

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

熊本 創^{*1}・下茂 道人^{*2}

Keywords : tracer test, sedimentary rock, fracture, matrix diffusion

トレーサー試験, 堆積岩, 亀裂, マトリクス拡散

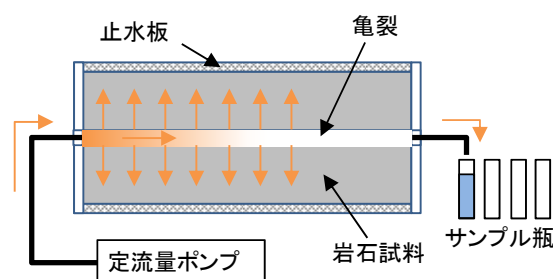
1. はじめに

近年、廃棄物処分場や工場からの汚染漏洩問題など、地下水中の汚染物質の移行挙動の評価が重要となってきた。高レベル放射性廃棄物地層処分では、地下300m以深の岩盤中に埋設処分する方針で検討が進められており、天然バリアとなる岩盤中の物質移行特性を適切に評価することが求められている。

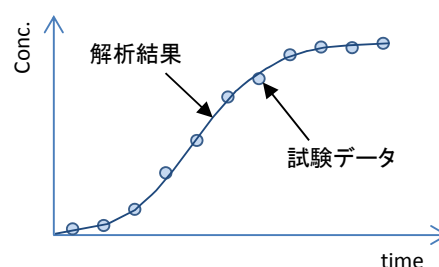
一般に、亀裂の発達した岩盤中の物質移行現象は、亀裂内の移流・分散が支配的となるが、亀裂内の流速が遅い場合や、岩石基質部（マトリクス部）の空隙率の大きい岩盤を対象とした場合は、亀裂からマトリクス部への拡散（マトリクス拡散）による遅延効果の影響を受けやすくなる^{1), 2)}。亀裂内の移流・分散やマトリクス拡散は、それぞれ亀裂内の実流速や分散係数、マトリクス部の空隙率や拡散係数などのパラメータによって決定付けらる。これらのパラメータは、一般に、原位置や室内においてトレーサー試験を実施し、試験で取得された濃度－時間曲線（破過曲線）と、支配方程式の解とのマッチングによって評価される（図－1）。しかし、亀裂内で生じる分散現象とマトリクス拡散現象は、破過曲線の形状に対して似通った影響を与えるため、一つの破過曲線から亀裂内の移流・分散現象、とマトリクス拡散現象の影響を分離して、それぞれに関連するパラメータを一度に決定することは困難である場合が多い。最近では、トレーサー試験結果から上記の各パラメータを適切に評価する方法として、同一の試料を対象にトレーサーの注入流量を変えた複数回の試験を実施する方法（multiple flow rate test, 本報ではマルチ流量試験と呼ぶ）や、拡散特性の異なる数種

類のトレーサーを一度に注入する方法（multiple tracer test：本報ではマルチトレーサー試験と呼ぶ）などにより、マトリクス拡散の影響の異なる複数の破過曲線を取得する方法が提案され、実際の室内や原位置試験に適用されている³⁾。しかし、既往の研究では、これらの手法の妥当性について十分な議論がなされておらず、試験の適用範囲や適切な試験条件の設定方法なども示されていない。

そこで、本報告では、一次元の亀裂内移流分散とマトリクス拡散を考慮した支配方程式の理論解⁴⁾を用いた数値実験により、マルチトレーサー試験から、亀裂内の移流・分散、およびマトリクス拡散に関わる3つのパラメータを一度に評価する方法の妥当性を検証するとともに、各パラメータを一度に評価可能な、適切な試験条件の設定方法を提案する。



(a) 装置レイアウトの例



(b) 試験結果の評価の概念

図－1 一次元トレーサー試験の概要

Fig.1 Basic concept of tracer test

*1 技術センター土木技術研究所地盤・岩盤研究室

*2 技術センター土木技術研究所

2. トレーサー試験結果の評価方法

2.1 支配方程式と理論解

マトリクス拡散を考慮した単一亀裂中の一次元の物質移行現象は、図-2 に示すような平行平板亀裂中の移流・分散現象と、亀裂と直行する方向へのマトリクス拡散現象を考慮した概念モデルによって近似され、以下のような支配方程式で表現することができる。

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} + v_f \frac{\partial c_f}{\partial x} - D_f \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} - \frac{n_m D_m}{b} \frac{\partial c_m}{\partial y} \bigg|_{y=b} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_m}{\partial t} - D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

ここに、 x は亀裂内の流れ方向の座標、 y は亀裂と直行する方向の座標、 c_f は亀裂内の溶質濃度、 c_m はマトリクス内の溶質濃度、 t は時間、 v_f は亀裂内の実流速、 n_m はマトリクス部の空隙率、 b は亀裂開口幅の 1/2 ($2b$: 亀裂開口幅) を示す。 D_f および D_m は、それぞれ亀裂内の水理学的分散係数とマトリクス部の拡散係数（マトリクス拡散係数）であり、それぞれ $D_f = \alpha_L v_f$ 、 $D_m = \tau D_d$ で表される。ここで、 α_L は亀裂内の縦方向分散長、 D_d は自由水中における溶質の分子拡散係数、 τ はマトリクス部の屈曲度⁵⁾を示す。

Tang 等⁴⁾は、式(1)および(2)について、 $c_f(0, t) = c_0$ 、 $c_f(\infty, t) = 0$ 、 $c_f(x, 0) = 0$ 、 $c_m(x, b, t) = c_f(x, t)$ 、 $c_m(x, \infty, t) = 0$ 、 $c_m(x, y, 0) = 0$ の初期条件、境界条件を仮定し、式(3)に示す理論解を導出している。

$$\frac{c_f}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{P_e}{2}\right) \int_l^\infty \exp\left[-\xi^2 - \frac{P_e^2}{16\xi^2}\right] \cdot 2\operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2T}\right] d\xi \quad (3)$$

ここに、 c_0 はソース濃度、 ξ は積分変数を示す。また、 Y 、 T および l は、以下の式で表される。

$$Y = \frac{T_0 P_e A}{4\xi^2} \quad (4)$$

$$T = \sqrt{t - \frac{T_0 P_e}{4\xi^2}} \quad (5)$$

$$l = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_0 P_e}{t}} \quad (6)$$

ここに、 T_0 は平均滞留時間、 P_e はペクレ数、 A はマトリクス拡散による移行パラメータであり、それぞれ以下のように表される。

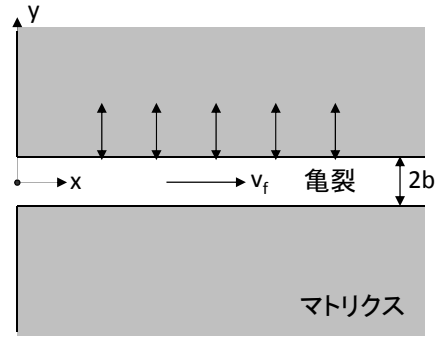


図-2 亀裂内移流・分散とマトリクス拡散の概念モデル
Fig.2 Conceptual model of advection – dispersion in fracture and matrix diffusion

$$T_0 = \frac{x}{v_f} \quad (7)$$

$$P_e = \frac{v_f x}{D_f} = \frac{x}{\alpha_L} \quad (8)$$

$$A = \frac{n_m}{b} \sqrt{D_m} \quad (9)$$

2.2 パラメータの評価方法

式(3)～(6)に示すように、単一亀裂内のトレーサー濃度の変化は、移流、分散およびマトリクス拡散に関わる 3 パラメータ (T_0 、 P_e 、 A) によって決定付けられる。トレーサー試験結果の評価では、破過曲線のマッチングにより、 T_0 、 P_e 、 A が求まれば、式(7)～(9)から、亀裂内の実流速 v_f 、開口幅 $2b$ 、縦方向分散長 α_L 、およびマトリクス部の拡散係数 D_m 、空隙率 n_m などが算定できる。また、トレーサーの注入流量 Q_f を一定とした条件では、亀裂内の実流速 v_f と開口幅 $2b$ の間に式(10)に示すような関係が成り立ち、これを式(7)に代入すると、平均滞留時間 T_0 は式(11)となる。

$$v_f = \frac{Q_f}{2bW} \quad (10)$$

$$T_0 = \frac{2bWx}{Q_f} \quad (11)$$

ここに、 W は亀裂の幅である。 W と Q_f を既知パラメータとすれば、式(11)より、平均滞留時間 T_0 から開口幅 $2b$ を求めることができる。また、マトリクス拡散係数 D_m は、式(9)に、式(11)から算定された開口幅 $2b$ と空隙率 n_m を代入して求めることができる。この場合、空隙率 n_m もマトリクス拡散係数 D_m と同様に未知パラメータであるが、通常は、コア試料を利用した室内試験によって求められる値を既知パラメータとして代用することが多い。本報告では、空隙率は既知パラメータと

して取り扱う。

以上より、トレーサー試験結果の評価では、破過曲線のマッチングによって求められた3パラメータ (T_0 , P_e , A) から、式(11), (8), (9)により、亀裂の開口幅 $2b$, 縦方向分散長 α_L , マトリクス拡散係数 D_m の3パラメータを決定することに帰着する。

3. マルチトレーサー試験の数値実験

マルチトレーサー試験により、3つの物質移行パラメータ ($2b$, α_L , D_m) を同定する際の解の妥当性を検証するために数値実験を行った。検討の方法は、まず、式(3)の理論解を用いて、表-1の条件で破過曲線を計算し、これを仮想的なトレーサー試験データとする(図-3)。次に、求める3つのパラメータを順次変化させながら計算した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、残差の収束性から解の妥当性を検討した。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-TRAT⁶⁾を用いた。iTOUGH2-TRAT は、トレーサー試験結果の評価を目的として開発された各種理論解による逆解析コードである。

3.1 仮想トレーサー試験

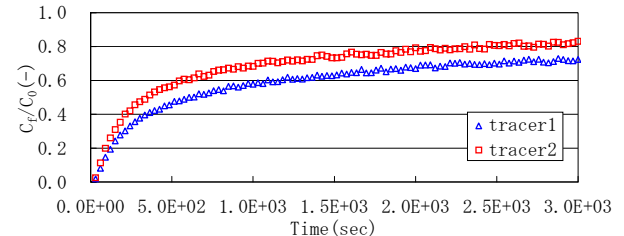
仮想トレーサー試験は、注入流量 Q_f の異なる2ケースを設定し、それぞれの流量条件でマルチトレーサー試験を実施する場合を想定した(表-1)。マルチトレーサーには、非収着性のハロゲンイオン (I⁻や Br⁻など、表-1中の tracer1) と、それよりも分子拡散係数が1/3程度低い PFBA³⁾ (ペンタフルオロ安息香酸、表-1中の tracer2) の2種類を想定した。また、試料の大きさ(試料長 L と亀裂幅 W) はコア試料を用いた室内トレーサー試験を想定して $L=W=5\text{cm}$ とした。図-3に、仮想トレーサー試験データを示す。同データは、実際の試験を想定して、理論解から求めた破過曲線に、 $\pm 2\%$ の測定誤差を付加したものである。

3.2 パラメータ同定における解の妥当性の確認

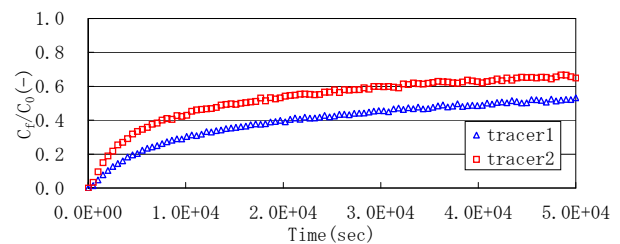
図-3の仮想トレーサー試験結果から、3つのパラメータ ($2b$, α_L , D_m) の組合わせを逆解析的に求める際の解の妥当性を確認する。図-4, 図-5は、3つのパラメータの組合わせを、真値(表-1の仮想試験の設定パラメータ)を中心に1オーダーの範囲で順次変化させ場合の破過曲線と、仮想試験データ(図-3)との残差二乗平均 S の分布のコンター図である。なお、 S

表-1 仮想トレーサー試験の設定条件

ケース	Q _f (cc/min)	2b (mm)	α _L (m)	n _m (-)	D _m (m ² /s)	α (-)	
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) Case 1



(b) Case 2

図-3 仮想トレーサー試験データ

Fig.3 Results of virtual tracer tests

は以下の式(12)から算定した。

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (C_i^* - C_i)^2} \quad (12)$$

コンターの寒色系は、仮想試験データと解析結果が良く一致していることを示す。したがって、真値(図中の白丸)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、図の(a)~(e)の D_m は tracer1 の値である。

図-4より、トレーサーの注入流量の大きい case1 は、 S の極小値が真値の近傍にあり(図-4(c))、ある程度正確なパラメータを同定できることが分かる。一方、図-5の注入流量の小さい case2 は、マトリクス拡散係数や分散長は、極小値が真値の近傍にあるが、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ことが分かる(図-5(c))。

図-6に、仮想トレーサー試験の tracer1 の条件のうち開口幅のみを変化させた場合の破過曲線を示す。これより、開口幅を小さくすると濃度上昇が速くなるが、ある範囲から開口幅を変化させても曲線形状が変化しなくなることが分かる。また、同図より、 S の収束性が高い case1 は、曲線形状が変化する範囲にあるが、case2 は、変化しない範囲にあるため、 S の収束性が低くなったと考えられる。

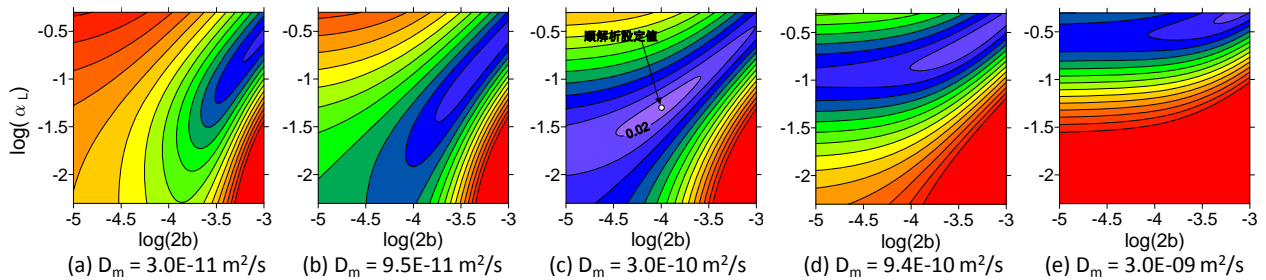

図-4 残差二乗平均 S の分布 (case1)

Fig.4 Distribution of error root mean square

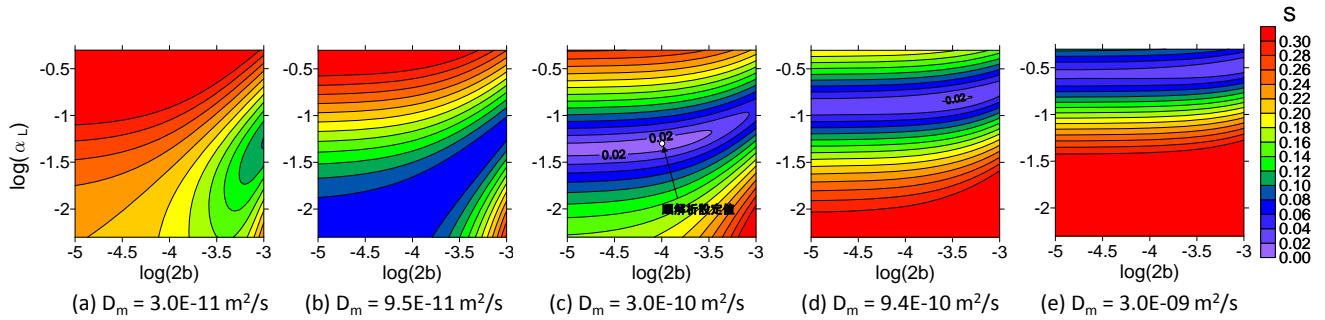

図-5 残差二乗平均 S の分布 (case2)

Fig.5 Distribution of error root mean square

以上より、一次元トレーサー試験から、亀裂内の移流・分散、およびマトリクス拡散に関わる3パラメータを一度に評価するためには、マルチトレーサー試験が有効であるが、開口幅の感度が十分に確保されるような流量条件を設定する必要があることが示唆された。

4. 試験条件と開口幅の感度の関係

ここでは、理論解を用いて、試験の流量条件と開口幅の感度の関係について説明し、開口幅の同定が可能となる流量条件を決定するための理論式を導出する。

まずは、簡単のために、亀裂内の移流とマトリクス拡散のみを考慮した（分散を無視した）理論解を用いて説明し、その後、分散を考慮した理論解を用いた説明を試みる。

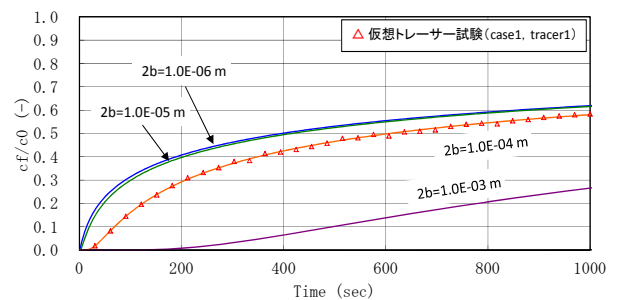
4.1 亀裂内の分散を無視した理論解による説明

4.1.1 亀裂内の分散を無視した理論解

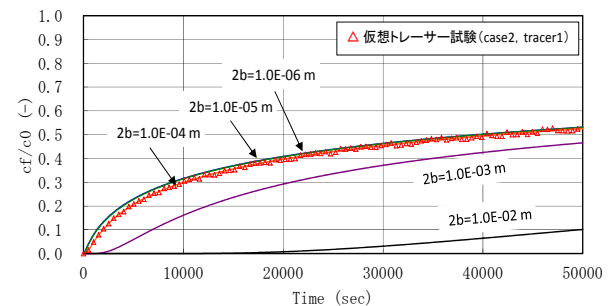
式(1), (2)において、亀裂内の分散を無視した支配方程式の理論解は、次式のように表される⁴⁾。

$$\frac{c_f}{c_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{T_0 A}{2\sqrt{t-T_0}}\right) \quad (13)$$

図-7 に、同式から計算した破過曲線の例を示す。分散を無視した場合、亀裂内の濃度は、マトリクス拡散による遅延の影響を受け、時間 $t=T_0$ から徐々に上昇する。Jakob (1997)⁷⁾は、亀裂内の相対濃度 c_f/c_0 が 0.5 と



(a) Case 1



(b) Case 2

図-6 開口幅の変化と破過曲線の関係

Fig.6 Relation between aperture variance and breakthrough curve

なる時間 $t_{0.5}$ を見掛け上の破過時間 (solute breakthrough time) とし、式(13)の相補誤差関数の逆算から、以下のような近似式を示している。

$$t_{0.5} = T_0 + 1.17 T_0^2 A^2 \quad (14)$$

ここに、 $T_0^2 A^2$ は、マトリクス拡散による遅延時間を表すパラメータであり、以下のように表される。

$$T_0^2 A^2 = \frac{4W^2 L^2 n_m^2 D_m}{Q_f^2} \quad (15)$$

すなわち、見掛け破過時間 $t_{0.5}$ は、移流による滞留時間 T_0 にマトリクス拡散による遅延時間 $1.1T_0^2 A^2$ を加えたものである。なお、式(14)中の 1.1 は、相補誤差関数の逆算から近似される定数であり、着目する濃度毎に簡単に求めることができる（たとえば、 c_f/c_0 が 0.3 になる時間 $t_{0.3}$ では 0.5 となる）。

4.1.2 理論解の無次元化

開口幅の感度と流量条件の関係について、より一般化した形で議論するために理論解の無次元化を行う。式(13)の理論解について、時間 t を $T_0^2 A^2$ で正規化すると、以下のように表すことができる。

$$\frac{c_f}{c_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{t^* - 1/\alpha}}\right) \quad (16)$$

ここに、 t^* は正規化時間（ $=t/T_0^2 A^2$ ）である。また、 α は、 T_0 と $T_0^2 A^2$ の比を表す無次元パラメータであり、以下のように表される。

$$\alpha = \frac{T_0^2 A^2}{T_0} = T_0 A^2 = \frac{2WLn_m^2 D_m}{Q_f b} \quad (17)$$

以上より、時間 t を $T_0^2 A^2$ で正規化すると、パラメータが一つ減り、破過曲線の形状は無次元パラメータ α のみによって決まることが分かる。

4.1.3 注入流量と開口幅の感度の関係

図-8 は、開口幅を 2 倍変化させた場合の破過曲線の変化を示す。なお、同図は、仮想トレーサー試験のパラメータ（表-1 の tracer1、ただし分散長は除く）を用いて計算した $t=t_{0.5}$ までの破過曲線である。これより、注入流量 Q_f の大きい case1 は、同じ 2 倍の開口幅の変化に対する破過曲線の変化が case2 よりも大きい。この違いは、上記の T_0 と $T_0^2 A^2$ の比と関連づけて以下のように説明できる。

式(11)、(15)より、 Q_f は $T_0 \propto 1/Q_f$ 、 $T_0^2 A^2 \propto 1/Q_f^2$ の関係にあるため、 Q_f が変わると、図-8 のように T_0 と $T_0^2 A^2$ の比が変化する。また、開口幅 $2b$ は $T_0 \propto 2b$ の関係にあり、 $T_0^2 A^2$ とは無関係であるため、開口幅の変化は、図のように T_0 の変化に相当する曲線の時間軸方向への平行移動として現れる。注入流量の小さい case2 は、着目する時間 $t_{0.5}$ に対して T_0 が極端に小さいため（すなわち $T_0 \ll T_0^2 A^2$ であるため）、開口幅の変化に対する曲線の変化量が相対的に小さくなったと考えられる。

図-9 は、図-8 の時間軸を正規化したものである。

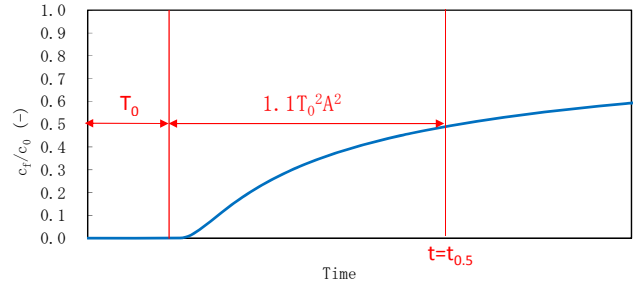
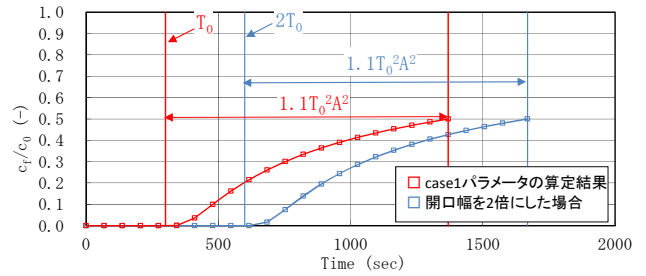
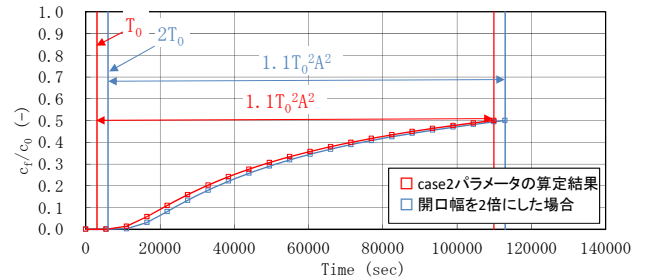


図-7 分散を無視した場合の破過曲線

Fig.7 Breakthrough curve from advection-matrix diffusion model



(a) Case 1



(b) Case 2

図-8 開口幅の変化と破過曲線の関係

Fig.8 Relation between aperture variance and breakthrough curve

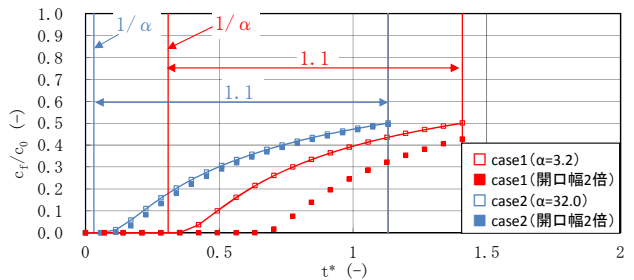


図-9 開口幅の変化と破過曲線の関係 (t 正規化)

Fig.9 Relation between aperture variance and breakthrough curve (normalized time axis)

正規化プロット上では、時間 $t_{0.5}$ に対するマトリクス拡散による遅延時間は 1.1 で一定となり、滞留時間は $1/\alpha$ で表される。同図より、開口幅の変化に対する破過曲線の変化量は、無次元パラメータ α が小さいほど大きくなっており、開口幅の感度を α との関係で整理できることを示唆している。

4.1.4 開口幅の感度の指標の提案

以上より、開口幅の感度は、 T_0 と $T_0^2 A^2$ の比を表す無次元パラメータ α に依存することが示唆された。ここ

では、この関係に着目し、試験の適切な条件設定のための、以下のような新たな指標を提案する。

$$R = (c_1 - c_2) / c_1 \times 100 \quad \% \quad (18)$$

ここに、 R は、試験の完了時間 $t=t_{end}$ における、開口幅の γ 倍の変化に対する濃度の変化率であり、開口幅の感度の一つの指標と考えられる値である（図-10 を参照）。 c_1 は、 $t=t_{end}$ における亀裂内の相対濃度であり、図-10 のように、 $c_1/c_0 = 0.5$ となる時間で試験を終了する場合は $c_1=0.5$ となり、最終時間は $t_{end}=t_{0.5}$ となる。また、 c_2 は、開口幅を γ 倍大きくした場合の、同じ時間 $t=t_{end}$ の相対濃度であり、次式で表される。

$$c_2 = \operatorname{erfc} \left(\frac{T_0 A}{2\sqrt{t_{end} - \gamma T_0}} \right) \quad (19)$$

式(19)は、 $t_{end}=t_{0.5}$ とした場合は、式(14)、(17)から、以下のような α と γ の関数で表せる。

$$c_2 = \operatorname{erfc} \left(\frac{T_0 A}{2\sqrt{t_{0.5} - \gamma T_0}} \right) = \operatorname{erfc} \left(\frac{\alpha}{2\sqrt{1.1\alpha + 1 - \gamma}} \right) \quad (20)$$

式(18)、(20)より、試験の完了時間 $t_{end}=t_{0.5}$ における濃度変化率 R を無次元パラメータ α と γ の関数で表せることが示された。なお、ここでは、例として $t_{end}=t_{0.5}$ の場合を示したが、着目する時間が変わっても同様に R を α と γ の関数で表すことができる。

図-11 は、式(18)と式(20)から求めた、開口幅の変化率 $\gamma=2.0 \sim 5.0$ に対する R と α の関係である。これより、濃度変化率 R は、 α が小さくなるほど大きくなり、たとえば、 α が 10 以下の範囲であれば、2 倍以上の開口幅の変化に対して、数%以上の感度が得られることが分かる。また、前章で残差二乗平均 S の収束性が高かった case1 の仮想トレーサ試験は、 $\alpha=3.2$ であり（表-1）、図-11 では 10%以上の感度が得られる範囲にある。一方、 S の収束性が低かった case2 は、 $\alpha=32.0$ であり、非常に感度が低い範囲にあることが分かる。

以上のことから、開口幅を適切に評価するためには、 α が小さくなるような条件で試験を実施する必要があると言える。

4.2 亀裂内の分散を考慮した場合

ここまで、亀裂内の分散を無視した理論解から、開口幅の感度が α に依存し、開口幅を適切に評価するためには、 α が小さくなるような条件で試験を実施する必要があることを示した。ここでは、亀裂内の分散を考慮した場合について、同様の検討を行う。

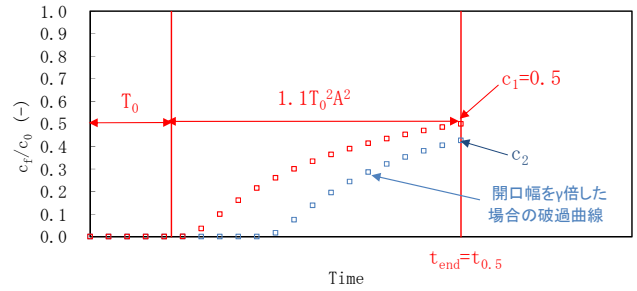


図-10 開口幅の感度の指標 R の概念 ($t_{end}=t_{0.5}$)

Fig.10 Concept of aperture sensitivity indicator R

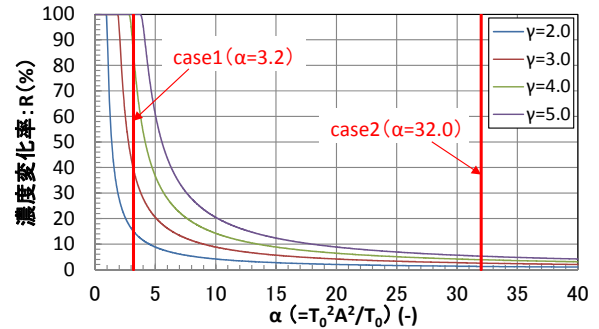


図-11 濃度変化率 R と α の関係 ($t_{end}=t_{0.5}$)

Fig.11 Relation between aperture sensitivity indicator R and α

4.2.1 理論解の無次元化

検討に先立ち、4.1.2 項と同様の無次元化を行う。

式(3)の理論解について、時間 t を $T_0^2A^2$ で正規化すると、式(3)中の Y 、 T は、以下の Y' 、 T' に置き換えられ、 l は、式(23)のように変形できる。

$$Y' = \frac{P_e}{4\xi^2} \quad (21)$$

$$T' = \sqrt{t^* - \frac{P_e}{4\xi^2\alpha}} \quad (22)$$

$$l = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_e/\alpha}{t^*}} \quad (23)$$

すなわち、分散を考慮した場合でも、時間 t を $T_0^2A^2$ で正規化すると、パラメータが一つ減り、破過曲線の形状は α と P_e によって決まることが分かる。

図-12 は、図-6 の時間軸を正規化したものである。図-6 は、いずれも同じ $P_e=1$ であるため、各曲線の違いは α のみである。図-12 より、開口幅の感度は、 α が小さいほど高くなり、ペクレ数が同じであれば、分散を無視した場合と同様に α との関係で整理できることを示唆している。

4.2.2 濃度変化率 R と α の関係

以上より、開口幅の感度は、分散を無視した場合と同様に無次元パラメータ α に依存する可能性があることが示された。ここでは、亀裂内の分散を考慮した場

合の濃度変化率 R と α の関係を導出し、試験条件決定の指標としての適用性を検討する。

分散を考慮した場合、式(18)中の c_1 は、 $t_{\text{end}}=t_{0.5}$ とすると、式(3)～式(6)と式(14)から、次式のような α と P_e の関数で表される。

$$c_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{P_e}{2}\right) \int_{l_{0.5}}^{\infty} \exp\left[-\xi^2 - \frac{P_e^2}{16\xi^2}\right] \cdot 2\text{erfc}\left[\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\alpha P_e^2}{1.1\alpha + 1 - P_e/4\xi^2}}\right] d\xi \quad (24)$$

$$l_{0.5} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{P_e}{1.1\alpha + 1}} \quad (25)$$

また、 c_2 は、 α と P_e と γ の関数として、次式のように表される。

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{P_e}{2}\right) \int_{l_{0.5}^{\gamma}}^{\infty} \exp\left[-\xi^2 - \frac{P_e^2}{16\xi^2}\right] \cdot 2\text{erfc}\left[\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\alpha P_e^2}{1.1\alpha + 1 - \gamma P_e/4\xi^2}}\right] d\xi \quad (26)$$

$$l_{0.5}^{\gamma} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\gamma P_e}{1.1\alpha + 1}} \quad (27)$$

以上より、分散を考慮した場合の濃度変化率 R は、式(18)と式(24)～式(27)から、 α と P_e と γ の関数で表されることが示された。

図-13 には、例として、開口幅の変化率 $\gamma=2.0$ とした場合の濃度変化率 R と α の関係を示す。なお、同図には、 $P_e=1, 10, 100$ の3ケースと、比較のため、分散を無視したケース（図-11 の $\gamma=2.0$ ）を示した。これより、濃度変化率 R は、分散を無視した場合と同様に α が小さくなるほど大きくなる。また、分散の小さい場合（ $P_e=100$ の場合）は、分散を無視した場合とほぼ同等の濃度変化率となっているが、ペクレ数が小さくなるにつれて R が低くなることが分かる。これは、図-14 に示すように、分散が大きくなると、着目する時間 $t=t_{0.5}$ における破過曲線の傾きが小さくなり、同じ T_0 の変化に相当する曲線の平行移動量に対して、濃度変化量（ c_1-c_2 ）が小さくなることに起因している。

図-13 中には、前章の仮想トレーサー試験の R と α の関係を示した。仮想トレーサー試験は、両ケースとも $P_e=1$ である（表-1）。図より、残差二乗平均 S の収束性が高かった case1 の仮想トレーサー試験は、5%程度の感度が得られる範囲にあるが、case2 は、感度が非常に低い範囲にあることが分かる。すなわち、亀裂内

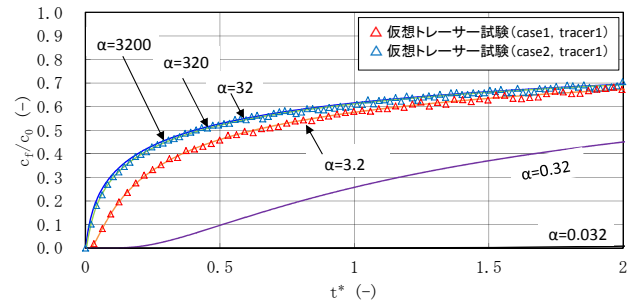


図-12 α の変化と破過曲線の関係（ t 正規化）

Fig.12 Relation between α and breakthrough curve

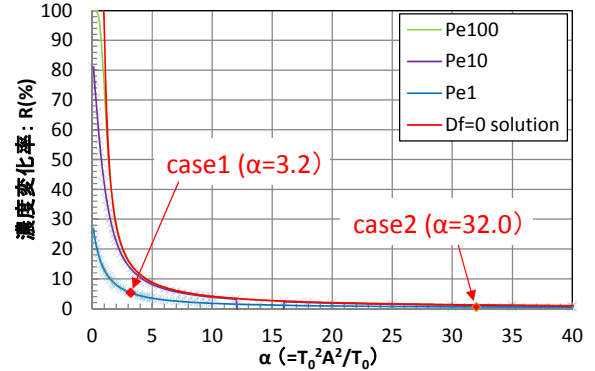


図-13 濃度変化率 R と α の関係（分散考慮、 $t_{\text{end}}=t_{0.5}$ ）

Fig.13 Relation between aperture sensitivity indicator R and α

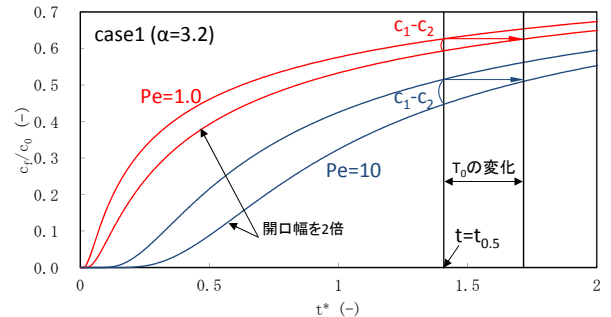


図-14 ペクレ数と破過曲線の変化量の関係

Fig.14 Relation between Pe and breakthrough curve variation

の分散を考慮した場合でも、開口幅を適切に評価するためには、 α が小さくなるような条件で試験を実施する必要があると言える。

5. 試験の条件設定方法の提案

以上の知見に基づき、トレーサー試験を実施する際の適切な試験条件の設定方法を提案する。

トレーサー試験では、試験スケールは既知条件であることが多く、決定すべき条件としては、トレーサーの注入流量 Q_f と、試験の実施期間 t_{end} である。これらの条件は、通常、対象とする場の水理地質特性を考慮した上で、注入ポンプや濃度センサーなどの装置の性能に関わる制約や、試験に必要な時間やコストなどの

制約に基づいて決定されることが多い。しかし、本報告のように、亀裂とマトリクスの相互作用を考慮した試験を行う場合は、前述のようなパラメータの感度に関わる新たな条件を加えて検討する必要がある。本報告では、以下のような条件設定方法を提案する。

上述のように、開口幅を適切に評価するためには、 T_0 と $T_0^2 A^2$ の比を表す無次元パラメータ α の範囲を考慮した試験条件を設定する必要がある。そこで、本報告では、図-13の濃度変化率 R と α の関係を用いた方法を提案する。すなわち、濃度センサーの精度などから、開口幅の同定に必要な濃度変化率 R を決定し、図-13の R と α の関係から、 α の閾値を決定すれば（たとえば、 $\alpha < 5$ など）、式(17)から適切な流量条件求めることができる。ただし、式(17)中の T_0 や A 、また、分散を考慮した場合の P_e は、本来は未知パラメータであるため、透水試験や拡散試験などの他の調査情報や既往の研究成果などを参考に、ある程度の範囲を事前に推定しておく必要がある。

また、図-13の関係図は、上記のような試験計画時の条件検討だけでなく、既に実施された試験の妥当性の検証にも用いることができる。すなわち、試験で求めたパラメータと試験条件から α を算定し、図-13と比較すれば、その試験が、開口幅の感度を有する条件で実施されたかどうかを確認することができる。

なお、 R と α の関係は、着目する時間（すなわち、試験の実施期間 t_{end} ）によっても変わる。図-13は、一つの実用的な例として $t_{end}=t_{0.5}$ の場合を示したが、他の制約条件などから、この条件での試験が困難となるような場合は、試験期間 t_{end} を変えた関係図を作成して、同様の検討を行うことも可能である。

6. おわりに

本報告では、地下水汚染問題への対応や放射性廃棄物地層処分の安全性評価などで重要となる岩盤の物質移行パラメータの評価手法の確立を目的とした検討を

行った。具体的には、理論解を用いた数値実験により、トレーサー試験から亀裂開口幅 $2b$ 、亀裂内の分散長 α_L 、マトリクス拡散係数 D_m の3パラメータを一度に評価するためのマルチトレーサー試験の適用性を検証した。その結果、試験の流量条件によっては、特に開口幅の感度が著しく低い場合があり、適切に評価できない可能性があることを示した。また、開口幅の感度の指標として、新たに濃度変化率 R を提案し、 R と無次元パラメータ α の関係から、開口幅を適切に評価できるような試験条件を決定できることを示した。

今後は、実際の試験を通して、提案した手法の妥当性を検証する予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、米国ローレンスバークレー国立研究所開発のiTOUGH2-TRATを使用させて頂き、開発者であるQuanlin Zhou博士には有益な御助言を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Neretnieks, I. : Diffusion in the rock matrix : An important factor in radionuclide retardation?, J. Geophys. Res., 85, 1980.
- 2) Grisak, G. E., et al.: Solute transport through fractured media 1. The effect of matrix diffusion : Water Resour. Res., 16, 1980.
- 3) たとえば 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., 36, 2000.
- 4) Tang, D.H., et al.: Contaminant transport in fractured media : Analytical solution for a single fracture: Water Resour. Res., 17, 1981.
- 5) Bear, J. : Dynamics of fluids in porous media, New York, 1972.
- 6) Zhou, Q. : Software management report for iTOUGH2-TRAT, Version 1.0, LBNL, Berkeley, CA., 2005.
- 7) Jakob, A., Modelling solute transport using the double porous medium approach. In: Grenthe, I., Puigdomenech, I. (Eds.), Modelling in Aquatic Chemistry. OECD/NEA, Paris, France., 1997.