

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○永井 遼
 京都大学大学院地球環境学堂 正会員 高井 敦史
 京都大学大学院地球環境学堂 正会員 加藤 智大
 京都大学大学院地球環境学堂 正会員 勝見 武

1. 背景と目的

鉄鋼スラグやセメントなどの酸化カルシウム (CaO) を含む材料を用いた地盤改良は、軟弱地盤の強度改善に効果的である一方、CaO の水和によって水酸化物イオン (OH) が溶出して周囲の地盤がアルカリ化する可能性がある。そのため、地盤改良工法の適用範囲を明らかにするためには、改良土から溶出する OH イオンの地盤中での移動特性の評価が求められる。しかし、土の OH イオンに対する緩衝能力に関する知見は限られており、特に地盤中での OH イオンの挙動に対する移流分散方程式解の適合性は未解明である。そこで本研究では、アルカリ性溶液を通水するカラム吸着試験を行い、実験値に対して 1 次元移流分散方程式の適合性を評価した。

2. 試験方法

2.1 使用材料 本研究では砂として豊浦砂を、アルカリ性溶液として水酸化ナトリウム溶液 (NaOH) を使用した。1 mol/L の NaOH 溶液を試験ごとに蒸留水を用いて希釈して流入液を調整した。表-1 に豊浦砂の土質性状を示す¹⁾。また豊浦砂の元素組成は、SiO₂ が 92.6%、Al₂O₃ が 3.7% で残りの 3.7% が他の元素であった²⁾。

2.2 実験方法と実験条件 カラム高さの影響を評価するため、直径 25 cm、高さが 20 cm と 5 cm の 2 種類のカラムを用いた。図-1 のように、圧送ポンプを用いてカラムに対し上向きに pH=12 に調整した NaOH 溶液を約 26 mL/h で通水し、カラムに充填した豊浦砂を通過した流出液をおよそ 0.5 PVF (1PVF = 流出液の累計体積/カラム内供試体の間隙体積) 間隔で採水した。採水後すみやかに流出液の pH を測定し、比濃度 (流出液の OH イオン濃度/流入液の OH イオン濃度) が 1 に達した時点で通水を終了した。表-2 に実施した 4 ケースの実験条件を示す。ケース 1 のみ、NaOH 溶液の通水試験が終了した後、流出液の pH が 9 以下となるまで蒸留水を通水しカラム内を洗浄した。洗浄後、非吸着性物質である塩化ナトリウム (NaCl) 溶液をカラムに通水するトレーサー試験を実施した。流出液の塩化物イオン (Cl) 濃度を測定し、比濃度が 1 に達した時点で通水を終了した。

2.3 供試体作製時の課題と検討 供試体の作製段階で、飽和過程での間隙水供給により土構造が再配列され供試体が圧縮・沈下する課題と、締固めによって透水性が低下し設定流量での通水が困難になる課題が生じた。後者については、豊浦砂は本来透水性の高い土質であり、締固めのみで極端な透水性低下が生じるとは考え

にくい。これは NaOH 溶液により豊浦砂の主成分である石英が溶解し、間隙で再沈殿することで閉塞が閉塞し透水性が低下した可能性が考えられる³⁾。これらの課題に対応するため、複数の締固め、飽和方法を検討した結果、ボルテックスミキサーを用い供試体全体に振動を与えて均一に密実化する振動締固めと、真空脱気による飽和を併用して供試体を作製することで、圧縮や変形が生じにくく比較的安定した通水が得られる傾向が確認された。ただし、すべてのケースで問題が完全に解消されたわけではなく、再現性の評価や NaOH 溶液による土の溶解は、今後の検討課題である。

表-1 豊浦砂の土質性状¹⁾

土粒子密度 (Mg/m ³)	2.653	
粒度 (%)	礫分	0
	砂分	100
	細粒分	0
最大粒径 (mm)	0.85	
均等係数	1.5	
曲率係数	0.94	

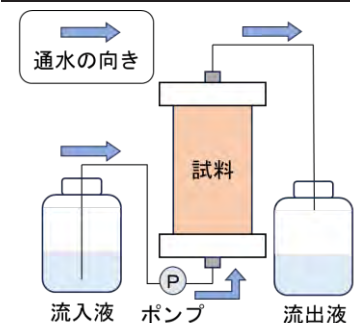


図-1 カラム吸着試験の様子

表-2 カラム吸着試験条件

ケース	1	2	3	4
カラム高さ (cm)	20	5		
乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	1.62	1.55	1.54	1.61
間隙流速 v ($\times 10^{-5}$ m/s)	3.6	5.1	2.3	2.7

2.3 実験結果の整理方法 実験値に対し、移流分散方程式の解析解をフィッティングすることで2つの未知数である分散係数 D と遅延係数 R を推定し、本研究では D と R を同時に推定する同時2変数フィッティングと、1変数ずつ推定する段階的2変数フィッティングを実施した。同時2変数フィッティングでは、NaOH溶液を通水したカラム吸着試験の実験値に対し、 D と R の2つを変数としてフィッティングし、 D と R を推定した。段階的2変数フィッティングでは、非吸着性物質であるNaCl溶液を通水したトレーサー試験の実験値に対し、 $R=1$ とし D のみの1変数条件でフィッティングし、 D を推定した。次に推定した D を間隙流速 v で除し分散長 λ を求め、NaOH溶液を通水したカラム吸着試験の実験値に適用し、 R のみの1変数条件でフィッティングして R を推定した。

3. 試験結果と考察

図-2 に NaOH 溶液を通水したカラム吸着試験の結果を示す。ここで横軸は通水量 / 間隙体積比 (PVF)、縦軸は OHイオンの比濃度であり、プロットは各ケースの実験値、実線は同時2変数フィッティングによる計算値である。カラム高さが 20 cm、5 cm のいずれのケースでも 4~6 PVF で比濃度が 1 に達したが、高さ 5 cm のケースでは複数の実験値が、比濃度が 1 を超えた。この結果から、一度吸着した OHイオンが豊浦砂から脱着した可能性が考えられる。

表-3 に各試験から得られた豊浦砂と OHイオンの物質移動パラメータを示す。同時2変数フィッティングにより推定した λ は、高さ 20 cm カラムで $0.7\sim 4.0 \times 10^{-3} m$ 、高さ 5 cm カラムで $0.1 \times 10^{-3} m$ となり、高さ 5 cm カラムの値のほうが 1 オーダーほど小さかった。これは、短尺カラムでは壁面に沿った流路が生じやすく、 λ が小さく推定されたと考えられる。また、高さ 20 cm カラムで実施した段階的2変数フィッティングからは $\lambda = 5.7 \times 10^{-3} m$ が得られ、同時2変数フィッティングから推定した λ と比較して、大きな値となった。同時2変数フィッティングは、実験値と計算値が見かけ上一致するよう見えるが、解の妥当性には課題があると言える。実際に、各フィッティング条件から得た λ は値が異なったため、トレーサー試験を実施し1変数条件で λ を推定する必要性が示された。一方、今回実施した全てのケースで、 R はおよそ 4.0、 K_d

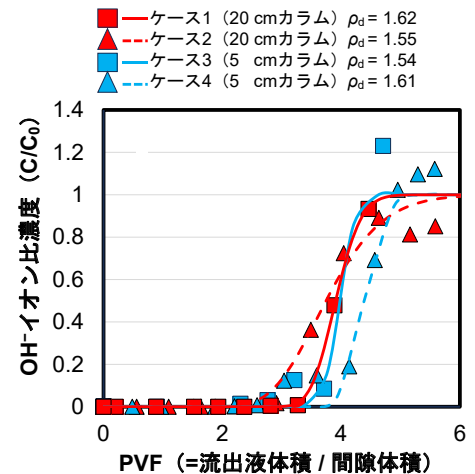


図-2 カラム吸着試験結果

表-3 豊浦砂と OH-イオンの物質移動パラメータ

カラム高さ	20 cm		5 cm	
フィッティング条件	同時	段階的	同時	段階的
$\lambda (\times 10^{-3} m)$	0.7-4.0	5.7	0.1	5.7
R	3.7-3.9	3.8-3.9	4.0-4.4	3.9-4.1
$K_d (L/kg)$	0.7	0.7	0.8	0.7-0.8

は $0.7\sim 0.8 L/kg$ と同程度の値が推定され、移流分散方程式の適用により求められる豊浦砂の OHイオンに対する緩衝能力は、カラム高さやフィッティング条件による影響は小さいことが推察された。

4. 結論

本研究では、砂の OHイオンに対する緩衝能力を評価するため、カラム吸着試験を実施し、以下の知見を得た。

1. カラム吸着試験の実験値に対し D と R の2変数を未知数としてフィッティングした結果、豊浦砂の λ は $0.1\sim 4.0 \times 10^{-3} m$ と推定された一方、 $R=1$ として D のみを変数としてフィッティングしたところ λ は $5.7 \times 10^{-3} m$ と推定され、1 オーダー程度大きかった。
2. カラム吸着試験の実験値に移流分散方程式の解析解をフィッティングして推定される豊浦砂と OHイオンの K_d は、カラム高さ、フィッティング条件によって大きくは異ならず $0.7 L/kg$ 程度だった。

参考文献

- 1) 吉津考浩, 正垣孝晴 : 豊浦砂の液状化強度に及ぼす相対密度と繰り返し回数の影響, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp. 639-640, 2013
- 2) 豊浦珪石鉱業株式会社 : 豊浦砂, <https://www.toyourakeiseki.com/about-product-a.html> (2025年7月13日アクセス)
- 3) 市川康明, 木本和志, 佐藤稔紀, 丹野剛男, 引間亮一, 真田祐幸 : 結晶質岩を対象とした連成現象が長期挙動におよぼす影響に関する研究 (2012年度), JAEA-Research 2013-045, 2014