



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

吉野 尚人 佐藤 久* 内田 雅大

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

* 検査開発株式会社

Estimation of Fluid Flow and Mass Transport Properties in a Natural Fracture Using Laboratory Testing System on Mass Transport in Fractured Rock (LABROCK)

Naoto YOSHINO Hisashi SATOU* Masahiro UCHIDA

Waste Isolation Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* Inspection Development Company Ltd.

高レベル放射性廃棄物地層処分では、安全評価のため天然バリア内での核種移行現象の解明が必要となる。著者らは50cmスケールのチャンネル構造を含んだ天然亀裂での透水・トレーサー試験ができる装置を開発し、天然亀裂内の透水・物質移行現象の解明を目的とした試験及び解析を行った。その結果、対象とした天然亀裂の水理学的開口幅、物質移行開口幅、マスバランス開口幅の大小関係を把握し、亀裂開口幅分布が異方的で流れ方向に交差する方向に大きなチャンネル構造をもつ可能性があることを明らかにした。また、天然亀裂内のチャンネル構造を概略的に把握した。さらに、亀裂に垂直応力を負荷させた透水・トレーサー試験より垂直応力と開口幅の関係に関する知見を得た。今後は天然亀裂の開口幅分布を測定して亀裂開口幅分布を明らかにし、天然亀裂内の透水・物質移行現象をモデル化する予定である。

The understanding of mass transport and fluid flow properties in natural rock fractures is important for safety assessment of geological disposal of high level nuclear waste. The authors developed advanced tracer test equipment in which a 50 cm cubic scale rock sample was feasible. The mass transport and fluid flow properties in a single fracture were also examined. The relation among hydraulic, transport and mass balance apertures of a natural single fracture were obtained. Heterogeneity of the aperture distribution was evident, as was the possibility of some major flow line perpendicular to the flow direction. Additionally, the relation between normal stress and each aperture was also obtained by loading normal stress on the fracture. In future, measuring the aperture distribution and establishing the model considering fluid flow and mass transport properties in natural rock fractures will be conducted.

キーワード

地層処分, 天然バリア, 安全評価, 透水試験, トレーサー試験, 水理学的開口幅, 物質移行開口幅, マスバランス開口幅

Geological Disposal, Natural Barrier System, Safety Assessment, Fluid Flow Test, Tracer Test, Hydrological Aperture, Transport Aperture, Mass Balance Aperture



吉野 尚人

システム解析グループ所属
地層処分における水理・物質移動に関する研究に従事



佐藤 久

システム解析グループ所属
地層処分における水理・物質移動に関する研究に従事



内田 雅大

システム解析グループ所属
グループリーダー
地層処分における水理・物質移動に関する研究に従事

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物を地下深部に地層処分する場合、地下水シナリオ¹⁾による核種移行を想定した天然バリアの安全評価は重要な検討項目となっている。第2次取りまとめ時点では岩盤内亀裂を平行平板と仮定したモデルにより天然バリアの概略的かつ保守的な安全評価が主に行われており²⁾、今後は天然バリア安全評価の信頼性向上に向けた研究が必要となっている³⁾。本研究では天然バリア安全評価の信頼性向上に向けて、地下深部岩盤内の透水・物質移行現象解明を目的とした検討を行っている。地下深部岩盤内の透水・物質移行現象解明のための原位置試験や室内試験は多くの研究者によって行われている⁴⁾⁵⁾。原位置試験では対象領域の境界条件や亀裂構造が不明確であることが試験結果に及ぼす影響を評価しづらくさせ、従来の室内試験では試験可能な供試体の大きさの制約や供試体のサンプリングによる擾乱等が試験結果に及ぼす影響の評価をしにくくさせるなどの問題点がある。サイクル機構では主に結晶質岩の亀裂内を物質が移行する現象に着目して、境界条件を正確に設定でき、原位置での透水・物質移行現象を再現できる単一亀裂を対象とした透水・トレーサー室内試験装置（亀裂状媒体水理試験設備⁶⁾）：LABoratory testing system on mass transport in fractured ROCK、略称LABROCK（写真1参照）を1993年に開発し、その後も装置改良を重ねながら岩盤内の透水・物質移行現象解明のための研究を行ってきた。LABROCKの使用可能な供試体の最大寸法は幅50cm、流水方向の長さ50cmであり、

単一亀裂内のチャンネルを包含した試験が実施可能であることから従来のコアサイズの供試体を使用した室内試験では得ることが出来なかったデータが取得可能である。なお、LABROCKで使用した供試体のサンプリングに際しては、亀裂の擾乱を防止するため、ロックボルトにより対象亀裂を固定し、採取予定の供試体よりも大きい領域をサンプリングし、亀裂を原位置と同様な状態に保持したまま切断・整形した⁷⁾⁸⁾。また、LABROCKでは、亀裂面に対して垂直な応力を負荷させることで、地下深部で岩盤の亀裂に作用する垂直応力と透水・物質移行現象の関係についても検討することが可能である。

本研究ではLABROCKを使用して、天然単一亀裂内の透水・物質移行現象を把握することを目的とし、試験段階として①垂直応力無負荷状態での透水・トレーサー試験、②垂直応力負荷状態での透水・トレーサー試験、③亀裂開口幅測定の3段階を設定した。本報告では②までの試験結果を取りまとめ、LABROCKの今後の展望について記述する。

2. 試験概要

2.1 供試体と試験装置の概要

供試体は岩手県釜石鉱山産出の栗橋花崗閃緑岩である。栗橋花崗閃緑岩は岩相及び構成鉱物の観点から日本の代表的な花崗岩類の一つであるため、このような岩体の特性を調査することによって、わが国の花崗岩類の有する一般的な特性についての知見を得ることが可能となる⁹⁾。

供試体は図1に示すように、高さ、幅、流水方



写真1 LABROCK 全景

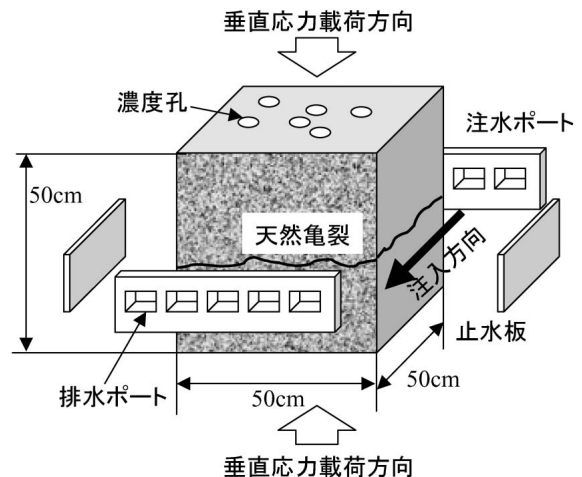


図1 試験岩体の概略図

向の長さがすべて50cmの立方体である。高さ方向のほぼ中央に天然単一亀裂があり，採取時に開口させず擾乱を防止するようにサンプリングしたため亀裂内には亀裂生成時に発生したガウジと呼ばれる充てん物が存在している。そのため，本試験で得られるデータは，亀裂内の充てん物が透水・物質移行に及ぼす影響を含んだものとなり，後に行う予定の亀裂開口幅測定により充てん物の分布状況や充てん率がわかれば充てん物が透水・物質移行に及ぼす影響について考察することが可能となる。亀裂内の充てん物は核種移行の遅延に大きく影響すると考えられており，充てん物を含んだ亀裂の透水・物質移行特性の試験を実施することは，より実際の現象に近い透水・物質移行特性の解明に寄与すると考えられる。亀裂部分の側面と注入・排出側はシリコン接着剤により止水板を接着し，注入・排出側には注入・排出ポートを設置した。すべての注入・排出ポートには供試体内の脱気ライン，水頭値測定ライン，注入・排出ラインが接続されており，注入・排出ラインにはトレーサー濃度計測を行うためのボックスを取り付けた。亀裂と注入・排出ラインの間の空間（デッドボリューム）はトレーサー試験時にトレーサーの拡散が生じ，亀裂空間の総体積に対してデッドボリュームが大きき場合にはトレーサー試験で計測した移行時間の誤差が大きくなる可能性がある。そのため，注入・排出ポートはトレーサー試験時に供試体外でのトレーサー拡散を極力抑えるため，止水板と供試体の間に厚さ約1.0mmのゴム板を挟み，注入・排出ポートの部分に高さ1.0cm，幅9.0cmの空隙を亀裂に沿って設けて，デッドボリュームを極力小さくする構造を採用した。

また，供試体内部にはトレーサー濃度を計測するための濃度孔を亀裂面に対して垂直方向に供試体を貫通させて削孔し，専用の濃度計測装置により計測を行った。濃度孔の位置は図2に示すように供試体表面の微細亀裂観察よりなるべく対象亀裂に交差する可能性のある微細亀裂と交差しないように配置したため不規則な配置となっており，削孔本数は亀裂面の代表的な位置でのデータ取得を考慮して6つとした。濃度計測は亀裂位置の上下1.5cmの位置にゴムパッカーが設置できるソンドを挿入して濃度孔内を流れるトレーサーの電位変化を測定する方式を採用した。濃度孔の直径は設置可能なソンドの直径より決定し，3.0cmとし

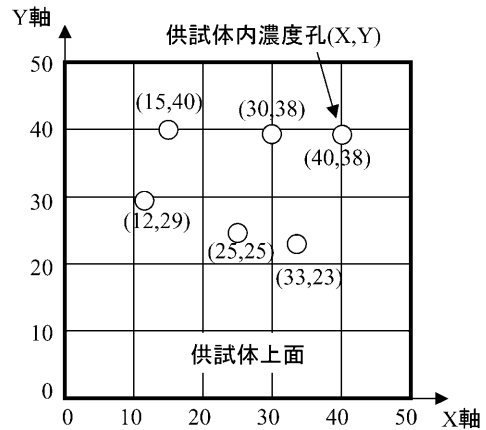


図2 供試体内濃度孔配置図

た。なお濃度孔設置による取得データ品質の低下が懸念されるが，亀裂開口幅計測後亀裂のモデル化の際に濃度孔との位置設定を正確に行うことでデータ品質の低下に対する対処は可能である。

垂直応力負荷状態での透水・トレーサー試験では，亀裂面に対して垂直方向に応力を負荷した。応力負荷に際しては，サーボコントロール式水圧装置により設定した荷重値（最大可能荷重値 = $1.96 \times 10^5 \text{ N}$ ）を保持した。応力負荷に伴う供試体の変位計測では変位計（東京測器：CDP 10）を供試体の4隅に設置し，計測長さ0.31mで変位を測定した。使用した変位計の測定精度は $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}$ である。変位形の計測長さが0.31mと長くなったのは変位計の取り付け位置が側面に取り付けられた止水板にかからないようにしたためである。岩体への垂直応力 [Pa] は(1)式で表される。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

ただし，Pは垂直荷重値 [N]，Aは垂直荷重面の面積 m^2 である。供試体の平均変位 [m] としては4つの変位の平均値を採用した。

2.2 透水・トレーサー試験の概要

LABROCKの配管等の構造模式図を図3に示す。水（トレーサー）は注水堰（トレーサー堰）から注入ポート，供試体内，排出ポートを通過して排出ポットに集積する。以下に透水試験とトレーサー試験の概要について述べる。

(1) 透水試験の概要

透水試験では供試体内を流れる水の単位時間流量 Q [m^3/s] と各計測ポイントの水頭値を計測する。単位時間流量は各時刻における各排水ポットに集

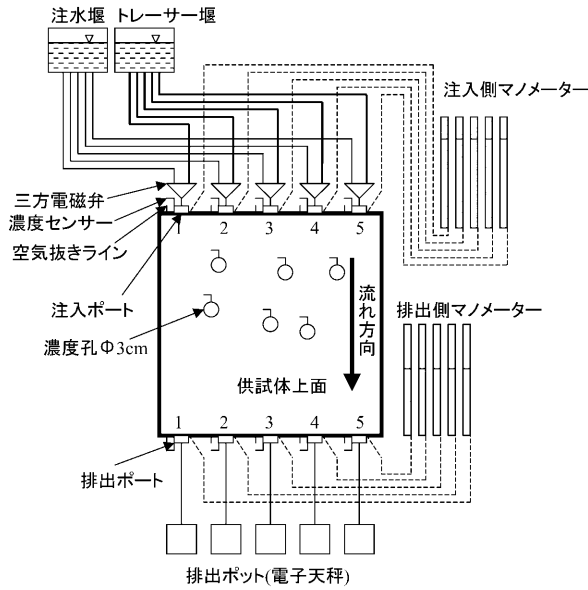


図3 LABROCK配管構造模式図

積した水の重量を電子天秤（測定下限値： 10^{-2} g）で自動計測することで算出した。計測した水頭値は、注水堰水頭値，注入ポート水頭値，排出ポート水頭値，排出ポット水頭値の4種類である。注入ポート水頭値と排出ポート水頭値はマンメータにより計測し，注水堰水頭値と排水ポット水頭値は任意の水頭差を設定するように高さを調整した。なお，設定水頭差は，注水堰水頭値から排出ポット水頭値を引いた値，試験体内水頭差は，注入ポート水頭値から排出ポート水頭値を引いた値とした。設定水頭差と供試体内水頭差が異なるのは供試体外の配管等による水頭損失のためである。注水堰から各注入ポート，各排出ポートから排水ポットまでの配管類は各ポートで水頭損失に差が生じないようにほぼ同様な長さ及び構造を採用した。以下に透水試験から得られる供試体内亀裂の物性値の詳細について述べる。

供試体内の動水勾配 I [m/m] は，(2) 式で算出した。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n h_{in,i} - \sum_{j=1}^n h_{out,j}}{L} \quad (2)$$

ただし， $h_{in,i}$ は注入ポート i の水頭値 [m]， $h_{out,j}$ は排出ポート j の水頭値 [m]， n はポート数， L は流水方向長さ [m] である。Q と (2) 式を求めることで，(3) 式により亀裂の透水量係数 T [m^2/s] が算出できる。

$$T_r = \frac{Q}{W \cdot I} \quad (3)$$

ただし， W は亀裂幅 [m] である。また，流れが3乗則¹⁰⁾に従うと仮定した場合(4)式により水理学的開口幅 b_h [m] が求められる。

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

ただし， ρ は密度 [kg/m^3]， g は重力加速度 [m/s^2]， μ は粘性係数 [$Pa \cdot s$] である。

(2) トレーサー試験の概要

トレーサー試験は透水試験を行った後に実施した。水からトレーサーへの切り替えは三方電磁弁により行い，瞬時にすべての注入ポートの切り替えが可能となる。トレーサーは安価で容易に入手でき，電位変化による濃度測定が可能である1%（重量比）のNaCl水溶液を使用した。トレーサー試験では注入ポート，排出ポート，供試体内濃度孔のトレーサー濃度の時間変化を測定する。トレーサーの濃度変化による電位変化の測定幅は5.00Vであり，測定精度は 10^{-2} Vである。測定値は0.0~1.0%濃度であるため，トレーサー濃度の測定精度は 2.0×10^{-3} %となる。以下にトレーサー試験から得られる供試体内亀裂の物性値の詳細について述べる。

注入側のトレーサー移行率 $q_{mas,in}$ [kg/s] と排出側のトレーサー移行率 $q_{mas,out}$ [kg/s] はそれぞれ(5)式，(6)式で算出した。

$$q_{mas,in} = \sum_{i=1}^n (\rho \cdot C_{in,i} \cdot q_{in,i}) \quad (5)$$

$$q_{mas,out} = \sum_{j=1}^n (\rho \cdot C_{out,j} \cdot q_{out,j}) \quad (6)$$

ここで， ρ は流体の密度 [kg/m^3]， $C_{in,i}$ ， $q_{in,i}$ はそれぞれ注入ポート i のトレーサー濃度 [kg/kg] と単位時間流量 [m^3/s]， $C_{out,j}$ ， $q_{out,j}$ はそれぞれ排出ポート j のトレーサー濃度 [kg/kg] と単位時間流量 [m^3/s] である。(5)式，(6)式より供試体内亀裂を流れるトレーサーの平均的な破過曲線を描き，(7)式からトレーサー流速 V [m/s] を算出した。

$$V = \frac{L}{T_{out}(50) - T_{in}(50)} \quad (7)$$

ただし， $T_{in}(50)$ は注入側のトレーサー移行率が最大値の50%になる時間 [s]， $T_{out}(50)$ は排出側のトレーサー移行率が最大値の50%になる時間 [s] である。

物質移行開口幅 b_t [m] は、(8) 式に示すようにトレーサー流速から算出した。

$$b_t = \left(\frac{12\mu V}{\rho g I} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

マスバランス開口幅 b_m [m] は、透水試験とトレーサー試験の両方の結果から導くことができ、(9) 式で算出した。

$$b_m = \frac{Q}{WV} = \frac{b_h^3}{b_t^2} \quad (9)$$

なお、(9) 式からわかるように、 b_m は、 b_h^3 と b_t^2 の比である。

縦方向分散長 [m] は実測の破過曲線を(10) 式で表される Ogata Banks の式¹¹⁾ から得られる破過曲線にフィッティングさせて求めた。

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x - Vt}{2\sqrt{\alpha Vt}} \right) + \exp \left(\frac{x}{\alpha} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x + Vt}{2\sqrt{\alpha Vt}} \right) \right\} \quad (10)$$

ただし、 x はトレーサー投入地点からの距離 [m]、 t はトレーサー投入開始からの経過時間 [s]、 $C(x, t)$ は距離 x 時間 t でのトレーサー濃度 [kg/kg]、 C_0 はトレーサーの初期濃度 [kg/kg] である。

3. 垂直応力無負荷状態での透水・トレーサー試験

3.1 試験ケース

表 1 に垂直応力無負荷状態での透水・トレーサー試験ケースを示す。試験ケース A 11 ~ A 31 は、5 つの注入ポートすべてからトレーサーを流

表 1 垂直応力無負荷状態での透水・トレーサー試験ケース

ケース名	設定水頭差 [cm]	使用したトレーサーポート
A 11	11	1, 2, 3, 4, 5
A 15	15	
A 19	19	
A 23	23	
A 27	27	
A 31	31	
B 31 1	31	1
B 31 2		2
B 31 3		3
B 31 4		4
B 31 5		5

してあり、供試体内の透水・物質移行現象が水頭差によってどのように変化するかについて検討した。試験ケース B 31 1 ~ B 31 5 はすべて設定水頭差 31cm での試験であり、1 つの注入ポートのみからトレーサーを流しており、使用した注入ポートと各濃度計測点の連結性の有無を観察することで、供試体亀裂内部の不均質性の把握を目的とした。

3.2 試験結果と考察

表 2 に垂直応力無負荷状態での透水・トレーサー試験結果を示す。なお、縦方向分散長についての検討も行っているが⁶⁾、ここでは開口幅に着目した検討を示す。

(1) 天然亀裂の平均的開口幅評価

試験ケース A 11 ~ A 31 の結果より、動水勾配と単位時間流量の関係を図 4 に示す。同図より動水勾配と単位時間流量はほぼ比例関係にあり、今回の試験結果をダルシー則や三乗則を基に検討することが可能であることがわかった。

次に、亀裂開口幅分布が等方的であるか異方的であるかを明らかにするために、各排出ポートの単位時間流量について検討した。図 5 に示すよう

表 2 垂直応力無負荷状態での透水・トレーサー試験結果

ケース名	設定水頭値	動水勾配	流量	トレーサー流速	縦方向分散長
	cm	m/m	$\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$\times 10^{-2} \text{ m/s}$	cm
A 11	11	0.011	0.41	0.12	21
A 15	15	0.048	1.24	0.36	16
A 19	19	0.086	2.00	0.58	16
A 23	23	0.126	2.88	0.83	19
A 27	27	0.168	3.53	0.98	18
A 31	31	0.210	4.20	1.11	20

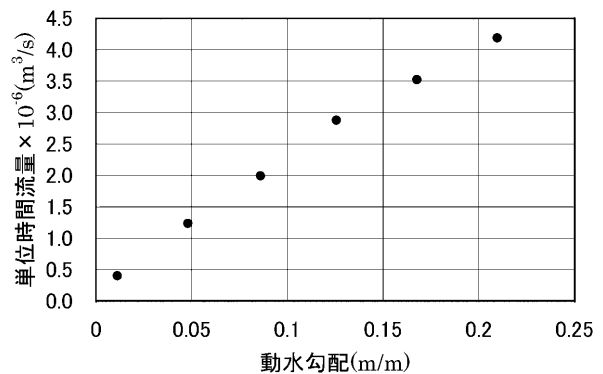


図 4 動水勾配と単位時間流量の関係

に、各排出ポートの単位時間流量は排出ポート1が最も大きく、排出ポート1から5にかけて小さくなっていった。亀裂開口幅分布が等方的である場合は亀裂内の流れは平均的には一様流となり各排出ポートの単位時間流量には大差がなくなると考えられるため、供試体の亀裂開口幅分布は異方的である可能性が高いと考えられる。

さらに、亀裂開口幅分布の概略的な構造評価のために平均的な亀裂開口幅による評価を試みた。図6には、水理学的開口幅 b_h 、物質移行開口幅 b_t 、マスバランス開口幅 b_m の最大値と最小値を示す。ここでは、粘性係数に $1.0 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ 、密度に $1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、重力加速度に 9.8m/s^2 、移行経路長に 0.5m 、亀裂幅に 0.5m の各定数を与えて、それぞれの開口幅を算出している。同図より、それぞれの開口幅の大小関係は、 $b_t < b_h < b_m$ となっている。これらの開口幅の大小関係は亀裂開口幅の分布状態と密接に関係があると考えられる。Silliman (1989)²⁾は亀裂開口幅が既知で等方的もしくは異方的である理想的な亀裂開口幅分布をもつ供試体を使用して室内実験を行い、これらの亀裂の大小関係と亀裂開口幅の幾何学的状態とを関連付け

て、①亀裂開口幅分布が異方的で注入側から排出側に卓越したチャンネル構造がある場合、②亀裂開口幅分布が異方的で流れ方向に交差する方向に卓越したチャンネル構造がある場合、③亀裂開口幅分布が等方的である場合の3種類に分類している。①の場合は $b_m < b_h < b_t$ 、②の場合は $b_t < b_h < b_m$ 、③の場合も $b_t < b_h < b_m$ となる。前出の各排出ポートの単位時間流量の違いの検討より、亀裂開口幅分布は等方的ではなく異方的であると考えられるため、今回の供試体の亀裂開口幅分布は②異方的で流れ方向に交差する方向に卓越したチャンネル構造がある場合である可能性が大きいと考えられる。

(2) 亀裂内部不均質性の概略評価

前節では、供試体内亀裂にチャンネル構造が存在する可能性があることを示したが、ここでは試験ケースB 31 1~B 31 5の試験結果を使用して、具体的にチャンネル構造の概略的评价を試みた。図7は、注入ポートの1つのみからトレーサーを注入し続け、供試体内濃度孔のトレーサー濃度がほぼ一定を示したときの値を示しており、各注入ポートと濃度計測孔との連結性が確認できる。各円の直径は濃度を表しており、最も大きい円が濃度1%を示している。注入ポート1から注入されたトレーサーは、ほとんどが排出ポート1から排出されており、供試体内の濃度孔にはほとんど濃度

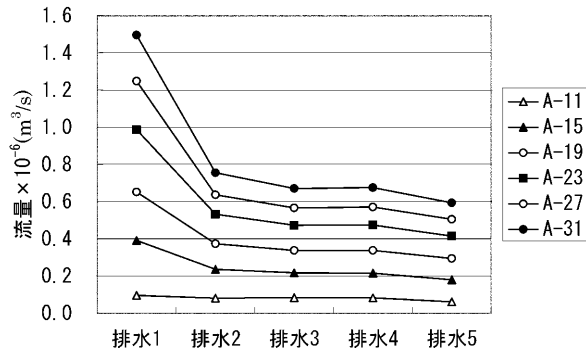


図5 排出ポート別の単位時間流量

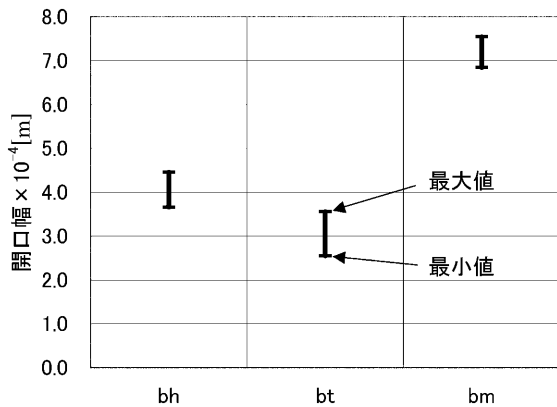


図6 各開口幅の算定値

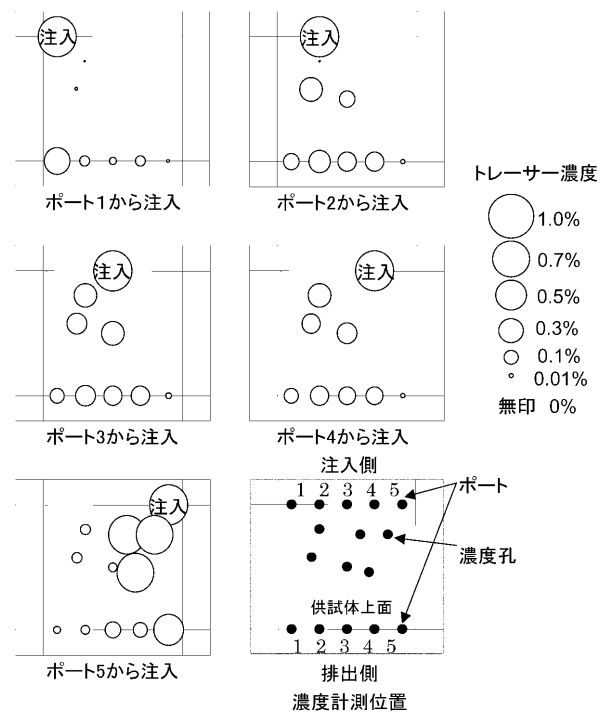


図7 試験岩体内トレーサー濃度状態

変化は無く、注入ポート1と供試体内濃度孔とは連結していない可能性が高い。注入ポート2～4からの注入では、供試体内の濃度変化はほぼ同様の傾向にあり、注入ポート2～4から注入されたトレーサーはほぼ同じ経路を流れていると考えられる。注入ポート5からの注入では、亀裂面の中央付近の内部センサーが大きく反応していることから、注入ポート5から注入されたトレーサーは亀裂面の中央付近を通過し、排水ポート5から排出されていると考えられる。以上のことから、亀裂内の流れは、ある偏りを持っていることがわかる。この結果は前節での各ポート別の流量の傾向とも合致する。すなわち、対象とした亀裂内の流れは一様流ではなく、チャンネルを含んでいると考えられ、今回の透水試験結果やトレーサー試験結果はコアサイズの試験では得ることの出来ない結果であることがわかる。

4. 垂直応力を負荷した透水・トレーサー試験

4.1 試験ケース

垂直応力を負荷した透水・トレーサー試験は表3に示すように垂直応力を5段階に変化させて実施した。なお、試験はすべて設定水頭差31cmで行い、5つの注入ポートすべてからトレーサーを流した。

4.2 試験結果と考察

表4に試験結果を示す。なお、前章と同様に縦

表3 垂直応力を負荷した透水・トレーサー試験ケース

ケース名	垂直応力 (MPa)
C 31 1	0.000
C 31 2	0.039
C 31 3	0.157
C 31 4	0.392
C 31 5	0.706

表4 垂直応力を負荷した透水・トレーサー試験結果

ケース名	動水勾配	流量	変位	トレーサー流速	縦方向分散長
	m/m	$\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$	$\times 10^{-5} \text{m}$	$\times 10^{-2} \text{m/s}$	cm
C 31 1	0.105	3.25	0.0	0.82	17
C 31 2	0.106	3.25	1.0	0.78	17
C 31 3	0.110	3.25	3.0	0.75	20
C 31 4	0.114	3.23	5.0	0.73	18
C 31 5	0.117	3.29	8.0	0.72	16

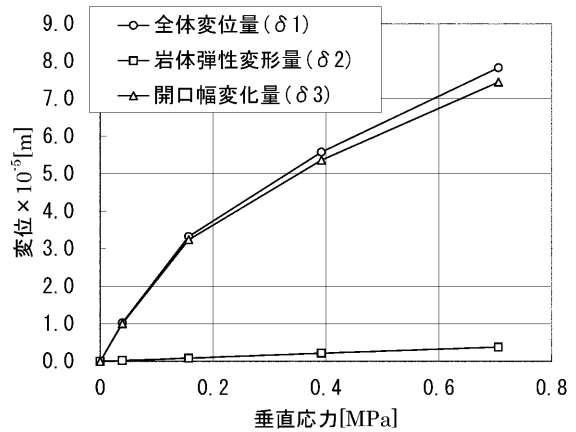


図8 垂直応力と変位の関係

方向分散長についての検討も行っている⁶⁾がここでは開口幅の検討についてのみ示す。

(1) 垂直応力と変位の関係

図8に垂直応力と供試体の全体変位量の平均値 [m]、対象亀裂以外の部分の弾性変位量 [m]、開口幅変位量 [m] ($= \delta_1 - \delta_2$) の関係を示す。ただし δ_2 は(11)式で算出している。

$$\delta_2 = \frac{\sigma}{E} \times d \tag{11}$$

ここで、 d は変位計の計測長さ[m]、 E は供試体の弾性係数[MPa]である。供試体の弾性係数は、今回の供試体と同位置で採取された岩石コアの弾性係数の平均値である5,700MPa⁹⁾を採用した。供試体の弾性係数により、想定される開口幅変位量は異なるため断定はできないが、亀裂開口幅の概略的な変位量は最大応力0.7MPaでも約 $7.5 \times 10^{-5} \text{m}$ であったと想定される。

(2) 垂直応力と開口幅の関係

図9に垂直応力と水理学的開口幅 b_h 、物質移行開口幅 b_t 、物質移行開口幅 b_n 、物質移行

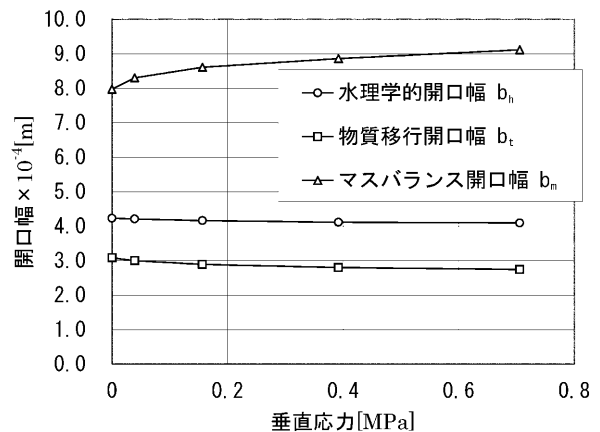


図9 垂直応力と開口幅の関係

開口幅 b_t ，マスバランス開口幅 b_m の関係を示す。同図より，垂直応力の増大に伴い b_h と b_t は若干小さくなり， b_m は大きくなっていることがわかる。(9)式で示したように， b_m は b_h^3 と b_t^2 の比であるため，この値が変化することは b_h と b_t の関係が変化していることを示している。また，3章で示したように， b_h と b_t の大小関係は亀裂の構造に起因して変化するため，垂直応力の増大に伴い b_h の減少する割合よりも b_t の減少する割合が大きくなっていることは，垂直応力の負荷に伴いチャンネル構造に若干の変化が生じた可能性を示していると考えられる。今後実施予定の亀裂開口幅測定により亀裂開口幅分布が把握できれば，垂直応力下での開口幅分布がどのように変化するかも把握できると考えられる。

5. おわりに

本報告では，2001年度までのLABROCKの試験結果について取りまとめ，天然亀裂内の透水・物質移行現象について検討した。

垂直応力無負荷状態での透水・トレーサー試験では，供試体の平均的開口幅評価を行い，水理学的開口幅，物質移行開口幅，マスバランス開口幅の大小関係について明らかにした。また，各排出ポートからの単位時間流量の違いとSillimanの分類に従って亀裂開口幅分布が異方的で流れ方向に交差する方向に卓越したチャンネル構造がある可能性が高いことを示した。さらに，1つのポートのみからトレーサーを注入し，供試体内濃度孔のトレーサー濃度を観察することで各ポートと供試体内濃度孔の連結性について確認し，供試体の流れが一樣流ではなくチャンネル構造を持つ流れであることを明らかにした。

垂直応力を負荷した透水・トレーサー試験では，垂直応力負荷に伴い亀裂開口幅が変化していることを定量的に確認した。また，水理学的開口幅と物質移行開口幅の減少率の違いに着目することで，垂直応力負荷に伴い亀裂開口幅分布が変化し，チャンネル構造が若干変化している可能性があることを指摘した。

今後は本研究で対象とした岩体の亀裂開口幅測定を行う予定である。亀裂開口幅測定では，亀裂内部にレジジン材を注入し，亀裂内部の状態を保持し，亀裂面に対して垂直方向に1 mm間隔で亀裂

開口幅を測定する。このようなチャンネル構造を含む亀裂内部構造のミクロな形状変化が地下水の流動に与える影響の検討を行い，マクロな亀裂構造特性の検討に応用することは，平行平板モデルのような既存の亀裂モデルの適用限界や適用上の留意点を明らかにすることができ，その信頼性向上につながる可能性があることから，天然バリア安全評価の信頼性向上に資すると考えられる。

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1 わが国の地質環境”，JNC TN1400 99 021，Ⅲ 8～Ⅲ20 (1999)
- 2) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 平成13年度報告”，JNC TN 1400 2002 003，2 3，(2002)
- 3) 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，I 1～I 6 (1999)
- 4) 例えば，Gale, J., MacLeod et al.：“Site characterization and validation measurement of flow rate, solute velocities and aperture variation in natural fractures as a function of normal and shear stress, Stage 3”，Stripa Project Report 90 11 (1990)
- 5) 例えば，Y.W. Tsang and Witherspoon：“Hydromechanical Behavior of a Deformable Rock Fracture Subject to Normal Stress, Journal of Geophysical Research”，Vol 86, No B10, pp9287 9298 (1981)
- 6) 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”，JNC TN8400 2002 001 (2002)
- 7) 内田雅大，吉野尚人：“亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)用供試体の切り出し・整形”，JNCTN 8410 2001 015 (2001)
- 8) 内田雅大，吉野尚人：“LABROCK用透水性キャリブレーション岩体の採取”，JNC TN 8410 2001 016，(2001)
- 9) 核燃料サイクル開発機構：“釜石原位置試験総括報告書”，JNC TN7410 99 001，pl 28 (1999)
- 10) Snow D.：“A parallel plate model of fractured permeable media, University of California”，Berkely, Ph. D., pp329 331 (1965)
- 11) Akio Ogata, R. B. Banks：“A solution of difference equation of longitudinal dispersion in porous media”，Geological survey professional paper 411 A，(1961)
- 12) S. E. Silliman: An Interpretation of the differences between aperture estimates derived from hydraulic and tracer in single fracture, Water Resources Research, vol 25, No. 10 (1989)