

京都大学防災研究所 フェロー 嘉門雅史
京都大学防災研究所 正会員 乾 徹
京都大学大学院 学生員 ○ 佐々木和憲

1. はじめに

浚渫土や建設汚泥の処分および有効利用に際しては、強度特性の改善及び、含有する重金属の封じ込めを目的としてセメント処理をするのが一般的である。しかしながらセメント固化処理した汚染土の長期的な封じ込め効果については、適当な評価方法が確立されていない。そこで著者らは汚染土固化体の長期安定性を検討することを目的として、各環境条件下におけるセメント固化処理土の溶出特性、ならびに試験方法に関する検討を行っている¹⁾。本報告では、セメント処理土が海面埋立て処分や海岸域で利用されることを想定して、海水環境におけるセメント処理土からの Zn、Cr(VI)の溶出特性を、セメント処理土等の低透水性材料に適するとされる Dynamic Tank Leaching Test（以下、DTLT）により評価した。

2. 実験方法と実験条件

室内試験では模擬汚染土として Zn 含有量が 800 mg/kg-drysoil、w = 90% となるように調整した深草粘土を使用した。作製した汚染土の基本物性を表 1 に示す。汚染土の湿潤質量に対して 8% となるように普通ポルトランドセメント（OPC）、B 種高炉セメント（SC）をそれぞれ添加・混合した。これをφ50×74 mm の塩化ビニル製円筒モールドに締固め、その後 14 日間密閉養生したものを成型体試料とした。一方、養生終了後に脱型し、2 mm 以下に粉碎して 1 日間整置した後、同モールドに脱型前と同密度になるように締固めたものを再作製試料とした。さらに汚染土を最適含水比 w_{opt} = 29.3% で同モールドに締固めたものを無処理試料とし、各試料の溶出特性を比較した。

表 1 汚染土の基本物性

液性限界	51.3 %
塑性限界	26.0 %
最適含水比	29.3 %
強熱減量	7.42 %
亜鉛含有量	800 mg/kg

表 2 海水と人工海水の基本物性

海水		人工海水	
イオン	濃度 (mol/kg)	イオン	濃度 (mol/kg)
Cl ⁻	0.545	Cl ⁻	0.451
Na ⁺	0.468	Na ⁺	0.331
SO ₄ ²⁻	0.028	SO ₄ ²⁻	0.029
Mg ²⁺	0.054	Mg ²⁺	0.037
Ca ²⁺	0.010	Ca ²⁺	0.006



写真 1 DTLT 試験状況

DTLT はカナダで適用されている試験方法²⁾に従い実施した。2L プラスチックボトルに溶媒体積 $V \text{ cm}^3$ が試料の表面積 $S \text{ cm}^2$ に対して $V / S = 10$ となるような量の溶媒（蒸留水、人工海水）を準備した。使用した人工海水の基本物性を表 2 に示す。溶媒中に試料をナイロンメッシュで吊るし、所定の期間（1、2、3、4、5、19、47、90 日目）毎に溶媒を交換して、実験後の溶媒中の Zn、Cr(VI)の濃度、pH をそれぞれ測定した。なお、処理土より溶出した重金属は溶媒の pH によっては沈殿していると考えられるが、溶媒中に存在する重金属は溶出したものと判断し、各溶媒を実験後 1N HNO₃ で pH = 3.5 まで低下させてから濃度を測定した。また、無処理試料では初期の溶媒交換を頻繁に行い、初期溶出を詳しく調べた。DTLT の試験状況を写真 1 に示す。また比較試験として同じ試料を対象に、環境庁告示 46 号試験（以下、JLT-46）を行い、DTLT で得られた結果と比較した。

3. 実験結果と考察

3.1 強度特性 固化処理土は改良後に地盤材料として使用することが多く、用途に適した固化強度が求められる。処理土の強度特性を把握するため、DTLT 試験の実施前後の処理土に対して一軸圧縮試験を行った。表 3 に結果を示す。28 日密閉養生した OPC、SC 処理土はともに十分な強度が示した。90 日間蒸留水に浸せきさせた処

表 3 一軸強度試験結果

28 日間養生後		DTLT 試験終了後 (90 日後)	
試料	一軸圧縮強さ (MPa)	試料	一軸圧縮強さ (MPa)
OPC 成型体	0.52	OPC 成型体	1.00
SC 成型体	0.32	SC 成型体	0.28
OPC 再作製	0.10	OPC 再作製	0.94
SC 再作製	0.07	SC 再作製	0.30
		蒸留水	0.21
		海水	0.08
		蒸留水	0.70
		海水	0.13

理土は水浸養生効果により強度が増加した。また、海水に浸せきさせた OPC 処理土で強度低下が著しかった。一方、SC 処理土の強度低下は比較的小さかった。この理由として、海水に含まれる硫酸イオンとの反応によりエトリンガイトの生成過程において体積膨張を生じたこと、海水中の塩化物イオンによる浸食作用が考えられる。さらに OPC は一般的に早期に強度が発現し、SC では長期的な強度が発現することも、強度特性に影響していると考えられる。

表 4 JLT-46 試験の結果

試料	pH	Zn	Cr (VI)	pH	Zn	Cr (VI)
		(mg/L)	(mg/L)		(mg/L)	(mg/L)
		蒸留水			海水	
OPC (粉体)	12.30	0.05	0.38	12.20	0.08	0.23
SC (粉体)	12.21	0.03	0.09	12.50	0.08	0.05
OPC 処理土	10.25	0.02	ND	9.06	0.01	ND
SC 処理土	10.40	0.02	ND	9.12	0.01	ND
無処理土	3.50	10.30	ND	3.72	9.00	ND

3.2 Cr(VI)の溶出特性 表 4 に JLT-46 試験結果を示す。セメントのみで JLT-46 を行った場合、蒸留水下では OPC、SC はともに環境基準値 (0.05 mg/L) を大きく上回る溶出がみられたが、海水下ではそれぞれ溶出量は減少した。一方、処理土からの溶出は、蒸留水、海水下いずれも検出されなかった。これは処理土内で Cr(VI)が Cr(III)に還元されたためと判断する。また DTLT でも処理土からの Cr(VI)は同様にみられなかった。

3.3 Znの溶出特性

DTLT の結果を図 1~4 に示す。図 1 に処理土と無処理試料からの Zn 溶出量を示す。処理土からの溶出は無処理試料の 1%以下に抑えられ固化処理効果は発揮されている。図 2 は DTLT 試験後の溶媒の pH を各試料について示したものである。蒸留水を溶媒とした場合、処理土ではセメント固化に起因する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の解離反応により、溶媒の pH が 11 前後まで上昇した。一方、無処理土では溶媒の pH は汚染土の pH (pH = 3.5) と同等の値を示しており、Zn の溶出が増加した一要因と考えられる。海水を溶媒とした場合、実験前後で pH の変動は見られなかった。これは海水中では OH^- が解離せずに海水中に含まれる MgSO_4 と反応し、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ として沈殿することが主要因と考えられる。図 3、4 に OPC 処理土および SC 処理土からの Zn 累積溶出量と溶出期間の関係

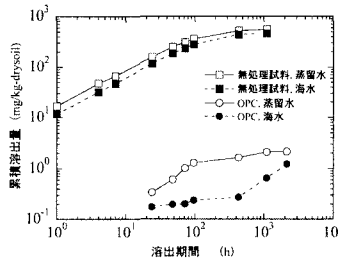


図 1 溶出量の比較

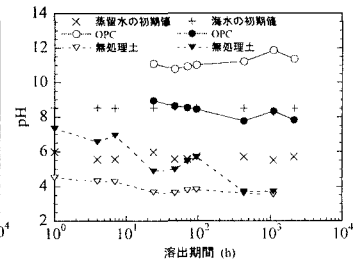


図 2 DTLT の pH 変化

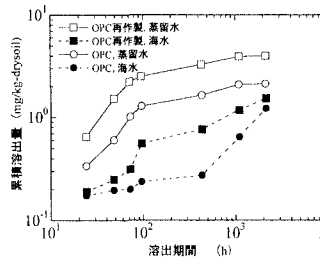


図 3 DTLT での亜鉛溶出量 (OPC)

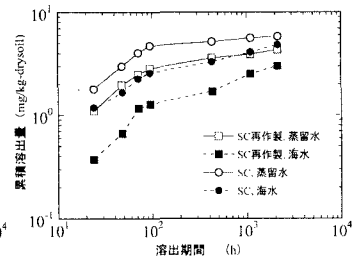


図 4 DTLT での亜鉛溶出量 (SC)

をそれぞれ示す。海水を溶媒とした場合、Zn の溶出量が減少する傾向がみられた。この傾向は JLT-46 試験結果とも一致する。原因として、海水は蒸留水と比較してイオン強度が非常に高いために溶出が妨げられること、Zn は海水の pH (pH = 8 程度) では化学吸着や沈殿の生成により溶出しにくいことが考えられる。また OPC 処理土と SC 処理土の Zn 溶出量を比較すると、溶出初期の段階で SC 処理土からの Zn 溶出量が大きかった。これは、SC は長期強度の発現に優れた材料であるため、試験開始直後には十分な封じ込め効果が得られなかったためと判断できる。試験の進行に伴い、どちらの処理土からも微量の溶出が確認されるに留まった。但し、海水中に浸せきさせた OPC 処理土は大幅な強度の低下が確認されており、90 日経過時点では Zn 溶出量に影響はみられないものの、今後さらに長期の試験を行い検証する必要があると考えられる。

4. おわりに

本報告では重金属として Zn を使用しているが、多くの物理化学的影響要因が各重金属の溶出特性に与える影響を体系的に整理し、重金属汚染土へのセメント固化処理の適用性、耐久性を評価することが望まれる。

<参考文献> 1) 嘉門雅史・乾 徹・M. Boutouil・鄭 載衡・佐々木和憲 (2001): 重金属汚染土のセメント封じ込め処理の長期安定性に関する基礎的評価、第 36 回地盤工学研究発表会、(投稿中)。2) J.A. Stegeman and P.L. Côté (1991): Investigation of test method for solidified waste evaluation— A cooperative program, Environment Canada Conservation and Protection WTC, TS-15, pp58-65.