

第Ⅲ部門

拡散輸送を考慮したソイルベントナイトの物質移行パラメータの評価

京都大学大学院 学生員 ○ 辰巳 鴻介
 京都大学大学院 正会員 高井 敦史
 京都大学大学院 正会員 乾 徹
 京都大学大学院 正会員 勝見 武
 ライト工業 増淵 淳

1. はじめに

既存構造物下に汚染土壌が存在した場合には積極的な浄化や除去は難しいため、汚染土壌を遮水工で囲み汚染が拡散するのを防ぐ原位置封じ込め工法が有効である。原位置土にベントナイトを添加、混合・攪拌することにより造成されるソイルベントナイト（以下 SBM）鉛直遮水壁は、高い遮水性、自己修復性を有する遮水壁としてその適用性が確認されている¹⁾。汚染物質の封じ込め措置であることから、SBM 遮水壁の物質移行特性を評価することは重要であるが、動水勾配により輸送される移流現象はこれまでも多く検討されている。一方、濃度勾配に起因して生じる拡散現象については十分に議論されていない。特に SBM のような低透水性材料では拡散輸送が無視できないことから²⁾、本研究では円筒型カラムを用いた拡散試験を行い、数値解析結果と比較することで、母材、間隙比が異なる SBM の有効間隙率 n_e 、有効拡散係数 D_d を同定した。

2. 実験方法

2.1 SBM の作製方法

粒度の異なる母材の影響を評価するため、硅砂 7 号単体と、硅砂 3、5、7 号（株式会社丸東：岐阜瑞浪市産）を 2:6:2 の割合で混合したもの（以下、混合硅砂）の 2 種類を母材として SBM を作製した。母材の基本特性を表-1 に示す。飽和砂地盤を想定し、含水比を硅砂 7 号は 26%、混合硅砂は 22%に調節した。安定液としてベントナイトスラリー（粉体のベントナイトが質量換算で 15%濃度と、20%濃度になるように蒸留水を加えて十分に攪拌した後、24 時間養生したもの）を母材に添加し、十分に混合・攪拌した時点で、フロー値（JIS R 5201 に準拠）が 150 mm を満足していることを確認し、ここに 50 kg/m³ の粉体ベントナイトを添加し、再度十分に混合攪拌した。用いたベントナイトは Na 型であり、モンモリロナイト含有率 48%、陽イオン交換容量は 0.732 meq/g である。

2.2 拡散試験

試験で用いた実験装置の模式図を図-1 に示す。直径 10 cm、厚さ 1.5 cm のカラムに充填した SBM 供試体をろ紙とポーラスストーンで挟み込み装置を組立てた後、供試体下部から蒸留水を注入することで供試体の飽和を行った。その後、上部のポーラスストーンに高濃度溶液（0.05 mol/L の NaCl）を定量送液ポンプを用いて循環させ上流側の濃度を一定に保った。表-2 に実験条件、ケースを示す。表-2 に示す圧密圧力に相当する間隙比で試料を充填した。水位差 90 cm を与え、ボトルの質量変化、溶液濃度変化を 1 日ごとに計測し、移流と拡散による

表-1 母材の基本特性

	硅砂 7 号	混合硅砂
土粒子密度 (g/cm ³)	2.61	2.61
粒度分布	礫分 (%)	0
	砂分 (%)	99.65
	細粒分 (%)	0.35
平均粒径 (mm)	0.21	0.45
均等係数	2.1	4.1

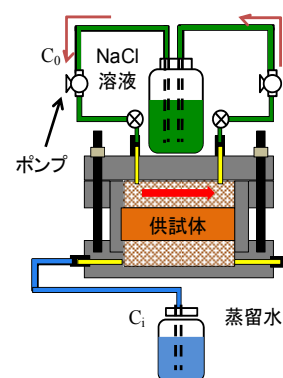


図-1 拡散試験の模式図

表-2 実験条件

実験ケース	母材	粉体ベントナイト添加量 (kg/m ³)	圧密圧力 (kPa)	湿潤密度 (g/cm ³)	間隙比
A-1	混合硅砂	50	78.4	2.01	0.66
B-1			39.2	1.96	0.70
B-2			39.2	1.96	0.70
C-1	硅砂 7 号		39.2	1.80	0.89

物質輸送を評価した。吸着の影響を受けない Cl 濃度を測定し、約 15 日間試験を継続した。

2.3 物質移行パラメータの推定

本研究では、移流分散方程式を基にオイリアン・ラグランジアン飽和・不飽和浸透流—二次元地下水移流・分散解析プログラム (Dtrans-2D)³⁾を用いて移流分散解析を行い、下部ポーラスストーンからの浸出フラックスの測定値と解析値をフィッティングすることにより、物質移行パラメータを同定した。解析モデルとして、供試体とポーラスストーンを 1 mm 毎に等分割した 1 次元モデルを作製した。入力パラメータは、透水係数は濃度差による浸透圧力を考慮して動水勾配を 20 として求めた実験値を用い、分散長はモデルが小さいこと、移流速度が小さいことから 0 とした。吸着の影響がない Cl 濃度を測定したため、遅延係数、減衰定数は 0 とした。

3. 結果と考察

図-2 に各ケースの質量フラックスの経時変化を示す。図のように実験開始後 2 日目までは濃度変化が無いことから、解析値を実測フラックスの立ち上がり箇所一致させ、フィッティングを行った。予め実施した感度分析結果を考慮し、 n_e が及ぼす影響は微小であると考え、初めに図-3(a)のように n_e を 0.2 で固定し、 D_d を変化させ測定値に近い解析値の D_d を決定した。次に図-3(b)のように n_e を変化させ、立ち上がりからの 3 点における測定値との残差二乗和が最小になる n_e 、 D_d を有効数字 1 桁で求めた。

表-3 に、上記の方法により求めた拡散係数と透水係数の値を示す。母材の異なる SBM で比較すると、珪砂 7 号単体を母材に用いた SBM の透水係数、有効間隙率が小さくなっている。これは珪砂 7 号の均等係数が小さく分級された試料であるため間隙が大きくなる一方、粉体ベントナイトが十分に膨潤でき透水係数と有効間隙率が減少したと考えられる。

4. おわりに

本研究では母材の異なる SBM を対象に拡散試験を行い、フラックスを求め、解析値とのフィッティングにより物質移行パラメータを有効数字 1 桁で同定した。応力状態、母材の異なる粉体ベントナイト添加量 50 kg/m³ の SBM は $n_e=0.2\sim0.3$ 、 $D_d=2.0\times10^{-10}\sim3.0\times10^{-10}$ m²/s と推定された。粉体ベントナイト添加量が同じ SBM では母材、間隙比を変化させても、有効間隙率 n_e 、有効拡散係数 D_d に大きな違いは見られなかった。

参考文献

- 1) 高井 敦史, 乾 徹, 勝見 武, 嘉門 雅史, 荒木 進 (2012): ソイルベントナイト連続遮水壁の遮水性能に及ぼす影響因子, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 68, No. 1, pp.1-14.
- 2) Shackelford, C. (2013): The role of diffusion in environmental geotechnics, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris 2013, pp.127-150.
- 3) 西垣 誠, 菱谷智幸, 橋本 学, 河野伊一郎 (1995): 飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析的手法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.511/III-30, pp.135-144.

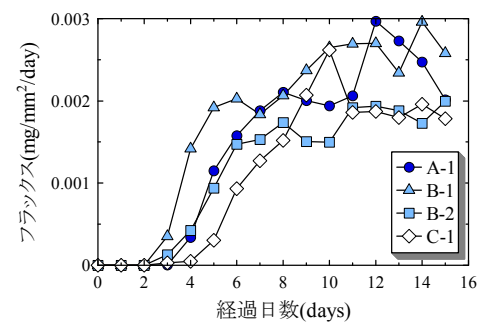
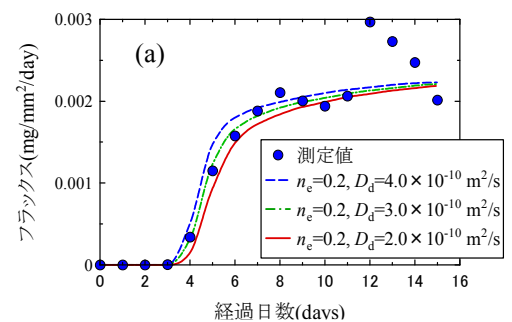


図-2 フラックスの時間変化



↓ $D_d = 3.0 \times 10^{-10}$ m²/s に固定

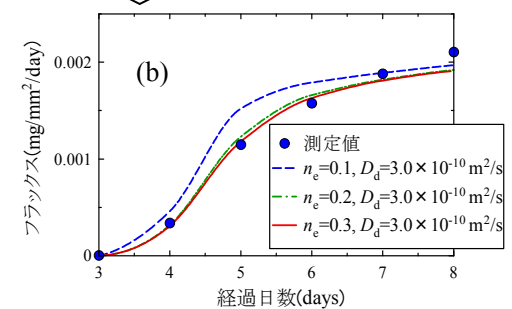


図-3 同定手順(ケース A-1)

表-3 拡散試験結果

実験ケース	透水係数 (m/s)	有効間隙率	有効拡散係数 (m ² /s)
A-1	7.0×10^{-10}	0.3	3.0×10^{-10}
B-1	8.9×10^{-10}	0.3	3.0×10^{-10}
B-2	6.5×10^{-10}	0.3	2.0×10^{-10}
C-1	5.8×10^{-10}	0.2	3.0×10^{-10}