

溶質の土中輸送過程における有効間隙率の評価

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

土中における溶質の輸送は、有効間隙部分で移流・分散が生じており、さらに吸着性溶質においては不動水部分を介して土粒子への吸着が生じている。そのため、粒径・実流速に応じた有効間隙率を定量的に評価することが重要である。本研究では、非吸着性溶質と平均粒径の異なる試料を用いて室内カラム試験を行い、累積流出間隙体積に基づいた理論解とのフィッティングにより輸送特性および有効間隙率について評価し、得られた結果と粒径・実流速の関係について考察する。さらに、重力排水と真空ポンプを用いた強制排水による飽和砂からの排水試験を行い、カラム試験から求められた有効間隙率と比較した。

2. 実験方法

実験装置は図 1 に示すような鉛直カラム(内径 3cm, 長さ 50cm)と可変ポンプからなる。鉛直カラムの上下端にはガラスビーズフィルターを設置し、内壁には水みちの発生を防止するために豊浦砂を貼り付けた。非吸着性溶質として塩化物イオン(濃度 1000mg/L)、試料には豊浦砂, 山砂(粒径 0.25~0.425mm, 0.425~0.85mm)の 3 種類の砂を使用した。このカラムに試料を一定密度で充填した後、可変ポンプを用いてカラム下端より蒸留水を浸透させ完全飽和させた後、下端より塩化物イオンを浸透させ、上端から排出される溶液を 2cc, 8cc ずつに交互に採取した。2cc 採取溶液から 1cc を量り取り、1/100 倍に希釈した状態でイオンメーター(電気化学計器 IOL-40 型)を用いて濃度を測定し、元の濃度に換算した。

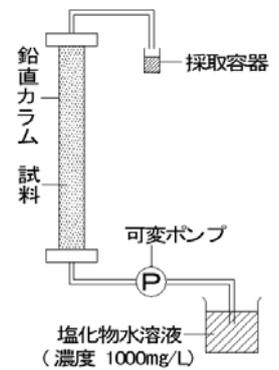


図 1 実験装置

3. 解析方法

実験状況に対応する溶液濃度 C に関する一次元輸送方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_e \frac{\partial C}{\partial x} \tag{1}$$

ここに、 x は流れの方向、 C は溶液濃度 (mg/L)、 D_L は流れ方向の分散係数(cm^2/s)、 v_e は試料の有効間隙部分における実流速(cm/s)である。(1)式を次の初期条件および境界条件のもとで解くと、その解は(2)式ようになる。

初期条件: $C(x, 0) = 0$

境界条件: $C(0, t) = C_0, C(L, t) = 0$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{Pe} - 1 - V_p}{2 \sqrt{V_p}} \right) + \frac{1}{2} \exp(-Pe) \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{Pe} + 1 + V_p}{2 \sqrt{V_p}} \right) \tag{2}$$

ここに、 C_0 は原液濃度、 Pe はカラム長 L を特性長とする動的ペクレ数で次式で表される。

$$Pe = L/\alpha_L = v_e L/D_L \tag{3}$$

V_p は累積流出間隙体積を表わし、これはカラム上端から排出される溶液の累積体積の試料間隙体積に対する割合である。しかし、実際の溶質の輸送は有効間隙部分で生じているため、図 2 に示す試料間隙体積 V_v に対する有効間隙体積 V_e の割合を S_e とすると、(2)式の V_p の変化は V_p/S_e となる。よって(2)式は(4)式ようになり、この(4)式を用いた理

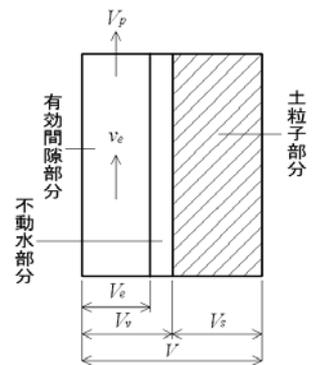


図 2 間隙と有効間隙

キーワード: 溶質移動, 移流拡散, 有効間隙率, カラム試験

連絡先: 〒259-1292 平塚市北金目 1117 TEL 0463-58-1211 FAX 0463-50-2045

論破過曲線と実験データのフィッティングを行った。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{Pe} (1 - V_p/S_e)}{2 \sqrt{V_p/S_e}} \right) + \frac{1}{2} \exp(-Pe) \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{Pe} (1 + V_p/S_e)}{2 \sqrt{V_p/S_e}} \right) \quad (4)$$

有効間隙率 n_e は相対濃度 $C/C_0=0.5$ が発現するときの V_p を求め(S_e)、 $n_e=nS_e$ より算出した。分散特性である D_L と α_L は(3)式にフィッティングから得られた Pe を代入して求めた。

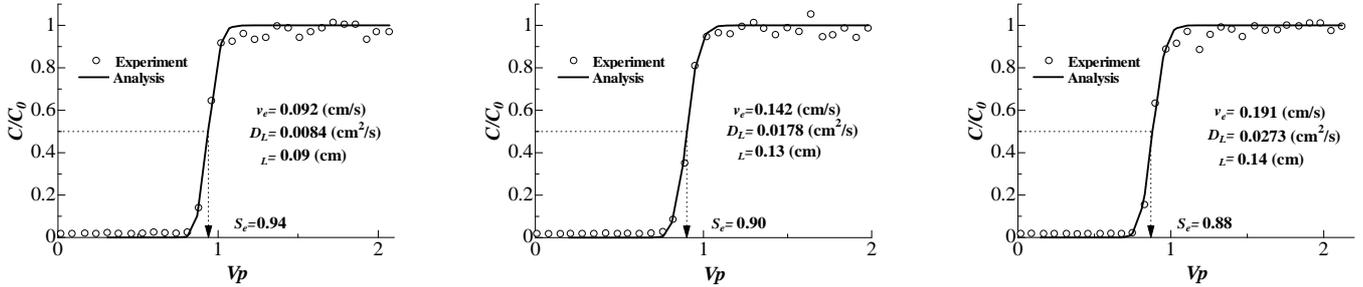


図 3 豊浦砂に対するフィッティング結果

4. 結果および考察

表 1 各試料のカラム試験および排水試験の結果

表 1 中には、各試料におけるカラム試験から得られた分散特性、ならびに飽和砂カラムからの重力排水による測定間隙率 $n_{e(g)}$ と真空ポンプ吸引による間隙率 $n_{e(vp)}$ を示した。排水試験より算出した間隙率は、カラム試

Medium	D_p (cm)	v_e (cm/s)	n_e	D_L (cm ² /s)	α_L (cm)	V_g (cm ³)	$n_{e(g)}$	V_{vp} (cm ³)	$n_{e(vp)}$
Hill Sand #1	0.064	0.068	0.34	0.0424	0.63	61.65	0.17	85.27	0.24
		0.102	0.33	0.0850	0.83				
		0.142	0.32	0.1014	0.71				
Hill Sand #2	0.034	0.047	0.37	0.0249	0.53	15.80	0.04	60.23	0.17
		0.061	0.36	0.0290	0.48				
		0.071	0.37	0.0354	0.50				
Toyouura Sand	0.027	0.092	0.38	0.0084	0.09	71.38	0.20	113.16	0.32
		0.142	0.37	0.0178	0.13				
		0.191	0.36	0.0273	0.14				

験より求めた有効間隙率よりも小さい値を示したが、粒径との明確な関係は見られなかった。図 3 は豊浦砂における 3 種類の実流速に対するフィッティング結果を示す。 $V_p=1$ 以降において濃度のばらつきが見られるが、これは可動水部分から不動水部分への拡散の影響があると考えられる。図-4 は実流速と分散係数の関係をまとめたグラフである。実流速と分散係数の関係は、(3)式より分散長を比例定数とする直線式 $D_L=\alpha_L v_e$ で与えられる。実験結果からも各試料それぞれにおいて直線関係が認められる。分散長は実流速を変えても試料ごと一定の値になっていることから粒径に応じた固有の値を持っていると考えられ、粒径が大きくなると分散長の値も大きくなっていることが分かる。図-5 は実流速と有効間隙率の関係をまとめたグラフである。各試料とも実流速の増加に伴い有効間隙率は減少する傾向が見られた。また、粒径が大きいほど有効間隙率は小さくなっていることが示された。これは、間隙内の流速分布の影響を受けているものと考えられる。

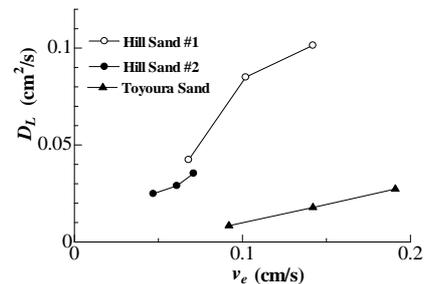


図 4 実流速と分散係数の関係

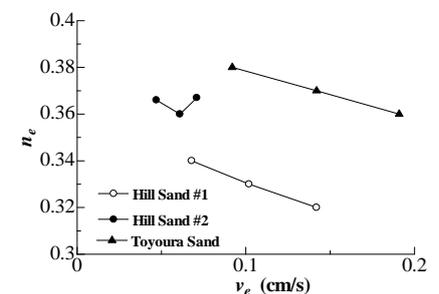


図 5 実流速と有効間隙率の関係

5. まとめ

本研究の結果から、分散長は粒径に、有効間隙率は実流速および粒径に依存していることが示された。今後は、吸着性溶質を用いたカラム試験を通じて、分散特性および遅延係数 R の評価を行っていく予定である。

<参考文献>

- 1) Youg, Mohamed & Warkentin, 福江正治・加藤義久・小松田精吉訳, 地盤と地下水汚染の原理, 東海大学出版会。
- 2) 中村直樹・本間重雄・近藤博, 累積流出間隙体積に基づく吸着性溶質の土中輸送特性の評価法, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2004, 地盤工学会関西支部, 2004。
- 3) van Genuchten の 2 Region Model 文献