第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集
公益社団法人土木学会　2022 年 1 月　講演番号 64

割れ目モデル構築における水理学的パラメータ推定手法とモデル化手法が解析結果に及ぼす影響

石橋 正祐紀[1*]・三好 貴子[1]・尾上 博則[2]・升元 一彦[1]

[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]日本原子力研究開発機構　東濃地科学センター（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-63）
（現：原子力発電環境整備機構（〒108-0014 東京都港区芝4-1-23 三田NNビル））
*E-mail: ishibama@kajima.com

地下水流動解析において，割れ目系岩盤のモデル化・解析に際しては，割れ目ネットワーク（DFN）モデルや等価不均質連続体（ECPM）モデルが活用される．この確率論を用いたモデル化に際しては，個々の割れ目の透水性を設定する水理学的パラメータセットの適切性を明確に示すことが重要となる．そこで，本報では地下坑道内で掘削されたボーリング調査結果を確率論的に再現可能な水理学的パラメータセットの推定手法を検討した．また，推定・構築したDFNモデルおよびECPMモデルを用いて坑道湧水量解析を実施し，ECPMモデルのメッシュサイズに比較して坑道サイズが十分に大きければ，DFNモデルとECPMモデルの解析結果に有意な差は認められない可能性が示唆された．

Key Words : *fractured rock, DFN model, ECPM model, groundwater flow analysis, tunnel*

1. 背景・目的

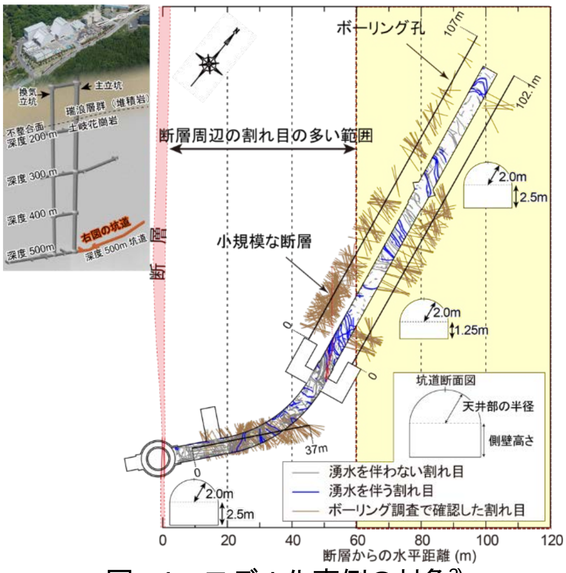
花崗岩などの硬岩では，割れ目が地下水の主要な移行経路となることから，地下水流動の評価に際しては，割れ目分布の不均質性を確率論的に考慮できる割れ目ネットワーク（DFN）モデルが活用される．DFNモデルを構築する際には，割れ目の方位，密度，長さや透水性の確率分布（各種確率密度分布のパラメータセット）を推定する必要がある．割れ目の方位，密度，長さ分布（幾何学的パラメータ）については，調査データから数学的（決定論的）に求める方法が提唱されている[1)]が，割れ目個々の透水性を再現する水理学的パラメータについては，試行錯誤して推定される．しかし，この試行錯誤した結果の適切性については，専門家の判断に委ねられる部分がある．

また，DFNモデルは割れ目数によっては，複雑なモデルとなり，大規模化に際しては解析時間の増加や解析結果の収束性が低下し，規模によっては解析が不可能となるなどの問題が生じる．このため，大規模モデルの解析に際しては，DFNモデルと等価な透水性や空隙率を有する任意のメッシュサイズに分割した等価不均質連続体（ECPM）モデルに変換される．しかしながら，DFNモデルからECPMモデルに変換することによる解析結果への影響が懸念される．

そこで，本報ではDFNモデルに適用する水理学的パラメータを直感的にも理解可能な提示方法を検討した結果を示すとともに，坑道湧水量解析におけるECPM変換による影響について検討した結果を示す．

2. 実施内容

本報は，岐阜県瑞浪市に位置する日本原子力研究開発



図ー1　モデル化事例の対象[2)]

機構の瑞浪超深地層研究所の深度500mで取得された割れ目情報（**図－1**の黄色ハッチ領域）[2]と原位置のボーリング孔で実施された区間水理試験結果[3]を用いてDFNモデルに設定する水理学的パラメータを推定した．

また，推定したパラメータセットを用いて100m立方のDFNモデルとECPMモデル（メッシュサイズ：1.0m，2.5m，5.0mの3種類）を構築し，DFN・ECPMモデルを用いて坑道掘削に伴う湧水量解析（坑道湧水量解析）を実施した．この湧水量解析の結果から，ECPMモデルへの変換による解析結果への影響を検討する．なお，本検討はConnectFlowを用いて実施した．

3. DFNモデルの構築

割れ目分布を示すDFNモデル（GeoDFNモデル）は，**表－1**に示す幾何学的パラメータセットを用いて構築した．幾何学的パラメータについては，坑道壁面調査で取得された割れ目情報に基づき推定されたものである[2]．割れ目の方位分布はFisher分布に基づき，割れ目の長さ分布についてはべき分布を仮定して推定されている[2]．

なお，DFNモデルで構築した割れ目は，最小割れ目長さ2m（半径で約1.13m），最大長さ100m（半径で約56.42m）である．

表－1　幾何学的パラメータセット

方位区分	傾斜方位 [deg.]	傾斜 [deg.]	Fisher K [—]	べき乗数 [—]	P_{32} [m^2/m^3]
set1	202.9	87.8	18.5	3.1	0.43
set2	150.6	89.6	17.8	3.4	0.13
set3	80.7	86.2	15.3	4.7	0.05
set4	210.7	30.3	12.1	3.3	0.08

4. 水理学的パラメータの推定

水理学的パラメータは，割れ目半径が大きな割れ目ほど，割れ目の透水量係数が大きくなるように式（1）の関係性があると仮定して推定した．

$$T = lognorm(\mu, \sigma) \cdot r^C \qquad (1)$$

ここで，T：透水量係数（m^2/s），μ：対数平均，σ：対数標準偏差，r：割れ目半径（m），C：定数を示す．

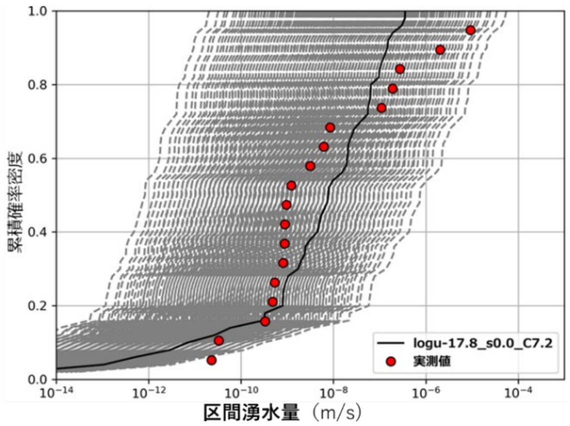
このうち，本報では割れ目半径が大きい割れ目に対して，低い透水量係数が設定されることを避けることを目的としてσ=0.0としている．

水理学的パラメータの推定に際しては，構築したGeoDFNモデルの中心に仮想ボーリング孔を設置した仮想水理試験解析の結果と実測値（水理試験時の湧水量）とを比較した．水理学的パラメータについては，μ=-20.0～-16.0，C=5.2～8.0の範囲で176のパラメータ組合せについて解析を実施している．なお，仮想水理試験解析の実施に際しては，当該研究所およびその周辺で取得された実施値の範囲から，割れ目の透水量係数の下限値を1.0E-11m^2/s，上限値を1.0E-4m^2/sとしている．

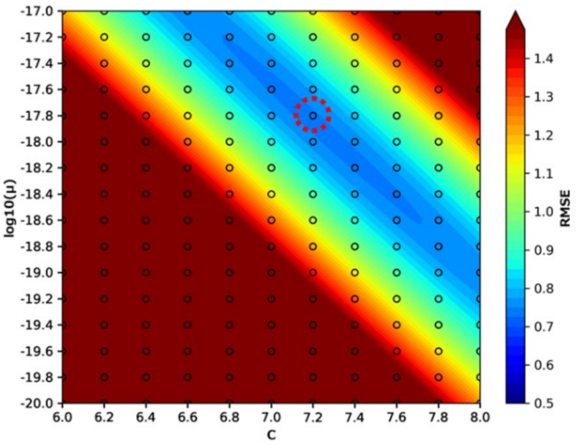
仮想水理試験解析結果と実測値分布を**図－2**に示すが，**図－2**のみ（グラフ情報のみ）では，最適なパラメータ組合せを決定することは困難である．そこで，実測値と解析値の差を対数値の平均平方二乗誤差（RMSE）として算出し，コンター図で可視化することで最適パラメータ組合せ（μ=-17.8，σ=0.0，C=7.2）を決定した（**図－3**）．これにより専門家の判断によらないパラメータが決定できたと考えられる．

5. ECPMモデルの構築

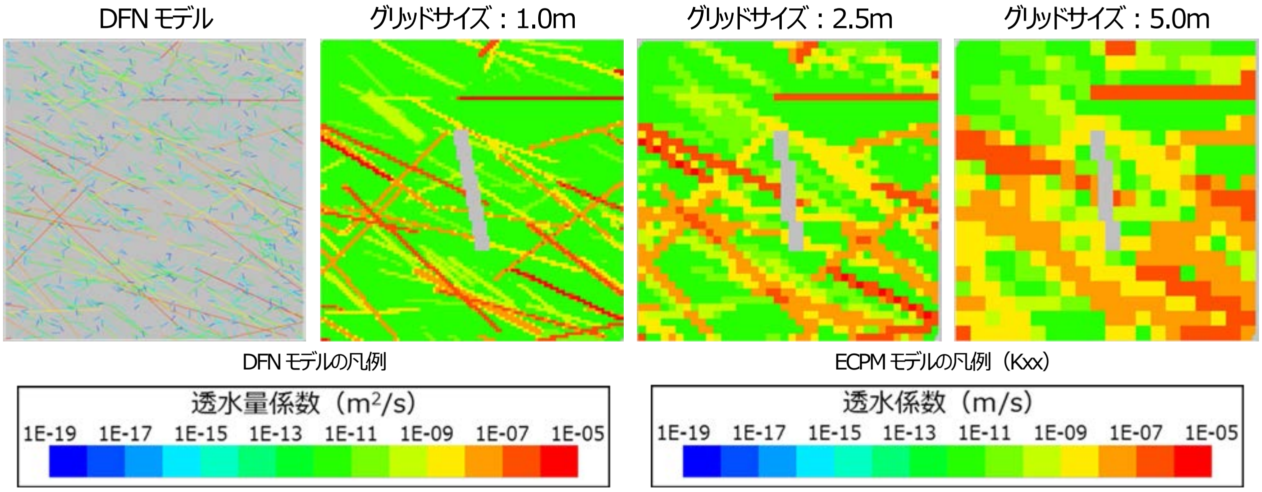
3章に示す割れ目の幾何学的パラメータセットと，4章で推定した割れ目の水理学的パラメータセットを用いて，坑道湧水量解析に用いるHydroDFNモデルを構築した．HydroDFNモデルは，確率論的なばらつきを考慮して20



図－2　仮想水理試験解析結果と実測値の比較
（灰色点線：全解析結果，黒線：最適パラメータ組合せ）



図－3　RMSEマップ
（点線赤丸：最も誤差の小さい箇所）



図−4　構築した DFN モデルおよび ECPM モデル（Kxx）断面

リアライゼーション構築している．

ECPMモデルは，構築したHydroDFNモデルを用いて，1.0m，2.5m，5.0mのメッシュサイズに分割することで構築している．構築に際しては，ConnectFlowに付属する機能を活用し，各メッシュ領域に対して，定常浸透流解析を実施し，HydroDFNモデルと等価な透水係数と空隙率を算出している．なお，ECPMモデルの構築方法には，メッシュ要素の範囲を広げて（要素間の重複範囲を設定し）パラメータを推定することも可能であるが，本報では要素間の重複をせずにメッシュ毎の等価なパラメータを推定している．

6.　坑道湧水量解析

構築したDFNモデルおよびECPMモデル（**図−4**）を用いて坑道湧水量解析を実施した．坑道湧水量解析は，モデル中に仮想坑道（総延長40m）を5mピッチで8ステップで設置し，仮想坑道の長さを変更する毎に定常浸透流解析を実施することで，坑道掘削による影響としての湧水量を算出した．なお，リアライゼーション数は20，モデル化領域は100m×100m×100m，坑道の方位はN10°Wの水平坑道とした．また，解析時の境界条件は，外側境界：全水頭400m，内側境界：全水頭0mである．

坑道湧水量解析の結果として，40m分の全ての坑道をモデル化した際のDFNモデル，ECPMモデル（メッシュサイズ：1.0m，2.5m，5.0m）から出力された，最小値，中央値，最大値について**表−2**に示す．

いずれの値を比較しても，DFNモデルの解析結果が最も湧水量が少なく，メッシュサイズが大きくなると湧水量も大きい傾向がある．しかし，いずれもオーダーレベルで見れば，全モデルで類似した結果が得られている．

次に，坑道長を5m毎に延長しつつ解析した結果を**図−5**に示す．ステップごとに見ると，特にステップ2〜3まで（坑道延長が10〜15mまで）の段階において，DFNモデルに比較してECPMモデルの解析結果の湧水量の幅（ばらつき）が小さくなる傾向が見受けられる．一方，ステップ数が大きくなる（坑道延長が20m程度以上になる）と，両モデルともにばらつきの範囲が類似する．

DFNモデルからECPMモデルに変換する際，メッシュごとに浸透流解析を実施していることから，1本でも透水性の高い割れ目がメッシュ内に交差すれば，そのメッシュの透水性は高くなる．その結果，ECPMモデルはDFNモデルに比べて透水性の高い領域が多く，メッシュ間のばらつきが小さくなる（**図−4**）．ステップごとの解析結果は，この影響を受けた結果と推定される．

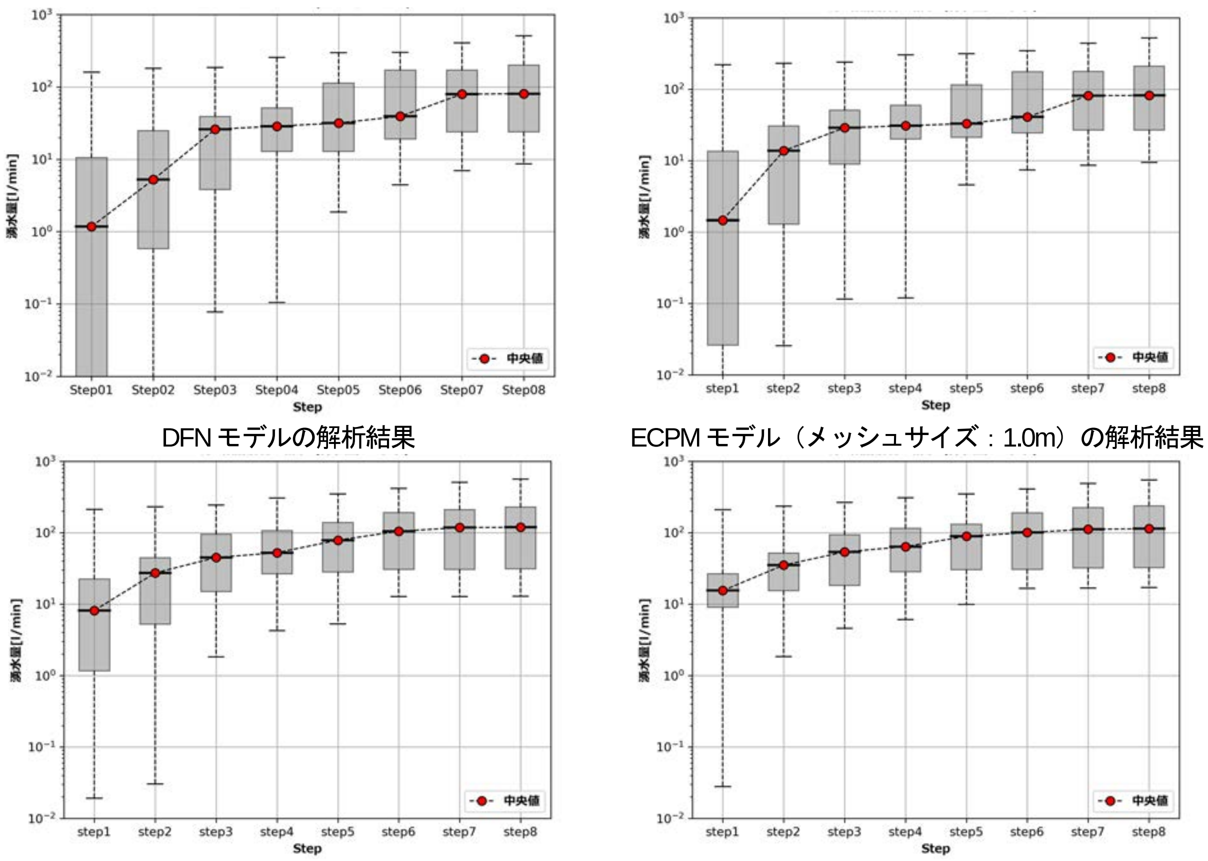
以上に基づけば，坑道湧水量解析については，坑道延長に対してメッシュサイズが十分に小さければ（本事例では坑道延長の1/2〜1/4倍程度）であれば，DFNモデル，ECPMモデルともに平均化し類似した解析結果が見込めるが，メッシュサイズが大きい場合は，同等の評価が困難となると考えられる．

表−2　坑道湧水量解析結果（m³/day）

	DFN モデル	ECPM モデル（メッシュサイズ）		
		1.0m	2.5m	5.0m
最小値	12.40	13.61	18.57	24.41
中央値	116.25	117.57	171.10	163.37
最大値	734.52	755.63	809.08	790.89

7.　まとめ

日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所で取得されたデータに基づき，DFNモデル構築に向けた水理学的パラメータの適切性を直感的な理解可能な提示方法，



DFN モデルの解析結果　ECPM モデル（メッシュサイズ：1.0m）の解析結果

ECPM モデル（メッシュサイズ：2.5m）の解析結果　ECPM モデル（メッシュサイズ：5.0m）の解析結果

図－5　各モデルにおける坑道湧水量解析結果

（箱ひげ図；ひげの上下端は最大・最小値，箱の上・下端は 75%・25%値を示す）

ならびにDFNモデルのECPMモデルに変換することによる坑道湧水量解析への影響を検討した．

その結果，水理学的パラメータの適切性については，誤差の定量値をコンター図等で示すことで直感的に理解可能になると推察された．また，坑道湧水量解析については，メッシュサイズが坑道延長に対して十分に小さい（本事例では1/2～1.4倍程度）場合には，DFNモデルと類似した解析結果が得られる可能性が示唆された．

なお，本件は経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業－岩盤中地下水流動評価技術高度化開発－」の一部である．

参考文献

1) Wang，X：*Stereological Interpretation of Rock Fracture Traces on Borehole Wall and Other Cylindrical Surfaces, Ph. D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005*.

2) 石橋正祐紀ほか：地下坑道調査結果に基づく亀裂ネットワークモデルの構築，日本応用地質学会 平成 29 年度研究発表会 講演論文集，pp.65-66，2017.

3) 尾上博則，竹内竜史：超深地層研究所計画における単孔式水理試験結果（2016 年度～2019 年度），JAEA-Data/Code 2020-011.

HYDRAULIC PARAMETER ESTIMATION METHOD, AND IMPACT OF ECPM MODELING IN GROUNDWATER INFLOW ANALYSIS

Masayuki ISHIBSHI, Takako MIYOSHI, Hironori ONOE, Kazuhiko MASUMOTO

In groundwater flow analysis, the DFN model and the ECPM model are used for modeling and analysis of fractured rock mass. The probabilistic modeling, it is important to clearly show the appropriateness of the parameter set (hydraulic parameter set) for the permeability of each fracture. Thus, this report shows the trial results of easy-to-understand visualization of hydraulic parameter estimation. In adittion, this report shows impact for groundwater inflow analysis by converting DFN models to ECPM models.