多孔質球と標準砂を用いた溶質移動実験と数値シミュレーション

法政大学大学院	学生会員	大隣	慶太
地盤調査事務所	正会員	木下	孝介
法政大学工学部	正会員	岡	泰道

1.目的

近年,溶質移動過程において破過曲線に見られる tailing 現象に関する研究が注目されている.そこで, 本研究では,多孔質球と標準砂との混合砂を作成し, 2次元溶質移動実験を試みた.実験より得られた破過 曲線より,移流分散方程式による最適化手法ならび に時間モーメントによる解析手法に基づき実流速と 分散係数を算定した.

2.2次元溶質移動実験

(1) 実験装置

本研究で用いた 2 次元溶質移動実験装置は,図 1 に示すように降雨供給装置,実験槽(幅:0.96m,高 さ:1.00m,奥行き:0.30m)ならびに地下水位設定装 置より構成される.土壌試料には,標準砂と多孔質 球(ハイドロボール)の質量比を10:1に調整した混合 砂を用い,水締め方式により実験槽に充填した.な お,多孔質球の粒径は2.10~2.47mmとなっている.

トレーサとして使用した NaCl の濃度は,水平方向 に4本,鉛直方向に4本を格子状に実験砂層内に埋 設した EC センサにより計測される.(図2参照).

(2) 実験方法

実験では,降雨装置により約 50,100,150mm/hr の定常降雨を発生させた後,地下水位調整装置によ り実験砂層を飽和状態に維持した.また,トレーサ 溶液は時限注入および連続注入により供給され,い ずれの条件においても供給水の入れ替え時を開始と した.

3.実験結果

図 3 に 152.2mm/hr の場合の実測破過曲線を示す. トレーサ注入時間は 5min である.すべての測定点で プリューム前方で速やかな濃度増加が見受けられ, ピーク濃度後の低濃度領域において tailing 現象が確 認された.これは,筆者らが得ている標準砂につい ての破過曲線¹⁾より tailing 現象が顕著に生じている.



図3 実測破過曲線の時間的変化

キーワード tailing 現象,多孔質球,時間モーメント,実流速,分散係数
 連絡先 〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2 法政大学工学部 TEL042-387-6278

4.移流分散パラメータの算定

各々の深度に対する実測値の平均値を用いること で,1次元的な流れの場を想定した.移流分散現象を 定量化するために,ここでは実測破過曲線と1次元 移流分散方程式との最適化,ならびに実測値に基づ いたモーメント解析の2通りの手法を採用した.

(1) 最適化手法[Case]

移流分散方程式の解については Gauss-Newton 法を 用い, 非線形最小2 乗問題として扱った.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial C}{\partial z^2} - u' \frac{\partial C}{\partial z}$$
(1)

ここに,*C*:相対濃度,*u*':実流速(m/s),*D*:分散係 数(m²/s),*t*₀:時限注入時のトレーサ溶液の注入時間 である.

(2) モーメント法[Case]

時限注入に対しての実測破過曲線の時間モーメン トは次式に基づき算定される.

$$m_{p}(z) = \int_{0}^{\infty} t^{p} C(z,t) dt \quad (p = 0,1,2,\cdots)$$

$$\mu'_{1}(z) = \frac{m_{1}(z)}{m_{0}(z)} \tag{2}$$

$$\mu_{2}(z) = \frac{1}{m_{0}(z)} \int_{0}^{\infty} (t - \mu'_{1}(z))^{p} C(z,t) dt$$

ここに, *m_p*(*x*): *p* 次の時間モーメント, μ'₁: 平均破 過時間, μ₂: 分散である.

一方,同一条件下での移流分散方程式のラプラス 領域での解析解から,上述の時間モーメントは理論 的に以下のように求められる(Leij and Dane, 1991).

 $m_p = t_0$

$$\mu'_{1} = \frac{t_{0}}{2} + \frac{z}{u'}$$
(3)
$$\mu_{2} = \frac{t_{0}^{2}}{12} + \frac{2zD}{u'^{3}}$$

これより,(2),(3)から μ'_1 , μ_2 に関する等式を導き, 個々の式に対して独立したパラメータを算定する. (3) 結果に対する考察

最適化手法ならびにモーメント法により求められ た実流速と分散係数を表 1 に示す.なお,降雨強度 と飽和体積含水率から算定される平均間隙流速 u'3 も同表に併記する.

実測破過曲線に対し(1)式を用いて同定した実流速 1.21×10⁴m/sは, u'₃の値と比較すると1割程度大き い値を示した.この結果から卓越した流れの存在が 推察される.

モーメント法に基づいた算定結果 (u_1, D_1) では,各 深度までの平均的な実流速は移動距離とともに増加 する傾向が確認された.これは,降雨が地表から浸 入する過程で,実験砂層表面付近での溶質の伝達に 時間差が生じたことに起因するものと考えられる. 深度 0.57m 以深より,実流速は 1.11×10^4 m/s に収束 し,概ね u'_3 と近い値を示した.一方,分散係数に対 しては Case と比べると $3 \pi - 9 - [unit:m^2/s]$ 小さい 結果となった.この原因については現段階では不明 である.

参考文献

1)木下ら、土木学会年講, , pp.45-46, 2004
 2) Leij et al., Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.58, pp.1076-1085.
 1991

3) Leij et al., Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.55, pp.944-953. 1991



図4 相対濃度の時間的変化

表1 移流分散パラメータの推定結果

Moment analysis					Simulated results		experiment		
z	$m_0(-)$	m_1	μ'_1	μ_2	<i>u</i> ′ ₂	D_2	u'_1	D_1	<i>u</i> ′ ₃
(m)	(-)	(min)	(min)	(\min^2)	$(\times 10^{-4} \text{m/s})$	$(\times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s})$	(×10 ⁻⁴ m/s)	$(\times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s})$	(×10 ⁻⁴ m/s)
0.19	5.4343	230.77	42.5	1134.6	0.80	2.50	1.21		
0.38	5.8793	404.87	68.9	1049.7	0.96	2.03		2.70	1.06
0.57	5.3447	472.76	88.5	950.7	1.10	1.88			
0.76	6.4577	760.69	117.8	1201.5	1.10	1.76			