

マルチトレーサー試験による亀裂内移流・分散とマトリクス拡散パラメータの評価

大成建設 (株) 正会員 ○熊本 創  
大成建設 (株) 正会員 下茂 道人

1. はじめに

亀裂を含む多孔質岩盤中の物質移行プロセスを考える場合、亀裂の開口幅や分散長に加え、マトリクス部の拡散係数の評価も重要である。一般に、1回の単成分トレーサー試験結果から上記の全てのパラメータを同定することは困難であり、既往の研究<sup>1)</sup>では、1回の試験で拡散係数の異なる数種類のトレーサーを同時に注入する方法(以下、マルチトレーサー試験と呼ぶ)などが提案されている。筆者らは、同試験法により適切にパラメータを同定するためには、ある流量条件を満足する必要があることを示し、その条件設定方法を提案した<sup>2)</sup>。本報では、筆者らが提案した手法の適用性の確認を目的とした室内試験結果について報告する。

2. 試験方法

マルチトレーサー試験は、分子拡散係数  $D^*$  (m<sup>2</sup>/s) の異なる複数種類の混合トレーサーを注入することにより、拡散の効果を変えた複数の破過曲線を一度の試験で取得する方法である。試験では、図-1に示すような一次元マルチトレーサー試験を行った。トレーサーの排出側には、装置内で生じる分散を低減するためにフラッシング機構を設けた。混合トレーサーには、臭化物イオン (Br<sup>-</sup>,  $D^*=2.0 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s) と、ペンタフルオロ安息香酸 (PFBA<sup>1)</sup>,  $D^*=7.6 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s) の2種類の非吸着性物質を用いた。トレーサー濃度はイオンクロマトグラフィー(IC)にて分析した。試験には北海道幌延町に分布する珪藻質泥岩(声問層)を用いた。試料は2つのブロック (L=136mm, W=50mm, H=57mm) に整形し、厚さ 0.1mm のスペーサーを挟んで重ね合わせた単一平行平板亀裂試料とした。表-1に、別途試験により求めた試料の基本的な物性値を示す。

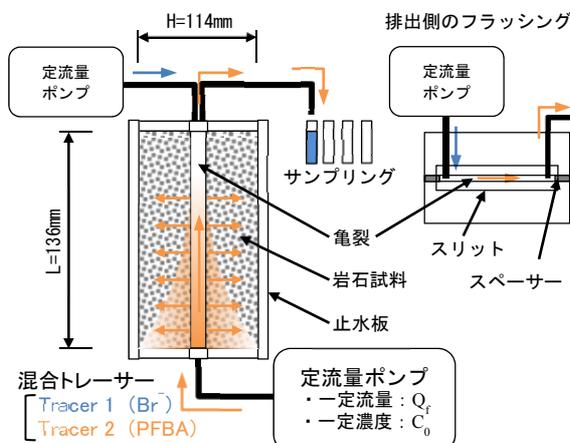


図-1 マルチトレーサー試験の概要

表-1 試料の基本物性

マトリクス部		亀裂部	
拡散係数: $D_m^*$ [m <sup>2</sup> /s]	間隙率* <sup>2</sup>	水理開口幅* <sup>3</sup>	
Br <sup>-</sup>	PFBA	$n_m$ [%]	
		2b <sub>H</sub> [mm]	
5.3E-10	1.7E-10	58	0.1

3. 試験条件

筆者らは、単一亀裂内の移流・分散とマトリクス内の拡散を考慮した Tang の理論解<sup>3)</sup> (式(1))に基づき、マルチトレーサー試験からパラメータを同定する場合に満たすべき流量条件の決定方法を提案している<sup>2)</sup>。

$$\frac{c_f}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{P_e}{2}\right) \int_{\frac{1}{2\sqrt{t}}}^{\infty} \frac{T_0 P_e}{t} \exp\left[-\xi^2 - \frac{P_e^2}{16\xi^2}\right] \cdot 2\text{erfc}\left[\frac{T_0 P_e A / 4\xi^2}{2\sqrt{t - T_0 P_e / 4\xi^2}}\right] d\xi \quad (1)$$

ここに、 $c_f$ は亀裂内の濃度、 $c_0$ はソース濃度、 $t$ は経過時間(s)、 $T_0$ ,  $P_e$ ,  $A$ は、それぞれ亀裂内の滞留時間(s)、ペクレ数(-)、拡散移行に関するパラメータ(s<sup>-1/2</sup>)であり、 $T_0 = L/v_f = 2bWL/Q_f$ ,  $P_e = L/\alpha_L$ ,  $A = n_m \sqrt{D_m}/b$  で表される。ここで、 $v_f$ は亀裂内の実流速(m/s)、 $Q_f$ は注入流量(m<sup>3</sup>/s)、 $2b$ は開口幅(m)、 $\alpha_L$ は縦方向分散長(m)、 $n_m$ はマトリクス部の空隙率(-)、 $D_m$ はマトリクス部の拡散係数(m<sup>2</sup>/s)であり屈曲率  $\tau$  (-)と  $D^*$  (m<sup>2</sup>/s)の積である。L, Wは、それぞれ試料の長さ(m)と幅(m)である。筆者らは、トレーサーの注入流量条件として、式(2)に示す亀裂内の移流による滞留時間  $T_0$  (s)とマトリクス拡散による遅延時間  $T_0^2 A^2$  (s)の比を表す無次元パラメータ  $\alpha$ に閾値を設け、混合トレーサーのうち少なくとも1つの物質について  $\alpha$ が閾値を上回らないような注入流量  $Q_f$ を設定する必要があることを示し

キーワード トレーサー試験, マトリクス拡散, マルチトレーサー

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 TEL 045-814-7237

ている。この条件を満たさない場合、特に開口幅 (2b) の感度が著しく低くなり、同定困難となる (詳細は文献2) を参照)。αの閾値は、破過曲線の分析誤差の程度等から決定されるべき値であるが、今回は、IC分析の精度を考慮して閾値を5として、式(2)から流量条件を決定した。なお、式(2)中のT<sub>0</sub>およびAは、本来、未知パラメータであるため、事前にある程度の範囲を推定する必要がある。今回は、表-1の別途試験結果を参考に算定した。表-2に試験条件を示す。試験は、筆者らの提案した条件を満たすケース (test1: α<5となる条件) と満たさないケース (test2: α>5となる条件) の2ケースとした。なお、フラッシング流量はいずれも注入流量の10倍とした。

$$\alpha = \frac{T_0^2 A^2}{T_0} = \frac{2WLn_m^2 D_m}{bQ_f} < \text{閾値} \quad (2)$$

4. 試験結果

図-2, 3に各ケースの試験結果と式(1)の理論解を用いたフィッティング解析結果との比較を示す。表-3にはパラメータの同定結果を示す。パラメータ同定では、2b, α<sub>L</sub>, D<sub>m</sub>を未知パラメータとし、Br<sup>-</sup>とPFBAの破過曲線を同時に再現可能なパラメータの組合せを求めた。ただし、test2については、2bの感度が低く、同定困難であったため、2bをtest1の同定結果 (2b=0.1mm) で固定し、α<sub>L</sub>とD<sub>m</sub>のみを未知パラメータとした。なお、同定解析には、米国ローレンスバークレー国立研究所開発の逆解析コードiTROUGH2-TRAT<sup>4)</sup>を用いた。図-2, 3より、試験結果と解析結果は良く一致しており、試験結果が、Tangの理論解により適切に表現可能であることが示された。また、表-3より、各パラメータの同定結果は、表-1の別途試験結果と概ね整合的であり、妥当なパラメータが得られていることが示唆される。また、図中の破線は、未知パラメータのうち2bのみを同定結果の0.1倍にした場合の解析結果である。これより、test2は2bの変化に対する曲線の変化がtest1よりも極端に小さく、同定困難であることが分かる。以上より、筆者らの提案した流量条件の重要性が確認された。

5. おわりに

本報では、単一の平行平板亀裂を有する堆積岩試料を対象にマルチトレーサー試験を実施した。その結果、筆者らの提案した流量条件を満たせば、亀裂の開口幅、分散長とマトリクス部の拡散係数をマルチトレーサー試験により評価できることを確認した。

謝辞

本研究のトレーサー試験の実施においては、独立行政法人日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターより岩石試料を提供して頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

1) Callahan, T.J., et. al. : Using multiple experimental methods to determine fracture/matrix interactions and dispersion of nonreactive solutes in saturated volcanic tuff, Water Resour. Res., Vol.36, No.12, pp.3547-3558, 2000. 2) 熊本創, 下茂道人: 単一亀裂を対象としたトレーサー試験による亀裂内移流・分散とマトリクス拡散の評価手法, 土木学会論文集C, Vol. 68, Mo. 3, pp. 535-546, 2012. 3) Tang, D.H., et. al. : Contaminant transport in fractured media : Analytical solution for a single fracture : Water Resour. Res., Vol.17, No.3, pp.555-564, 1981. 4) Zhou, Q. : Software management report for iTROUGH2-TRAT, Version 1.0, 1001-SMR-1.0-00. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA., 2005.

表-2 試験ケースと設定条件

ケース	注入流量 Q <sub>f</sub> [cc/min]	トレーサー濃度 C <sub>0</sub> [mg/L]	無次元パラメータ* α [-]	
test1	0.5	500	Br <sup>-</sup>	5.8
			PFBA	1.9
test2	0.05		Br <sup>-</sup>	58.1
			PFBA	18.7

\* 表-1の別途試験結果よりT<sub>0</sub>とAを推定し、式(2)から算定

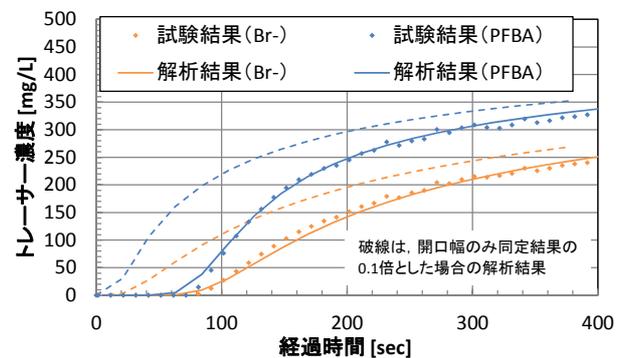


図-2 試験結果と解析結果の比較 (test1)

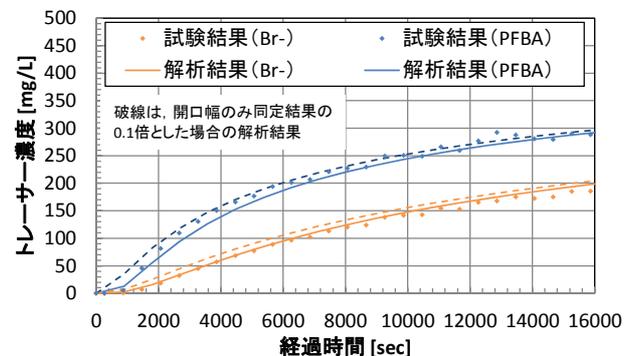


図-3 試験結果と解析結果の比較 (test2)

表-3 パラメータ同定結果

ケース		拡散係数 D <sub>m</sub> [m <sup>2</sup> /s]	開口幅 2b [mm]	分散長 α <sub>L</sub> [mm]	無次元パラメータ*1 α [-]
test1	Br <sup>-</sup>	3.3E-10	0.1	2.8	3.6
	PFBA	1.2E-10			1.4
test2	Br <sup>-</sup>	2.8E-10	0.1 *2	13.6	30.7
	PFBA	1.1E-10			11.7

\*1 上記の同定パラメータより算定

\*2 同定不能につきtest1の値で固定