

上向流カラム通水試験の充填密度が汚染土壌の溶出挙動に及ぼす影響

福岡大学工学部 学生会員 白川 眞平 崎山 大星
 福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 藤川 拓朗 古賀 千佳嗣
 国立環境研究所 正会員 肴倉 宏史

1. はじめに 汚染土壌に起因する環境リスクを評価する際、汚染物質の溶出特性を把握することは重要である。上向流カラム通水試験 (ISO 21268-3) (カラム試験) は、溶出濃度の経時変化や溶出挙動の詳細な評価が可能であることから、判定試験である環境庁告示第 46 号試験と併用した評価に注目が寄せられている¹⁾。しかしながら、現行のカラム試験は、試料を充填する際の締固めエネルギーが極めて小さく、実地盤の密度と乖離が生じているとの指摘がある。そこで本報告では、充填密度の違いが溶出挙動に与える影響を把握することを目的とし、試料充填時の締固めエネルギーを変化させ、充填密度の違いが溶出挙動に与える影響について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料及び実験条件 実験試料として 2 種類の自然由来の重金属等が含まれる汚染土 A, B (写真-1 (a), (b)) を用いた。表-1 に各試料の物理特性と環告 46 号法による試験結果を、図-1 に各試料の粒径加積曲線を示す。実験にはこれら試料を四分法により分取した後、4.75mm ふるいを通過したものを用いた。なお、汚染土 A については自然含水比が高くカラムに突固めて充填することが難しかったため、風乾したものをを用いている。また、いずれの分析項目においても重金属等が検出されており、中には土壤環境基準値を超過するものも見られる (表-1)。

2-2 上向流カラム通水試験方法 カラム試験は、ISO 21268-3 に準拠し、表-2 に示す試験方法で実施した。カラム試験の配管図を図-2 に示す。試料の突固めは、試料を 5 層に分け、重さ 125g のランマーを高さ 20cm から各層 3 回数で落下させることが規定²⁾されているが、本検討では、カラムに充填する密度が試験結果に与える影響を把握するため、突固めエネルギーを既定値 (締固め仕事量に換算すると 0.01E_c 程度) の 10 倍, 100 倍 (0.1E_c, 1.0E_c) に変化させて試料を作製した。供試体作製後、カラムの下端から 0.001mol の塩化カルシウム (CaCl₂) 溶液を溶媒とし流速 12±1.6mL/h で通水させた。その後、2 日間以上静置させて飽和を行っている。飽和過程終了後、通水を開始し所定の分画にて採水を行った。採水した浸出液は、

pH, EC, 六価クロム (Cr(VI)), フッ素 (F), ホウ素 (B) を測定した。分析には、イオンクロマトグラフィー (ICS-1000:ダイオネクス社製)、ICP プラズマ発光分析装置 (ICP7000-Ver.2:島津製作所製)、分光光度計 (SHIMAZU 社製 UVmini-1240) を用い各々定量した。また、本研究では充填密度の違いによる浸透圧力の変化を確認するため、ポンプとカラム下端の間に水圧計 (GC31:NAGANO KEIKE 社製) を設置した。

3. 実験結果及び考察

3.1 充填密度が浸透水圧と pH に及ぼす影響 図-3 に締固めエネルギーと乾燥密度の関係を示す。いずれの条件においても、締固めエネルギーの増加に伴い、乾燥密度の増加が認められる。乾燥密度の増加は、充填した試料の間隙率に大きな影響を与えるため、締固めエネルギーの決定は溶出挙動に及ぼす重要な因子であると言える。また、図-4 に示す累積液固比と浸透水圧の関係からも分かるように、汚染土 B においては締固めエネルギーの増加に伴い浸透水圧が増加し、最大 50kPa 程度の差が生じていることが分かる。肴倉ら³⁾は、カラム内の定流量時の間隙水圧について、透



(a) 汚染土 A (b) 汚染土 B
 写真-1 試料の外観

表-1 試料の物理特性

試料		汚染土 A	汚染土 B
初期含水比 w (%)		47.8	9.6
細粒含有率 F _c (%)		69.7	25.6
環告 46 号法 試験結果	pH	8.29	8.96
	Cr(VI) (mg/L)	nd	0.05
	F (mg/L)	0.69	1.3
	B (mg/L)	0.31	0.03

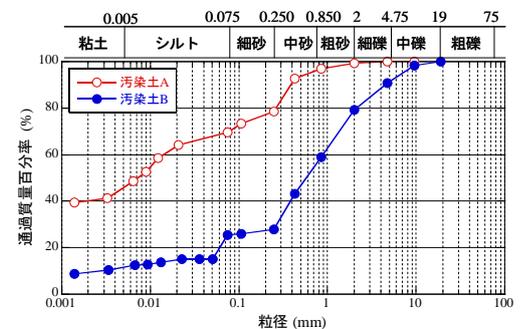


図-1 粒径加積曲線

表-2 カラム試験方法

最大粒径	4.75mm
試料の状態	風乾状態、自然含水比状態
充填の方法	高さ 6cm を 5 層 125g ランマーで各層 3 回
試料高さ	30±5cm、充填量統一
ろ紙の孔径	1.5~8µm
溶媒	1mM の CaCl ₂ 溶媒
分画	9 分画 (24 時間、48 時間、 72 時間、96 時間、7 日、14 日、21 日、28 日、35 日)

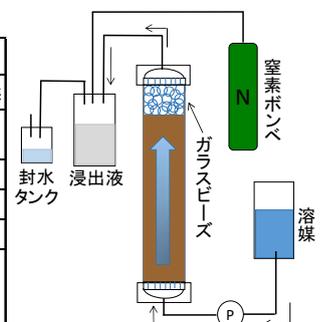


図-2 カラム試験の配管図

水係数が 10^{-8}m/s 以下の土壌においては浸透水圧が 300kPa を超えることを報告しており、このようなカラム上下端における過剰な浸透圧力の発生はチューブやカラムの破損を引き起こすだけでなく、水みちを発生させ、飽和度を減少させる要因となることもあるため注意が必要である。pHについては、図-5に示すように、いずれの条件においても、累積液固比が増加してもほぼ一定で推移し、充填密度の違いが pH に及ぼす影響は少ないと考えられる。

3.2 充填密度が溶出挙動に及ぼす影響 本研究では、既往の研究³⁾を参考に、各条件において累積液固比 10 (L/S=10) における 0.01E_c と 1E_c の累積溶出量の差が±20%以内を閾値に設定しており、20%を超えるものについては溶出挙動に影響を及ぼすと定義する。図-6に汚染土 B の六価クロム(Cr(VI))の結果について示す(汚染土 A については定量下限値以下のため示していない)。締固めエネルギーの増加に伴い溶出量は増加し、L/S=10 における溶出量の差は 20%以上あることから、六価クロムは充填密度の影響を受けることが分かる。また、L/S2あたりからは、溶出が見られず一定であることから、特に通水初期に影響が大きいと言える。図-7(a), (b)に汚染土 A, B のふっ素の結果を示す。ふっ素についても六価クロムと同様に、締固めエネルギーの増加に伴い溶出量は増加する傾向にあり、L/S=10 における溶出量の差は 20%以上あることから、充填密度の影響を受けることが分かる。図-8(a), (b)に汚染土 A, B のホウ素の結果を示す。汚染土 A については、0.01E_c と 0.1E_c において溶出量に差は認められず、両者は同様な溶出挙動を示していることが分かる。また、L/S=10 における溶出量の差についても 20%以内にあることから、締固めエネルギーの違いが与える影響は小さいと考えられる。汚染土 B については、現在、試験の途中ではあるが L/S=10 における溶出量の差は概ね 20%程度と推察され、締固めエネルギーの影響は他の元素と比べて低いと考えられる。しかしながら、いずれも通水初期の挙動に差が見られることから、締固めエネルギーの影響は通水初期に大きいと考えられる。

4. まとめ 1) 充填密度の違い(締固めエネルギーの違い)は汚染土壌の溶出量に影響を与えるが、その影響範囲は対象とする元素によって異なる。今回の実験結果においては、六価クロムやふっ素の溶出量に影響が見られた。2) 充填密度の影響は、いずれの元素においても通水初期の溶出挙動に影響を与える。

以上のことから、充填密度の違いは溶出挙動に影響を及ぼす重要な因子であるため、これらの特性を十分に理解した上で試験の実施と条件設定を行うことが肝要である。

謝辞: 本研究は、令和2年度科学研究費助成事業(課題番号:19K04606)の助成を受けたものです。関係者各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】 1) 肴倉ら: 環境影響評価のためのカラム通水試験の基準化に向けて, 地盤工学会誌, Vol.63, No.1, Ser.No.684, pp.18-21, 2015. 2) ISO 21268-3 Soil quality -Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials, Part3: Up-flow percolation test. 3) 藤川ら: 上向流カラム通水試験における溶媒通水速度の適用範囲の検討, 第13回環境地盤工学シンポジウム, pp.149-154, 2019.

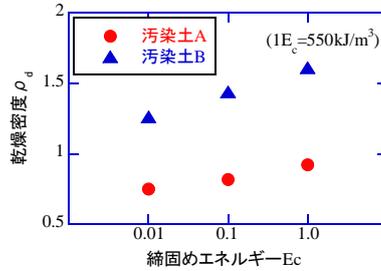


図-3 締固めエネルギーと乾燥密度の関係

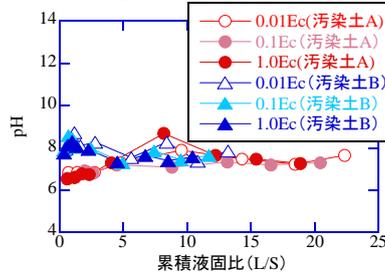
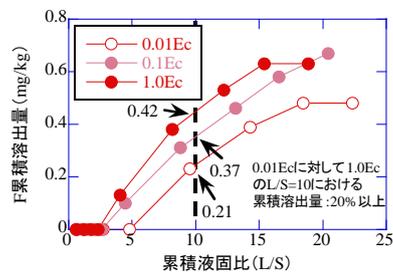
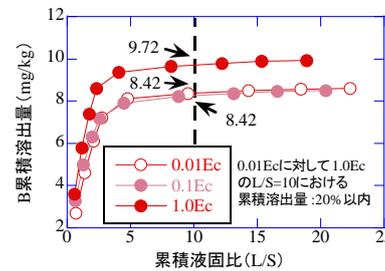


図-5 累積液固比と pH の関係



(a) 汚染土 A



(a) 汚染土 A

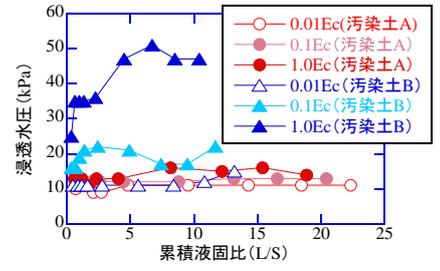


図-4 累積液個比と浸透水圧の関係

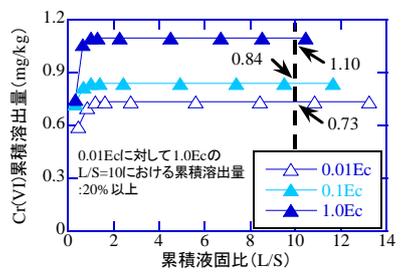
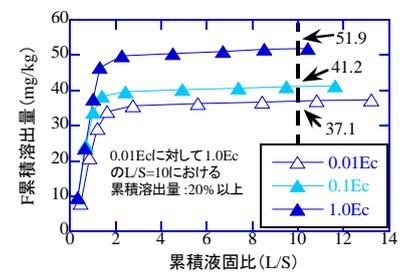
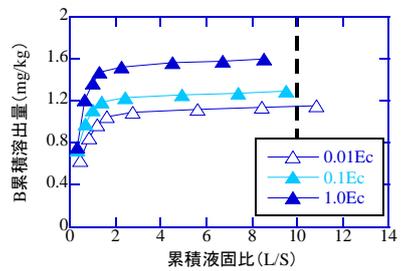


図-6 汚染土 B の累積液固比と累積溶出量の関係(六価クロム)

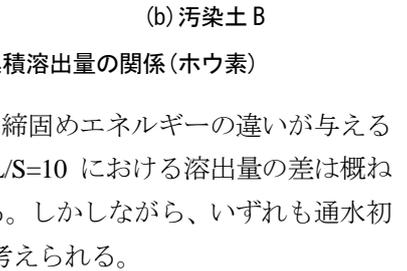


(b) 汚染土 B

図-7 累積液固比と累積溶出量の関係(ふっ素)



(a) 汚染土 A



(b) 汚染土 B

図-8 累積液固比と累積溶出量の関係(ホウ素)