

亀裂を有する岩石を対象とした室内トレーサー試験手法の開発

—マトリクス拡散現象を考慮したトレーサー試験手法—

熊本 創*¹・下茂 道人*¹

Keywords : laboratory experiment, tracer test, fracture, transport property, matrix diffusion

室内試験, トレーサー試験, 亀裂, 物質移行特性, マトリクス拡散

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物質移行特性を適切に評価することが重要である。一般に、単一亀裂を有する岩石中の物質移行特性は、亀裂内での移流・分散による移行と、亀裂から岩石基質中への拡散（マトリクス拡散）および亀裂表面や岩石基質内での鉱物粒子表面への収着等による遅延効果を考慮した1次元平行平板モデルで表現される。

筆者らは、既存の透過拡散法による拡散試験手法に移流発生機構を設けることで、上記の各特性を室内で精度良く測定することができる新しいトレーサー試験手法を開発し、単一亀裂を有する軟岩試料を用いた実験により、その有用性を確認した。本報では、本試験方法の特徴および適用性について述べる。

2. 試験方法

トレーサー試験は、トレーサー物質を含む溶液を試料に通水し、排出される溶液中のトレーサー濃度の経時変化（破過曲線）を測定し、これを理論曲線にフィッティングすることで、試料の物質移行特性を把握する試験である。

従来の研究¹⁾においては、単一亀裂を有する岩石コア試料を対象としたトレーサー試験手法として、図-1に示すような配管系を介した試験方法が一般的に広く用いられている。しかし、このような試験法では、配管内をトレーサー溶液が移動する際に、既に分散現象が発生している恐れがあり、これにより試験精度の信頼性を著しく損なう可能性が考えられる。また、特に堆積岩等の軟岩試料を対象とした試験においては、亀裂内での移流分

散に加えて、亀裂から岩石基質内への拡散現象（マトリクス拡散現象）による遅延効果が非常に重要な要因となり、これを考慮した試験を実施するためには、非常に低流量条件下での試験を行う必要がある。従来の研究においては、このような低流量条件下での試験を実施する場合、配管内のトレーサー滞留時間をできるだけ短縮するために、図-1中に示すように、試験装置の排出側にフラッシング機構を設ける場合もある。しかし、これもフラッシングによる希釈の影響により測定誤差を増大させる可能性が考えられる。

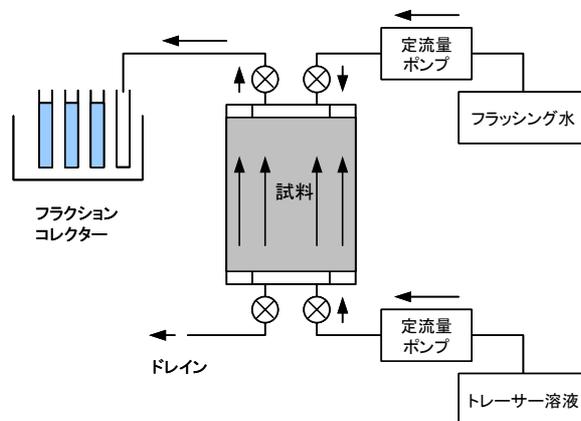


図-1 トレーサー試験方法（従来の方法）
Usual method of the tracer test

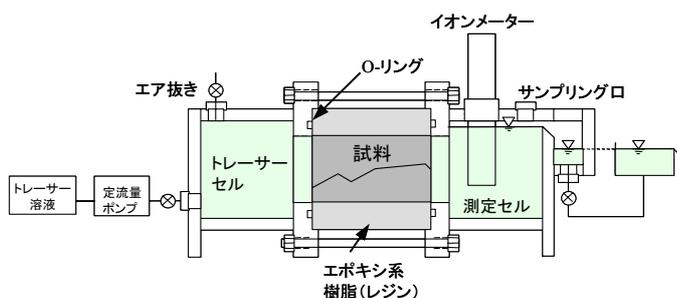


図-2 セル型トレーサー試験装置概要
New method of the tracer test

* 1 技術センター土木技術研究所地盤・岩盤研究室

そこで、本研究では、トレーサー試験の測定精度の向上を目的として、図-2 に示すようなセル型の新しいトレーサー試験装置を開発した。

本装置は円柱状のコア試料をトレーサー用セル（注入側）と測定用セル（排出側）の2つのセルで挟み、トレーサー用セルより一定流量でトレーサー溶液を注入し、測定用セル側の溶液濃度の経時変化を測定するものである。本装置は溶液濃度測定部と試料の間に配管系を有していないため、配管内分散が生じず、かつ配管による時間遅れの無い破過曲線が得られる。また、トレーサー注入用に極微小流量を定流量で送液可能なシリンジポンプ（最小流量 $0.5 \mu\text{l}/\text{min}$ ）を用いることにより、マトリクス拡散を考慮した低流速条件下の試験が可能である。測定セル側の濃度測定は、イオンメーターによる連続測定を行うとともに、サンプリングによる分析が可能のように、測定セル側の上部にサンプリング口を設けている。また、測定セル内の濃度を均一にするため、試験中は常時マグネチックスターラーによる攪拌を行う。

3. 測定精度の確認

本試験手法の測定精度の確認として、マトリクス拡散の生じないアクリル製の平行平板亀裂を有する試料と、自然亀裂を有する新第三紀堆積岩コア試料（核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センターHDB-4 孔より採取：稚内層泥岩）を用いたトレーサー試験を実施した。

3.1 試料作成

試料は、図-3 に示すように、直径 5.0cm 高さ 5.0cm の円柱状に整形して作成した。アクリル試料については、図-3(a)に示すように、円柱試料を半割り状にし、半割面の両端に厚さ 0.05mm のスペーサーを挟み込んで作成し

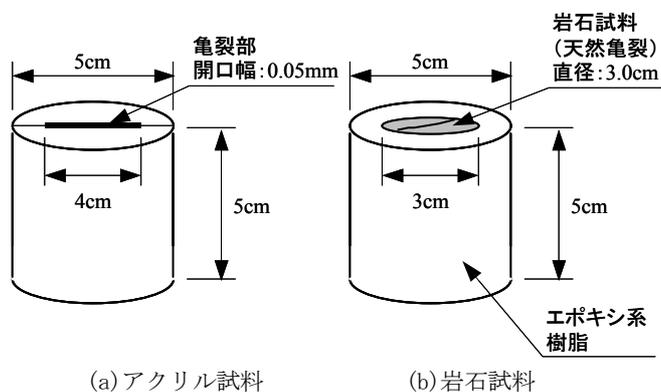


図-3 試験試料
Sample

た。一方、岩石試料は、自然亀裂を有する直径 8.0cm のボーリングコアから、亀裂がなるべく中央に位置するように、直径 3.0cm に再コアリングし、周囲を直径 5.0cm になるように、エポキシ系樹脂にてコーティングして作成した。

3.2 試験条件

試験条件として、注入するトレーサー溶液には、非吸着性のヨウ化カリウム水溶液を用い、濃度はヨウ化物イオン濃度で 500 (mg/L) とした。また、トレーサー注入流量は、0.001 (cc/min) とした（表-1）。また、測定セル側の濃度測定には、イオンメーターを用いた。なお、測定セル側溶液濃度の測定は、測定精度の信頼性向上を目的として、イオンメーターによる連続測定に加えて、1日3回程度サンプリングを行い、ICPによる濃度分析も行った。

また、事前の透水試験を実施する際には、図-2 中の注入側部分をシリンジポンプに代わって、定水頭の堰に

表-1 トレーサー試験条件
Test condition

試験条件	
トレーサーセル側	ヨウ化カリウム水溶液
	・濃度: I 500 (mg/L) ・注入流量 $q=0.001$ (cc/min)
測定セル側	脱イオン水
	・イオンメーターにより測定

置き換えて、定水頭透水試験を実施した。

3.3 試験手順

試験は次のような手順で行った。

(1) 試料のセット

試料を2つのセルで挟み込むようにセットし、亀裂内にエアが残留しないよう、注入側のセルから試料内部を通水して装置全体に脱イオン脱気水を満たし、注入側、排水側の両バルブを閉じる。

(2) トレーサー試験の開始

測定セル側のバルブを閉じたまま、注入側装置内の脱イオン水をトレーサー溶液（ヨウ化カリウム水溶液）と交換し、シリンジポンプの始動と同時に出口側のバルブを開いて拡散実験を開始する。

(3) 測定セル側溶液の濃度測定およびサンプリング

イオンメーターによる連続測定により、試験開始直後の測定セル側濃度の経時変化を測定する。また、試験開始当日から1日3回程度の頻度で、サンプリングを5ml ずつ行い、ICPによるヨウ化物イオン濃度測定を行う。サンプリング後は同量の脱イオン脱気水を測定セル

に補充する。測定セルの脱イオン水の補充により生じる希釈の影響は、サンプリング毎の量とその濃度から補正する。

(4) サンプルの分析

サンプリングした溶液に含まれるヨウ化物イオン濃度を ICP 発光分光分析（定量下限値：0.01 mg/L）により求める。

3.4 試験結果

試験結果を図-4、5 に示す。これらの図から、イオンメーターによる測定結果と ICP による分析結果が良く一致しており、本試験で得られる測定結果の信頼性が高いことがよく分かる。また、アクリル試料に比べて、岩石試料の試験結果は、マトリクス拡散による遅延効果の影響を受け、測定濃度の経時変化のプロットが、下方向

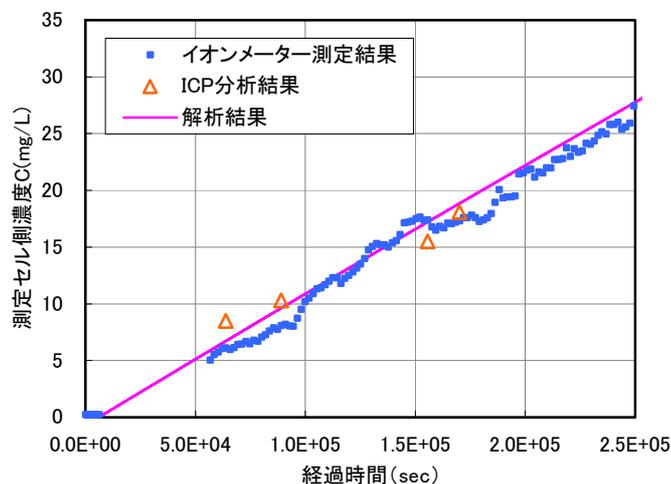


図-4 トレーサー試験中の測定セル側濃度の経時変化 (アクリル試料)
Change in the concentration in the measurement cell (Acrylic sample)

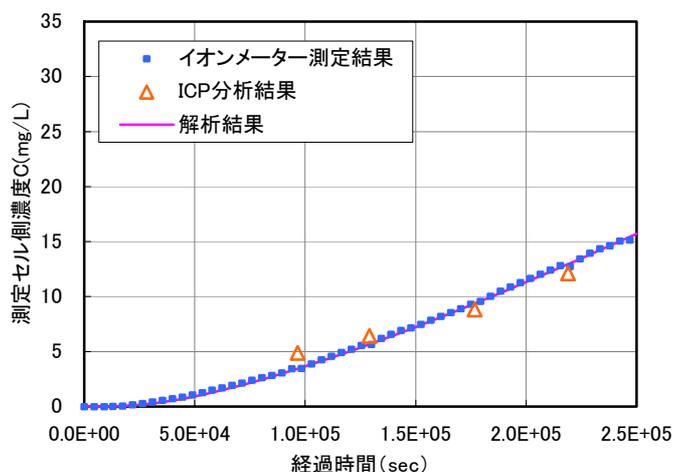


図-5 トレーサー試験中の測定セル側濃度の経時変化 (岩石試料)
Change in the concentration in the measurement cell (Rock sample)

に湾曲しながら上昇していることが分かる。

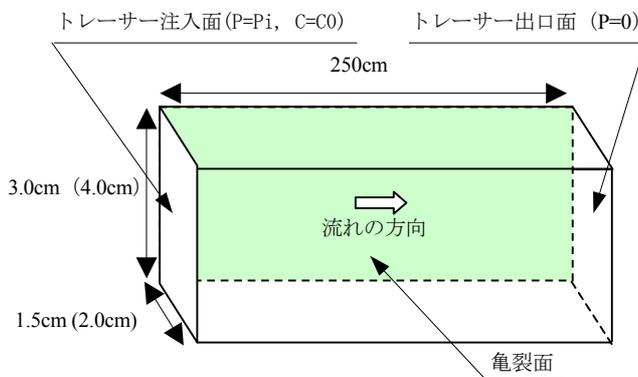
3.5 解析結果

解析は、浸透流解析ならびに移流分散、拡散、吸着、放射性崩壊を考慮した物質移行解析が可能な3次元解析コード (FRAC3DVS) ²⁾ を用いて行った。解析では、トレーサー試験と同様の条件を与えること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および分散係数 (分散長) を求めた。なお、物質移行開口幅は曲線の傾きに、分散長は曲線の立ち上りの部分に影響するので、両者は独立して決定することができる。

解析条件を表-2 に示す。既知パラメータとして与えた水理開口幅、マトリクス部の透水係数、マトリクス部の拡散係数、空隙率は、それぞれ定流量透水試験、トランジェントパルス法による透水試験、透過拡散法による拡散試験、物理試験でそれぞれ事前に別途測定したものをを用いた。

表-2 解析条件一覧
Input parameters

試験ケース	注入流量 (cc/min)	水理開口幅 (mm)	マトリクス部 透水係数 (m/s)	マトリクス部 拡散係数 (m ² /s)	マトリクス部 有効空隙率 (%)
アクリル試料	0.001	0.050	0.00	0.00	0.00
岩石試料	0.001	0.045	5.00E-12	2.50E-11	0.35



上下面：水頭固定境界、側面：不透水境界
図-6 トレーサー試験の解析条件 (岩石試料)
(括弧内の数値は、アクリル試料の数値)
Analytical model (rock sample)

表-3 解析結果
Results of analysis

試験ケース	物質移行開口幅(mm)	縦方向分散長(m)
アクリル試料	0.050	0.001
岩石試料	0.045	0.001

解析メッシュ (図-6) は、岩石試料については、3cm×3cm の正方形断面の中心に、平板亀裂を配置し、亀裂面を挟んで対称としたものである。流れ方向の長さは、分散長よりも十分長くとるため、250cm とした。亀裂面は、面要素でモデル化した。境界条件は、左右面を水頭固定境界、上下側面を不透水境界とした。ここで、試験条件が定流量条件にも関わらず、左右面を水頭固定としたのは、マトリクス部と亀裂部に流れる流量比が未知であるため、解析上、流量を固定できないためである。今回は、透水係数から、マトリクス部への流入量が亀裂に比べて十分小さいと考えられることから、亀裂の透水量係数とトレーサー流量から動水勾配を求め、左右水頭を設定した。

一方、アクリル試料については、図-6 において、試験断面を 4cm×4cm の正方形断面とし、マトリクス部の透水係数、拡散係数を 0 に設定したモデルを用いて解析を行った。

表-3 および図-4、5 中に解析結果を示す。図-4、5 に示すように、アクリル試料ではマトリクス拡散を無視した亀裂内移流分散モデルで、岩石試料ではマトリクス拡散を考慮したモデルで解析結果と測定結果の良好一致が見られた。また、表-2、3 から、トレーサー試験の解析から得られた物質移行開口幅と、事前に実施した透水試験結果から三乗則により求めた水理開口幅は、等しい値を示していることが分かる。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おり、今回の結

果は、この傾向と一致しない。これは、今回の試験では、岩石試料については、再コアリング作業の関係上、密着した亀裂を有する試料を用いており、開口幅の面内不均一性が低かったためと推察される。また、これに関してはアクリル試料についても同様のことが言える。分散長については、一般的に移行経路の 1/10~1/100 の値を示すと言われており、今回の結果はこの傾向とも一致している。

以上より、本手法は亀裂内の移流およびマトリクス拡散を考慮したトレーサー試験手法としての適用性を充分満たしていることが分かった。

4. まとめ

今回、トレーサー試験の測定精度向上を目的として、新しいトレーサー試験手法を開発した。また、同手法を用いたトレーサー試験を実際に行い、本手法の適用性を検討した。その結果、本手法は、単一亀裂試料を対象としたマトリクス拡散を考慮したトレーサー試験方法としての適用性を十分に満たしていることが分かった。今後、さらに異なる岩種の試料について試験を実施し、データの蓄積および適用性の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Ivars Neretniks et al. : "Tracer Movement in a Single Fissure in Granitic Rock : Some Experimental Results and Their Interpretation, Water Resour. Res., 18(4), 1982.
- 2) 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.