

飽和砂中の溶質輸送における有効間隙および分散特性の評価

東海大学大学院 学生会員 劉 海成
 東海大学大学院 学生会員 乙茂内 康史
 東海大学工学部 正会員 本間 重雄

1. はじめに

土中の溶質輸送においては移動可能な自由水が占める有効間隙部分で移流・分散現象が生じるため、有効間隙率の大きさを定量的に把握することが重要である。本研究では、粒径および粒度分布の異なる砂について非吸着性塩化物イオン溶液によるカラム試験を実施し、累積流出間隙体積に基づく破過曲線の形状から有効間隙率を求める方法について検討した。また、破過曲線の後半で観察されるテーリング現象について、自由水部分から不動水部分への溶質移動を考慮した粒子追跡法による輸送シミュレーションを行い、物質移動係数の大きさについて検討した。

2. 実験概要

実験装置は図-1に示す内径3cm、長さ50cmの鉛直カラムと送液定量ポンプで構成される。カラム上下端にはガラスビーズフィルターを設置し、内壁には豊浦砂を貼り付けて水みちの発生を防止した。このカラム内に図-1中の表に示す平均粒径の異なる3種類の均一砂(No.1,2,3)およびそれらの混合砂(No.4)を一定密度で充填し、カラム下端より蒸留水を供給して試料を完全飽和させた後、原液濃度 1000mg/L の塩化物イオン溶液を浸透させた。カラム上端から排出される溶液の濃度をイオンメータ(電気化学計器 IOL-40 型)を用いて測定した。なお、排出液の濃度変化は時間経過として追わず、試料の間隙体積 V_V に対する累積排出流量 q の比で定義される累積流出間隙体積 V_p の変化として把握した。

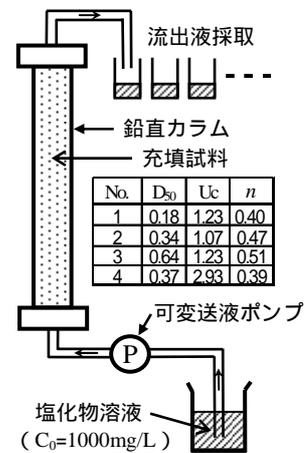


図-1 実験装置

3. 有効間隙率の評価

実験状況に対応する一次元移流分散方程式の V_p に基づく解析解は次式で与えられる¹⁾。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{P_e} (1 - V_p / S_e)}{2 \sqrt{V_p / S_e}} \right) + \frac{1}{2} \exp(P_e) \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{P_e} (1 + V_p / S_e)}{2 \sqrt{V_p / S_e}} \right) \quad (1)$$

ここに、 $P_e = v_e L / D_L$ はカラム長を特性長とする動的ペクレ数、 v_e は自由水の実流速、 D_L は流れ方向分散係数である。また、 S_e は全間隙体積に占める自由水部分の体積割合で $S_e = n_e / n$ で与えられる(図-2)。有効間隙率 n_e は、 V_p に関する実験破過曲線に(1)式をフィッティングさせ、相対濃度 $C/C_0 = 0.5$ が発現するときの V_p を S_e とし(図 3)、 $n_e = n S_e$ より求めた。分散係数 D_L はフィッティングされた P_e の値より算出した。

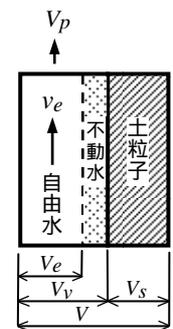


図-2 有効間隙

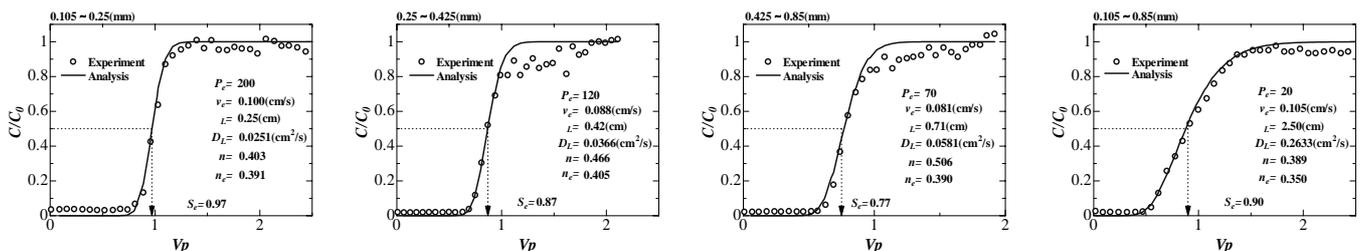


図-3 実験破過曲線に対する解析解のフィッティング

キーワード： 移流分散，有効間隙率，物質移動係数

連絡先： 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117 東海大学工学部 Tel 0463-58-1211 FAX 0463-50-2045

表-1 試料の有効間隙率および分散特性

No.	D ₅₀ (mm)	Uc	v _e (cm/s)	n _e	n _e /n	D _L (cm ² /s)	a _L (cm)
1	0.18	1.23	0.100	0.39	0.98	0.0251	0.25
2	0.34	1.07	0.088	0.41	0.87	0.0366	0.42
3	0.64	1.23	0.081	0.39	0.76	0.0581	0.71
4	0.37	2.93	0.105	0.35	0.90	0.2633	2.50

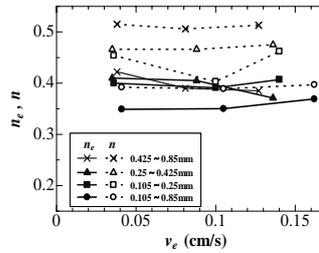


図-4 実流速と有効間隙率の関係

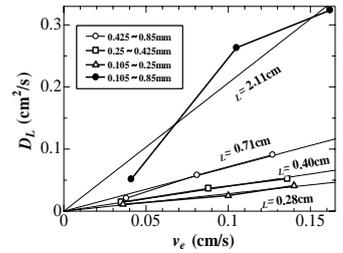


図-5 実流速と分散係数の関係

図-3は実験破過曲線に対する解析のフィッティングを示したもので、平均粒径の大きい試料ほど全間隙体積に占める自由水部分の体積割合s_eは小さくなっている。表-1には、前述の方法により求めた試料別の有効間隙率と分散係数を示した。有効間隙率n_eは0.35~0.40の値を示し、これは間隙率nの76~98%の容量であった。また、均一砂(No.1~3)では平均粒径の増大につれ分散係数は増大し、混合砂(No.4)ではかなり大きな分散係数が得られた。その理由は、混合砂では間隙内実流速の不均一性が増やすためと思われる。図-4は実流速と有効間隙率の関係をまとめたもので、有効間隙率は実流速の影響を受けないことが分かった。図-5は実流速と分散係数の関係を示したもので、分散係数は実流速とほぼ比例関係にあることが示された。

4. 物質移動係数の評価

図-3にみられたとおり、実験破過曲線の後半では濃度増加が鈍るいわゆるテーリング現象が発現する。これは溶質が輸送中移動可能な自由水部分から不動水部分へとその一部が移動しているためと考えられ、その物質移動を考慮した粒子追跡法⁹⁾による輸送シミュレーションを行い、物質移動係数の大きさを把握した。自由水部分(有効間隙)から不動水部分への溶質移動を考慮した輸送方程式

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + v_e \frac{\partial C_m}{\partial x} - D_L \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} + \alpha \left(\frac{C_m - C_{im}}{n - n_e} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_{im}}{\partial t} - \alpha \left(\frac{C_m - C_{im}}{n - n_e} \right) = 0 \quad (3)$$

は(2)(3)の連立微分方程式で与えられる。ここに、C_mは可動水(自由水)の濃度、C_{im}は不動水の濃度、αは物質移動係数である。C_mは自由水部分を

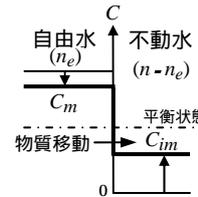


図-6 物質移動

輸送されるので、(2)式の□部分にラグランジュ移動座標系による溶質分散解析を行い、オイラー固定座標系への濃度分布に変換した後、不動水部分への溶質移動計算を逐次施す数値計算を行った。

図-7a,b,cは物質移動を考慮した粒子追跡法による輸送シミュレーション結果の一例である。自由水部分から不動水部分への物質移動を考慮することにより、テーリング現象がうまく再現されている。図-8は物質移動係数と実流速の関係を示したもので、流速の増加に伴い物質移動係数は増大することが分かった。均一砂では、粒径が大きいほど物質移動係数が大きくなることも分かった。

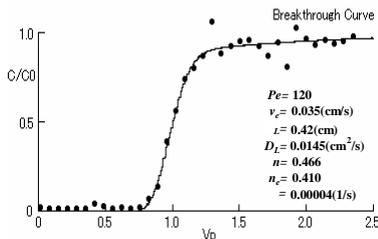


図-7a 物質移動を考慮した破過曲線

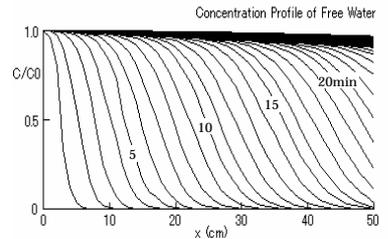


図-7b 自由水の濃度分布

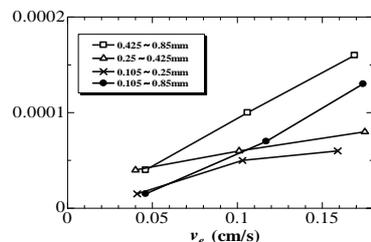


図-8 物質移動係数と実流速の関係

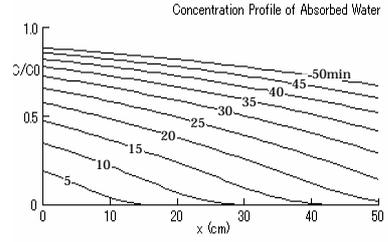


図-7c 不動水の濃度分布

5. まとめ

本研究の結果から、有効間隙率・分散係数および物質移動係数の大きさを合理的に

求める方法が示された。今後は、土粒子の混合割合(均等係数)と有効間隙率・物質移動係数の関係ならびに吸着性溶質の土中輸送機構について研究を進める予定である。

【参考文献】1) 乙茂内康史・本間重雄「溶質の土中輸送過程における有効間隙率の評価」, 土木学会関東支部第33回技術研究発表会 -6, 2006. 2) 土と基礎の講座(移流分散解析入門・粒子追跡法) 2002.9~2003.9

