

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同定

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

1. はじめに

堆積岩などの多孔質な岩盤中の物質移行では、亀裂内の移流・分散だけでなく岩石マトリクス部への拡散も重要である。筆者らはトレーサー試験により、亀裂の開口幅や分散長に加え、マトリクス部の拡散係数を同時に同定する手法を研究している。一般に、1回の単成分トレーサー試験結果から上記のパラメータ全てを同定することは困難であり、マトリクス拡散の効果を変えた複数の試験データを取得する必要がある。その方法として、既往の研究¹⁾では、①流量を変えた試験を繰り返し実施する方法や、②1回の試験で拡散係数の異なるトレーサーを同時に注入する方法（本研究ではマルチトレーサー試験と呼ぶ）が用いられている。熊本・下茂²⁾は、①の方法に関し、パラメータを同定するために必要な流量条件を示した²⁾。本報では、さらに②の方法の流量条件について検討を加える。

2. マルチトレーサー試験

マルチトレーサー試験は、物理化学的性質の異なる複数成分のトレーサーを同時に注入することにより、拡散や収着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。本報では、分子拡散係数の異なる2種類のトレーサーを一定流量、かつ一定濃度で同時に注入する条件を想定する。

3. 試験方法の適用性検討

筆者らは、流量を変えた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を提案している²⁾。今回、マルチトレーサー試験についても、提案した流量条件の妥当性を検討した。検討の方法は、まず、理論解を用い、表-1の条件で破過曲線を計算し、これを仮想試験データとする。求める3つの物質移行パラメータ（亀裂の開口幅、分散長、マトリクス部の拡散係数）を、真値を中心とした1オーダーの範囲で変化させながら理論的な破過曲線と仮想試験データとの残差二乗平均の分布を計算し、その極小値の局所性から解の収束性を検討した。なお、理論解による破過曲線と残差二乗平均の計算には、米国ローレンスバークレー国立研究所開発のiTOUGH2-TRAT³⁾を用いた。理論解は、単一亀裂内の一次元の移流・分散とマトリクス拡散を考慮したTangの理論解⁴⁾（式(1)）を用いた。

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

ここに、 c_f は亀裂内の濃度、 c_0 はソース濃度、 t は時間(s)、 ξ は積分変数、 T_0 、 P_e 、 A は、それぞれ滞留時間(s)、

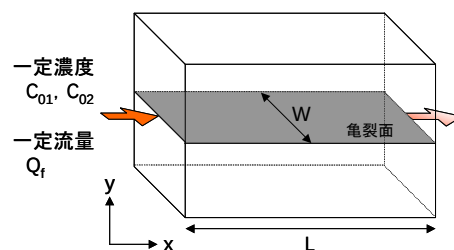
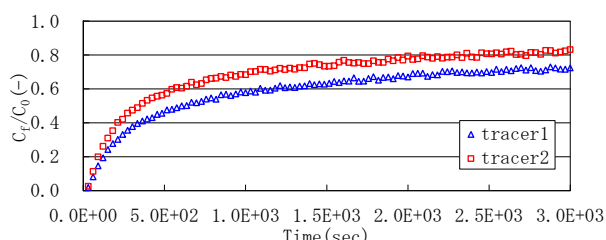


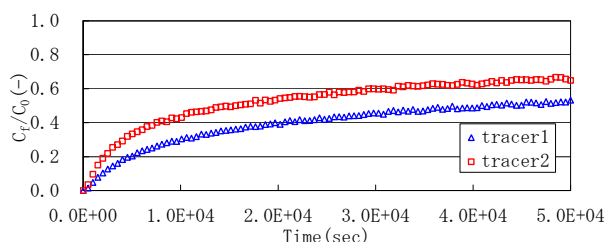
図-1 トレーサー試験の概念

表-1 仮想試験の設定条件 (W=L=5cm)

ケース	Q_f (cc/min)	$2b$ (mm)	α_L (m)	n_m (-)	D_m (m^2/s)	T_0A^2 (-)	
case1	0.05	0.1	0.05	0.3	tracer1	3.0E-10	3.2
	tracer2				1.0E-10	1.1	
case2	0.005				tracer1	3.0E-10	32
					tracer2	1.0E-10	11



(a) case1



(b) case2

図-2 仮想試験データ

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

ペクレ数(-), 拡散移行に関するパラメータ ($s^{-1/2}$) であり, $T_0 = L/v_f = 2bWL/Q_f$, $P_e = L/\alpha_L$, $A = n_m \sqrt{D_m}/b$ と表される. v_f は亀裂内の実流速 (m/s), Q_f は注入流量 (m^3/s), $2b$ は開口幅 (m), α_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^2/s) であり屈曲率 τ (-) と分子拡散係数 D^* (m^2/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 (図-1 参照).

仮想試験は, 流量の異なる 2 ケースとした (表-1). すなわち, 筆者等が提案している流量条件 ($T_0 A^2 < 6$)²⁾ を満たすケース (case1) と, 満たさないケース (case2) とした. ここで, $T_0 A^2$ は, 亀裂内の移流とマトリクス拡散の比を表す無次元パラメータであり, この値が 6 を超えるような流量条件では, 特に破過曲線の形状に対する開口幅の感度が小さくなり, 開口幅を正しく同定できなくなる²⁾. したがって, 開口幅を同定するためには, 少なくとも 1 つの試験データがこの条件を満たす必要がある. マルチトレーサーには, 非収着性のハロゲンイオン (I^- や Br^- など, tracer1) と, それよりも拡散係数が 1/3 程度低い PFBA (Pentafluorobenzoate¹⁾, tracer2) の 2 種類を想定した.

図-3, 4 は, 亀裂の開口幅と分散長, マトリクス部の拡散係数の組み合わせに対する, 理論解による破過曲線と仮想試験データ (図-2) との残差二乗平均 S の分布のコンター図である. コンターの寒色系は, 試験データと解析結果が良く一致していることを示している. 仮想試験の設定パラメータ (図中の白丸で, 真値となる点) の周りに寒色系の明瞭なピークが現れれば, より信頼性の高いパラメータ同定が可能であることを示す. なお, 図中 (a) ~ (e) の D_m は tracer1 の値である. 図-3 より, 提案した流量条件の範囲を満たす case1 では, S の極小値が仮想試験で与えた順解析設定値の近傍にあり (図-3(c)), ある程度正確なパラメータ同定が可能である. 一方, 図-4 の流量条件の範囲を満たさない case2 では, マトリクス部の拡散係数や亀裂の分散長については, 極小値が順解析設定値の近傍にあるが, 図-4(c)を見ると, 開口幅については極小値が一点に定まらず正しく評価できない可能性がある.

4. まとめ

マルチトレーサー試験によって, 堆積岩などの多孔質岩盤中の物質移行で重要となる亀裂の開口幅, 分散長と, マトリクス部の拡散係数を 1 回の試験から同時に同定できるが, その場合, 筆者らが提案した試験の流量条件²⁾に留意する必要がある.

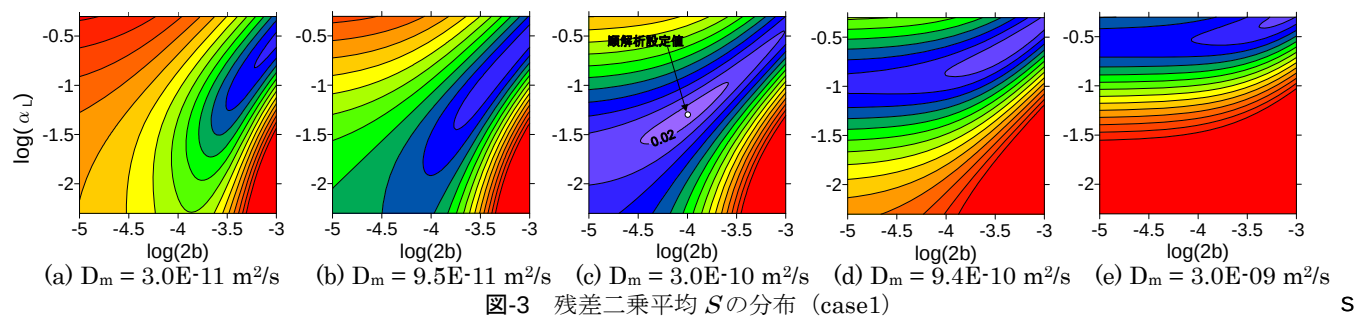


図-3 残差二乗平均 S の分布 (case1)

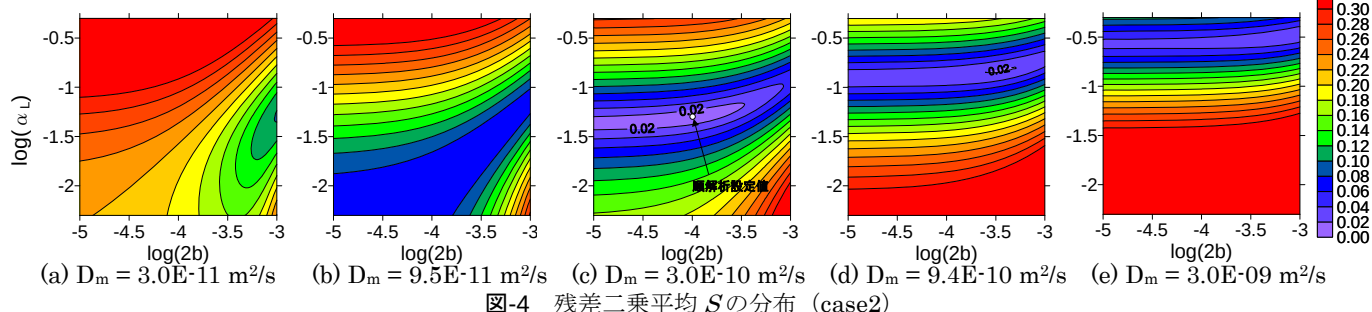


図-4 残差二乗平均 S の分布 (case2)

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一次元トレーサー試験による亀裂内移流・分散およびマトリクス拡散パラメータの評価方法, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2011.
- 3) Zhou, Q. : Software management report for iTOUGH2-TRAT, Version 1.0, 1001-SMR-1.0-00. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA., 2005.
- 4) 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.