

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

佐藤 久^{1*}・澤田 淳¹

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）
*E-mail:sato.hisashi@jaea.go.jp

不均質な開口幅分布が透水物質移行現象に与える影響検討を目的に、岩石亀裂の透明レプリカ試験体を用いた光学的手法による高解像度で定量的な亀裂開口幅とトレーサー濃度分布データを取得した。光学的手法により得られた開口幅データを用いて、局所的には三乗則が成立することを仮定して透水量係数に換算することにより2次元浸透流解析を行った。その結果、透水試験で得られた透水量の1.6倍と過大評価される結果となった。その一方でトレーサー濃度の定量的なデータから破過曲線を算出しトレーサー移行特性について評価を行った。平均移行時間と流量から算出されるマスバランス開口幅は、開口幅の平均値と等しくなったことから、トレーサー試験結果から推定した亀裂内の体積の妥当性を示すことができた。

Key Words : aperture, transport, visualization, transparent replica, optical method

1. はじめに

花崗岩などの結晶質岩を対象とした高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価には、一般に亀裂を均質な平行平板に近似したモデルが用いられている¹⁾。その一方で、実際の亀裂の表面形状は複雑で、亀裂開口幅も不均質に分布しており、これらが透水物質移行現象に大きな影響を与えている。また、それらが透水現象に及ぼす影響と物質移行現象に及ぼす影響はそれぞれ異なる。平行平板モデルに用いられる等価開口幅として、透水試験結果から三乗則に基づいて得られる水理学的開口幅と、トレーサー試験結果から得られるマスバランス開口幅などのいくつかの定義が示されている²⁾。理想的な平行平板の場合に両者は一致するが、実際の亀裂のように複雑な形状を呈し、不均質に開口幅が分布する場合には、それぞれ異なった値となることが知られている³⁾。このため、平行平板モデルに用いる開口幅の値をいかに設定するかが、安全評価手法の信頼性向上に向けた課題の1つである。

不均質な開口幅分布を有する亀裂内の透水物質移行現象を解明するためには、亀裂の内部構造の把握と透水や物質移行現象の測定が必要となる。開口幅分布の不均質性が透水物質移行特性に与える影響の検討についてはこれまでにも行われており、例えば、Silliman⁴⁾は開口幅分布の不均質性と透水物質移行特性についての理論的な

検討を行っており、開口幅分布が対数正規分布に従い、かつ、流れ方向に開口幅が変化する場合と流れ方向と垂直な方向に開口幅が変化する場合、及びランダムな開口幅分布の場合のケースについて、水理学的開口幅と開口幅の対数値の標準偏差との関係を整理している。また、実際に測定された開口幅を用いた検討としては、例えばNicholl et al.⁵⁾は模様ガラスを貼り合わせて亀裂を模擬した試験体を対象に、透水試験と光学的手法による高解像度の開口幅測定を行い、得られた開口幅データを用いて局所的には三乗則が成立すること(LCL:Local Cubic Law)を仮定して開口幅から各点の透水量係数を求め、ダルシー則に基づく浸透流解析を行った結果、透水量は実測値に対して約1.4倍であると報告している。また、Konzuk and Bernard⁶⁾は石灰岩を対象に人工的に作製した亀裂を用いて、透水試験を実施するとともに、試験体をスライスすることにより、約5mm間隔で計測した開口幅のデータを用いてLCLとダルシー則に基づく浸透流解析を行った結果、透水量は実測値に対して1.75倍であると報告している。

上記の既往の報告のように、不均質な開口幅分布を持つ亀裂中の透水物質移行特性を評価するためには、亀裂の内部構造とそこでのトレーサー移行現象を同じ条件で測定する必要がある。亀裂開口幅の測定方法には、亀裂形状測定からの開口幅の推定、亀裂断面の直接観察や、X線CT、MRI等の非破壊手法など様々な手法が提案され

ている。これらのうち亀裂形状からの推定は亀裂形状を正確に測定することができるが、亀裂開口幅分布の再現性は亀裂を重ね合わせる際のかみ合わせの精度に依存し、その誤差が大きくなる傾向がある。亀裂断面の直接観察は亀裂をレジン等で固定した後に試験体をスライスや研磨することにより亀裂を露出し直接測定する手法であり、得られるデータの信頼性は最も高いが、高い分解能での測定には膨大な費用や時間が掛かる。非破壊手法はトレーサー試験と同一条件で測定が可能な魅力的な手法であるが、1回の測定で得られるのは亀裂の1断面のデータであり、三次元空間のデータを得るには多数の測定を繰り返し行う必要がある。また、数cmから数10cmスケールの岩石試料の亀裂の開口幅やトレーサー濃度の測定には、ノイズの影響の排除や測定解像度の向上といったさらなる検討が必要と考えられる。一方、光学的手法は透明な試験体を使用する必要があるため、岩石試料から亀裂の透明レプリカ試験体を作製する必要があるが、高解像度な開口幅データとトレーサー濃度分布を同一条件で取得することができる。

光学的な測定手法は透明な試験体と染料トレーサーを用いて亀裂を可視化することにより亀裂開口幅やトレーサー濃度分布を測定する手法であり、基本的な測定原理は吸光光度法と同様にLambert-Beerの法則を用いている。光学的手法による測定方法の概要は、Glass and Tidwell⁷⁾により提案され、Detwiler et al.⁸⁾により開口幅の定量的な測定精度が検討されている。また、Detwiler et al.⁹⁾は、この手法をトレーサー濃度測定に応用し、模様ガラスを貼り合わせて亀裂を模擬した試験体を対象に試験を実施し、亀裂内の濃度分布から亀裂内でのトレーサーの分散についての検討を行っている。

光学的手法による測定精度は、使用するCCDカメラの性能に強く依存するが、高解像度で定量的な開口幅測定とトレーサー濃度分布測定を同一条件で行える。以上のことから、現実的な亀裂を対象とした試験を実施するために、岩石亀裂の透明レプリカ試験体を作製し、光学的手法による開口幅測定とトレーサー試験及び透水試験を実施し、得られたデータに基づき不均質な亀裂開口幅分布が透水物質移行特性に与える影響についての検討を行った。

2. 測定原理

光学的測定手法の基本原則であるLambert-Beerの法則は式(1)で表される。

$$I = I_0 e^{-\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b} \quad (1)$$

ここで、 I_0 は入射光強度、 I は透過光強度、 ε_d は染料ト

レーサーの吸光係数、 b は開口幅（液層の厚さ）、 c_d は染料トレーサーの濃度である。

亀裂内を水で満たした場合の透過光強度を I_{water} 、亀裂内を染料トレーサーで満たした場合の透過光強度を I_{dye} とすると透過光強度の関係は式(2)となる。

$$\ln \left(\frac{I_{\text{dye}}}{I_{\text{water}}} \right) = -\varepsilon_d \cdot c_d \cdot b \quad (2)$$

式(2)より、 $\ln(I_{\text{dye}}/I_{\text{water}})$ と開口幅 b の関係は傾き $-\varepsilon_d \cdot c_d$ の直線関係となる。このことから、開口幅が既知の試験体を用いて透過光強度を計測し、比例係数 $-\varepsilon_d \cdot c_d$ の値を決定しておくことで、 I_{water} と I_{dye} の比から開口幅を求めることができる。また、亀裂内を濃度 C_0 の染料トレーサーで満たした透過光強度を $I_{\text{dye}C_0}$ 、亀裂内を水で満たした試験体の亀裂内に染料トレーサーを注入後、時刻 t における透過光強度を $I_{\text{dye}ct}$ とすると、時刻 t におけるトレーサーの規格化濃度は式(3)で示され、トレーサー試験中の各時間における $I_{\text{dye}ct}$ からトレーサーの規格化濃度を求めることができる。

$$\frac{c_t}{c_0} = \ln \left(\frac{I_{\text{dye}ct}}{I_{\text{water}}} \right) / \ln \left(\frac{I_{\text{dye}C_0}}{I_{\text{water}}} \right) \quad (3)$$

3. 試験の概要

(1) 光学的測定装置の概要

測定装置の概要を図-1に示す。測定装置は暗室内に設置したフラット照明（CCS社製 LEDフラット照明）、CCDカメラ（DVC社製1412AM）、データ記録用のPCで構成されている。フラット照明の上に透明試験体を設置して、CCDカメラにより透過光強度を最大1392×1040ピクセルで12ビット（4096階調）の数値データとして記録する。また、Lambert-Beerの法則は単色光の場合に成立するため、試験に用いる染料トレーサーの吸光特性に合わせたバンドパスフィルター（中心波長510nm 半値幅10nm）を使用することにより、単色光に近い条件で測定を行った。

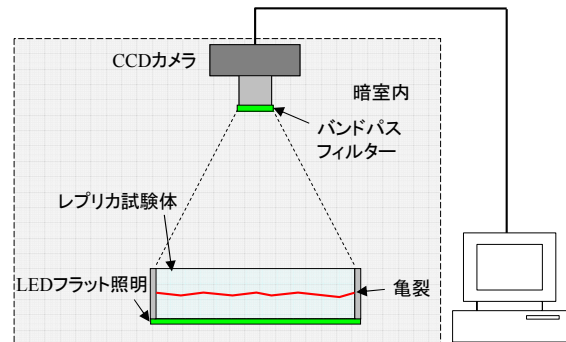


図-1 測定装置概要

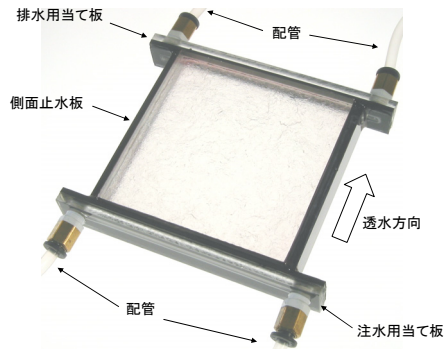


図-2 透明レプリカ試験体

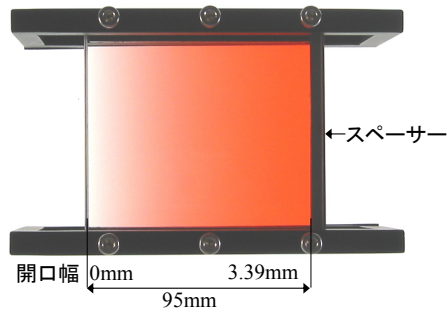


図-3 楔状亀裂試験体

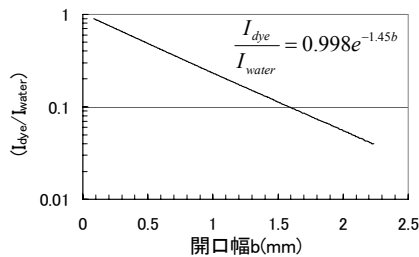


図-4 透過光強度の比と開口幅の関係

(2) 透明レプリカ試験体の作製

試験で使用する透明レプリカ試験体は、一辺10cmの立方体に整形した稲田花崗岩の中央に割裂により作製した亀裂を型としている。透明レプリカ試験体は、型取り用のシリコンにより亀裂の型を取り、そのシリコン製の型に透明エポキシ樹脂を注入し、硬化させることにより作製した。図-2に試験に用いた透明レプリカ試験体の様子を示す。

4. 試験結果と考察

(1) 開口幅測定

亀裂開口幅を求めるためには、式(2)に示した亀裂開口幅と透過光強度の関係から比例係数 $\epsilon_d \cdot c_d$ を求める必要がある。そこで、2枚のガラス板の一方に既知の厚さ(3.39mm)のスペーサーを挟むことにより、開口幅が連続的に変化する試験体を作製して、開口幅と透過光強度の関係を求めた。

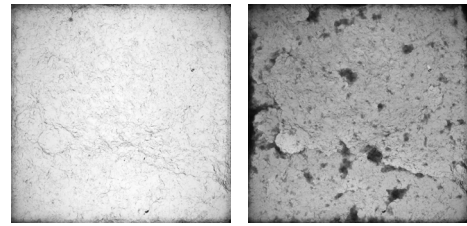


図-5 透過光強度
(亀裂内水)

図-6 透過光強度
(亀裂内染料トレーサー)

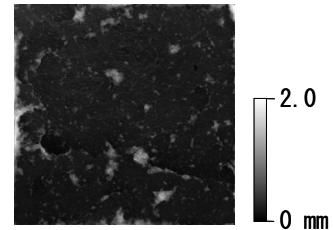


図-7 開口幅分布

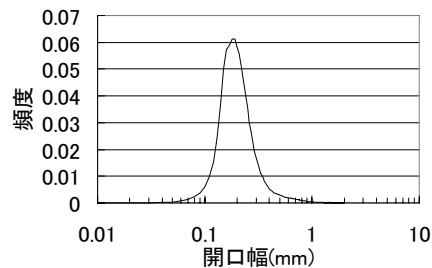


図-8 開口幅頻度分布

図-3に開口幅が連続的に変化する楔状亀裂試験体の様子を示す。この試験体の亀裂内に水を満たした透過光強度と亀裂内に染料トレーサーを満たした透過光強度を測定することにより、開口幅と $\ln(I_{\text{dye}}/I_{\text{water}})$ の関係を求めた。

図-4に $\ln(I_{\text{dye}}/I_{\text{water}})$ と開口幅の関係を示す。 $\ln(I_{\text{dye}}/I_{\text{water}})$ と開口幅の関係は直線関係となっており、Lambert-Beerの法則を精度良く満たしていることがわかる。また、その比例係数は-1.45となる。

図-5に亀裂内を水で満たした透過光強度分布、図-6に亀裂内を染料トレーサーで満たした透過光強度分布を示す。これらのデータと開口幅と透過光強度の関係で求めた比例係数を用いて開口幅分布を求めた。図-7に開口幅測定結果を示す。100mm×100mmの試験体を688ピクセル×688ピクセルで測定したため、1ピクセルの大きさは約0.15mm×0.15mmとなる。図中左側に開口幅が大きい領域が連続している領域があるが、全体的には、ランダムに分布している傾向にあることが見て取れる。また、得られた開口幅の算術平均値は0.27mmであった。亀裂開口幅分布のヒストグラムを図-8に示す。今回の試験体の開口幅分布は対数正規分布の特徴を示している。

(2) 亀裂内体積測定

開口幅測定結果の妥当性を検討するために、亀裂内の体積測定を行った。測定方法は、亀裂内を空気で満たした場合の重量と亀裂内を水で満たした場合の重量差から求めた。その結果、亀裂内の体積は 2.9cm^3 であった。試験体のサイズが $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ であることから、亀裂内の体積測定から求められる平均開口幅は 0.29mm となり、光学的手法により求めた開口幅の平均とほぼ等しい値となった。

(3) 透水試験

透水試験は、一定の動水勾配の条件下で亀裂を透過する単位時間当たりの流量を電子天秤で測定することにより実施した。図-9に透水試験結果を示す。水頭差と流量はほぼ直線関係となっており、ダルシー則を満たしていると考えられる。なお、同図にはレイノルズ数 Re も併せて示している。一般にレイノルズ数が1以下での試験が望ましいとされているが、今回の試験ケースでのレイノルズ数の範囲は約0.8から2.9となっている。

3乗則から求められる水理学的開口幅 b_h は式(4)で定義される。

$$b_h = \left(\frac{12 \cdot \mu \cdot L \cdot Q}{\rho \cdot g \cdot W \cdot \Delta h} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

ここで、 μ は粘性係数($\text{pa} \cdot \text{s}$)、 L は亀裂長さ(m)、 Q は単位時間流量(m^3/s)、 ρ は水の密度(kg/m^3)、 g は重力加速度(m/s^2)、 W は亀裂幅(m)、 Δh は水頭差(m)である。

式(4)より、透水試験結果から求められる水理学的開口幅 b_h は 0.20mm となった。

(4) トレーサー試験

トレーサー試験は、亀裂内を水で満たした状態の試験体に染料トレーサー溶液を定流量ポンプを用いて $0.017\text{cm}^3/\text{s}$ の一定流量で透水試験と同じ方向に注入する方法で行った。また、データの取得はトレーサー注入開始から光学的手法により7秒間隔で行った。なお、この条件でのレイノルズ数は0.41である。

図-10に式(3)で求めたトレーサー濃度分布を示す。開口幅測定と同じ解像度でトレーサー濃度分布が定量的に測定でき、トレーサー移行の先端部の濃度を定量的に評価できている。

破過曲線を算出するには、亀裂から排出されたトレーサー濃度の時間変化を測定するのが一般的であるが、亀裂内の体積に比べて排出ポート内の体積が大きく、その影響によりトレーサーの分散効果や移行時間が過大評価される傾向にある。

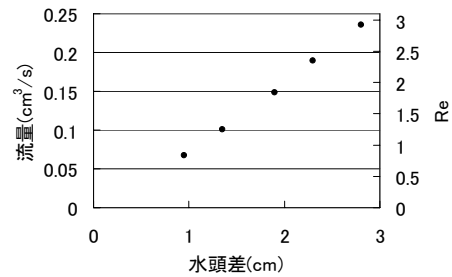


図-9 透水試験結果

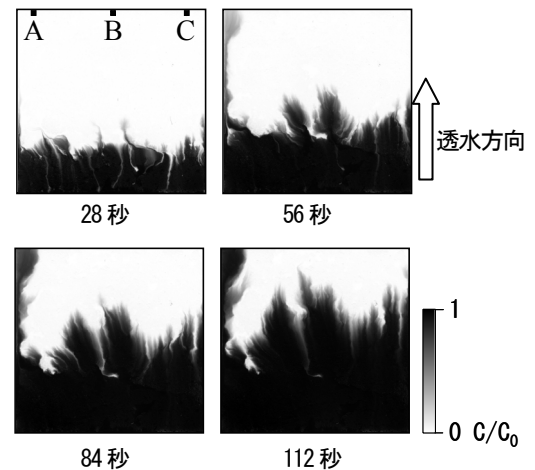


図-10 トレーサー規格化濃度分布の時間変化

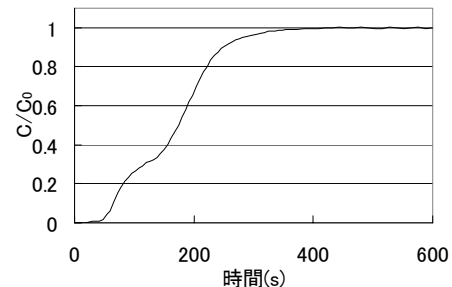


図-11 トレーサーの累積破過曲線

光学的手法では亀裂内の各点の亀裂開口幅とトレーサー濃度を測定することができることから、亀裂内に存在するトレーサーの総量を求めることができる。そこで、亀裂内にトレーサーをパルス状に注入することで一定量のトレーサーを亀裂内に注入し、排出側に破過するトレーサー量を算出した。

図-11に累積破過曲線を示す。累積破過曲線には100秒過ぎあたりに停滞域が見られる。これは、図-7、図-10(84秒後、112秒後)に示されるように、亀裂の左側に開口幅が大きな領域が連続しているため、そこがチャンネル流れとなっているためと考えられる。

(5) 透水特性評価

亀裂の開口幅データと水理学的開口幅の関係については、様々な方法が提案されている。開口幅分布が対数正規分布に従い、空間的にランダムに分布している場合には、水理学的開口幅は幾何平均と等しくなるとされている¹⁰⁾。また、Silliman⁴⁾は、開口幅分布が対数正規分布に従い、空間的にランダムに分布している場合には、水理学的開口幅 b_h が式(5)で求められるとしている。

$$b_h = b_a \cdot \exp(-\sigma_b^2 / 2) \quad (5)$$

ここで、 b_a は開口幅の平均値、 σ_b は開口幅の対数値の標準偏差である。

また、数値解析による手法としては、LCLを仮定して開口幅から各点の透水量係数を求めることにより、ダルシー則に基づく浸透流解析を行う手法が一般的に行われている。

今回の試験体の開口幅分布は図-8に示すように、対数正規分布に近い分布となっていることから、水理学的開口幅を推定するために、幾何平均、式(5)による値及びLCLに基づく2次元浸透流解析コードによる解析結果との比較を行った。

結果を表-1に示す。透水試験から求められた水理学的開口幅とこれら3つの結果を比較すると、幾何平均、式(5)による値と解析により求められた水理学的開口幅は、ほぼ等しい値となっているが、試験で求められた水理学的開口幅と比較すると約1.2倍程度過大評価されている。また、透水量は水理学的開口幅の3乗に比例することから、開口幅の3乗で比較すると、透水試験から求められた水理学的開口幅に対して、約1.6倍から1.8倍過大評価されている。

試験結果と解析結果の乖離については、今後の更なる検討が必要と考えられるが、光学的手法はこの様な検討を行うための定量的なデータを取得するための有力な手段になると考えられる。

(6) 物質移行特性評価

a) マスバランス開口幅

亀裂の物質移行特性を表すパラメーターとして、マスバランス開口幅がある。マスバランス開口幅 b_m は式(6)で表される。

$$b_m = \frac{Q \cdot t}{L \cdot W} \quad (6)$$

ここで、 Q は単位時間流量(m^3/s)、 t はトレーサの平均移行時間(s)、 L は亀裂長さ(m)、 W は亀裂幅(m)である。

平均移行時間として、トレーサの濃度が50%に到達した時間 t_{50} が多く用いられているが、Moreno et al.¹⁰⁾はMean Residence Timeとして以下の式を提案している。

$$\text{Mean Residence Time} = \int_0^\infty \frac{C_{(\infty)} - C_{(t)}}{C_{(\infty)}} dt$$

ここで、 $C_{(\infty)}$ は排出されたトレーサの濃度が定常状態に達した時の濃度で、注入したトレーサの濃度である。

図-11の累積破過曲線から求めた t_{50} とMean Residence Timeはそれぞれ174秒と162秒となり、マスバランス開口幅はそれぞれ0.29mmと0.27mmとなった。今回のケースではトレーサが亀裂全面を流れていることから、あまり違いは見られないが、チャンネル流れのように亀裂内の流れの不均質性が高くなるとMean Residence Timeが t_{50} に比べてが大きくなる傾向になることが知られている。

今回のケースでは、Mean Residence Time を適用した場合には、光学的手法で算出した開口幅の算術平均と等しくなることから、トレーサ試験結果から推定した亀裂内の体積の妥当性を示すことができた。

b) 亀裂内の分散特性

光学的手法により得られた破過曲線にOgata and Banks¹¹⁾の式により分散長のフィッティングを行った結果、分散長は0.98cmとなり、移行距離の約1/10となった。この値は一般的な単一亀裂内での分散長と整合的である。

図-10に示すトレーサ濃度分布におけるトレーサの移流フロントでの濃度勾配は比較的シャープである。図-12に図-10に示す排出側の任意の1ピクセル(A,B,C)における破過曲線を示す。微小な領域ではトレーサ濃度の立ち上がりはシャープであり、分散長は非常に短い(移行距離の約1/100)ことがわかる。このことから、個々の経路での分散効果は相対的に小さく、経路毎の流速の違いが主要な分散の要因であると言える。

表-1 開口幅の測定値と推定値の比較

	開口幅(mm)	開口幅比*	開口幅の三乗の比*
透水試験から求めた水理学的開口幅 b_h	0.200	1.000	1.000
開口幅の幾何平均	0.239	1.193	1.699
Sillimanによる式(5)から求めた値	0.245	1.224	1.835
LCLによる解析から求めた水理学的開口幅 b_h	0.234	1.171	1.605

*:透水試験から求めた水理学的開口幅 b_h に対する比

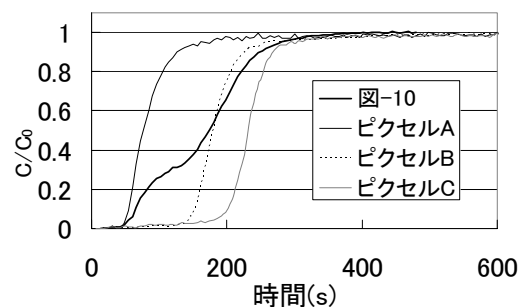


図-12 1ピクセルでの累積破過曲線

5. まとめ

本研究では岩石試料を型として作製した、透明レプリカ試験体を対象に、光学的手法による亀裂開口幅測定と亀裂内物質移行の測定を行い、亀裂開口幅分布の不均質性が物質移行に与える影響についての検討を行った。今回の検討で得られた知見を以下に示す。

- ・光学的手法により、高解像度の開口幅データ及びトレーサー濃度分布データを取得することができた。
- ・光学的手法により得られた開口幅データを用いて透水量の比較を行った結果、統計データから推定される流量や解析による流量は、透水試験で得られた透水量の1.6から1.8倍となった。この試験結果と解析結果の乖離については、これまでに報告されている研究例と整合的である。
- ・トレーサーの平均移行時間から算出されるマスバランス開口幅は、光学的手法により求められた開口幅の算術平均値とほぼ等しいことから、トレーサー試験結果から推定した亀裂内の体積の妥当性を示すことができた。
- ・今回の試験条件において、微小な領域での分散長は移行経路長の約1/100程度であるが、亀裂全面での分散長は移行経路長の約1/10となっており、このことから、個々の経路での分散効果は相対的に小さく、経路毎の流速の違いが主要な分散の要因であることが確認できた。

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) Tsang, Y. W. : Usage of "Equivalent Aperture" for Rock Fracture as Derived From Hydraulic and Tracer Tests, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL.28, NO.5, pp.2033-2048, 1992.
- 3) Tsang, Y. W. and Tsang, C. F. : Channel model of flow through fractured media, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL.23, NO.3, pp.467-480, 1987.
- 4) SILLIMAN, S. E. : An Interpretation of the Difference Between Aperture Estimates Derived From Hydraulic and Tracer Tests in a Single Fracture, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL.25, NO.10, pp.2275-2283, 1989.
- 5) Nicholl, M. J., H. Rajaram, R. J. Glass, and R. Detwiler : Saturated flow in a single fracture: Evaluation of the Reynolds equation in measured aperture fields, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL.35, NO.11, pp.3361-3373, 1999.
- 6) Konzuk, J. S., and B. H. Kueper : Evaluation of cubic law based models describing single-phase flow through a rough-walled fracture, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL.40, W02402, 2004.
- 7) Glass, R. J., and V. C. Tidwell : Research program to develop and validate conceptual model for flow and transport through unsaturated, fractured rock, paper presented at 2nd International Conference of High Level Radioactive Waste Management, Am. Nucl. Soc., Las Vegas, Nev., April 28 to May 3, 1991.
- 8) Detwiler, R. L., S. E. Pringle and R. J. Glass : Measurement of fracture aperture fields using transmitted light: An evaluation of measurement errors and their influence on simulations of flow and transport through a single fracture, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL.35, NO.9, pp.2605-2617, 1999.
- 9) Detwiler, R. L., H. Rajaram and R. J. Glass : Solute transport in variable-aperture fracture: An investigation of the relative importance of Taylor dispersion and macrodispersion, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL.36, NO.7, pp.1611-1625, 2000.
- 10) Moreno, L., Y. W. Tsang, C. F. Tsang, F.V. Hale, and I. Neretnieks : Flow and Tracer Transport in a Single Fracture: A Stochastic Model and Its Relation to Some Field Observations, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL.24, NO.12, pp.2033-2048, D 1988.
- 11) Ogata, A., R. B. Banks : A solution of difference equation of longitudinal dispersion in porous media, *Geological survey professional*, pp.411-A, 1961.

STUDY ON MASS TRANSPORT IN A SINGLE FRACTURE USING TRACER TRANSPORT DATA MEASURED BY OPTICAL METHOD

Hisashi SATO and Atsushi SAWADA

The fracture aperture and tracer concentration within a single fracture was measured quantitatively, by using optical method with the transparent replica of a single fracture, to study how flow and transport is affected by the aperture spatial pattern. Two dimensional groundwater flow analysis was applied with the transmissivity estimated from measured aperture data, according to the assumption that cubic law could be applicable locally. The evaluated flow rate through the fracture was 1.6 times larger than the hydraulic test result. The mass balance aperture calculated from the mean travel time of tracer migration with groundwater flow rate was equivalent to the arithmetic mean value of the aperture data.