

岩石試料の研削による亀裂形状計測 データを用いた透水トレーサー試験の評価

澤田 淳^{1*}・佐藤 久¹・鐵 桂一²・坂本 和彦³

¹日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門（〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33）

²検査開発株式会社（〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松字平原3129-37）

³株式会社NESI（〒312-0005 茨城県ひたちなか市新光町38）

*E-mail: sawada.atsushi@jaea.go.jp

亀裂性岩盤を対象とした地下水流動評価や核種移行評価には、亀裂を一枚の均質な平行平板に近似したモデルを一般的に用いる。実際の亀裂は複雑な形状を呈しており、これを平行平板モデルで表現する際、透水量係数や亀裂開口幅の値をどのように設定するかが課題となる。この課題解決に向けた研究の一つとして、50cmスケールの岩石試料の亀裂形状を1mm間隔で計測された亀裂の上下面からなる亀裂幅データを用いて数値解析を行い、岩石試料を対象に実施された透水トレーサー試験データと比較した。その結果から、亀裂幅の平均的な補正により亀裂の透水量を再現できるが、トレーサー移行現象の再現にはより局所的な不均質性の影響を考慮する必要を指摘した。

Key Words : rock fracture, transmissivity, aperture, hydraulic aperture, transport aperture

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に際しては、地下水の移行経路にあたる岩盤の間隙中での地下水流動挙動や、物質移行挙動を適切に表現したモデルやパラメータ値を用いる。亀裂性岩盤を対象とした評価では、地下水流動の主要な経路である亀裂を平行平板に近似してモデル化する手法が一般に用いられる¹⁾。このモデルは簡略かつ、複数の平行平板モデルを組み合わせることで岩盤中の不均質な移行経路を表現することが可能などの応用力を有するという利点があり、広く用いられている。亀裂が平行平板であれば、亀裂中の透水量は開口幅の三乗に比例するため、これに基づいて透水量係数を求めることができる。しかしながら、実際の亀裂は亀裂面が複雑に凸凹の形状を呈しているため、地下水の流動や物質移行に寄与する場となる亀裂の開口部は不均質に分布する。この場合には、平行平板で近似したモデルに用いる等価な亀裂開口幅の値をどのように設定するかが課題となる²⁾。開口幅を幾何学的に測定した場合には、開口幅の不均質な分布を考慮した統計的な処理など代表値をどう決定するかといった検討が必要となる。透水試験から求められる亀裂の透水量係数から三乗則を仮定して平均的な開口幅を求める場合もあり、それを水理学的開口幅と呼ぶ。また、トレーサー試験の結果から、トレーサー

の移行に寄与する間隙として開口幅を求める場合もあり、これを物質移行に寄与する開口幅と呼ぶ。亀裂が理想的な平行平板の場合にはこれらの3つの定義による開口幅の値は一致する。実際の亀裂の場合には、地下水流動や物質移行など現象毎に不均質に分布する開口幅が与える影響が異なるため、各定義の開口幅の値が異なる結果となる。このため、例えば、原位置で実施したトレーサー試験の結果から求めた物質移行に寄与する開口幅と、透水試験から得られる透水量係数との相関^{3), 4), 5)}を活用して経験的に開口幅を設定する場合もある¹⁾。しかし、トレーサー試験の場所や試験条件の違いなどに起因してその相関には不確実性が含まれる。その不確実性の低減には、平行平板モデルに用いる透水量係数（もしくは水理学的開口幅）と物質移行に寄与する開口幅のなどのパラメータ間の相関のより詳細な検討が必要で、複雑な形状を呈する亀裂内の流体挙動に関する基本的な理解が重要である。そのためには亀裂内の空隙構造の定量的データと水理物質移行特性データを同時に取得する必要がある。著者らは、この課題の解決に向けた研究として、①実際の亀裂を対象とした透水トレーサー試験による平均的な水理特性や物質移行特性の評価とともに亀裂表面の粗さや開口幅の分布などの実測から亀裂の幾何学的な特徴を理解するとともに、②亀裂の透明レプリカを用いた不均質に分布する亀裂開口幅と亀裂内での物質の移行（特に、

移流分散現象)の定量的測定に基づく不均質亀裂内の流れの理解に向けた研究⁹⁾を進めてきた。①は実際の亀裂の透水量係数と物質移行に寄与する開口幅の値と亀裂の特徴に基づいたモデルやパラメータ値の関係を提示できると考えられるものの、調査可能なスケールや数量が限定される。また、亀裂内の流れや物質移行を直接観察することはできない。その一方で、②は実験可能な試料はレプリカに限定されるものの、不均質に分布する亀裂開口幅と亀裂内のトレーサーの濃度分布を定量的に計測することができる。より包括的には①や②の実験データに基づき亀裂内の複雑な特徴を有する亀裂モデルを数値的に作成して解析を行うことで、亀裂形状を表す指標が亀裂の水理学的特性や物質移行特性に与える影響について検討する必要がある。

著者らは、これまでに上記①に関連して亀裂形状の計測による亀裂幅分布の分析を行っている^{7,9)}。本論では、その亀裂形状データを用いた数値解析による透水トレーサー試験解析と、実験結果との比較結果について報告する。用いた亀裂形状の計測データは、50cmスケールの亀裂に沿って1mm間隔で計測した天然単一亀裂の形状と亀裂幅の約25万箇所のデータである。

2. 亀裂を対象とした透水トレーサー試験

亀裂を対象とした透水とトレーサー試験の概要を記す。その詳細は文献^{9, 10, 11)}を参照されたい。試験には、自然の単一亀裂を有する花崗閃緑岩を用いた⁹⁾。岩石試料は亀裂を中心に50cm角に整形した後、亀裂状媒体水理試験設備を用いた透水試験やトレーサー試験^{10, 11)}により、50cmの大きさの亀裂の透水量係数や物質移行に寄与する開口幅などの値が評価されている。本論ではその概要を記す。50cm角の岩石試料中の亀裂を対象とした透水試験とトレーサー試験の概念図を図-1に示す。透水試験とトレーサー試験は任意の1方向で実施し、図-2に示すように注水側と排水側でそれぞれ5等分に分割した区間で水頭とトレーサー濃度を測定し、排水側では各区間からの排水流量を測定している。なお、亀裂に対して垂直な方向に直径約3cmのボーリング孔を6本削孔して、亀裂内のトレーサー濃度も測定されている。注水側と排水側に設けた堰により一定の水頭差で注排水を制御するとともに、注排水の各区間の水頭をマンメータにより計測している。透水試験は、堰で水頭差を約11, 15, 19, 23, 27, 31 cmに制御した6ケースで実施した。透水試験結果の例として、水頭差設定値11 cmと31 cmのケースを表-1に示す。各区間で測定された水頭差は配管内の圧力損失と亀裂内の不均質な透水性の影響により、それぞれ平均で0.6 cm, 10.5 cmと小さく、水頭や排水流量も区間によって異なる値となっている。トレーサー試験は、1

表-1 透水試験測定結果の例

(1)設定水頭差：0.11mのケース

	区間	1	2	3	4	5	平均
水頭 $\times 10^2$ m	注水	0.8	1.0	1.2	1.2	1.2	1.1
	排水	0.7	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
流量 $\times 10^8$ m^3/s	排水	9.6	8.1	8.4	8.3	6.1	8.1*

*:排水流量の総和は $4.05 \times 10^{-7} m^3/s$

(2)設定水頭差：0.31mのケース

	区間	1	2	3	4	5	平均
水頭 $\times 10^2$ m	注水	14.2	14.4	15.3	15.6	15.8	15.1
	排水	8.4	4.1	3.6	3.4	3.4	4.6
流量 $\times 10^8$ m^3/s	排水	149.6	75.5	67.1	67.5	59.4	83.8*

*:排水流量の総和は $41.9 \times 10^{-7} m^3/s$

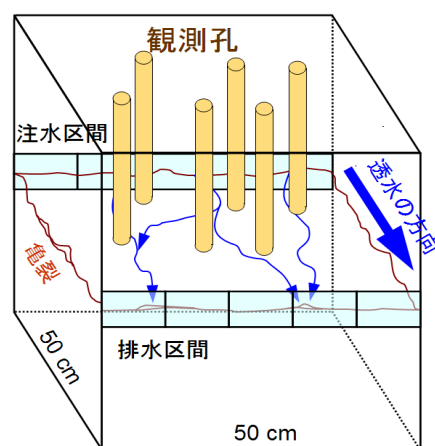


図-1 透水トレーサー試験の概念図

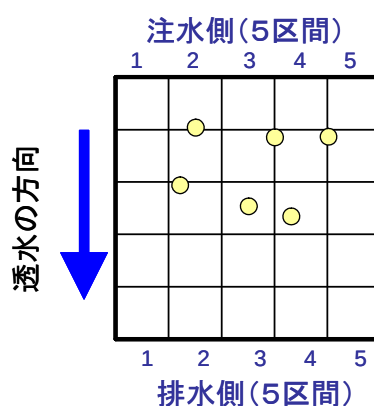


図-2 透水の方向と注排水区間の概念図

6つの丸印はそれぞれ観測孔を示す

wt%程度の濃度のNaCl水溶液をトレーサーとして使用し、注排水区間やボーリング孔において電気伝導度計でトレーサー濃度の経時変化を測定している。透水試験で設定した水頭差の透水条件下で、注水側の全区間への注水を

トレーサー溶液に切り替えて排水側の各区間へのトレーサーの破過を観測している。また、表-1(2)のケースでは注水区間毎に注水をトレーサー溶液に切り替えて排水側の各区間への破過を計測する試験も実施するなど複数の異なる条件でトレーサー試験が実施されている。試験結果の例として表-1(1)のケースにおける排水側の各区間へのトレーサー破過曲線を図-3に示す。同図は注水したトレーサー濃度で規格化した濃度の時間変化を示しており、排水区間によってトレーサー破過の時間変化に違いがあることがわかる。このケースでは、試験時間の制約から、規格化濃度が1に達していない0.9前後で試験を終了している。特に排水区間5は、他に比べてトレーサーの移行が極端に遅いことがわかる。透水試験の結果から、対象とした亀裂の平均的な透水量係数は 5×10^{-5} m/s前後であった。この値を三乗則を仮定した水理学的開口幅に換算すると約0.4 mmとなる。また、トレーサー試験の結果からは、物質移行に寄与する開口幅は水理学的開口幅の2倍程度であったと報告されている^{10),11)}。

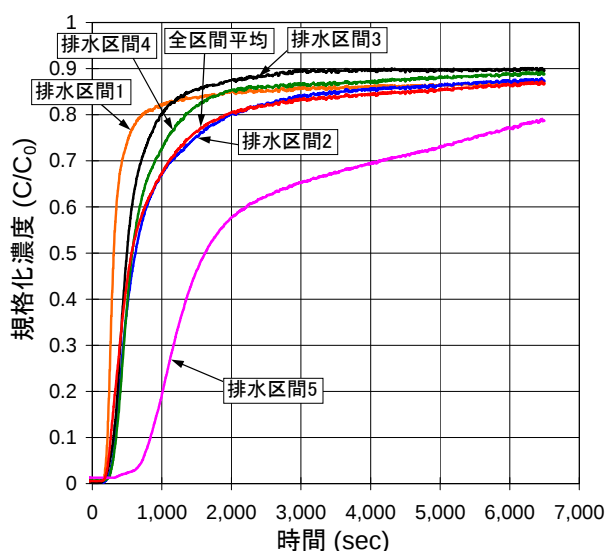


図-3 トレーサー試験の結果例
注入側濃度で規格化したトレーサー破過曲線

3. 研削による亀裂形状計測

研削による亀裂形状計測の概要を記す。その詳細は文献⁷⁾⁸⁾を参照されたい。亀裂形状の計測には、岩石試料の精密研削と亀裂部の撮影を繰り返す手法を用いた。亀裂を対象とした一連の透水トレーサー試験の後に、レジンを亀裂開口部に充填して亀裂を固化させた。岩石試料を亀裂に対して垂直に精密平面研削することで、内部の亀裂の断面を研削面に露出させる。研削面に露出した亀裂の断面の拡大図をデジタル撮影して、画像データとして記録する。この様な研削と撮影を繰り返すことで、亀

裂全体の形状画像データが取得できる。これらの画像データを分析することで、亀裂面全体の詳細な亀裂形状を計測することができる。研削面に表出した亀裂断面のデジタル撮影には、1350万画素のデジタルカメラ（CMOSセンサー：4500 pixel×3000 pixel）を用いた。亀裂幅の大きさに比べて岩石試料が50cmと極端に大きいため、一度の撮影で研削面全体を一括して撮影した場合には亀裂幅の測定に必要な測定精度を確保できなくなる。したがって、亀裂に沿って比較的狭い視野角で複数の撮影により画像データを取得した。亀裂幅の測定解像度は撮影時の視野角の大きさと撮影解像度に依存することから、本研究では、研削断面毎に亀裂に沿って6～7枚のデジタル画像を撮影し、1 pixelあたりの解像度は約25 μ mとなった。この画像データから亀裂の上下面の形状や亀裂内の開口部などの構造の詳細を調査するが、これまでに画像データから亀裂の上下面の形状を亀裂に沿って1mm間隔で判読し、亀裂上下面形状から亀裂幅のデータを取得している。亀裂幅の分布を図-4に示す。その平均値と標準偏差はそれぞれ1.14mm, 0.78mmであった。なお、この亀裂幅は亀裂内の充填物の寄与分を含んだ亀裂内の開口部より大きな値である。

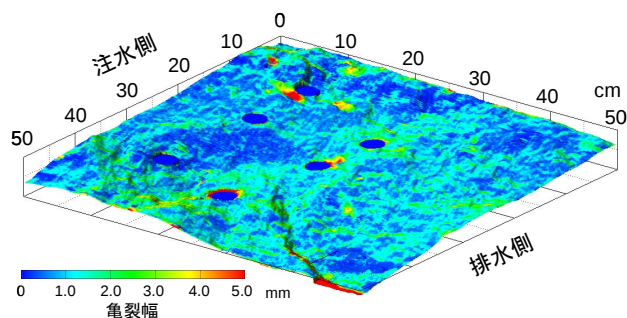


図-4 亀裂の形状と亀裂幅分布
亀裂幅は亀裂上下面の幅を表す

4. 亀裂形状データを用いた数値モデルによる解析

図-4に示した亀裂幅のデータから、亀裂面に平行な二次元平面で1mm間隔で離散化した有限要素で数値モデルを作成した。図-4の亀裂幅が開口幅と等価であると仮定して各有限要素の開口幅を決定し、局所的には三乗則（LCL:Local Cubic Law）が成り立つことを仮定して個々の要素の亀裂幅から透水量係数を設定した。数値解析には、ダルシー則に基づく二次元飽和浸透流解析と粒子追跡法による移流分散解析コード¹²⁾を用いた。LCLにより個々の要素の透水量係数を換算した数値解析モデルを図-5に示す。このような複雑な開口幅分布を呈する亀裂へLCLを適用した場合には、実測される透水量係数より1.1倍から2倍程度大きな値が推定される傾向があることが報告されている¹³⁾。

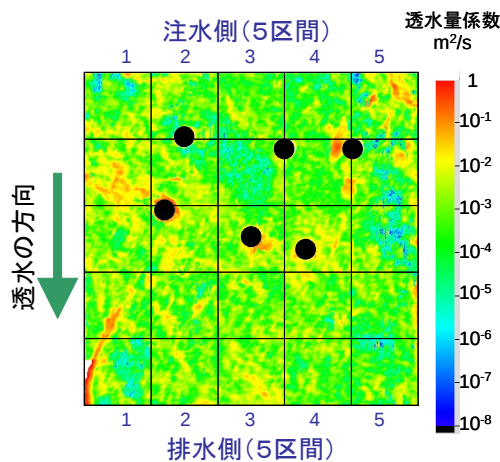


図-5 数値解析に用いたモデルの透水量係数分布図
●印で示した6箇所の観測孔は不透水とした

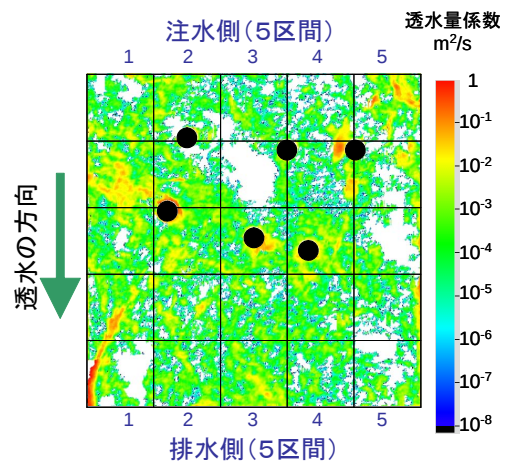


図-8 キャリブレーション後 ($b = 0.57 \text{ mm}$) の透水量係数分布
白は亀裂が閉塞している箇所を表す

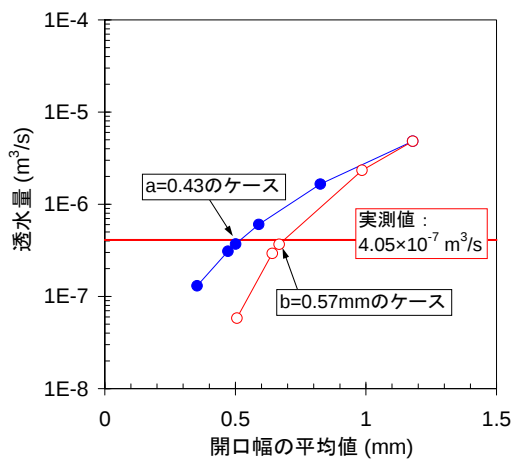


図-6 透水量に対するキャリブレーション結果

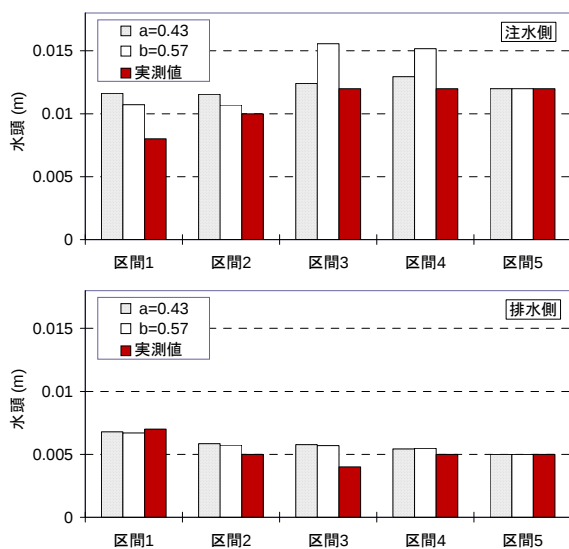


図-7 各区間の水頭値の解析結果と実測値の比較

表-1 (1)のケースについて、注水側と排水側でそれぞれ測定した水頭の平均値から、平均的な動水勾配を0.011と設定して定常状態の浸透流解析を行った。注水側と排水側以外の側面は不透水境界とした。6つの観測孔は不透水に設定した。解析の結果、亀裂全体の透水量が $5.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ と表-1 (1)に記した実測値より一桁以上大きい値が得られた。この理由には、局所的な三乗則の仮定の影響、実際に透水に寄与する亀裂の開口部だけではなく亀裂内の充填物の寄与を無視した亀裂幅のデータを用いた点、の2点が挙げられる。前者についてはその影響は大きくても2倍程度と考えられ、本検討の場合は後者の影響が相対的に大きいと考えられる。そのため、本検討では後者の影響に着目して亀裂内に平均的に充填物が存在していると仮定し、モデルのキャリブレーションを行った。すなわち、(a)開口部が亀裂幅の a 倍（亀裂内の充填物が $1-a$ 倍）、(b)亀裂幅に関係なく一定の厚さ b (mm)で充填物が存在、のふたつのケースを設定し、透水量の実測値に対してそれぞれ a 、 b の値をキャリブレーションした。その結果、図-6に示すように(a)のケースでは $a = 0.43$ の場合に、(b)のケースでは $b = 0.57 \text{ mm}$ の場合に実測値とほぼ同じ透水量となった。図-6は各キャリブレーションケースのモデルの開口幅の平均値と透水量の関係を示しており、キャリブレーションの方法によって開口幅の平均値が異なることがわかる。図-7は $a = 0.43$ の場合と $b = 0.57 \text{ mm}$ の場合のモデルを用いて、境界条件を流量境界に設定して求めた注排水の各区間の水頭分布と実測値との比較を示している。排水側の流量は表-1(1)の実測値を、注水側は総流量を水頭比で分配した量を設定した。どちらのケースとも実測値と完全には一致しないものの、水頭分布はほぼ同様の傾向を示していることがわかる。以上のことから、亀裂の平均的な透水特性の観点からは、図-6のように a や b などの亀裂特性を平均的に調整するパラメータを用いてキャリブレーションすることが可能

で、平均的には測定した亀裂幅の半分程度が亀裂内充填物の影響を受けていると考えられる。

図-8に $b = 0.57 \text{ mm}$ ケースのモデルの透水量係数分布を示す。図-4に比べて亀裂が閉塞している比率が増加し注水側から排水側への経路パターンが変化していることがわかる。両キャリブレーションケースともに亀裂の平均的な透水量係数を減じさせ、実測値を表現することが可能であるが、一定の比で開口幅を減ずる(a)のケースの場合には図-8に示されるような著しい移行経路パターンの変化は生じない。また、このような亀裂内の充填物は亀裂の成因などに依存して局所的に分布する可能性もあり、局所的な亀裂の閉塞など、亀裂の透水性や経路パターンに対してより複雑な影響を与えると考えられる。

このような移行経路パターンの違いが物質移行に与える影響を検討するために、上記の a と b をキャリブレーションしたふたつの数値モデルを用いて、図-3のトレーサー試験を対象とした解析による検討を行った。トレーサー試験は注水側から一定濃度のトレーサーが一定の時間入力されている。これを粒子追跡法による数値解析で模擬するため、注水側から一定の数の粒子を入力し、それらの粒子が排水側へ破過した数の時間変化を求め、排水区間毎に破過した粒子の総数で規格化した。 $a = 0.43$ のケースと、 $b = 0.57 \text{ mm}$ のケースのそれぞれについて実測値との比較結果を図-9に示す。同図には、全ての排水区間の流量と濃度から算出したトレーサーの破過曲線の全区間平均値と解析結果の比較も示している。前述のように、本試験データは、試験時間の制約から規格化濃度が1に達していないため、数値解析結果との比較には不確

実性が伴うものの、概ね下記のような考察ができると考えられる。どちらの解析ケースも平均的な透水量係数は等しいが、 $b = 0.57 \text{ mm}$ のケースは $a = 0.43$ のケースに比べてトレーサーの破過が相対的に遅い傾向がある。これは、 $b = 0.57 \text{ mm}$ のケースの方が開口幅の平均値が大きく、図-8に示されるように注水側から排水側に至る経路の連続性が局所的に絶たれトレーサーの移行経路パターンが変化したためと考えられる。破過曲線の全区間平均値の場合、 $b = 0.57 \text{ mm}$ のケースが試験初期の破過段階で試験結果と一致し、物質移行の観点からは $a = 0.43$ のモデルに比べて $b = 0.57 \text{ mm}$ の方が試験結果を良好に再現できている。しかし、トレーサー試験後半の破過の遅れまでは十分に表現できていない。排水区間毎には、排水区間1と3はふたつの解析ケースの間に実測値が分布するのに対して、排水区間2、4と5では $b = 0.57 \text{ mm}$ のケースの解析結果より実測値の方が破過に時間がかかっている。そのため、排水区間4～5へ至る経路については、トレーサー破過がより遅れる効果などのより局所的な不均質性の影響をモデルに追加して表現する必要があると考えられる。

以上のことから、亀裂幅データを使った数値モデルを用いた検討において、透水性に関しては平均的な補正パラメータを用いることで実験値に対して数値モデルをキャリブレーションすることができた。しかし、物質移行に関しては、水理試験に対してキャリブレーションしたモデルではトレーサー試験結果を十分表現できなかった。特に、不均質なトレーサー破過の様子を再現するためには、移行経路の連続性などのより局所的な不均質性の影響を考慮した検討が必要と考えられる。

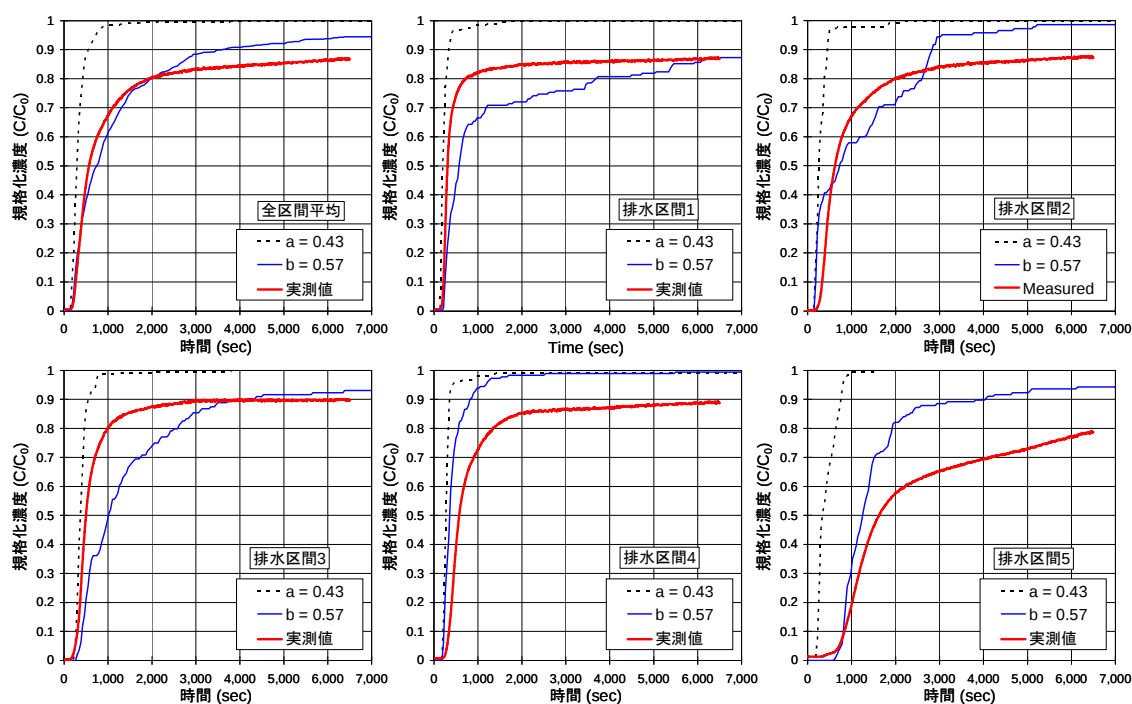


図-9 トレーサー試験解析結果 排水側での破過曲線の実測値との比較

5. おわりに

亀裂内の空隙構造と水理物質移行特性の相関性を検討するための研究の一環として、50cmスケールの岩石試料の亀裂形状を1mm間隔で計測された亀裂の上下面からなる亀裂幅データを用いて数値解析を行い、岩石試料を対象に実施された透水トレーサー試験データと比較した。数値解析では、亀裂幅のデータからLCLを仮定して透水量係数を推定し、定常の浸透流解析と粒子追跡法による物質移行解析を行い室内実験による透水試験やトレーサー試験の実測値との比較検討を行った。亀裂全体の透水量は実測値に比べて一桁以上大きな値が求められ、その理由として亀裂内の充填物を含んだ値を開口幅と仮定して透水量係数を算定したためと推察した。一定の割合または一定の幅で亀裂幅を平均的に変化させることにより亀裂の透水量をキャリブレーションすることができた。しかし、透水量をキャリブレーションしたモデルではトレーサー試験の結果を十分再現できず、物質移行現象の評価には透水現象とは異なり移行経路の連続性などのより局所的な影響を考慮した検討の必要性を指摘した。今後は、他の試験ケースのデータを用いた数値解析による検討を進める。また、本研究で用いた亀裂幅のデータは、亀裂に直交する方向に1mm間隔で岩石試料を平面研削し、研削断面毎に取得した亀裂断面の詳細な画像データから判読した亀裂の上下面の形状から取得したものである。今後は、この画像データの再分析を行い、亀裂内の充填物の影響を考慮して開口幅のデータを取得する予定である。得られた開口幅データを用いた数値解析と実験結果との比較を通じて、亀裂全体の透水特性や物質移行特性と亀裂の幾何学的な特徴との関係を検討する予定である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.

- 2) Sawada, A., Sato, H., Tetsu, K., Sakamoto, K.: Characterization of fracture aperture for groundwater flow and transport, AGU 2007 Fall Meeting, H23G-1705, 2007.
- 3) Shimo M., Yamamoto H., Uchida M., Sawada A., Doe T. W., Takahara, Y.: In-situ test on fluid flow and mass transport properties of fractured rocks, Proc.9th ISRM Congress, Vol. 2, pp.1401-1404, 1999.
- 4) Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H., Doe, T. W.: Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi Mine, Northeast Japan., Engineering Geology, 56,75-96,2000.
- 5) Rhén, I. (Ed.), Gustafsson, G., Stanfors, R., Wikberg, P.: Åspö HRL - Geoscientific Evaluation 1997/5. Models Based on Site Characterization 1985-1995, SKB TR 97-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1997.
- 6) 佐藤久, 澤田淳: 単一亀裂を対象とした光学的手法によるトレーサー移行計測データに基づく物質移行評価, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.263-268, 2008.
- 7) 鐵桂一, 澤田淳: 研削により測定した50cmスケール岩体中の天然亀裂の形状に関する研究, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-079, 2008.
- 8) 澤田淳, 鐵桂一: 50cmスケールの花崗岩試料の研削による亀裂形状計測について, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.266-271, 2009.
- 9) 吉野尚人, 内田雅大: 亀裂媒体水理試験設備(LABROCK)用試験岩体の切り出し・整形, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8410 2001-015, 2001.
- 10) 吉野尚人, 佐藤久: 亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)による透水・トレーサー試験—2001年度までの成果—, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2002-001, 2002.
- 11) 吉野尚人, 佐藤久, 内田雅大: 亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)による天然亀裂内の透水・物質移行特性評価, サイクル機構技報, No. 18, pp.51-58, 2003.
- 12) Miller I, Lee G, Dershowitz W.: MAFIC Matrix/Fracture Interaction Code with Heat and Solute Transport. User Documentation, Golder Associates Inc., 2002.
- 13) Al-Yaarubi, A. H., Pain, C. C., Grattoni, C. A., Zimmerman, R. W.: Navier-Stokes Simulations of Fluid Flow Through a Rock Fracture, Dynamics of Fluids and Transport in Fractured Rock, Faybishenko et al, ed., AGU, pp.55-64, 2005.

EVALUATION STUDY ON FLOW AND TRACER EXPERIMENTS USING FRACTURE GEOMETRY DATA MEASURED BY GRINDING ROCK SAMPLE

Atsushi SAWADA, Hisashi Sato, Keiichi TETSU and Kazuhiko SAKAMOTO

The homogeneous one-dimensional parallel plate model is usually applied as nuclide migration model in a fracture. An actual fracture in the natural geological environment has complex rough surface. It is one of issues for developing the methodology how to define the representative parameters used for the parallel plate model, such as transmissivity and aperture. In this study, the numerical model based on fracture geometry data was examined for simulating flow and tracer experiments considering an effect of fracture infillings. It was indicated that the effect of heterogeneity onto tracer migration should be considered even if flow rate through the fracture could be reproduced by calibrating the average aperture.