

亀裂を有する軟岩の透水性および物質移行特性

に関する室内実験

LABORATORY EXPERIMENT ON THE HYDRAULIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF FRACTURED SOFT SEDIMENTARY ROCKS

○畑中耕一郎*、内田雅大*、下茂道人**、山本肇**、熊本創**

Koichiro HATANAKA, Masahiro UCHIDA, Michito SHIMO, Hajime YAMAMOTO, Sou KUMAMOTO

A series of laboratory experiments have been conducted to study flow and transport in fractured soft sedimentary rock. The drilled mudstone cores obtained from the HDB-4 borehole at the Horonobe Underground Research Center were used for the experiments. The matrix porosity of the intact cores ranged from 33% to 41%. The hydraulic conductivity of rock matrix determined by the transient pulse test was found to be of order of 10^{-12} m/s. The effective diffusion coefficient obtained from the “through diffusion test” was 0.8×10^{-11} to 2.5×10^{-11} m²/s. The hydraulic conductivity of the fractured cores ranged from 5.6×10^{-9} to 1.8×10^{-8} m/s. These results suggested that the fractures have the significant influences on flow in the fractured sedimentary rock used for this experiment, and matrix diffusion, diffusion from fractures into rock matrix, may affect the mass transport in the rock mass.

Non-sorbing tracer experiments were conducted by using the fractured cores. Tracer, potassium iodide solution, was injected at a constant rate and the concentration of the tracer was observed at the outlet. The obtained breakthrough curve was interpreted and fitted by using a numerical simulator for flow and mass transport called FRAC3DVS (Therrien et al., 1999), and mass transport parameters are obtained. The results indicated that the matrix diffusion can play an important role for mass transport in the fractured soft sedimentary rocks.

Key Words: laboratory experiment, tracer test, soft sedimentary rocks, fracture, transport property, matrix diffusion

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの性能評価にあたっては、天然バリアを構成する岩盤中における水理特性および物質移行特性を適切に評価することが重要である。これまでの研究¹⁾では、軟岩における物質移行現象に関しては、粒子間間隙を主な移行経路として考えてきた。しかし、亀裂が発達した軟岩においては亀裂の方が粒子間間隙よりも卓越した水みちを形成する可能性がある。

筆者らは、亀裂を有する軟岩中の水理特性と物質移行特性の解明を目的とし、自然亀裂を有する新第三紀泥岩のコア試料を用いた室内試験(透水試験、トレーサー試験、拡散試験)および解析を行った。その結果、今回の軟岩では、亀裂内の移流分散が支配的であり、かつマトリクス拡散による遅延効果が大きいことが明らかになった。

* 正会員 核燃料サイクル開発機構

**正会員 大成建設(株)技術センター土木技術研究所

2. 試験概要

1) 試験試料

試験試料は、北海道幌延町にある核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センターが平成14年度に掘削した試験孔（HDB-4 孔）において採取した。採取地の幌延地域には、珪藻質泥岩や硬質頁岩などの珪質岩が広く分布しており、続成変質（Opal A 帯/Opal CT 帯）の程度の相違に基づいた層序区分がなされている。本試験孔において実施された調査結果²⁾によると、HDB-4 孔では深度128.00m 付近までの上部の珪藻質泥岩を声間層とし、これ以深の硬質頁岩を稚内層に対比している。今回の試験では、特に稚内層を試験対象として、深度200m 付近、300m 付近、450m 付近の3 深度を選定して試料採取を行った。採取した試料について、室内試験を実施する前に基本物性試験を行った。基本物性のうち、乾燥密度は1.47～1.67 (g/cm³)、有効空隙率は33.2～41.4 (%)、S 波速度が0.98～1.15 (km/s) であり、深度依存性が確認できた。なお、試験試料は、上記のHDB-4 孔の試験コア（直径86mm）から、孔軸と直交方向に直径50mm にて再コアリングし、直径50mm×高さ50mm の寸法に整形した。

2) 試験方法および試験ケース

試験では、表-1 に示すように、亀裂の有無により異なる試験方法を採用した。まず、亀裂の無い試料では、透水性が非常に低いことが想定された。そこで、透水試験は低透水性岩石に対して実績のある、トランジェントパルス透水試験法を用いた。また、物質移行に関しては、低透水性のため、通常の地下水流動条件下では移流・分散効果を見逃しうると考えられることから、岩石マトリクス部の拡散係数を求めることを目的とした拡散試験を行った。一方、亀裂を有する試料に関しては、透水性が比較的高いことが想定されたため、通常の定流量透水試験およびトレーサー試験を行った。

試験ケースを表-2 と表-3 に示す。まず、亀裂の無いインタクト試料では、各試料の採取深度における原位置応力状態を模擬した封圧ならびに間隙水圧を設定した。ただし、拡散試験については、封圧を載荷することが困難であるため、今回は3 ケースとも大気圧下で実施した。一方、亀裂を有する試料で実施した定流量透水試験ならびにトレーサー試験については、同一封圧条件下における採取深度の異なる試料毎の特性変化および、同一試料における深度に対する封圧の依存性を確認する目的で、表-3 に示す6 ケースを実施した。なお、封圧は、100m～400m の4 深度に相当する有効応力により設定した。

3. インタクト試料を対象とした透水試験および拡散試験

1) トランジェントパルス透水試験

試験に用いたトランジェントパルス透水試験装置の概要および測定原理をそれぞれ、図-1、図-2 に示す。

本装置の特徴は、温度変化による水圧への影響を低減するため、装置全体を水槽内に沈める機構を有することである。試験は、まず三軸セルにセットした試料に所定の封圧を載荷し、上下流側に接続した貯留槽に所定の等しい水圧を加え、両側の貯留槽の水圧および試料の間隙水圧が平衡状態に達し

表-1 試験内容

	透水試験	物質移行試験
インタクト試料	トランジェントパルス法	拡散試験(透過拡散法)
亀裂試料	定流量透水試験法	トレーサー試験

表-2 試験ケース（トランジェントパルス法）

試験 No.	採取深度 (m)	封圧 (MPa)	間隙水圧 (MPa)	有効応力 (MPa)
①	200	3.6	2.0	1.6
②	300	5.4	3.0	2.4
③	450	8.1	4.5	3.6

表-3 試験ケース（定流量透水試験・トレーサー試験）

採取深度 (m)	封圧 (MPa)			
	100m相当	200m相当	300m相当	400m相当
200	-	-	① 2.4	-
300	② 0.8	③ 1.6	④ 2.4	⑤ 3.2
450	-	-	⑥ 2.4	-

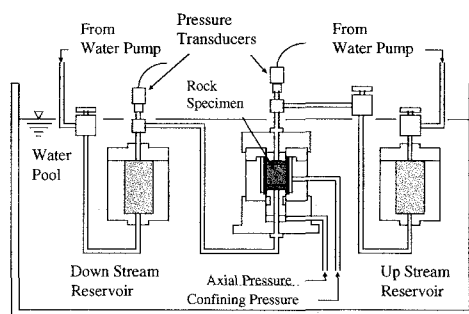


図-1 トランジェントパルス透水試験装置概要

た後、上流側の水圧を瞬間的にパルス圧Hだけ上昇させた。この時、上流側貯留槽の水は、試料内を浸透して下流側へ流れるので、上下の貯留槽の水圧は、図-2のように経時的に変化する。この圧力の経時変化から試料の透水性を求めた。トランジェントパルス透水試験の解析には、Brace 法³⁾と差圧を用いたHsieh法を用いた。差圧を用いたHsieh法とは、Hsieh法⁴⁾の解析において、温度による水圧変化の影響によって生じる解析誤差を低減するために、上流側の水圧と下流側の水圧の差を取ることで温度による水圧変化分をキャンセルアウトする方法である。試験結果の一覧を表-4に示す。この表より、インタクト試料の透水係数は 10^{-12} (m/s) オーダーであることが分かる。今回の試験で用いた試料は、水中飽和法により得られた有効空隙率が約30~40%であり、平均的な岩石に比べて比較的ポーラスな岩石であると言えるが、同等の有効空隙率を有する岩石に比べて、非常に低透水性であることが分かった。

2) 拡散試験

拡散試験は透過拡散法により行った。試験装置の概要を図-3に示す。試験には、コア試料を直径30mm、厚さ5mmの円盤状に再整形し、周囲をエポキシ系樹脂で固めたものを試料として用いた。試験は次の手順にて行った。まず拡散セルに試料をセットした後、脱イオン水を両セルに注入し、水中脱気により岩石を含水させた。その後、トレーサーセル側の脱イオン水をトレーサー溶液（ヨウ化カリウム水溶液：I⁻ 500mg/L）と交換し、試験開始とした。試験中、定期的に測定セル側から20mlずつサンプリングし、同量の脱イオン水を測定セルへ加えた。サンプリングした溶液中のトレーサー濃度はICP発光分光分析法（定量下限値：0.01mg/L）により測定した。サンプリング水と脱イオン水の置換に際して生じる誤差については補正した。

試験結果を図-4に示す。この結果から、経過日数とともに濃度が直線的に増加していることが分かる。この試験データを用い、一次元の拡散方程式から定常状態において近似的に求められた次式によって拡散係数等を求めた。

$$C_d = \frac{S_r \cdot H \cdot C_0}{V_m} \left(\frac{D_e \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} \right) \quad (1)$$

ここに、 t ：時間(s)、 H ：試料の厚さ(m)、 C_0 ：トレーサーセル中のトレーサー濃度(mg/L)、 C_d ：測定セル中のトレーサー濃度(mg/L)、 S_r ：試料の断面積(m²)、 D_e ：実効拡散係数(m²/s)、 V_m ：測定セル中の溶液体積(m³)である。また、 α は収着容量であり、 $\alpha = n_e + \rho \cdot K_d$ (n_e ：試料の有効空隙率、 ρ ：試料の乾燥密度(kg/m³)、 K_d ：分配係数(m³/kg))で与えられる。また、見かけの拡散係数を次式に与えられるタイムラグ法によって求めた。

$$D_a = \frac{H^2}{6T_{lm}} = \frac{D_e}{\alpha} \quad (2)$$

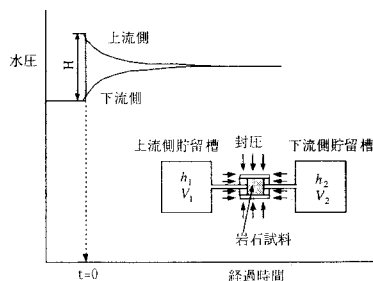


図-2 トランジェントパルス法測定原理

表-4 インタクト試料透水試験結果一覧

採取深度 [m]	透水係数 [m/s]		比貯留係数 [1/m]
	Brace法	差圧を用いたHsieh法	差圧を用いたHsieh法
200	4.83E-12	5.49E-12	1.12E-05
300	4.83E-12	4.88E-12	6.08E-06
450	1.69E-12	1.63E-12	8.11E-06

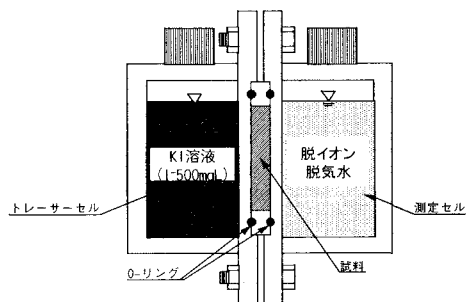


図-3 拡散試験装置概要

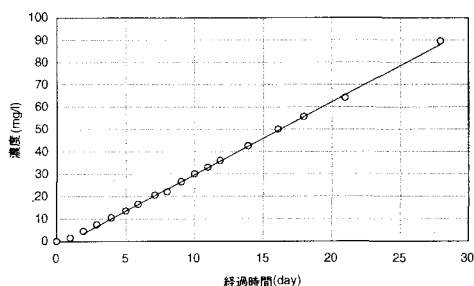


図-4 拡散試験結果（採取深度200m試料）

表-5 拡散試験結果一覧

採取深度 (m)	実効 拡散係数 De (m ² /s)	見かけの 拡散係数 Da (m ² /s)	収着容量 α (-)	分配係数 Kd (m ³ /kg)	有効 空隙率 ne (-)
200	2.34E-11	6.86E-11	0.342	-0.049	0.414
300	2.55E-11	3.36E-11	0.758	0.244	0.384
450	8.16E-12	3.84E-11	0.212	-0.072	0.332

ここに、 D_0 ：見かけの拡散係数 (m^2/s)、 T_{in} ：(1) 式を時間軸まで外挿した時の時間 (s) である。

解析により求めた実効拡散係数、見かけの拡散係数および収着容量を表-5 に示す。実効拡散係数については、 $0.8 \times 10^{-11} \sim 2.5 \times 10^{-11}$ (m^2/s) の値が得られた。既往の、新第三紀泥岩・凝灰岩の拡散係数値¹⁾と今回の試験結果の比較を図-5 に示す。この図より、今回得られた値は、同一有効空隙率のサンプルの中で平均的な値であることが分かる。また、収着容量から求めた分配係数を求めると、0 に近い値となることから、当試料へのヨウ化物イオンの収着量は非常に小さいものと考えられる。

4. 亀裂試料を対象とした透水試験およびトレーサー試験

1) 定流量透水試験

定流量透水試験は、後述のトレーサー試験装置を用いて実施した。試験装置の概要を図-6 に示す。試験は、三軸セル内にセットした試料に所定の封圧を载荷し、上流側の定流量ポンプ（供試体の下側）より試料に通水して行った。また、流量の測定は上流側の注入量を電子天秤にて測定して行い、注入圧力の測定は上流側注入ライン上に設置した圧力計にて行った。定流量透水試験の結果を、表-6 に示す。定流量透水試験では、試料直径と同じ幅を有する単一亀裂内のみが透水すると仮定して求めた亀裂の透水量係数 T_f (m^2/s) と、試料の全断面を透水すると仮定した場合の試料の透水係数 K (m/s) を求めた。表-6 より、亀裂の透水量係数 T_f は、試験の全般に渡って $10^{-11} \sim 10^{-10}$ (m^2/s) のオーダーであり、試料全体の透水係数 K は $10^{-9} \sim 10^{-8}$ (m/s) のオーダーであった。試料全体の透水係数は、亀裂を有しないインタクト試料よりも 3~4 オーダー大きい結果となった。また、深度 300m で採取した試料を対象として、封圧と亀裂の透水量係数の関係を求めた結果、図-7 に示した通り、圧の増加と共に試料の透水性が低下する傾向が確認された。これは、封圧の増加に伴って、試料の亀裂開口幅が減少し、透水性が低下していると考えられる。試験は、载荷装置の载荷重がある程度安定した後に行っているが、変形量の収束が十分でない可能性がある。したがって、今後、亀裂部の変形量の測定など、詳細な検討が必要である。

2) トレーサー試験

a) 試験装置および方法

トレーサー試験装置の概要を図-6 に示す。本試験は、三軸セル内の試料に所定の封圧を载荷した状態で、試料の下側から上側へトレーサー溶液（ヨウ化カリウム水溶液：I- 1000mg/L）および脱イオン水を注入し、排出される溶液の濃度の時間変化を測定するものである。排出溶液の分析装置には、トレーサー試験中のトレ

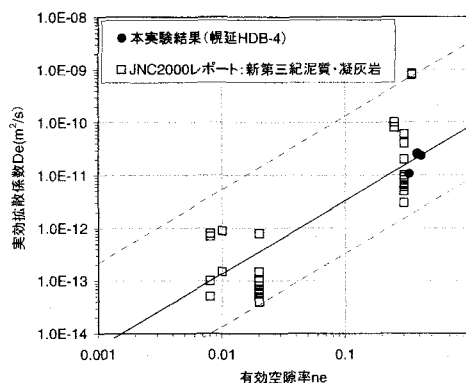


図-5 実効拡散係数と有効空隙率の関係
(既往データとの比較)¹⁾

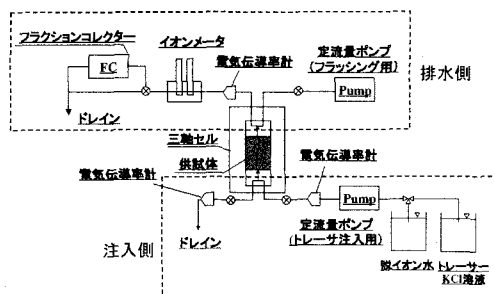


図-6 透水・トレーサー試験装置概要

表-6 亀裂試料透水試験結果一覧

採取深度 [m]	封圧 [MPa]	亀裂の 透水量係数 [m ² /s]	試料全体の 透水係数 [m/s]
200	2.4	2.18E-10	5.56E-09
300	0.8	1.44E-10	3.67E-09
300	1.6	9.35E-11	2.38E-09
300	2.4	5.94E-11	1.51E-09
300	3.2	4.41E-11	1.12E-09
450	2.4	4.00E-10	1.02E-08

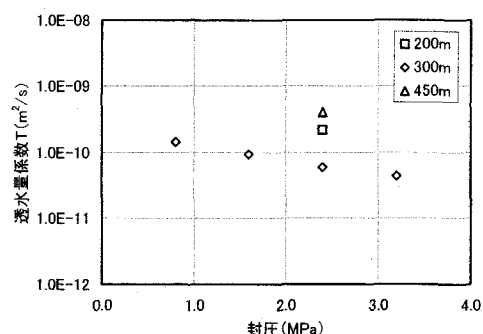


図-7 亀裂試料での封圧と透水量係数の関係

ーサー濃度を連続的に測定するための装置として、電気伝導率計とイオンメータを排出側配管途中に配した。さらに、水質分析用のトレーサー溶液のサンプルを一定時間毎に採取するため、フラクションコレクターを用いた。なお、フラクションコレクターにより採取された排出溶液のヨウ化物イオン濃度の測定には、前述の拡散試験と同様に ICP 発光分光分析法を用いた。

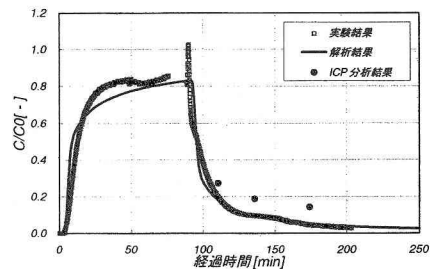
b) 試験結果

試験で得られた破過曲線の代表例を図-8 に示す。特徴としてトレーサー濃度が注入濃度 ($C/C_0=1$) に達する前にほぼ安定していることや、トレーサーから水に切り替えた後の濃度低下が非常に遅いことなどが挙げられる。その理由として、トレーサー溶液が試料内部へ拡散している可能性が考えられる。収着に関しては、前述の拡散試験から無視しうると考えられる。そこで、岩石マトリクス部への拡散と単一亀裂内移流分散の両者を考慮した解析を実施した。その理論解として Tang 等(1981)⁵⁾によって導かれた式があるが、トレーサー注入面からの拡散など、より実際の試験条件を反映するため、次に述べる数値解析を実施した。

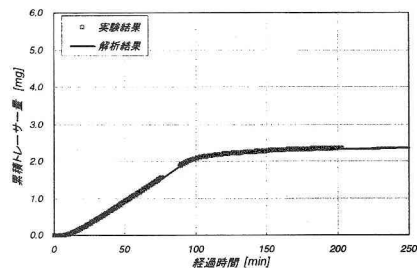
数値解析には、3次元物質移行解析コード FRAC3DVS(ver. 3.49、Therrien 他、1999)⁶⁾を用いた。数値解析により得られた破過曲線を、試験結果とフィッティングすることにより、亀裂部の物質移行開口幅ならびに分散係数(分散長)を求めた。

解析メッシュ(図-9)は、正方形断面の中心に平板亀裂を配置したものである。流れ方向である高さは、分散長よりも十分長くするため、250cm とした。亀裂面は、面要素でモデル化した。境界条件は、上下面を水頭固定境界、側面を不透水境界とした。その他の解析の諸条件は、前述の透水試験と拡散試験の結果を基に表-7 のように設定した。

解析結果の代表例を図-8 中に示した。本解析結果より、実験結果に見られるトレーサー破過曲線ならびに回収率曲線が良好に再現されていることが分かる。解析と実験結果のフィッティングから求めた物質移行開口幅と分散長を表-8 に示す。まず、分散長はいずれの試料においても 1.5×10^{-3} [m] が得られた。この結果を既往の実験結果⁷⁾(図-10)と比較すると、ほぼ同じトレンド上にある。次に、物質移行開口幅は、0.007~0.014mm が得られた。この幅は、透水係数から三乗則により逆算した水理開口幅(表-8)よりやや大きい。一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところのボトルネック効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は平均的な開口幅(全体の亀裂空隙体積)の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されている⁸⁾。今回の結果では物質移行開口幅/水理開口幅比は最大で 1.7 程度であり、あまり大きな差がない。これは亀裂が十分に密着しており、開口幅の面内不均一性

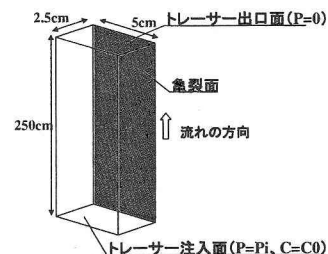


(a) トレーサー濃度



(b) 累積トレーサー量

図-8 トレーサー試験結果および解析結果
(200m 試料、封圧 0.8MPa)



上下面:水頭固定境界、側面:不透水境界

図-9 トレーサー試験の解析条件

表-7 解析入力条件一覧

採取深度 [m]	封圧 [MPa]	亀裂部 透水係 数 Tf [m2/s]	マトリ クス部 透水係 数 Km [m/s]	マトリクス部 実効拡散係 数 Dm [m2/s]	マトリ クス部 有効空隙率 n [%]	分配 係数 Kd
200	2.4	2.18E-10	5×10^{-12}	2.5×10^{-11}	35	0
300	0.8	1.44E-10	5×10^{-12}	2.5×10^{-11}	35	0
300	1.6	9.35E-11	5×10^{-12}	2.5×10^{-11}	35	0
300	2.4	5.94E-11	5×10^{-12}	2.5×10^{-11}	35	0
300	3.2	4.41E-11	5×10^{-12}	2.5×10^{-11}	35	0
450	2.4	4.00E-10	5×10^{-12}	2.5×10^{-11}	35	0

表-8 トレーサー試験解析結果一覧

採取 深度 [m]	封圧 [MPa]	実流速 v [m/s]	水理 開口幅 eH [m]	物質移行 開口幅 eT [m]	分散長 α [m]
200	2.4	8.94E-04	6.69E-06	1.00E-05	0.0015
300	0.8	1.19E-03	5.83E-06	7.00E-06	0.0015
300	1.6	1.31E-03	5.05E-06	8.00E-06	0.0015
300	2.4	1.52E-03	4.34E-06	8.00E-06	0.0015
300	3.2	1.81E-03	3.93E-06	8.00E-06	0.0015
450	2.4	1.15E-03	8.19E-06	1.40E-05	0.0015

が低かったためと推察される。また、既往の研究⁹⁾より、花崗岩地域（釜石鉱山原位置試験場）において原位置スケールの亀裂に対して物質移行開口幅 e と透水量係数 T の間に $e=2\sqrt{T}$ の関係が示されている。今回の試験結果は、この傾向とも大きく外れていない（図-11）。

c) 数値解析的検討

図-12 に、今回の室内実験の条件において、マトリクス拡散係数を 2 オーダー変化させたときに得られる破過曲線の数値解析例を示した。この図から、マトリクス拡散係数によって、遅延効果が大きく異なることが分かる。

5. まとめ

幌延地域の軟岩（新第三紀泥岩）試料を対象とし、室内試験（透水試験、拡散試験、トレーサー試験）を実施した。その結果をまとめると、次の通りである。

- (1) 岩石マトリクス部の透水系数が 10^{-12}m/s オーダーと小さいのに対し、拡散係数は同一有効空隙率の既往データに対して平均的な値が得られた。これは、当軟岩の空隙率は約 30~40% と大きい、個々の空隙径が非常に小さく、流れに対する抵抗力が大きいため、透水系数の増加に寄与しないためと考えられる。
- (2) 一方、亀裂内の物質移行開口幅や分散長については、既往データと整合的な結果が得られた。特に、花崗岩地域の原位置トレーサー試験結果と同様に、透水量係数と関連づけて整理できる可能性が示された。
- (3) 今回の試験結果から、試料採取地点周辺の地下水流れや物質移行特性に関して考察すると、地下水流れに関しては、粒子間隙隙よりも亀裂が卓越した水みちを形成する可能性が高い。一方、物質移行においては、亀裂内の移流分散だけでなく、マトリクス拡散による遅延効果も大きいと考えられる。

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技術の信頼性 一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、核燃料サイクル開発機構、JNC TN1400 99-023、(2000)。
- 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 一平成 14 年度報告一、核燃料サイクル開発機構、JNC TN1400 2003-004、(2003)。
- 3) Brace, W.F., et al : "Permeability of Granite under High Pressure", J. of Geophysical Research, Vol.73, No.6, pp.2225-2236, (1968)
- 4) Hsieh, P.A., et al : "Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of 'Tight' Rocks - I Theory", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp.245-252, (1981)
- 5) Tang, D. H., E.O. Frind, E.A.Sudicky : "Contaminant transport in fractured porous media: analytical solution for a single fracture", Water Resources Research, Vol.17, No.3, pp.555-564, (1981)。
- 6) Therrien, R., E.A.Sudicky : "Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media", J. Contaminant Hydrology, 23, pp.1-44, (1996)。
- 7) 新藤静夫、井伊博行：表層における地下水流動、放射性廃棄物と地質科学（島崎英彦、新藤静夫、吉田鎮男編）、東京大学出版会、(1995)。
- 8) Abelin, H., I. Neretnieks, S. Tunbrant, and L. Moreno: "Migration in a single fracture: Experimental results and evaluation", final report, Stripa project, Tech. Rep. 85-03 Swed. Nucl. Fuel and Waste Manage. Co. (SKB), Stockholm, (1985)。
- 9) 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)。

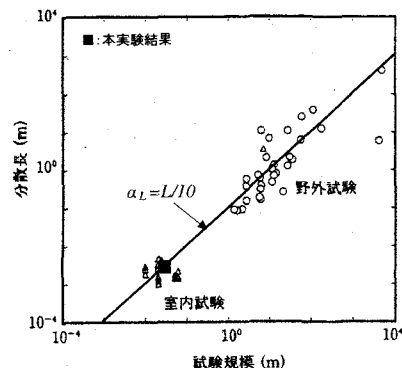


図-10 分散長と試験スケールとの関係
(既往データとの比較)⁷⁾

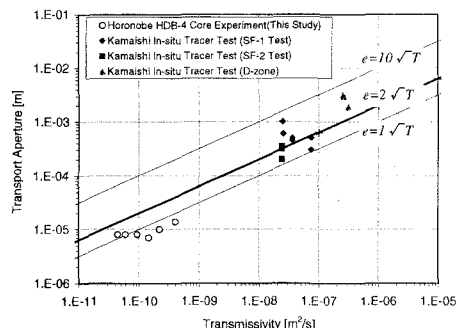


図-11 透水量係数と物質移行開口幅の関係
(既往データとの比較)⁸⁾

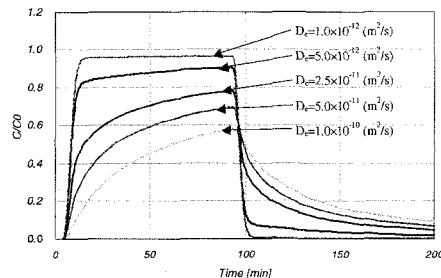


図-12 数値解析によるマトリクス拡散の遅延効果