

カラム試験での分散長に及ぼす通水速度の影響

京都大学 正会員 ○加藤智大

産業技術総合研究所 保高徹生 井本由香利 黒澤暁彦

京都大学 フェロー会員 勝見 武

1. 研究の背景と目的

建設工事で発生する掘削土から溶出する自然由来重金属等への対策の一つに、重金属等を捕捉する能力を持つ吸着層に通過させて浄化する、吸着層工法が提案されている。設計の際は、カラム試験によって地盤材料の吸着性能評価を行う事例が増えており、試験で得られる時間-重金属等濃度の関係（破過曲線）に対し、移流分散方程式の解析解をフィッティングして吸着性能を示す分配係数 (K_d) を取得する¹⁾。カラム内を移動する溶質の分散性は、通水速度や間隙構造によって異なるため、 K_d を取得する際は分散長 (λ) の決定が重要になるが、その決定方法を検討した事例は限られており、特にカラム試験での通水速度と λ の関係について目安となる λ の値は十分に評価されていない²⁾。本研究ではカラムに異なる通水速度条件でトレーサー溶液を通水して λ を取得し、その関係を評価した。

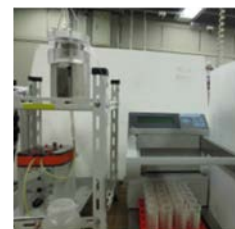
2. 研究手法

2.1 カラム試験: カラム試験の様子を図-1に示す。市販のマサ土で、目開き 9.5 mm ふるい通過分を使用した。使用したマサ土の土粒子密度 ρ_s は 2.664 g/cm³、含水比 w は 5.1% であった。

直径と高さが 5 cm の円筒カラム内に、125 g のランマーを用いて各層 3 回ずつ突き固めを行うことで、マサ土を 5 層に分けて充填した。供試体を 3 つ作製し、それぞれの乾燥密度 ρ_d は 1.5 g/cm³、間隙率 n は 0.43 であった。この充填方法は ISO 21268-3 を準用したものである。試料充填後、定流量ポンプを用いて、通水速度 $r = 36, 72, 108$ mL/h を目安にイオン交換水をカラム内へ上向きに通水した。カラム上端から水が流出した後にポンプを停止し、24 時間静置することで供試体を飽和に近づけた。24 時間経過後、通水液を塩化カリウム (KCl) 0.1 mol/L に切り替えて同じ供試体に通水するトレーサー試験を実施した。この溶液を $r = 36, 72, 108$ mL/h を目安にそれぞれ通水することで、塩化物イオンの移行特性を評価した。トレーサー試験では、塩化物イオン濃度の代わりに電気伝導率 (EC) を測定した。試験は浸出液の EC_i が通水溶液の EC (EC_m) の 95% の値 (比 EC, EC_i/EC_m = 0.95) に至るまで行った。EC_i は採水した分画の EC 測定値から、トレーサー試験開始直後の採水液の EC 値をバックグラウンド値として差し引いて求めた。EC の測定には EC メーターを用いた。



(a) カラム装置



(b) 採水・通水方法

図-1 実験の様子

2.2 逆解析による分散長の算定: カラム試験で得た破過曲線に、一次元移流分散方程式の解析解である (式 1) をフィッティングすることで、分散係数 D (cm²/h) と遅延係数 R (-) という 2 つの未知パラメータが決定でき、分散長 λ (cm) と分配係数 K_d (cm³/g) をそれぞれ取得できる。 D と R 、 λ と K_d には $D = \lambda \times v$ と $R = 1 + (\rho_d \times K_d) / \theta$ のような関係がある。2 変数を未知数としたままフィッティングすると、それぞれ現実的ではない値が推定される可能性があるため、まず $R = 1$ と見なせる非吸着性の溶質 (本研究では塩化物イオン) を通水し、その破過曲線に対して (式 1) をフィッティングして D を推定した¹⁾。 C/C_0 は塩化物イオン比濃度ではなく比 EC 値を用い、Excel のソルバー機能による最小二乗法を適用した。ここで、 C はカラム流出部の物質濃度 (mg/L)、 t は時間 (h)、 L はカラム長 (cm)、 v は流速 (cm/h) である。カラム試験では採取口 (採水チューブ出口) の濃度が実測値となるが、逆解析の際はカラム流出口の濃度が必要になるため、採水チューブの体積を通水速度で除し、採水時間から差し引く等の補正を行った。

破過曲線から有効間隙率 n_e を推定し、流速 v を $v = r / (A \times n_e)$ として定め再度フィッティングを行った (A はカラム断面積 (cm²))。この操作により、実際に水の通水に寄与した間隙である n_e を溶質が通過した際の D を推定した。

キーワード 分散長, カラム通水試験, 有効間隙率, 移流分散方程式, 逆解析

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院地球環境学堂 TEL 075-753-5114

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{RL - vt}{(4RDt)^{1/2}} \right] + \left(\frac{v^2 t}{\pi RD} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{(RL - vt)^2}{4RDt} \right] - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{vL}{D} + \frac{v^2 t}{RD} \right) \exp \left(\frac{vL}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{RL + vt}{(4RDt)^{1/2}} \right] \quad (式 1)$$

3. 結果と考察

3.1 実験の結果: カラム試験で得た破過曲線を図-2 に示す。グラフの横軸に通水量/間隙体積比 (Pore volumes of flow, PVF) を取り、異なる通水速度条件での、間隙水の入れ替わりと EC 値の推移を議論する。図-2 に示すように通水速度の条件に関わらず、比 EC の値は 0.2 PVF 程度から大きくなり、比 EC = 0.5 となる PVF や 1 PVF の時の比 EC も概ね同様の値となった。以上より、最大粒径が 9.5 mm のマサ土を直径 5 cm、高さ 5 cm の円筒カラムに充填し、通水速度が 36-108 mL の範囲で通水した場合には、概ね同様な破過曲線の形状が得られることが明らかになった。

有効間隙率 n_e を評価する。供試体の間隙すべてが通水に寄与する場合、図-2 に示す破過曲線は 1 PVF で比 EC = 0.5 となり、点対称の形状に近づく。本研究では図-2 に示すように、通水速度の条件に関わらず比 EC = 0.5 となる PVF は 0.7 程度であった。このことから供試体の間隙の 70% 程度が通水に寄与したことが推察される。図-2 に示すように、点対称ではない破過曲線が得られた理由として、マサ土の団粒化の影響が考えられる³⁾。溶液が流れやすい間隙を通過した塩化物イオンによって 1 PVF 以下で比 EC = 0.5 となり、その後通水しづらい間隙を緩やかに通過した塩化物イオンが徐々に到達した結果、図-2 に示すような非対称の破過曲線が得られたと考えられる。

3.2 分散長と通水速度の関係: 図-3 にトレーサー試験で得た実験値に対し、2.2 に示した逆解析の結果を示す。通水速度 $r = 36 \text{ mL/h}$ の時に取得された D は $3.48 \text{ cm}^2/\text{h}$ であり、分散長 λ は 0.80 cm と推定された。同様に $r = 72, 108 \text{ mL/h}$ の結果について、移流分散方程式の解析解をフィッティングしたところ、図-4 に示すようにそれぞれ $0.84, 1.04 \text{ cm}$ と推定された。通水速度が大きいほど λ の値は大きくなったが、オーダーが極端に異なることはなく、概ね同様の範囲の値が得られたと言える。

n_e を補正した後の逆解析の結果を図-3 に示す。有効間隙率の補正前の解析解と比べ、より実験値に適合した結果となり、3.1 で推定した n_e が n の 70% 程度という推定結果は概ね妥当と推察された。図-4 に示すように補正後の λ は補正前より小さく取得されたが、概ね同様の範囲であった。

4. まとめ

本研究では、直径と高さが 5 cm のカラムに異なる通水速度で塩化カリウム溶液を通水し、分散長を取得した。その結果、通水速度が 36~108 mL の範囲では 0.6~1.1 cm 程度の分散長が算定され、通水速度の条件に関わらず、分散長の値はカラム長の 1/5 程度の値が取得された。また、有効間隙率は間隙率に対して 70% 程度の値と推察された。

謝辞

本研究は、吸着層工法に使用する材料等の試験方法の標準化に関する検討委員会の一環として実施された。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所(2012): 建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル (改訂版), 132-135.
- 2) 加藤ら(2021): 地盤工学ジャーナル, 16(2), 131-141. 3) 徳本ら(2005): 水文・水資源学会誌, 18(4), 401-410.

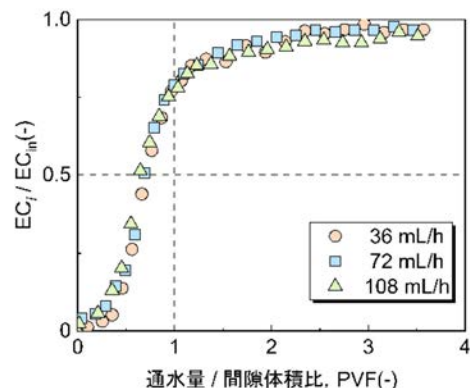


図-2 カラム試験で得た破過曲線

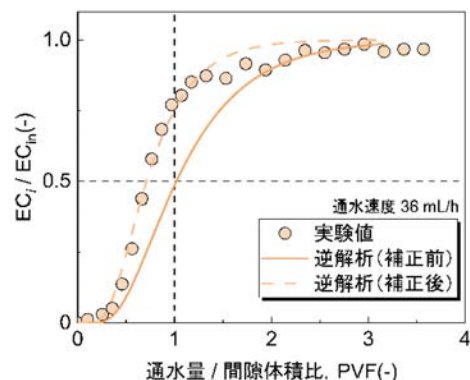


図-3 通水速度 36 mL/h での逆解析結果

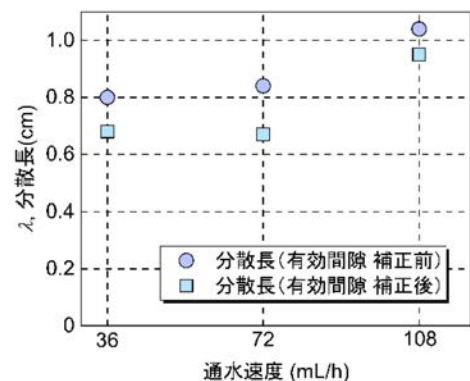


図-4 分散長と通水速度の関係