

イオン交換と凍結融解を利用した汚染土壌洗浄技術の 洗浄液事前混合による洗浄効果

イオン交換 凍結融解 土壌洗浄技術

奥村組土木興業 正会員 ○廣瀬 剛
摂南大学 国際会員 伊藤 謙
錦城護謄 正会員 山内 義文
河南理工大学 芮 大虎

1. 目的：汚染土壌の洗浄工法では土から細粒分が取り除かれ、砂分のみが洗浄・再利用される。一方、取り除かれた細粒分は脱水ケーキとして処分される。これは細粒分では汚染物質が細粒土の土粒子表面に電気的に強く吸着され、洗浄することが困難であったためである。

そこで、細粒土の洗浄を目的とし、凍結融解を利用して洗浄液を高温側から低温側へ効率的に通水し、洗浄液にイオン交換物質を使用する洗浄技術が提案された。模擬汚染物質として土に含まれるカリウム（K）を対象として、洗浄液に酢酸アンモニウム水溶液と真水とを使用して効率的な洗浄方法が検討された。実験の結果、酢酸アンモニウム水溶液と真水とを間欠供給して凍結融解を繰り返すと、凍結融解繰返し回数 $n < 5$ では酢酸アンモニウム濃度が 0.1 mol/l 、 $n \geq 5$ では 0.37 mol/l で効率よく洗浄された¹⁾。

本研究では洗浄液を加えた脱水ケーキ（事前混合）を用いて、凍結融解による洗浄効果を明らかにした。

2. 実験内容：試料土は $425 \mu \text{m}$ ふるいを通過させた黄土 16N で、物性値を表 1 に示す。供試体は「事前混合なし」では練り混ぜに真水を、「事前混合有り」では酢酸アンモニウム水溶液を用いて液性限界の 1.3 倍の含水比に調整し、脱気して 24 時間養生した後に $\phi 10 \text{cm}$ の円筒形の圧密容器に入れ、予圧密荷重 $P = 20 \text{ kN/m}^2$ まで圧密したものを高さ 5cm で成形したものである。

洗浄実験には一次元凍結融解透水実験装置²⁾を用い、実験荷重 $p = 20 \text{ kN/m}^2$ で供試体上面を高温側(Tw)、下面を低温側(Tc)として下から上に凍結させた。凍結過程では上部から洗浄液を供給し、融解過程では洗浄液を供給せず、下部から排水した。これを 1 サイクルとして凍結融解を繰り返した。実験前および実験後の供試体および排水中の K 濃度は ICP 発光分光分析法により測定された。

表 2 に実験条件を示す。本研究では酢酸アンモニウム水溶液の事前混合による影響を明らかにするため、①事前混合の有無（MN1-1：「事前混合なし」、MN2-1～MN3-1：「事前混合有り」）、②事前混合する酢酸アンモニウム濃度（事前混合濃度）（MN2-1～MN3-1： $0.01 \sim 0.1 \text{ mol/L}$ ）、③凍結時に供給する洗浄液の酢酸アンモニウム濃度（洗浄液濃度）（MN2-1： 0.1 mol/L 、MN3-2： 0.05 mol/L ）を検討した。

3. 結果と考察：図 1 に凍結融解繰返し回数と凍結融解ごとの凍上量の関係を示す。「事前混合なし」の MN1-1 は凍結融解繰返し回数 $n = 3$ 回まで凍結融解ごとの凍上量 h が急激に減少し、その後約 $h = 10 \text{ mm}$ に収束した。「事前混合有り」で洗浄液濃度の高い MN2-1、2-2、3-1 は $n = 1 \sim 5$ 回で変化が少なく、約 $h = 10 \text{ mm}$ であった。事前混合濃度および洗浄液濃度の低い MN3-1 は $n = 2 \sim 5$ 回で h が減少したものの、 $n = 5$ 回における h は最も大きく、約 $h = 14 \text{ mm}$ であった。

図 2 にカリウム含有量分布と事前混合濃度の関係を示す。初期値は洗浄実験を行う前の未凍結土の K 含有量である。「事前混合なし」の MN1-1 では供試体の上部で初期値よりも K 含有

表 1 試料土の物性値

土粒子密度 ρ_s g/cm ³	液性限界 w_L %	塑性限界 w_p %	粒度分布		
			砂分 %	シルト分 %	粘土分 %
2.702	54.5	22.1	0.9	31.5	67.6

表 2 実験条件

実験番号	事前混合の 洗浄液濃度	凍結融解 繰返し回数	洗浄液 濃度	洗浄液 給水回数
	mol/L	n 回	mol/L	n' 回
MN1-1	なし	5	0.1	ALL
MN2-1	0.01	5	0.1	ALL
MN2-2	0.05	5	0.1	ALL
MN3-1	0.1	5	0.1	ALL
MN3-2	0.01	5	0.05	ALL

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

予圧密荷重: $P = 20 \text{ kN/m}^2$, 実験荷重: $p = 20 \text{ kN/m}^2$

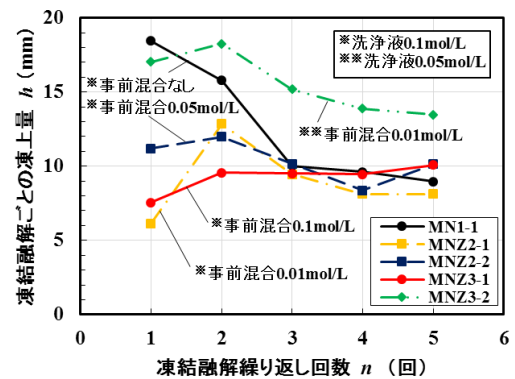


図 1 凍結融解繰返し回数と凍上量の関係

量が低下するが、下部においてはK含有量が初期値よりも小さくなった。「事前混合有り」では事前混合濃度が高いほど供試体下部のK含有量が小さくなる傾向が認められ、事前混合濃度が高いMNZ2-2およびMNZ3-1では供試体下部のK含有量が初期値よりも小さくなった。

図3にカリウム含有量分布と洗浄液濃度の関係を示す。事前混合濃度が同じでも、洗浄液濃度が低いMNZ3-2は、洗浄液濃度が高いMNZ2-1と比較して供試体下部のK含有量が小さくなった。図2、図3より、「事前混合有り」では事前混合および洗浄液濃度が高いMNZ3-1で最もK含有量が小さくなった。

図4に凍結融解繰り返し回数とカリウム累計排出量および洗浄率の関係を示す。洗浄率はK累計排出量と未凍結土のK含有量との比を百分率で示したものである。凍結融解を繰り返すごとにK累計排出量および洗浄率は増加した。「事前混合有り」のMNZ2-1～MNZ3-2は、「事前混合なし」のMN1-1よりもK排出量および洗浄率が大きくなった。「事前混合有り」では事前混合濃度の高いMNZ3-1、MNZ2-2のK排出量が大きかった。事前混合濃度が同じ場合、洗浄液濃度の低いMNZ3-2は、洗浄液濃度が高いMNZ2-1よりも最終的なK排出量および洗浄率が大きくなった。

図5に置き換え率と洗浄率の関係を示す。置き換え率は凍結融解により排出された水量と未凍結土の間隙水量との比を百分率で示したものである。「事前混合なし」のMN1-1と比較して、「事前混合有り」のMNZ2-1～3-2では洗浄率が大きくなった。「事前混合有り」では、事前混合濃度が低いMNZ2-1は洗浄率が最も小さく、事前混合濃度が高いMNZ2-2、MNZ3-1は洗浄率が大きくなった。事前混合濃度が最も高いMNZ3-1は置き換え率が最も小さかった。洗浄液濃度が低いMNZ3-2は洗浄率および置き換え率が共に大きくなった。

事前混合を行なうとK排出量は大きく、K含有量は小さくなる。これは事前混合により酢酸アンモニウムイオンの働きで土粒子表面のKが脱着され、凍結融解により多く排出されたためと考えられる。ところが、事前混合濃度を低くすると供試体下部にKが溜る傾向が認められた。溜ったKは洗浄液濃度を低くすると排出されるが置き換え率が大きくなり効率的に洗浄できない。今回の実験条件では事前混合濃度の高い方が小さい置き換え率で大きな洗浄率が得られ、効率的に洗浄できた。

4. まとめ

本研究の成果をまとめる。①事前混合を行うとK排出量は大きくなる。②凍結融解を繰り返すごとにK累計排出量と洗浄率は増加する。③事前混合濃度を高くすると供試体下部のK含有量が小さくなり、小さい置き換え率で高い洗浄率が得られる。謝辞：本研究はタツタ環境分析センターの阪部秀雄氏にご協力いただき、実験の主要部分は摂南大学都市環境工学科の神田充伯氏、高橋尚也氏によるものです。厚く御礼申し上げます。参考文献：1) 廣瀬剛他：凍結融解作用とイオン交換反応を利用した洗浄技術の効率化に及ぼす洗浄液濃度と凍結融解繰り返し回数の影響、第13回地盤改良シンポジウム論文集、pp.371-374、2018。2) 井上拓人他：凍結融解とイオン交換反応を利用した土壌洗浄実験における洗浄効率に及ぼす影響、第12回地盤改良シンポジウム論文集、pp.277-282、2016。

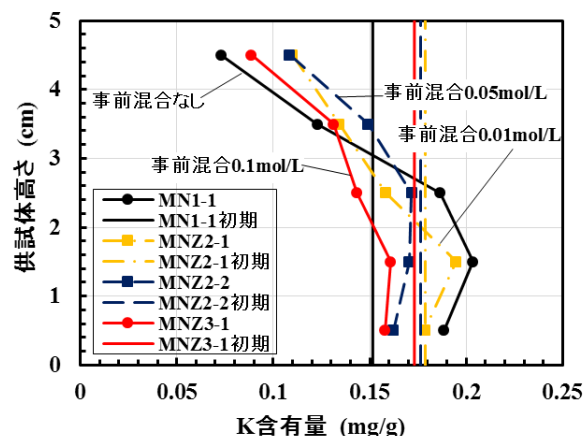


図2 K含有量分布と事前混合濃度の関係

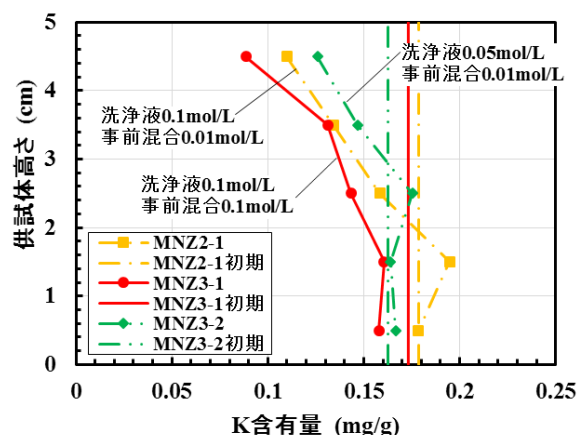


図3 K含有量分布と洗浄液濃度の関係

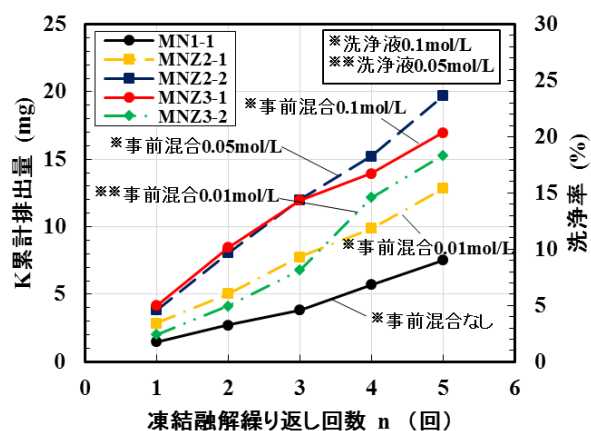


図4 凍結融解繰り返し回数とK累計排出量および洗浄率の関係

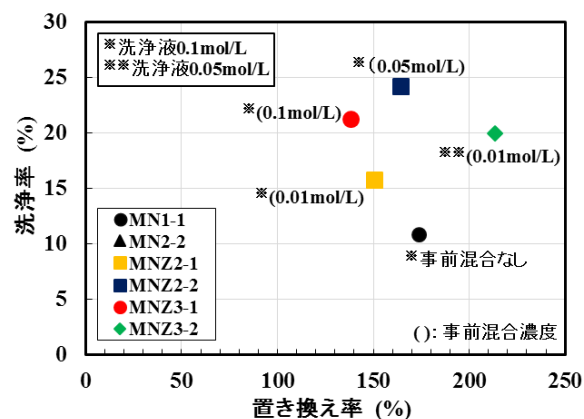


図5 置き換え率と洗浄率の関係