マトリクス拡散を考慮した不連続性岩盤の巨視的物質移行特性の評価手法に関する基礎的検討

下茂 道人1*・熊本 創2・松岡 稔幸3・石井 英一3

¹公益財団法人 深田地質研究所(〒113-0021東京都文京区本駒込2-13-12)
 ²大成建設株式会社技術センター(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
 ³国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2)
 *E-mail: mshimo@fgi.or.jp

不連続性岩盤内における地下水質の長期変化には、亀裂内移流分散の他、亀裂から基質部に向かうマト リクス拡散等の現象が関わっている.このため、深部地下水の水質分布の解釈には、上記現象を考慮した 物質移行特性の評価が求められる.そこで、著者らは、北海道幌延地域周辺に分布する珪質頁岩層を対象 として、亀裂内移流分散およびマトリクス拡散を考慮した岩盤の巨視的物質移行特性の評価手法に関する 解析的検討を行った.まず、複数の亀裂密度を有する100m角の岩盤ブロックについて、亀裂ネットワ ークモデルを用いた順解析(移流分散拡散解析)を実施した.次に、均質モデルおよび単一亀裂モデルを 用いた逆解析により、順解析で得られた破過曲線の再現性を評価した.

Key Words : matrix diffusion, discontinuous rock, inverse analysis, macroscopic property

1. はじめに

亀裂を有する岩盤内の物質移行には、個々の亀裂内の 移流分散や亀裂交差による分散の他、亀裂から岩石基質 部への拡散(マトリクス拡散)など種々の現象が関わっ ていると考えられる.このうち,移流分散は亀裂内の地 下水流れに伴う移動現象であり、マトリクス拡散は溶質 の濃度勾配により、亀裂とマトリクス内部間で生じる物 質移動現象である. すなわち, 不連続性岩盤内において, 溶質は相対的に地下水流速の大きい亀裂中を移行し、さ らに亀裂表面からマトリクスへの拡散を伴いながら移動 するものと考えられる. 岩盤内の物質移行を巨視的にと らえると、マトリクス拡散の影響は、「遅延」または 「減衰」効果として現れる.したがって、岩盤内の天水 浸透に伴う長期的な地下水水質変化の評価や汚染物質の 移動現象の予測等においては、亀裂内移流分散およびマ トリクス拡散の両者を考慮した評価が必要となる.特に, 結晶質岩と比較してマトリクス部の空隙率が相対的に大 きい堆積岩においては、マトリクス拡散が岩盤全体の物 質移行特性に与える影響がより大きいと考えられるため, 長期的な物質移動現象の評価には、岩盤の巨視的な物質 移行特性に与えるマトリクス拡散の影響を定量的に評価 する手法が求められる.

マトリクス拡散を考慮した亀裂性岩盤内の物質移行現

象を評価するためのモデルや解析手法については, Huyakom et al.(1983)¹⁾, Neretnieks(1980)²⁾, Noorishad et al.(1983)³⁾, Sudicky et al.(1982)⁴⁾, Tang et al.(1981)⁵⁾, などの先駆的研究 がある. これらの研究では,単一亀裂あるいは規則的な 亀裂分布を有する岩盤を対象として,マトリクス拡散を 評価するための理論的または数値解析的な検討を行って いる. 近年では,数値解析技術の進歩とともに,より複 雑な亀裂分布を有する岩盤内の物質移行現象の評価が試 みられている(例えば,Flemisch et al., 2018⁹⁾). しかし, これらの多くは,モデル化手法や解析技術の検討が主で, 物質移動の評価を行う上で重要な,亀裂分布やマトリク ス拡散が岩盤の巨視的な物質移行特性に与える影響を評 価する手法については未だ確立されているとは言えない.

そこで、本研究では、不連続性岩盤の巨視的な物質移 動特性と亀裂分布やマトリクス拡散との関係を調べるた め、亀裂ネットワークとマトリクスからなる岩盤モデル を用いた解析(順解析)を行った.さらに、巨視的な物 性の評価を行う目的で、岩盤を均質連続体またはこれに 単一亀裂を加えた単純化した岩盤モデルにより順解析結 果を再現する逆解析を実施した.解析に用いた亀裂の水 理特性やマトリクスの物質移行パラメータ(透水係数, 空げき率、拡散係数など)は、北海道幌延地域周辺に分 布する珪質頁岩層を対象とした地表および地下での調 査・試験結果および室内試験結果"をもとに設定した.

2. 検討方法

亀裂性岩盤内の移流・分散,マトリクス拡散現象を巨 視的に評価するための解析的検討のフローを図-1に示す. 解析は、亀裂ネットワークモデルを用いた順解析と、順 解析で得られた破過曲線やマスバランスを単純な岩盤モ デルを用いて再現する逆解析からなる. 順解析では、 亀 裂ネットワーク内の移流分散とマトリクス拡散を考慮し た物質移動解析により,流出側境界における溶質の破過 曲線を取得する.次に,順解析で得られた破過曲線を観 測値として、2種類の単純化した岩盤モデル、すなわち 均質空隙体モデルおよびこれに単一亀裂を配置したモデ ル(以後、均質モデルおよび単一亀裂モデルと呼ぶ)を 用いた逆解析による再現を試みる. 単純化したモデルに より,破過曲線の再現が可能な場合は, 亀裂沿いの移流 分散、マトリクス拡散現象を考慮した巨視的な物質移動 パラメータが存在することが示唆される.また, 亀裂ネ ットワークモデルの亀裂分布や水理・物質移動パラメー タを種々変えて同様な検討を行うことにより、ネットワ ークモデルパラメータと巨視的物質移動特性(空隙率, 亀裂開口幅,分散長,拡散係数など)との間の相関性に 関する知見を得る. 以下においては、ネットワークモデ ルパラメータのうち亀裂密度に着目した検討を行う.

3. 解析モデル

順解析に用いる岩盤モデルとしては、図-2に示すよう な無限領域における格子状亀裂ネットワークを考え、こ の中から、周期性を考慮した100m×100m×100mの部分 領域を抽出した. 亀裂面の交差で区切られる単位を改め て「亀裂」と呼ぶとすると、モデル内には144枚の亀裂 が存在する. 図-3に、逆解析に用いた均一モデルおよび 単一亀裂モデルを示す. これらの岩盤モデル内の物質移 動現象は、マトリクスの空隙率(nm)、透水係数(km)、 縦方向分散長(a Lm), 分配係数(Kd), 拡散係数 (D_m),および単一亀裂の水理開口幅(b_H),物質移 行開口幅(br),縦方向分散長(al),などの集中パ ラメータ (Lumped Parameter) で表現される. すなわち, ネットワークモデルに対する破過曲線をこれらの単純化 したモデルで再現できれば、不連続性岩盤内における移 動現象が、これらの巨視的パラメータを用いて表現でき ることを意味する. 図-4に、水理および物質移動解析 (順解析, 逆解析) に用いた境界条件を示す。地下水流 れは、X方向に動水勾配i=0.01で流れる一次元定常流れ とした.物質移動の境界条件としては、上流側面を C=1.0×10⁶kg/m³の定濃度境界,下流側は分散・拡散の無 い移流のみを考慮した流出境界とした.













表-1に、順解析に用いた水理・物質移行パラメータを 示す.これらの値は、幌延地区に分布する珪質頁岩につ いて得られた原位置試験および室内試験結果を参考に設 定した⁹.

順解析には、図-5に示すように亀裂密度 ρ の異なる4 種類の亀裂ネットワークモデルを作成した.すなわち、 Casel(ρ =100%)は144枚すべての亀裂が存在するモデル であり、Case2(ρ =75%)、Case3(ρ =50%)、Case4(ρ =25%)は、対応する亀裂密度となるようにアトランダム に亀裂を取り除いたモデルである.なお、今回は、各ケ ースともモデルは1種類のみであり、乱数発生による複 数モデルによる検討は行っていない.

逆解析による水理・物質移動パラメータ同定は、図-6 に示すように3段階に分けて実施した.まず、ネットワ ークモデルの流入出量から、理論解を用いて均質モデル および単一亀裂モデルの透水パラメータ(km, 2bH)を 求めた.巨視的な物質移動パラメータは、移流分散パラ メータとマトリクス拡散パラメータに分けて同定を行っ た.ネットワークモデルを用いた順解析では、マトリク ス拡散を無視した(すなわち、亀裂内移流分散のみを考 慮した)解析とマトリクス拡散を考慮した解析の2種類 を実施し、前者の結果(流出境界での破過曲線)を移流 分散パラメータの同定に用い、後者を用いてマトリクス 拡散パラメータ(均質モデルでは、マトリクス拡散によ る遅延を表現するための分配係数Ka)を同定した.

なお,解析コードは,順解析にはFrac3Dvs⁸を逆解析 にはitough2⁹をそれぞれ用いた.

4. 解析結果

順解析で得られた定常流量は、図-7に示すように亀裂 密度ρとほぼ比例関係が見られた.この結果を用いて、 均質モデルの透水係数および単一亀裂モデルの水理開口 幅(三乗則を仮定)を求めた.なお、単一亀裂モデルの マトリクス透水係数は、順解析と同じ値とした.

流出境界における破過曲線を図-8および図-9に示す. マトリクス拡散を考慮しないケース(図-8)では, Casel(ρ=100%)の場合,20日程度で流出側と流入側の濃 度が等しくなっているのに対して,マトリクス拡散を考 慮したケース(図-9)では,約1000年後(t=3.65×10⁵days) においても流出側の濃度は流入側の約60%までしか上昇 していない.この結果から,頁岩のようなマトリクスの 空隙率が大きい堆積岩においては,亀裂沿いのマトリク ス拡散は,岩盤内の溶質移動時間に大きな影響を与える ことが示された.図-10および図-11に,4ケースのネッ トワークモデルにおける,任意時刻における濃度コンタ ーを示す.各ケースとも,岩盤ブロックの濃度コンター 表-1 順解析に用いた水理・物質移動パラメータ

現象		パラメータ		単位	値	備考
水理	マトリクス	透水係数	K _m	m/s	1.0×10^{-10}	声問層相当6)
	割れ目	透水量係数	T _F	m²/s	1.0 × 10 ⁻⁶	$b_{H} = 1.11 \times 10^{-4} m$
物質移行	マトリクス	空隙率	n _m	-	0.5	声問層相当6)
		拡散係数	D _m	m²/s	2.0×10^{-10}	声問層相当6)
	割れ目	開口幅	Ь _Т	m	1.11×10 ⁻⁴	水理開口幅b _H と同値
		縦方向分散長	a .	m	1.0	スケールの1/100







Case4:p=25%

Case3:p=50%

図-5 検討に用いた亀裂ネットワークモデル (マトリクス部は非表示)

【均質モデル】	【単一亀裂モデル】
①透水性の評価 ネットワークモデルの流量から 巨視的透水係数(K _w)を算定	①透水性の評価 ネットワークモデルの流量から 水理開口幅(b ₄)を算定
②移流・分散の評価 ネットワークモデル(マトリクス 拡散なし)の破過曲線を観測値 とする逆解析により空隙率(n,,) および分散長(q,,)を同定	②移流・分散の評価 ネットワークモデル(マトリクス 拡散なし)の破過曲線を観測値 とする逆解析により物質移行 開口幅 (b)および分散長(a)を 同定
(3)マトリクス拡散の評価 ネットワークモデル(マトリクス 拡散あり)の破過曲線を観測値 とする逆解析により分配係数 (k _a を同定	(3)マトリクス拡散の評価 ネットワークモデル(マトリクス 拡散あり)の破過曲線を観測値 とする逆解析により拡散係数 (Dm)を同定





の右側に、Z方向中央断面のスライスコンター図を示す. マトリクス拡散を考慮しないケース(図-10)では、亀 裂密度が減少するにつれて限られた亀裂に沿って溶質が 移動するため、亀裂ネットワーク内において不規則な濃 度分布が形成されることがわかる.マトリクス拡散を考 慮したケース(図-11)においては、溶質は亀裂部を優 先的に移動するとともに、亀裂からマトリクス内部にも 移動していることが分かる.

図-12に、マトリクス拡散を考慮しないケースの逆解 析結果を示す.破過曲線は、均質モデルおよび単一亀裂 モデルとも同一の結果が得られた.これは、マトリクス 拡散を考慮しない場合、両モデルとも移流分散方程式を 数値解析的に解いており、取り扱う現象に実質的な差が 無いためである.ただし、ダルシー流速と実流速の比は、 均質モデルでは空隙率nmにより評価されるのに対し、単 ー亀裂モデルでは、亀裂の物質移行開口幅brにより評価 される.また、分散は、均質モデルではマトリクスの縦 方向分散長 α Lmで評価されるのに対し、単一亀裂モデル では、亀裂の縦方向分散長 α Lにより評価される.図-12 より、亀裂密度が大きいケース(Casel)では、順解析 結果と均質モデルおよび単一亀裂モデルの結果は良い整



(マトリクス拡散を無視したケース)



合性が見られる.しかし,亀裂密度の減少とともに順解 析結果と逆解析結果の間には,乖離が見られる.これは, 亀裂ネットワーク内に卓越した移行経路が形成されるた めのチャンネル効果³に起因すると考えられる.すなわ ち,亀裂ネットワークモデル内では,分岐した複数の流 動経路が形成されるのに対し,均質モデルおよび単一亀 裂モデルでは,単一の流動経路しか持たないため,破過 曲線の再現性に限界があると考えられる.例えば,図-12のρ=25%の順解析結果では,テール部が長い非対称 性が顕著な破過曲線が得られており,このため逆解析結 果との乖離が見られる.すなわち,亀裂ネットワークモ デル内の移流分散現象を,均質モデルや単一亀裂モデル などの巨視的パラメータを用いたモデルを用いて再現す る際には,チャンネリングの考慮などの課題があること が示された.

図-13に、マトリクス拡散を考慮したケースについて の逆解析結果を示す.均質モデルを用いた逆解析で得ら れた破過曲線(破線で示す)は、順解析結果を再現する ことはできなかった.この結果は、亀裂に沿ったマトリ クス拡散の効果を、遅延を考慮した均質モデル内の移流 分散問題で置き換えることができないことを示している.



図-10 亀裂内濃度分布 (マトリクス拡散を無視したケース)



図-11 **亀裂・マトリクス内濃度分布** (マトリクス拡散を考慮したケース)

一方,単一亀裂モデルによる逆解析結果(図-13中に実線で示す)は、順解析結果と良い一致が見られた.逆解析に用いた移流分散パラメータは、前述のようにマトリクス拡散を無視したケースの破過曲線を完全には再現できなかった(図-12).それに対して、マトリクス拡散を考慮したケース(図-13)では良い再現性が得られたということは、マトリクス拡散が卓越するような長期の物質移行に対して、亀裂内の移流分散は大きな影響を与えないことを示唆していると考えられる.

図-14にマスバランスのチェックを行った結果を示す. 図中には、領域内を通過する流体流量(定常)の他、領 域内に流入あるいは流出する溶質の積算総質量を示す. 亀裂密度の異なる4ケースとも、順解析および逆解析で 求めた流入総質量および流出総質量は、いずれも良い一 致が見られる.

以上から、マトリクス拡散を考慮した亀裂ネットワー ク内の移流分散現象は、単一亀裂モデルを用いて良好に 再現できることが示された. 言い換えると、亀裂沿いの マトリクス拡散を考慮した巨視的な物質移動パラメータ が存在する可能性が示された.

5. 亀裂密度と巨視的物質移動パラメータとの関係

図-15に、マトリクス拡散を無視したケースの4種類の モデルに対して得られた亀裂密度と巨視的移流パラメー タ(均質モデルの空隙率および単一亀裂モデルの物質移 行開口幅)との関係を示す. 単一亀裂モデルの物質移行 開口幅は、亀裂密度の増加とともに増加する傾向がみら れる. ρ=100%のモデルに対する物質移行開口幅は, 6.66×10⁴m (=6×1.11×10⁴m) であり、地下水流れ方向 (x方向)に平行な6枚の亀裂(図-5)が移動経路となっ ていると解釈される.一方, $\rho=75\%$ の結果は, ρ =100%の結果より大きな値が得られている.これは、 亀 裂密度が下がると移流分散のみを考慮した場合の破過曲 線の再現精度が低下することに起因すると考えられるが. ネットワークモデルにおける流れ直交方向の割れ目によ る移流への寄与の影響も考えられる. ρ=50%以下の2ケ ースでは、ρの低下とともに空隙率(単一亀裂モデルで は物質移行開口幅)は、亀裂密度とともに減少する.縦 方向分散長は、ρ=100%のとき、個々の亀裂に与えた1 m (表-1) に等しく, 亀裂密度の低下とともに増加する 傾向がみられる.これは、 亀裂密度の低下に伴って地下 水流動経路が制限されることにより、流れの不均質性が 増加することによると解釈される.

図-16に、亀裂ネットワークモデルの亀裂密度と単一 亀裂モデルのマトリクス拡散係数との関係を示す.図よ り、マトリクス拡散係数は、亀裂密度にほぼ比例して増 加している.これは、 亀裂密度の増加とともに 亀裂がマ トリクスと接触する 面積が増大することに 起因すると考 えられる.

以上から, 亀裂ネットワークモデルを用いた順解析と 単純化した岩盤モデル(単一亀裂モデル)による逆解析 を組み合わせた方法により, 亀裂沿いのマトリクス拡散 を考慮した巨視的な物質移動パラメータが存在する可能 性の評価やパラメータ同定が可能であることが示された.





図-15 亀裂密度 ρ と 巨視的移流パラメータとの関係



図-16 亀裂密度 ρ と巨視的拡散パラメータとの関係 (単一亀裂モデル)

6. まとめ

亀裂ネットワーク内の巨視的な移流,分散,マトリク ス拡散パラメータの評価手法を検討し,以下の知見を得た.

・単一亀裂モデルにより, 亀裂沿いの移流分散およびマ トリクス拡散(破過曲線, マスバランス)を評価でき る可能性がある.

- ・均質連続体モデルでは、マトリクス拡散を考慮した巨 視的な物質移行特性評価は困難である.
- ・透水性,移流,分散,拡散の各パラメータと亀裂密度
 ρの間に相関がみられた.
- ・順解析と逆解析を組み合わせた手法は、巨視的に見た 亀裂沿いの移流分散およびマトリクス拡散パラメータ の評価を行う上で有効である.

今後, 乱数発生により生成した複数の亀裂ネットワ ークモデルによる確率論的な検討を行う.

参考文献

- Huyakom, P. : An Efficient Finite Element Technique for Modeling Transport In Fractured Porous Media 1. Single Species Transport, *Water Resources Research*, VOL. 19, No.3, pp. 841-854, June 1983
- Neretnieks, I. : Diffusion in the rock matrix : An important factor in radionuclide retardation, J. Geophys. Res., 85(B8), pp.4379-4397, 1980.
- Noorishad, J., and M. Mehran : An upstream finite element method for solution of transient transport equations in fractured porous media, *Water Resources Research*, 18(3), pp.588-596, 1982..
- Sudicky, E. A., and E. O. Frind, Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solutions of a system of parallel fractures, *Water Resources Research*, 18(6), pp.1634-1642, 1982.
- Tang, D. H., E. O. Frind, and E. A. Sudicky, Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solution for a single fracture, *Water Resources Research*, 17(3), pp.555-564, 1981.
- Flemisch et al., Benchmarks for single-phase flow in fractured porous media, Advances in Water Resources, vol. 111, 239-258, 2018.
- 7) 熊本 創,下茂 道人:単一亀裂を対象としたトレーサー試験 による亀裂内移流・分散とマトリクス拡散の評価手法,土 木学会論文集C(地圏工学) 68巻,pp.535-546,2012.
- Therrien, R. and E.A.Sudicky : "Three-dimensional analysis of variably flow and solute transport in discretely-fractured porous media", *J.Contaminant Hydrology*, 23, 1996.
- 9) Finsterle, S. : iTOUGH2 User's Guide, Report LBNL-40040, UC-400. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA., 1999.

FUNDAMENTAL STUDY ON EVALUATION OF MACROSCOPIC MASS TRANSPORT CHARACTERISTICS OF DISCONTINUOUS ROCK MASS CONSIDERING MATRIX DIFFUSION

Michito SHIMO, Sou KUMAMOTO, Toshiyuki MATSUOKA and Eiichi ISHII

Understanding the long term evolution of groundwater is essential for siting and performance assessment of HLW repositories. In this study, the authors conducted a numerical study on the evaluation of macroscopic mass transfer properties of fractured rock considering matrix diffusion. Modeling study consists of forward and inverse analyses. It was found that the breakthrough curve obtained from a fracture network model cannot be reproduced by a homogeneous porous model, whereas can be sufficiently reproduced using a single fracture model added to a porous model. A correlation between advection/dispersion parameters and the fracture density was also confirmed.