

## 亀裂性岩盤浸透問題に関するモデル化手法の比較 STUDY OF FLOW MODEL COMPARISON IN FRACTURED ROCK

澤田 淳\*・塩月正雄\*・小山田潔\*\*・高瀬博康\*\*\*  
Atsushi Sawada, Masao Shiotsuki, Kiyoshi Oyamada and Hiroyasu Takase

For the fractured rock modeling, many kind of modeling procedures such as discrete fracture network model, heterogeneous continuum model and etc. have been proposed. This paper reports the comparison results of flow modeling among several fracture network models and heterogeneous continuum models, based on a DFN model input parameters as a reference case apart from in-situ test datum in order to avoid data uncertainty of them. From the comparison results, all DFN models resulted in same range. And, it was shown that the continuum models might not fully model the effect of relatively large-scale fractures.

### 1. はじめに

亀裂性岩盤における浸透・物質移行問題のモデル化に関しては、亀裂のネットワーク構造を直接的にモデル化する亀裂ネットワーク (DFN) モデルや、地球統計法等を利用して亀裂構造に起因する不均質な水理特性を統計的に表現可能な連続体モデル等様々な手法が提案されている。それらの適用性を相互に比較するためにはレファレンスともいえる原位置調査データを必要とするが、原位置調査の制約が取得されるデータを限定し、それが解析結果の比較を困難にさせているのが現状である。また、その原位置調査の制約は、モデルに用いられるパラメータの不確実性に加えて、モデルそのもの不確実性に対する評価の必要性を示唆している。

本研究では、モデルの不確実性評価に資することを目的として、任意の DFN モデルの入力パラメータをレファレンスとして用いて、複数の DFN モデルと連続体モデルで比較解析を実施した。様々なモデル化手法のうち DFN モデルの入力パラメータをレファレンスケースに設定することにより、概念モデルが同じ DFN モデルについては計算結果の妥当性を相互に比較することが、また、連続体の概念を導入しているモデルにおいては、亀裂のネットワーク構造を直接的に表現しているモデルに対して比較することで、各モデルの連続体への近似プロセスにおいて亀裂構造に起因する不均質な水理特性の効果が表現できているかを検討することができる。

### 2. 解析条件

解析対象としては一辺が 200m の立方体領域を設定し、この領域の中央には直径 2.2m で長さ 200m の水平坑道を配置した (図-1)。この坑道の周囲には坑道方向に連続した厚さ 0.5m の掘削影響領域 (EDZ; Excavation Disturbed Zone) が存在すると仮定した。なお、坑道内は不透水であると仮定した。

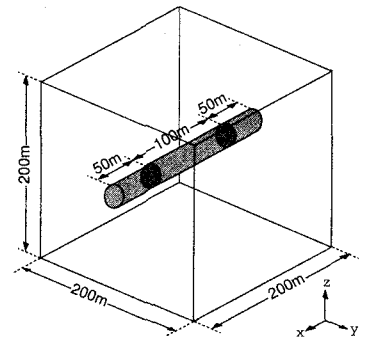


図-1 解析対象領域

\* 核燃料サイクル開発機構  
\*\* 日揮株式会社  
\*\*\* Quintessa LTD.

動水勾配は y 軸に沿った方向，すなわち坑道に対して垂直な方向に 0.008 を設定した。なお，x 軸と z 軸に直交する側方境界面は不透水性と仮定した。レファレンスとして設定した DFN モデルでは，亀裂の幾何学的特性と水理学的特性が入力条件として必要となる。それらの入力パラメータを以下に記す。

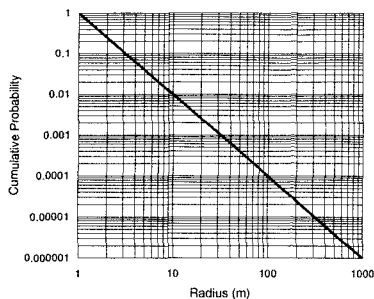


図-2 亀裂半径の累積確率密度分布

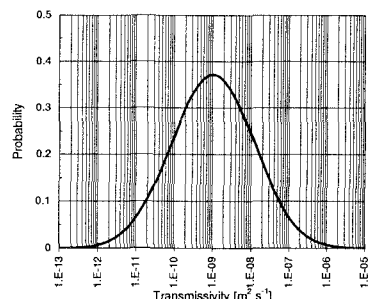


図-3 透水量係数分布図

**亀裂形状：**

平行平板の円盤と仮定する。

**亀裂方向：**

相互に直交する二組の鉛直亀裂群を仮定する。それぞれの亀裂セットの方位は，x 軸及び y 軸方向に沿って分布し，その確率密度関数は以下の Fisher 分布により与えられる。

$$f(\theta, \varphi) = \frac{\kappa \sin \theta}{2\pi(e^\kappa - e^{-\kappa})} e^{\kappa \cos \theta} \quad (1)$$

$$0 < \theta < \pi, 0 < \varphi < 2\pi$$

ここで， $\theta$  は亀裂の主極方向からの偏向角， $\varphi$  は方位角を表す。 $\kappa$  はばらつきを与える Fisher 定数であり，今回は  $\kappa=10$  と設定した。

**亀裂半径：**

亀裂半径  $r$  は以下の確率密度関数に従うものと仮定する。

$$f(r) = \frac{b-1}{r_{min}} \left( \frac{r_{min}}{r} \right)^b \quad r \geq r_{min}, b > 1 \quad (2)$$

ここで， $r_{min}$  は最小亀裂半径で 1m とし， $b$  はべき指数であり  $b=3$  を設定した (図-2)。

**亀裂位置及び頻度：**

亀裂の中心位置は空間的にランダムに分布するものとし，3次元亀裂密度として  $0.8m^2/m^3$  を設定した。なお，構築したネットワークモデル上の任意の測線における亀

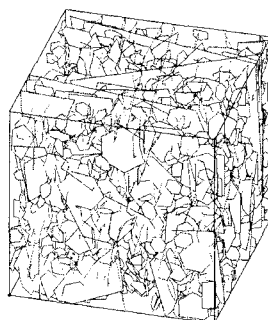


図-4 DFN モデル例  
全亀裂の内 25%の亀裂を表示  
(200m×200m×200m)

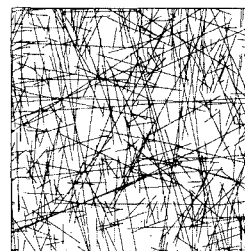


図-5 水平面における  
トレース図  
(200m×200m)

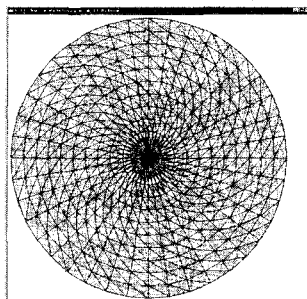


図-6 FFDF の 2 次元 DFN モ  
デルと連続体有限要素  
(200m×200m 領域を含む円領域)

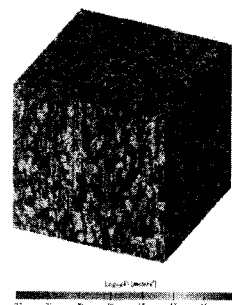


図-7 FCM モデル例  
固有浸透率の分布  
(200m×200m×200m)

表-1 解析モデル概要

Code name	Organization	Conceptual model	Flow calculation	Groundwater travel time	NR	Remarks
FracMan <sup>1)</sup>	JNC	3D-DFN	3D-DFN (MAFIC code)	CN (LTG code <sup>2)</sup> )	50	-
FNET_FLO	Taisei Corp.	3D-DFN	3D-DFN	PT: 3,000 particle	50	-
NAPSAC <sup>3)</sup>	AEA	3D-DFN	3D-DFN	PT:100 particle on CN <sup>4)</sup>	50	-
FracAffinity <sup>5)</sup>	QuantiSci	3D-DFN	3D-DFN	PT: 50 particle	50	Simulate 100m scale
FFDF	UCB	2D-DFN	2D-Continuum	PT: 5 particles	25	FEM was generated for the percolating fracture clusters
CRFGEN/ TOUGH2	LBL	3-D Effective Continuum Model	3-D Continuum (TOUGH2 code <sup>6)</sup> )	Flow path (Tecplot code)	11	Variograms parallel to each fracture set were applied
FCM	Sandia NL	3-D Fractured Continuum Model	3-D Continuum (POR-SALSA code <sup>7)</sup> )	PT: 600 particles	50	Geostatistical simulation such as Boolean simulation <sup>8)</sup> was applied

DFN: Discrete Fracture Network model, CN: Channel Network model, PT: Particle Tracking method, NR: Number of realizations

裂の頻度は平均 0.26 本/m である。

**透水量係数：**

亀裂の透水量係数(m<sup>2</sup>/s)は対数正規分布に従い、その対数平均値-8.99、標準偏差 1.07 と設定した (図-3)。

**開口幅：**

亀裂の開口幅  $a$  は、各亀裂の透水量係数  $T$  に相関すると仮定し、以下の相関式により求める。

$$a = 2\sqrt{T} \text{-----(3)}$$

**掘削影響領域(EDZ)：**

坑道の周囲には坑道方向に連続した厚さ 0.5m の EDZ が存在し、モデルの平均的な透水量係数と同じ透水性を有すると仮定した。すなわち、掘削影響による透水性の増減は考慮しないものの、坑道に沿った方向の水理学的な連続性を考慮した。

**3. 解析内容と比較のための指標**

解析は、上記境界条件による定常浸透流れを対象とした。解析結果比較のための指標としては、①坑道中央 100m の EDZ を通過する地下水流量、②坑道中央 100m 部分から下流側境界へ至る最短の地下水移行時間、を用いた。また、各モデルの巨視的な地下水フラックスと動水勾配から求めたモデルの平均的な透水量係数も構築したモデルの特徴を示すものとして参照した。

**4. モデル**

本研究の比較解析に参加したモデルを表-1 に示す。以下に、それぞれのモデルの概要を記す。

FracMan, FNET\_FLO ならびに NAPSAC は DFN モデルとしての概念モデルは基本的に同じであるが、FracMan と FNET\_FLO では、亀裂形状に 6 角形を採用し、NAPSAC は 4 角形を採用している。DFN モデルの例として FracMan によるモデルを図-4 に、また、その水平面内のトレースを図-5 に示す。

FracAffinity は、本来 DFN モデルと連続体モデルの両方の機能を兼ね備えたハイブリッドなモデルであるが、本研究においてはそのネットワークモデルの機能のみを使用している。したがって、基本的には前述の DFN モデルと同じ概念モデルを用いている。しかし、計算容量の制限から、図-1 に示す解析領域より小さな 100m×100m×100m スケールを対象とするとともに、亀裂発生時に解析領域境界に達しない規模の亀裂を削除している。

FFDF (Finite-element Flow code for Discrete-Fracture networks) は水理解析に 2次元を対象とした連続体有限要素法を採用しているが、個々の要素の水理特性は、2次元の DFN モデルからパーコレーション解析により抽出した境界間を連結する亀裂クラスターに Kozeny-Carman 式<sup>9)</sup>を適用して求めている。図-6 に FFDF の 2次元 DFN モデルと連続体モデルの要素図を重ね合わせた図を示す。

CRFGEN (Correlated Random Field Generator) /TOUGH2 と FCM (Fractured Continuum Model) は共に 3次元連続体モデルであり、地球統計法を適用することで亀裂構造の効果を表現している。CRFGEN は、指定された透水量係数分布に基づき空間的にランダムに透水量係数を割り付けたモデルに対して、亀裂の卓越方向に沿った方向に

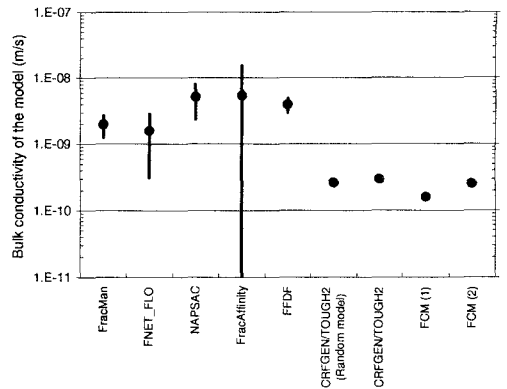


図-8 各モデルの平均的な透水量係数

●：各リアライゼーションの平均値、|：2σの範囲  
注：FracAffinity は平均値よりも標準偏差が大きい。

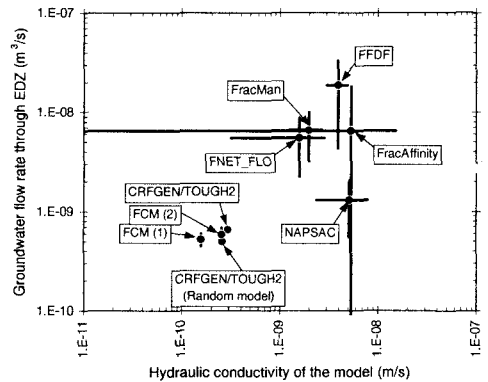


図-9 各モデルの平均的な透水量係数に対する EDZ を通過する平均地下水流量

●：各リアライゼーションの平均値、|：2σの範囲  
注：CRFGEN/TOUGH2 では標準偏差が求められていないため 2σの範囲は未掲載。

任意に設定したバリオグラムを満足するように simulated annealing を行い、亀裂構造に起因する透水係数の不均質性を表現している。なお、比較対象としてランダムなモデルを用いた解析も実施している。

FCM は、個々の亀裂構造を連続体モデルで詳細に表現するために、解析対象領域を 100 個×100 個×100 個の要素に細分割した。透水場のモデルは、i) 亀裂構造を考慮した透水部/非透水部の分類、ii) 各要素に含まれる亀裂個数、iii) 各要素に含まれる亀裂の連結数を boolean simulation, multi-gaussian geostatistical simulation, indicator geostatistical simulation でそれぞれ独立に求め、それらを指標とした実効的な透水係数を推定している (図-8~10 では FCM(1)と記す)。また、より亀裂による透水部・非透水部のコントラストをつけるために boolean simulation による亀裂構造モデル (上記 i)) と亀裂密度の相関を考慮した解析も実施している (図-8~10 では FCM(2)と記す)。図-7 に FCM で求められた固有浸透率分布の例を示す。

## 5. 解析結果

各モデルの平均的な透水係数を図-8 に示す。同図には、それぞれのリアライゼーションで得られる値のばらつきとして 2σ の範囲 (σ : 標準偏差) を幅で示した。DFN モデルは 10<sup>-9</sup> m/s オーダーに分布するのに対して、CRFGEN/TOUGH2 と FCM の連続体モデルは 10<sup>-10</sup> m/s オーダーに分布する傾向があることが分かる。

### 5. 1 EDZ を通過する地下水流量

各モデルで解析して得られた EDZ を通過する流量は 10<sup>-10</sup> m<sup>3</sup>/s オーダーから 10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>/s オーダーに分布するものの、それぞれのモデルの平均的な透水係数で整理すると、各モデルの平均的な統帥係数に対応して、CRFGEN/TOUGH2 と FCM の連続体モデルは EDZ を通過する流量が小さい傾向があり、一方で、DFN を基本としたモデルは EDZ を通過する流量が大きい傾向がある (図-9)。DFN'モデルのグループにおいては、FFDF がやや大きな EDZ を通過する流量を、NAPSAC がやや小さな値をとる傾向がある。ただし、FFDF については、2次元モデルであること、ならびに DFN モデルを連続体モデルに近似するという他の DFN モデルとは異なるプロセスを採用しているために結果が異なる可能性もある。連続体モデルのグループにおいては、CRFGEN/TOUGH2 と FCM モデルでモデルの構築プロセスが異なるにもかかわらず、ほぼ同様な結果が得られた。また、それぞれの構築プロセスの変更 (CRFGEN/TOUGH2 においては亀裂構造を考慮したモデルとランダムモデル、FCM モデルでは FCM(1)と FCM(2)) が結果に与える影響が小さいことが分かる。

### 5. 2 最短移行時間

各モデルで解析して得られた地下水の最短移行時間を各モデルの平均的な透水係数で整理したものを対する最短移行時間を図-10 に示す。これらの結果から、最短移行時間は数年オーダーから百年オーダーに分布するものの、モデルの平均的な透水係数に対応して DFN モデルは最短移行時間が短く、連続体モデルは長い傾向がある。FracAffinity は他の DFN モデルと比べて最短移行時間が長く、連続体モデルと同様の値を示しているが、これは

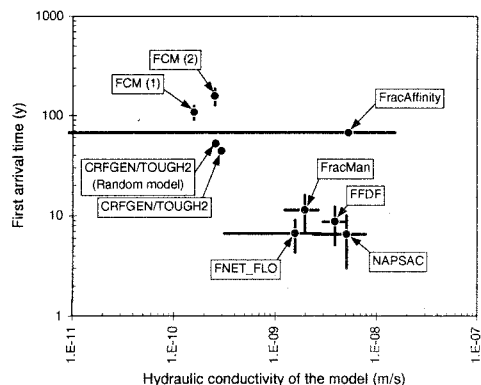


図-10 各モデルの平均的な透水係数に対する最短移行時間

● : 各リアライゼーションの平均値、| : 2σ の範囲

注: FracAffinity, CRFGEN/TOUGH2 では標準偏差が求められていないため 2σ の範囲は未掲載。

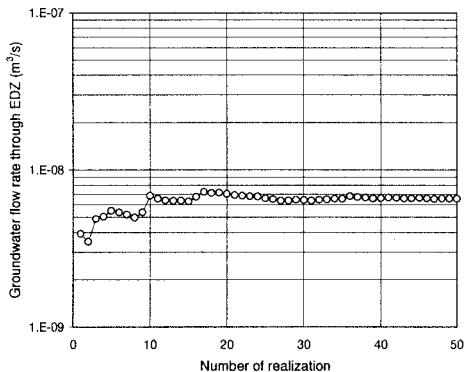


図-11 リアライゼーション数と EDZ を通過する流量の平均値 (FracMan の場合)

粒子追跡法で解析を行う際に、その粒子の出発点として 100m 坑道の任意の 3 点を特定しているため、他の DFN モデルより最短移行時間が長くなったと考えられる。

## 6. 考察・まとめ

亀裂性岩盤を対象とした水理モデルにおいては、解析対象に対する亀裂の大きさと亀裂の連続性が問題となる。本研究では、(2)式や図-2 に示した亀裂半径の確率密度と図-5 に示した DFN モデルのトレース図に示されるように、解析対象に対して有意な大きさの亀裂群が含まれるように設定した。この場合、解析領域全体の実効的な透水性は並列抵抗モデルを指標として表すことができると考えられる。並列抵抗モデルの平均透水係数は透水量係数の算術平均  $2.13 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  と亀裂頻度 0.26 本/m の積から約  $6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  と求まり、この値は上記 DFN モデルの結果とはほぼ調和的である。一方、連続体モデルでは平均的な透水係数が DFN モデルに比べて約 1 オーダー小さい結果となった。これは、連続体モデルにおいては水理特性が各要素内で平均化されており、今回のように解析領域に対して十分大きな亀裂が存在するような問題に対しては、大きな亀裂の効果を各要素間での水理的な連続性として十分表現できていない可能性がある。また、その平均化のプロセスは各要素の大きさにも関係があると考えられ、今後これらの課題を整理してゆく必要がある。

また、各モデルともに統計的なモデルであり、解析結果はそれぞれリアライゼーションごとに異なる。今回の解析ではそれぞれ 50 個のリアライゼーションを対象に解析を実施し、その平均値を指標とした。図-8~11 に示されるようにモデルや指標に応じて  $2\sigma$  のばらつきは異なり、本研究のようにモデル間の比較をおこなう場合には指標として求められる値の代表性や信頼性が問題となる。図-11 はリアライゼーションの増加に対して得られた EDZ を通過する地下水流量の平均値がどのように変化するかを例示したものである。これによると、リアライゼーションの増加とともに平均値はある値に漸近し、20~30 個以上ではほぼ値が変化しなくなっていることから得られる値の代表性を検討した。今後は、このようにして得られた値の信頼性評価について検討していく必要がある。

本研究では、様々な提案がなされている亀裂性媒体のモデルのうち、DFN モデルの入力パラメータセットをレファレンスケースとして設定し、複数の DFN モデルと連続体モデルの比較解析を実施した。DFN モデルについては、計算手法の違いに起因する結果の差異が一部認められるものの、おおむね同様の結果が得られた。一方で、連続体モデルは DFN モデルに比べた場合、解析領域に対して十分大きな亀裂がモデルの透水性に与える影響が過小評価されている可能性が示された。

## 6. 謝辞

本研究の実施にあたり、各モデルにおける解析は以下の諸氏により実施されました。ここに感謝の意を表します。

FracMan : 坂本和彦 (検査開発株式会社), 井尻裕二 (核燃料サイクル開発機構), FNET\_FLO : 下茂道人, 山本肇 (大成建設株式会社), NAPSAC : Lee J. Hartly (AEA Technology), FracAffinity : Jason P. Humm, Peter. C. Robinson (QuantiSci), FPDF : Joonhong Ahn, Doohyun Lim (University of California Berkeley), CRFGEN/TOUGH2 : Christine. Doughty, Kenji Karasaki (Lawrence Berkeley National Laboratory), FCM : Paul C Reeves, Sean A. McKenna, Erik K. Webb (Sandia National Laboratories).

## 7. 参考文献

- 1) Dershowitz, W., Lee, G., Geier, J., Foxford, T., LaPointe, P. and Thomas, A.: FracMan interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation, User documentation, Version 2.6, Golder Associates Inc., Seattle WA., 1998
- 2) 澤田淳: 亀裂ネットワークモデルの核種移行問題への適用, 第 34 回地盤工学研究発表会講演論文集, pp.1309-1310, 1999
- 3) Hartley, J.: NAPSAC(Release 4.1) Technical summary document, AEA-D&R-027, AEA Technology, Harwell, 1998
- 4) Herbert, A. and G. Lanyon: Modelling tracer transport in fractured rock at STRIPA, SKB TR92-01, 1992
- 5) Impey, M., J. Humm, P. Grindrod and P. Robinson: Frac-Affinity version 1.0: Theoretical background, QuantiSci Report MC-5041A-15, 1998
- 6) Pruess, K.: TOUGH2 - A general-purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow, Rep. LBL-29400, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, 1991
- 7) Martinez, J., P. Hopkins and J. Shadid: LDRD Final report: Physical simulation of nonisothermal multiphase multicomponent flow in porous media, SAND97-1766, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1997
- 8) Deutsch, C. and A. Journel: SGLIB Geostatistical software library and user's guide, Oxford University Press, New York, 1998
- 9) Bear, J.: Hydraulics of groundwater, McGraw-Hill Publishing Company, p.67, 1979