

鉛汚染土壌の凍結融解洗浄における繰り返し回数の効果

奥村組土木興業(株) 正会員 ○廣瀬 剛
 摂南大学 正会員 伊藤 謙
 タツタ環境分析センター 阪部 秀雄

1. 目的: 身近なところで地下水や土壌の汚染が毎年見つかっている。令和元年の土壌汚染調査結果では、重金属のうち、鉛が要措置区域としての指定件数が多く、対処方法は掘削除去が一般的であった¹⁾。資源の有効利用の観点からは汚染土の洗浄が望ましいが、洗浄の過程で分級された汚染物質を含む細粒土は洗浄することが困難であった。本研究では、凍結融解と酢酸を利用した洗浄技術の洗浄率を改善することを目的とし、凍結融解繰り返し回数と洗浄効果の関係を検討した。

2. 実験方法: 試料土は 425 μm ふるいを通過させた京都伏見産の稲荷山黄土でその物性値を表 1 に示す。試料土に鉛水溶液を加えて練り混ぜ、24 時間養生した後に脱気し、予圧密荷重 $P = 78.5 \text{ kN/m}^2$ まで段階的に圧密させ、直径 $\phi 10 \text{ cm}$ 、高さ $h = 5.0 \text{ cm}$ に成形したものを供試体とした。表 2 に実験条件を示す。洗浄液は、CASE1 ではイオン交換水を、CASE3, 4 では 1.7mol/l の酢酸水溶液を用いた。凍結融解の繰り返し回数 n が洗浄率に及ぼす影響を明らかにするために、CASE3 では $n = 5$ 回、CASE4 では $n = 15$ 回として比較した。

実験には、1次元凍結融解実験装置を用いた²⁾。実験では、荷重 $p = 19 \text{ kN/m}^2$ (CASE1, CASE3), 14kN/m^2 (CASE4) が載荷され、供試体は 1次元凍結融解させた。下部プレートは冷端側 T_c とし、上部プレートを温端型 T_w として下から上に凍結させた。 T_w と T_c の温度差を 10°C に保ち、 $T_w = 10^\circ\text{C}$, $T_c = 0^\circ\text{C}$ から $T_w = 0^\circ\text{C}$, $T_c = -10^\circ\text{C}$ まで冷却速度 $dT/dt = 0.4^\circ\text{C/hour}$ で温度降下させた。その後 $T_w = -10^\circ\text{C}$ まで急冷し、供試体全体を -10°C で 5 時間凍結させた。その後、 T_c と T_w を 10°C まで温度上昇させ、24 時間以上維持した。温度降下時は上部から洗浄液を供給し、融解時は洗浄液の供給を止め下部から排水させた。給排水量は電子天秤で測定し、排水の鉛含有量は蛍光 X 線で測定した。また、pH はガラス電極方式 pH 計、電気伝導率 EC は交流 2 電極方式電気伝導率計により測定された。

3. 実験結果: 図 1 に給排水量と排水中の鉛含有量を示す。凍結融解ごとの給水量と排水量は概ね一致した。CASE1 ではイオン交換水を洗浄液にした。給排水量が多いものの、排水中の鉛含有量は凍結融解繰り返し回数 $n = 3$ 回目以降、約 0mg/l であった。CASE3 では 1.7mol/l の酢酸水溶液を洗浄液とし、 n を 5 回とした。 n の増加に伴い給排水量は減少し、鉛含有量は増加した。CASE4 では 1.7mol/l の酢酸水溶液を洗浄液とし、 n を 15 回とした。 $n = 1\sim 3$ 回目において給排水量と鉛含有量のバラツキが認められた。これは配管内の気泡が給排水量に影響を及ぼした可能性がある。 $n = 4\sim 10$ 回目では給排水量が減少し、鉛含有量が増加した。 $n = 10$ 回目以降は給排水量が $10\sim 20\text{cm}^3$ 、鉛含有量は 125mg/l で安定した。洗浄液を酢酸に代えるとイオン交換水よりも凍結しにくく、給水量が少なくなった。CASE3 よりも CASE4 の給排水量が大きくなった原因として、CASE4 の実験荷重が小さいため凍結しやすいことが影響したと考えられる。

図 2 に凍結融解繰り返し回数 n と pH の関係を示す。CASE1 では n

表 1 試料土の物性値

土粒子 密度 ρ_s (g/cm^3)	液性 限界		塑性 限界			粒度分布			鉛含 有量 (mg/kg)	pH	EC (mS/m)
	LL (%)	PL (%)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)						
2.679	36.5	15.9	4.0	66.5	29.5	24	6.89	48			

表 2 実験条件

実験名	洗浄液		EC (mS/m)	繰り返し 回数 (回)	鉛含有量 (mg/kg) (洗浄前)	予圧密 荷重 p (kN/m^2)	上載 荷重 P (kN/m^2)
	種別	pH					
CASE1	イオン交 換水	8.0	0.1	10		19	
CASE3	酢酸 1.7mol/l	3.1	74.3	5	57	78.5	19
CASE4	酢酸 1.7mol/l	3.1	74.3	15			14

※冷却速度: $dT/dt=0.4^\circ\text{C/h}$, 温度勾配 $dT/dh=2.0^\circ\text{C/cm}$

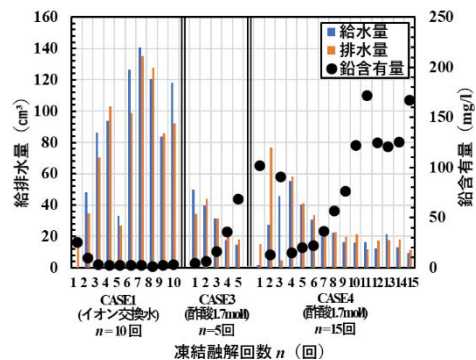


図 1 給排水量と排水中の鉛含有量

キーワード 凍結融解, 鉛, 洗浄,

連絡先 〒160-0004 東京都新宿区四谷 1 丁目 (外濠公園内) (公社) 土木学会 全国大会係 TEL 03-3355-3442

の増加により pH は 6 から 7 に増加した。CASE3, 4 では $n = 1$ 回目の pH は CASE1 と同じで pH が約 6 あったが、 $n = 2$ 回目以降は pH 約 4 で安定した。CASE3, 4 では酢酸の pH が 3.1 であるため、 $n = 2$ 回目以降の排水には酢酸が排水中に含まれている可能性がある。

図 3 に凍結融解繰り返し回数 n と電気伝導率 EC の関係を示す。CASE1 では EC が 20mS/m 以下であった。CASE3, 4 では、 n と共に EC が増加した。CASE4 では $n = 10$ 回目以降で増加が緩やかになり、 $n = 15$ 回目には約 400mS/m まで増加した。酢酸で洗浄すると、 n の増加により排水中に鉛が増えていることが示唆された。

図 4 に凍結融解ごとの鉛排出量の変化を示す。CASE1 では、鉛排出量は 0.5mg 未満であった。CASE3 は n と共に鉛排出量が増加した。CASE4 は $n = 1 \sim 3$ で鉛排出量が約 1.5mg から約 0.4mg まで減少したが、 $n = 3 \sim 10$ 回目にかけて再び増加し、 $n = 10$ 回目以降は約 2mg で安定した。洗浄液に酢酸水溶液を用いるとイオン交換水よりも鉛が多く排出される。土粒子表面付近に電氣的に捕捉されていた鉛が酢酸により洗い流された可能性がある。

図 5 に凍結融解繰り返し回数と洗浄率の伸びを示す。洗浄率は、洗浄前の供試体に含まれる鉛量に対する鉛排出量の比である。CASE1 では、 n の増加により洗浄率が直線的に増加した。CASE3 は指数的に増加し、CASE4 では $n = 10$ 回目までは指数的に増加し、その後、増加が収束する傾向を示した。イオン交換水よりも酢酸を用いる方が繰り返しによる洗浄率の増加量が大きくなった。 $n = 15$ 回目までは、凍結融解繰り返し回数を多くするほど高い洗浄率が得られ、1.7mol/l の酢酸水溶液では洗浄率が 41% にまで達した。

4. 結論 : 1) イオン交換水を用いて洗浄すると、凍結融解の繰り返しにより、給水量は多く、排水中の鉛含有量は小さくなる。一方、酢酸を用いると、給水量は少なく、排水中の鉛含有量は大きくなるが、その変化は $n = 10$ 回目以降収束する。2) 排水中の pH は、イオン交換水を使用して洗浄すると中性を示すが、酢酸では弱酸性を示す。排水中の EC はイオン交換水では小さく、酢酸では大きくなる。3) 鉛排出量は、イオン交換水では小さく、 n の増加による変化はないが、酢酸では $n = 10$ 回目まで増加し、その後変化は小さくなる。4) 洗浄率は n の増加に伴い大きくなる。酢酸を用いて洗浄した方が洗浄率は大きくなり、15 回目で 41% まで増加した。

謝辞 : 本研究には科学研究費補助金(基盤研究(C))課題番号 21K04262 番が使用されています。本研究の主要部分は摂南大学都市環境工学科の野田和希(現:南海辰村), 建井那月(現:五洋建設), 坂本沙世(現:日研トータルソーシング), 河内貴史の卒業研究として実施されたものです。**参考文献** : 1) 環境省: 令和元年度 土壤汚染対策法の施行状況及び土壤汚染調査・対策事例などに関する調査結果, <http://www.env.go.jp/water/report/r2-01/index.html>, 2021.

2) 廣瀬剛: 洗浄液の事前混合がイオン交換と凍結融解を利用した汚染土壤洗浄技術の洗浄効率に及ぼす影響, 第 56 回地盤工学研究発表会, 13-4-2-02, 2021.

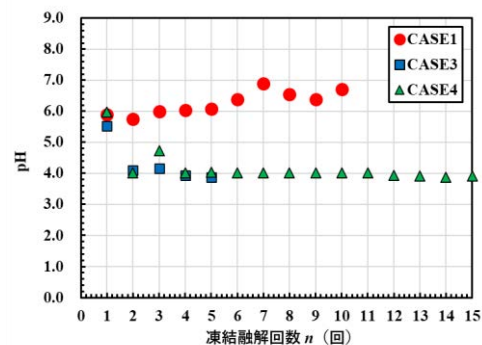


図 2 凍結融解繰り返し回数と pH

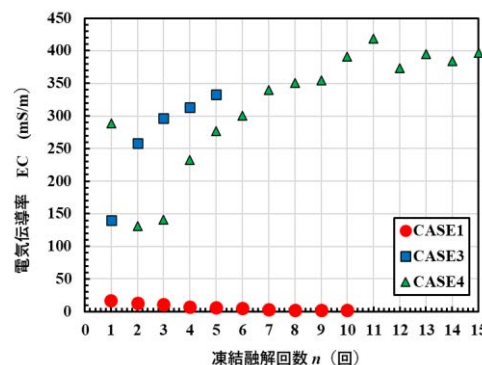


図 3 凍結融解繰り返し回数と EC

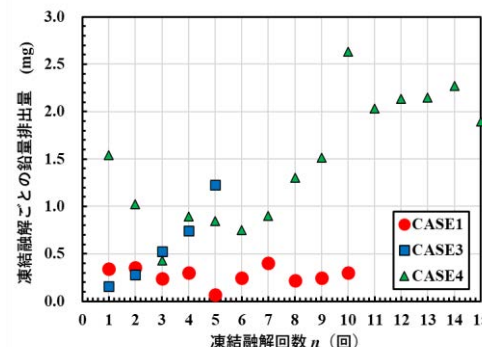


図 4 凍結融解繰り返し回数と凍結融解ごとの鉛排出量

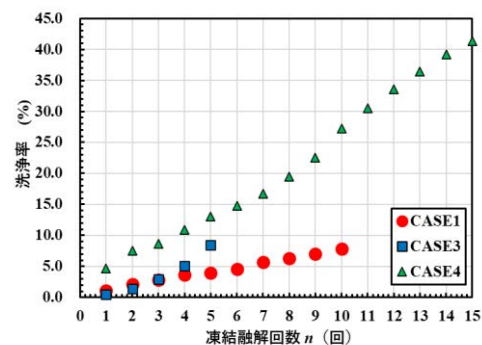


図 5 凍結融解繰り返し回数と洗浄率