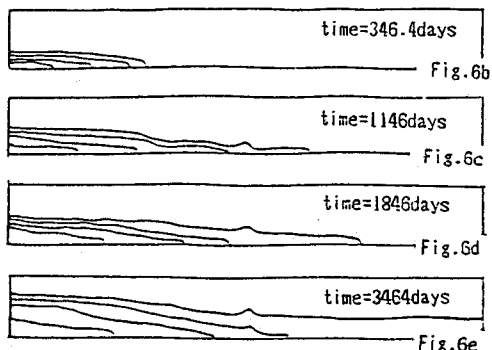
① モデルおよび結果

用いたモデルを Fig. 6a に示し、b ~ e に計算結果を示す。

② 考察

結果によると、亀裂の存在によって、移流拡散がおこるばかりではなく、流れと直角方向に存在する亀裂において比較的大きな分散が生じることがわかる。これは、亀裂の存在により拡散現象が複雑に変化する可能性を表すものとして興味深い。

Distribution of Concentration



Initial Condition	$c(x,0)=c'(x,z,0)=0.$	
Boundary Conditions	$c(0,t)=1.$	$\frac{\partial c}{\partial x}(x_0,0,t)=0.$
	$c'(x,0,t)=c(x,t)$	$\frac{\partial c'}{\partial z}(x,z,t)=0.$
c' : Concentration in Matrix	c : Concentration in Fracture	
Velocity Conditions	$v(x,0,t)=0.01$	$v(x_0/2,z,t)=0.0$
	$v'(x,t)=0.0$	(m/day)
v' : Velocity in Matrix	v : Velocity in Fracture	

6. まとめ

今回の一連の解析結果より、本手法を用いることにより岩盤中の浸透流と核種移行挙動をある程度、把握できることが確認できた。しかし本手法には、以下の様な問題がある。

- ① ジョイント要素を用いる亀裂は、決定論的に調査されていなければならない。
- ② 移行拡散方程式の移流項の流速が一定入力値であるため、地下浸透流との連成解析になっていない。
- ③ 実際の放射性廃棄物処分では、さらに熱や応力場の影響が考えられ、本手法ではそこまで考慮していない。

今後の課題としては、以上の問題を克服するとともに、実際に耐え得るコードにしていくためには、さらに統計的な処置も考えなければならないだろう。今後は、岩盤の透水性や拡散性の統計的扱い方、あるいは、モデリングについても研究していく所存である。

7. 参考文献

- 1) 大西 有三、西野 賢治: 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1984、PP.343-348.
- 2) Long, J.C.S., J.S. Remer, C.R. Wilson and P.A. Witherspoon: Water Resources Research, vol18, No.3, 1982, pp.645-658.
- 3) Bear, J.: Dynamic of Fluids in Porous Media, Elsevier, New York, 1972.
- 4) Huyakorn, P.S., Pinder, G.F.: Advances in Water Resources vol1, No.5, 1978, pp.285-298.
- 5) Gringarten, A.C., H.J. Ramey and R. Raghaven: Society of Petroleum Engineers Journal, vol14, No.4, 1974, pp.347-360.
- 6) Tang, D.H., E.O. Frind, and E.A. Sudicky: Water Resources Research, vol17, No.3, 1981, pp.555-564.
- 7) Lester, D.H., G. Jansen, and H.C. Burkholder: Symp. Ser. 71, A.I.Ch.E., 1975.

(40) FINITE ELEMENT ANALYSIS OF
FLUID FLOW AND TRANSPORT OF
RADIOACTIVE NUCLIDES
IN DISCONTINUOUS ROCK

Y. Ohnishi ,T. Shiota

Department of Civil Engineering ,Kyoto University

M. Nishigaki

Department of Civil Engineering ,Okayama University

A. Kobayashi

Technical Research Institute of HAZAMA-GUMI,LTD.

SUMMARY

Performance assessment of some potential high-level waste repository sites will require analysis of radionuclide transport in discontinuous rock. Radionuclide transport then is the combined effect of advection and hydrodynamic dispersion with radioactive decay and adsorption on the geologic media. Especially it has been recognized that fracture plays a very important role in conducting transport of radionuclide through rocks, and so much effort has been directed toward studying fractures and fracture systems on a quantitative basis.

This paper presents the formulations of a two-dimensional finite element model designed to simulate the ground-water flow and radionuclide transport in fractured system with substantially permeable rock matrix and the results of several one- and two-dimensional simulations. The model regards the fractured system as one continuum with a number of discrete discontinuities corresponding to individual lines of fractures. At first the ground-water flow is simulated and then ,inputting the calculated water velocity as the data, the transport is simulated.

The code takes into account:

- (a) advective-dispersion transport ,
- (b) chain reactions of radionuclide components ,
- (c) adsorption on the geologic media

and uses an upstream-weighted residual technique to overcome oscillations of the numerical solutions when the convective terms are dominant.