

移流分散効果の評価に関する割れ目 ネットワークモデル解析コードの比較検証

岩野圭太^{1*}・染谷麻優子¹・並川正²・渡辺邦夫³・佐々木泰⁴

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

³埼玉大学 地圏科学研究センター (〒338-08570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

⁴日本原燃株式会社 (〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駱字野附504-22)

*E-mail: iwanokeita @kajima.com

不連続性岩盤の場合、割れ目が地下水流動場を支配していると考えられ、割れ目構造を直接モデル化して対象領域全体の透水性を評価する試みが盛んに進められている。このような解析モデルの長所の1つとしてパーティクルトラッキングによる物質移行/核種移行解析が挙げられるが、解析コードにより結果の傾向に違いが生じることも考えられる。ここでは、解析実績の豊富なコードとしてチャンネルネットワークモデルのDonChanと亀裂ネットワークモデルのFracManに着目し、簡単な不連続性岩盤モデルに対して解析コードの比較検証を行うと共に、分散効果についても検証した。

Key Words : channel / fracture network model, groundwater flow simulation, advection, dispersion

1. はじめに

放射性廃棄物処分施設においては、廃棄体はベントナイトなどの人工バリアにより隔離されるものの、超長期にわたる処分施設の安全評価の観点から、地下水の移行状況を十分検討しておく必要がある。

岩盤においては、断層や割れ目が岩盤全体の透水特性を支配していると考えられるため、断層や割れ目の透水性を考慮できる解析手法が必要であり、これまでも幾つかのモデルが提案されている^(例えば1)~4)。また、これら複数の解析手法を実際のサイトを対象に適用し、大局的に比較検討されている研究事例もある⁵⁾。

また、岩盤の地下水流動特性における物質移行や核種移行に着目すると、割れ目内を卓越して流れる地下水の移行経路や移行時間を検討するために、割れ目を直接モデル化する解析手法が適用されてきている。この場合、割れ目の大きさや方向性、頻度、透水量係数などを決定するだけでなく、割れ目内の移流・分散、拡散、化学吸着、放射性崩壊などのパラメータ設定も物質の移行特性に影響を与える重要な因子である。ここでは、岩盤の割れ目を直接的にモデル化することが可能な2つの解析モデル(Don Chan とFracMan)についてコードの特性を比較検証した。また物質移行解析の影響因子の1つである分散現象に着目し、解析的検討を行った。

2. DonChan・FracManの比較検討

(1) 解析モデル

DonChanモデルは、岩盤内の割れ目等の地質情報を基礎とし、1次元管路(パイプ)の組み合わせとして3次元管路網を構築することで岩盤内の水みちをモデル化するチャンネルネットワークモデルであり、これまでに多くの実績がある^(例えば1),6)。一方、FracManは、不連続性岩盤内の主たる水みちである割れ目を多角形の平行平板でモデル化した亀裂ネットワークモデルであり、これまでもいくつかの研究が実施されている^(例えば2),7)。これら割れ目を直接表現する解析モデルに共通する課題は、地質特性評価の不確定性であり、割れ目の大きさ、頻度、方向性、連続性などをボーリング孔や調査坑道壁面の観察のみで確定させることは困難である。そこで実測値に基づく割れ目パラメータの設定および解析では、確率論的な観点に立ち、実測値と整合の取れた複数の割れ目モデルをモンテカルロ的に作成し(リアライゼーション)、対象領域の巨視的水理特性を評価している方法が検討されている⁸⁾。

(2) 解析モデルの比較

以上のように対象領域の巨視的水理特性の評価を行う上で、解析コードの特性が結果に影響を及ぼすことが十

分に考えられる。従って、ここでは、DonChanモデル、FracManモデルにおいて割れ目の性状を含め、出来る限り同一解析条件下における水理特性の評価を行い、解析モデルの傾向や特徴を把握することとした。

a) 解析条件

解析条件は、図-1に示すように、1辺=50mの立方体に一様流れとして動水勾配=5%を仮定した。また対象領域として、堆積軟岩を念頭においているため、表-1に示すように、間隙率を30%と設定し、割れ目だけでなく、岩盤のマトリクス部の透水性も考慮することとした。マトリクス部は、図-2に示すようにDonChanモデルは3次元規則的に配置したパイプの連結、FracManはX、Y、Z軸に垂直な平行平板の組み合わせでモデル化した。割れ目の本数は50条、透水量係数は $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ と固定し、空間分布、方向分布、大きさ分布を表-1の統計代表値に整合するように割れ目をモンテカルロ的に発生させ、5回のリアライゼーションを実施した。

図-3に発生させた割れ目の大きさ分布を示した。発生させた割れ目条数が50条と少ないため、例えばCase05のように解析ケースによっては、半径の大きな割れ目が発生しており、これらが領域全体の巨視的な水理特性に影響を及ぼすものと予想される。また、図-4に割れ目の法線ベクトルの一例を下半球投影のステレオネットで示したが、ランダムに発生していることが分かる。

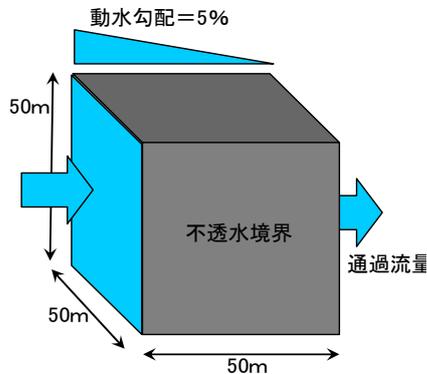


図-1 解析条件

表-1 岩盤および割れ目の解析パラメータ

岩盤物性	
透水係数	1.00E-08 m/s
間隙率	0.3
分割ピッチ	3 m
割れ目物性	
条数	50
透水量係数	$1.00E-06 \text{ m}^2/\text{s}$
空間分布	一様(ポアソン分布)
方向分布	ランダム(Fisher定数=1)
長さ分布	べき分布
(最小半径)	5 m
(べき乗数)	4

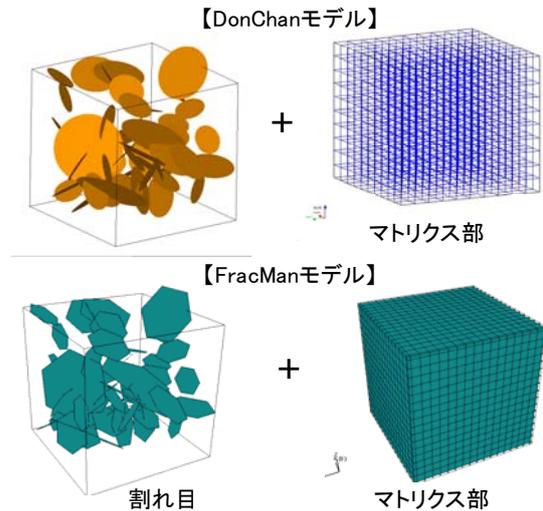


図-2 割れ目/マトリクスのモデル化

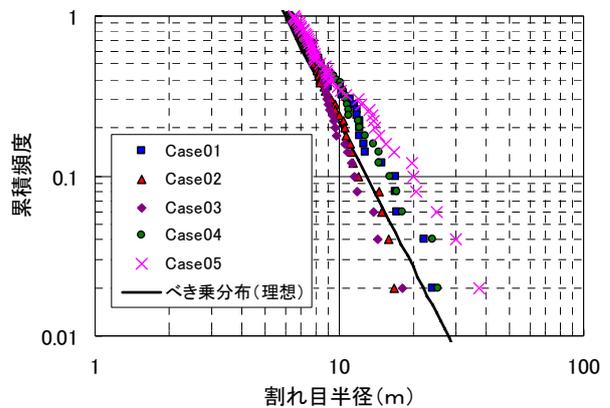


図-3 割れ目の大きさ (べき分布)

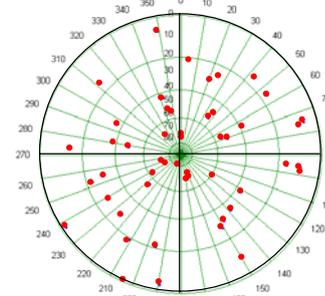


図-4 割れ目の方向性の一例 (ランダム)

b) 解析結果

図-5に解析結果として、発生させた割れ目状況、パーティクルトラッキングにおけるブレイクスルーカーブ(破過曲線)を示す。割れ目状況により、ケースごとにブレイクスルーカーブの形状が異なっているが、同一ケースにおけるDonChanとFracManの比較をすると形状は非常に類似していることが分かる。ブレイクスルーカーブに影響をもたらす因子として、例えば、両解析コードの割れ目のモデル化の違いや、物質移行時のパーティクルの移行経路の選択方法の違いが考えられるが、今回の比較の前に、より簡易なモデルで試解析した結果では両解析コードについて明確な差異はみられなかったことを確認している。

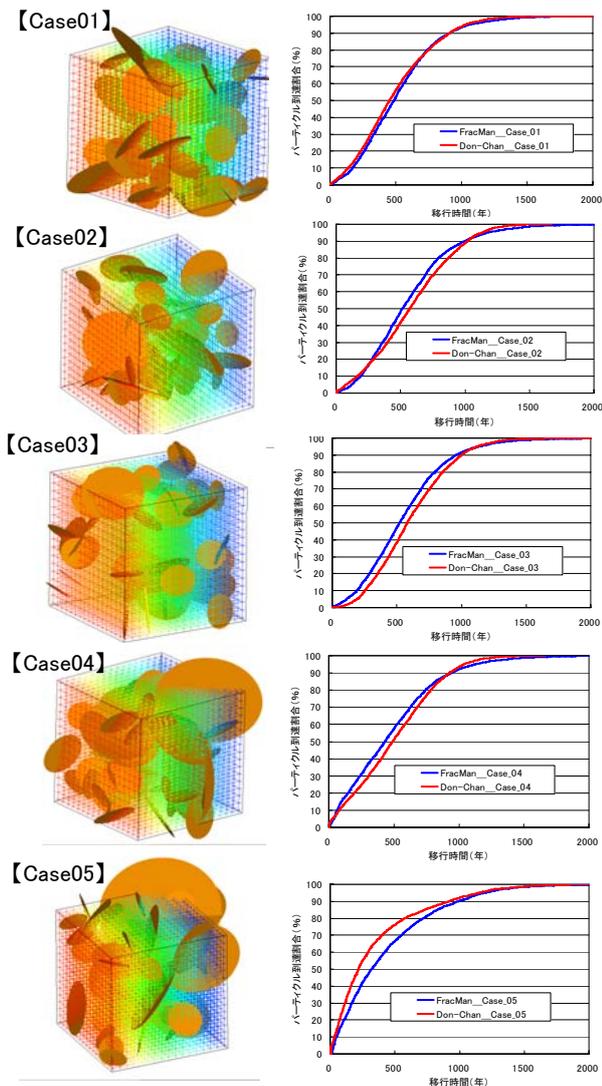


図-5 DonChanとFracManの解析結果比較

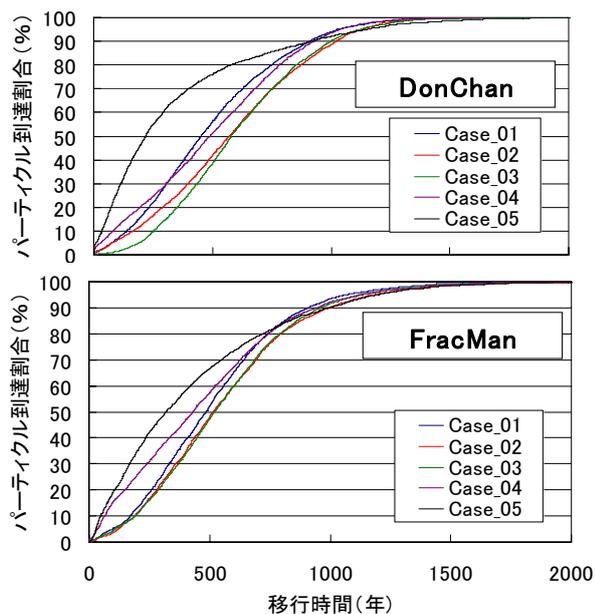


図-6 各解析モデルのブレイクスルーカーブ

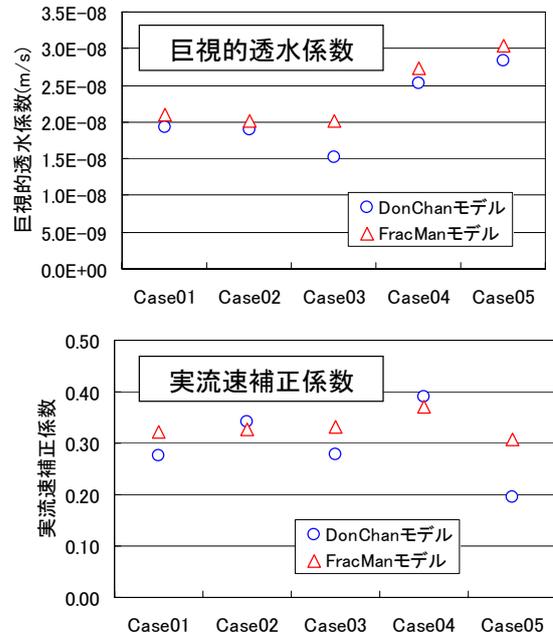


図-7 各解析ケースの巨視的水理パラメータ

図-6に両解析モデルごとにブレイクスルーカーブをまとめた。ここからも両解析モデルの傾向は類似しているといえる。

巨視的水理パラメータは、各解析ケースの対象領域全体の水理特性を示す重要なパラメータであり、以下の式を用いて算出した⁸⁾。

$$\text{巨視的透水係数} \quad \bar{K} = \frac{Q}{i \cdot A} \quad (1)$$

$$\text{実流速補正係数} \quad \phi = \frac{q}{v} = \frac{\bar{K} \cdot i}{L/t_{50}} \quad (2)$$

ここで、 Q ：通過流量、 i ：動水勾配、 A ：流下面積、 L ：直線移行距離、 t_{50} ：ブレイクスルーカーブの50パーセンタイル値である。

図-7に解析ケースごとの巨視的水理パラメータを整理した。巨視的透水係数および実流速補正係数は、両解析モデルともほぼ同じ値をとり、特にCase04やCase05の巨視的透水係数が大きい値をとるのは、大きな割れ目が特徴的である両ケースに対して妥当な結果であるといえる。

3. 分散長についての検討

2. の検討のパーティクルトラッキングでは、割れ目の存在による移行経路の違いが原因で、パーティクルの移行時間にばらつきが生じた考えることができる。1つの割れ目に着目してみると、割れ目界面の凹凸等より、割れ目内においても流速分布が不均一となり、結果とし

て移行時間のばらつきを与える要因となることが考えられる。但し、原位置トレーサ試験などの実現象を考えた場合、上記2つの要因および分子拡散は、試験結果からそれぞれの要因を明確に区別できるものではなく、不連続性岩盤・多孔質媒体といった対象領域の性状によっても、移行時間のばらつきを与える主要因は異なると考えられ、実際の要因の区分は非常に困難であると思われる。

しかしながら、解析においては、このような実現象との整合性の問題があるものの、移行経路の違いに起因したばらつきと、各割れ目内の流速分布の不均一性に起因したばらつきをそれぞれ考慮することが出来る。従って、ここでは、特にFracManを用いてそれぞれに起因する分散について検討した。

(1) 割れ目を考慮しない場合

移行経路の違いに起因するばらつきを除くため、対象領域内の割れ目を取り除き、マトリクス部のみとした。マトリクス部の縦方向分散長を0.0, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0mと変えた。ここでは、条件を簡単にするため、横方向分散長は考慮しないものとした。この場合、図-8に示すように、移行経路は、上流から下流にむけて直線的となる。

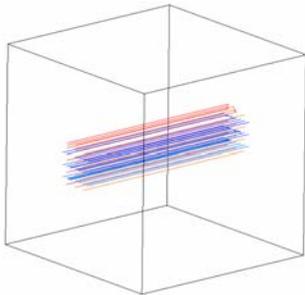


図-8 パーティクル移行経路 (割れ目を考慮しない場合)

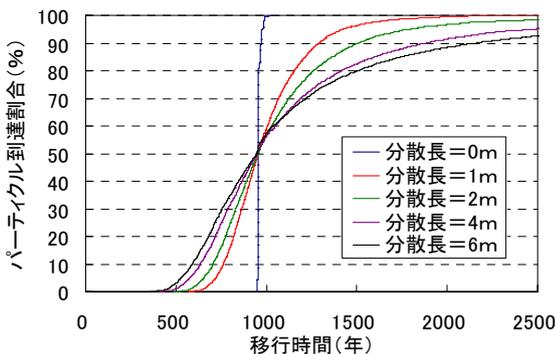


図-9 ブレイクスルーカーブ (割れ目を考慮しない場合)

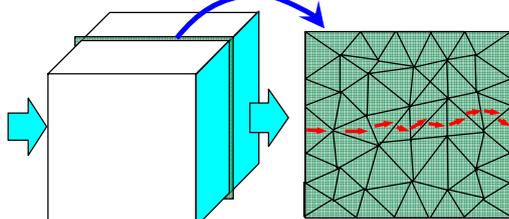


図-10 数値分散の発生要因

ここで上流面からパーティクルを時間パルスの与えた場合のブレイクスルーカーブを図-9に示す。与えた縦方向分散長が大きくなるほど、ブレイクスルーカーブが傾き、移行時間のばらつきが大きくなっている。

縦方向分散長=0.0mの場合、ブレイクスルーカーブは、本来ステップ関数となるはずであるが、図-9ではパーティクル到達割合が80%を越えたあたりから傾斜している。これは以下の理由によると考えられる。FracManモデルでは、割れ目のみならず、マトリクスも三角形の平行平板の組み合わせとしてモデル化している。図-10に誇張して示しているように、本来上流から下流に向けて直線的に流れるはずが、要素分割の影響で流速ベクトルの流れ方向以外の成分も厳密にはゼロでない値をとるためであり、いわゆる数値分散が主な原因であると思われる。

ある一定方向の平行流、遅れ、分散、減衰を考慮した一次元の一般化した移流拡散方程式は以下のように示される⁹⁾。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{u}{R} \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{D_L}{R} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \lambda c \quad (3)$$

ここで、 c : 濃度、 u : 実流速、 R : 遅延係数、 $D_L = \alpha_L u$: 分散係数 (α_L : 縦方向分散長)、 λ : 減衰定数である。

このとき、質量 ΔM のフラックスが時刻 $t=0$ のときに $x=0$ で瞬間放出されたことを考える。この初期条件は以下のようなになる。

$$C_s(x, t) = \frac{\Delta M}{A n_e R} \delta(x) \quad (4)$$

ここで A : 流下面積、 n_e : 有効間隙率、 $\delta(x)$: デルタ関数である。

境界条件として、無限遠方として、

$$C_s(\pm \infty, t) = 0 \quad (5)$$

とすると、濃度の理論解は以下のようなになる。

$$C_s(x, t) = \frac{\Delta M}{2 A n_e R \sqrt{\pi \alpha_L u t / R}} \exp\left(-\frac{(x - ut/R)^2}{4 \alpha_L u t / R}\right) \exp(-\lambda t) \quad (6)$$

ここで(6)式の係数部分

$$B = \frac{\Delta M}{2 A n_e R} \quad (7)$$

は、時間に依存しないものと仮定する。ブレイクスルーカーブの縦軸(比濃度)は正規化するため、この係数の値は、ブレイクスルーカーブには寄与しないことになる。また、遅延および減衰は考慮しないため $R=1$ および $\lambda=0$ とした。実流速 u については、今回の解析条件から、

$$u = \frac{v}{n_e} = \frac{K \cdot i}{n_e} = \frac{1.0 \times 10^{-8} \cdot 0.05}{0.3} = 1.67 \times 10^{-9} (m/s) \quad (8)$$

とした。また観測位置 x は、 $x = 50(m)$ として、縦向分散長 α_L を変化させ、濃度 $C_o(50, t)$ を求めた。図-11に理論式から求めたブレイクスルーカーブを示す。但し、縦方向分散長 $\alpha_L = 0$ の場合は、(6) 式がゼロ割となるため、便宜上、分散を無視できる場合の理論上の移行時間を用いた。

$$t_{\text{分散長}=0} = \frac{x}{u} = \frac{50}{1.67 \times 10^{-9}} = 3.0 \times 10^{10} (s) \approx 951 \text{年} \quad (9)$$

図-9と図-11比較すると、FracManの解析結果は、理論式によるブレイクスルーカーブと類似した結果となっている。図-12に縦方向分散長が1.0mの場合と、6.0mの場合を示した。

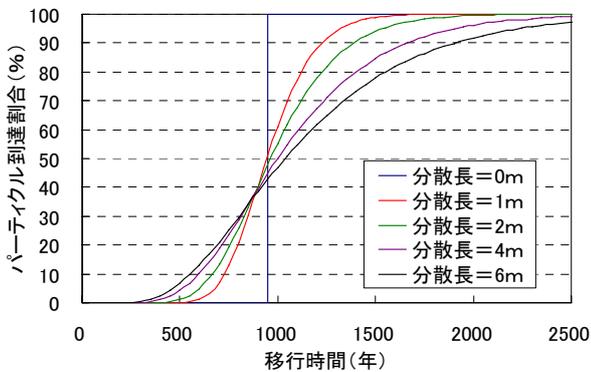


図-11 理論解から求めたブレイクスルーカーブ

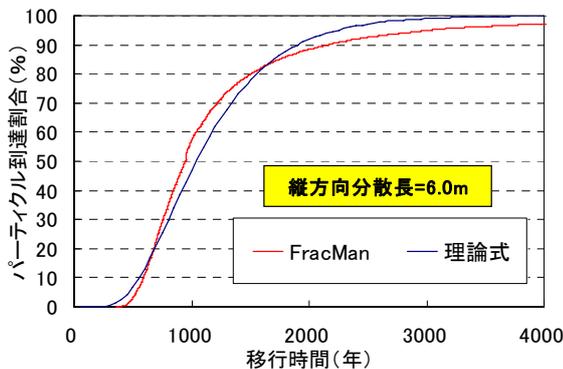
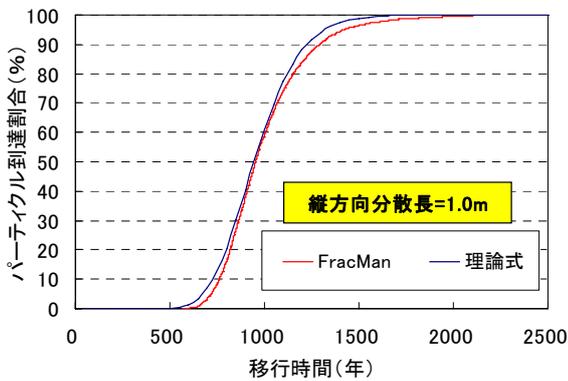


図-12 縦方向分散長ごとのFracMan解析と理論解の比較

この理論式とFracMan解析のそれぞれのブレイクスルーカーブは、同時刻のパーティクルの到達割合にして最大で10%程度の違いがあった。

(2) 割れ目を考慮する場合

次に移行経路に起因したばらつきも考慮するため、領域内に割れ目を設定した。割れ目の発生状況は不変とし、割れ目内の縦方向分散長を0.0, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0mと変えた。パーティクルは上流面から同時刻にパルス状に5000個放出した。上流面内のパーティクル放出位置は乱数を基に決定しており、その放出パターンが結果に影響を及ぼすことも予想されたため、各縦方向分散長で放出パターンを変えて3回ずつ合計21ケースを行っている。ここでも、条件を簡単にするため、横方向分散長は考慮しないものとした。

図-13にパーティクルの移行経路の一例を示す。割れ目を卓越して流れる地下水流動により、パーティクルが様々な移行経路をとっていることが分かる。図-14にブレイクスルーカーブを示した。(1) 割れ目を考慮しない場合と比べ、割れ目を優先的に移行し、早い時間からパーティクルが下流に到達している。縦方向分散長が大きくなるほど、ブレイクスルーカーブは右にずれる(移行時間が遅れる)傾向となるが、縦方向分散長が6.0mを超えたあたりからブレイクスルーカーブとして明確な差異は見えない。(1) 割れ目を考慮しない場合と比較

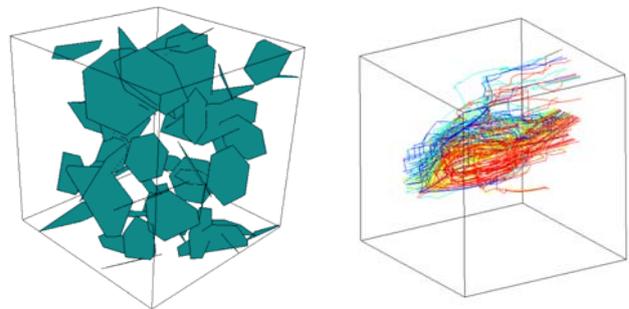


図-13 パーティクル移行経路 (割れ目を考慮する場合)

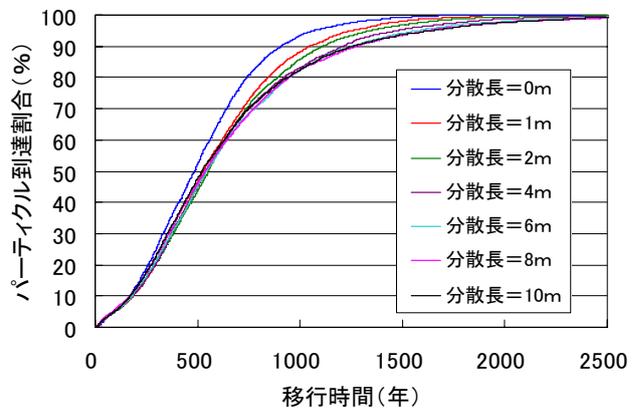


図-14 ブレイクスルーカーブ (割れ目を考慮する場合)

すると、縦方向分散長に起因した割れ目内の流速不均一性によるばらつきに比べ、移行経路によるばらつきが相対的に卓越してきたといえる。原位置では、両者のばらつきを区別することが出来ないが、今後、数値解析的なアプローチより、ブレイクスルーカーブを基にしてこのような両者のばらつきを考慮できる巨視的分散長の検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

割れ目を直接的に表現できる解析モデルについて比較検討と、分散現象についての数値解析的な検証を行った。それによる知見は以下のとおりである。

- DonChan/FracManの比較解析では、同一の割れ目の発生状況に対して両モデルの解析結果の傾向はよく類似している。
- FracManによる分散効果の検討については、数値解析的検討ではあるものの、理論式と比較して、類似した結果が得られることを確認した。また、割れ目内の流速不均一性によるばらつきと移行経路によるばらつきそれぞれが領域全体の水理特性に与える影響について定性的に把握することができた。

実現象を念頭に置くと対象地盤により地下水流動特性も様々であることから、数値解析のようにばらつきの因子を明確に区別することは困難であるが、解析結果と実測結果の整合性をとりながら、今後も、巨視的水理パラメータを評価法の確立していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 田中達也, 渡辺邦夫, 前川恵輔, 中村直昭: 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発その1—解析の考え方—, 応用地質, 35巻, 3号, pp.22-33, 1994.
- 2) 亀裂ネットワークモデルを用いた水理解析に関する研究—Golder Associates Inc.留学報告—: 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所, 1990.
- 3) Pruess, K. : TOUGH2-A general- purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow, Rep.LBL-29400, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA,1991.
- 4) 下茂道人, 山本肇: 等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法, 大成建設技術研究所報, p.257-262, 1996.
- 5) 三枝博光, 澤田淳, 稲葉薫, 竹内真司, 中野勝志: 複数のモデル化手法を用いた地質環境特性調査における地下水流動特性評価の不確実性の検討, サイクル機構技報, No.20, pp.75-89, 2003.
- 6) 渡辺邦夫, 田中達也, 内田雅大, 岩崎浩: 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発その2—釜石鉱山 KD90 坑道・トレーサー試験の解析—, 応用地質, 35巻, 4号, pp.2-12, 1994.
- 7) 亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析, 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 研究報告, 1999.
- 8) 佐々木泰, 細谷真一, 川原秀二, 浜田憲彦: 水理特性を試験スケールから評価スケールに巨視化する方法, 2005年地下水学会秋季大会, 2005.
- 9) W.キンツェルンバッハ: パソコンによる地下水解析, 第7章 輸送方程式の解法, 森北出版, 1990.

COMPARISON BETWEEN TWO FRACTURE NETWORK SIMULATORS REGARDING OF EVALUATION OF ADVECTION DIPERSION EFFECT

Keita IWANO, Mayuko SOMEYA, Tadashi NAMIKAWA , Kunio WATANABE and Tai SASAKI

Many studies realized that fractures control the groundwater flow not only in discontinuous rock but in soft sedimentary rock, and it is one of the key issues to appropriately evaluate water flow in fractures. Several numerical simulators which can model these fractures distinctively are so far proposed. While fracture-parameter-setting based on limited in-situ data is most critical issue, each simulator's characteristic can affect the numerical results. In this paper, two different type simulators are compared and identified each characteristic affecting on the numerical results.