

スラグ材料の地盤工学的利用に際しての環境影響とその評価について

京都大学大学院地球環境学堂
京都大学大学院地球環境学堂
京都大学大学院地球環境学堂
中央復建コンサルタンツ

フェロー
正会員
正会員

嘉門雅史
○乾 徹
勝見 武
宮城大助

1. はじめに

溶融スラグをはじめとする固体系廃棄物の地盤材料としての利用に際しては、環境庁告示第46号法（以下、JLT46）による溶出試験によってスクリーニングが行われる。一部のスラグについては地盤材料として見なさず、土壤環境基準を適用しない場合もあるが、再利用にあたっては地盤環境に対する環境負荷、安全性を明らかにする必要がある。従来から指摘されているように JLT46 の試験結果は現場における実際の溶出挙動を必ずしも反映するものではない。既存の研究においても pH や水の接触量、接触形態が溶出挙動に及ぼす影響について評価されているが、これらの評価結果を実際の環境影響の判定に反映する方法は確立されていない。本研究では、複数の溶融スラグを対象としてカラム溶出試験を実施し、その基本的な溶出挙動の特性化を行った。さらにその結果に基づいて、路盤材としてスラグを利用した場合の周辺地盤における化学物質の輸送を数値解析によって推定し、環境リスクの概念に基づいて環境安全性を評価する手法を示した。

2. 実験方法

2.1 使用材料 一般廃棄物焼却飛灰溶融スラグ（以下、MSWIFA スラグ）1 種類、および鉄鋼スラグ 4 種類を対象として各種溶出試験を実施した。スラグの物理化学特性を表-1、表-2 に示す。なお、表-2 中に示した Slag-3、Slag-4 については製品として流通しているスラグである。

2.2 溶出試験 有姿の MSWIFA スラグ、および 2 mm ふりい通過分の鉄鋼スラグを対象としてカラム溶出試験を実施した。カラム溶出試験の概念図を図-1 に示す。円筒カラムにスラグを充填し、そのスラグ層に溶媒を浸透させるもので、溶融スラグを地盤材料として利用するときの雨水浸透を模擬している。溶媒には、蒸留水に希硝酸を添加し、pH = 4.0 に調整した溶液を使用した。本研究では、特にスラグ層を浸透する溶媒の流速、およびスラグ層厚が溶出挙動に及ぼす影響を調査した。

2.3 化学分析 MSWIFA スラグ層を通過した検液については鉛（Pb）濃度、亜鉛（Zn）濃度、pH を測定し、鉄鋼スラグ層を通過した検液についてはフッ素（F）濃度、ホウ素（B）濃度、pH を測定した。Pb、Zn、B の測定には ICP 発光分析装置（島津製作所 ICPS-8000）、F の測定にはイオンクロマトグラフ（島津製作所 PIA-1000）を使用した。

3. 実験結果と考察

鉄鋼スラグ（Slag-3）からの F の溶出を対象として、異なる浸透流速で溶媒を流下させてカラム溶出試験結果を図-2 に示す。浸透流速の変化に伴って溶出量も変化している。同じ傾向が MSWIFA スラグからの Pb、Zn の溶出においても確認されており¹⁾、スラグ材料からの無機化学物質の溶出は流速依存性を有

表-1 MSWIFA スラグの物理化学特性		
項 目	試験方法	物性値
粒子密度（有姿）（g/cm ³ ） （2mm 以下）（g/cm ³ ）	JIS A 1202	2.73
		2.89
自然含水比（%）	JIS A 1203	7.28
最適含水比（%）	JIS A 1210	11.3
最大乾燥密度（g/cm ³ ）	JIS A 1210	1.88
修正 CBR（%）	JIS A 1211	43.6
Pb 溶出濃度（mg/L）	JLT46	0.06
pH	JLT46	9.44

表-2 鉄鋼スラグの物理化学特性				
項目	Slag 1	Slag 2	Slag 3	Slag 4
粒子密度（g/cm ³ ）	3.18	3.51	3.03	2.77
自然含水比（%）	7.1	1.1	6.8	7.7
粒径分布 砂分（%） シルト分（%）	96.5	97.8	88.5	85.9
	3.5	2.2	11.5	14.1
pH	12.55	12.48	12.36	10.33
フッ素溶出濃度*（mg/L）	3.19	1.33	0.71	0.30

*：環境庁告示第46号試験

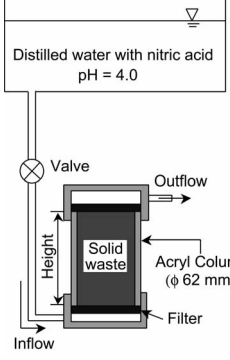


図-1 カラム溶出試験

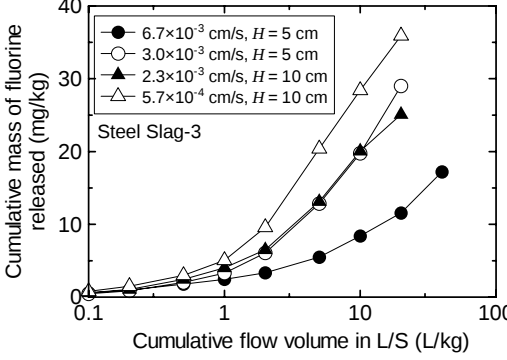


図-2 鉄鋼スラグのカラム溶出試験結果 1

するといえる。図-3に4種類の異なる鉄鋼スラグについて、累積流量が $L/S = 20$ に達した時点での溶出量で正規化した単位質量スラグからの F 溶出量と流量の関係を示す。スラグの種類を問わず、液固比で標記した累積流量と F 溶出量にはほぼ一意的な関係が確認できる。一方、層厚の異なる MSWIFA スラグ層からの Pb 溶出量と累積流量の関係を図-4に示す。スラグ層厚を問わず、特に溶出濃度が高い流量が小さい段階において、累積流量と単位質量スラグからの Pb 溶出量にはほぼ一定の関係がみられる。これらの試験結果から、有効利用したスラグ層からの化学物質溶出量はスラグ層内の浸透流量が明らかになれば、おおよそ溶出試験結果から推測できるといえる。しかし、溶出量は浸透流速に依存することから、試験条件の決定においては留意が必要である。

4. 数値解析を導入した環境影響の推定

鉄鋼スラグ（Slag-3）を路盤材料として利用した事例を想定し、利用開始から10年間に渡るフッ素の地盤内の輸送挙動を浸透流解析および移流分散解析を用いて推定した。解析断面（二次元、単位奥行き）を図-5に示す。0.05 m 厚のアスファルト層下部に 0.5 m 厚の鉄鋼スラグによる路盤層を設けた。周辺には乾燥砂質土、もしくは比較的保水性の高い湿潤地盤が存在するとして、左から右方向に動水勾配 $i = 0.005$ で地下水が流れているとした。解析では地下水位、降雨浸透量を表-3

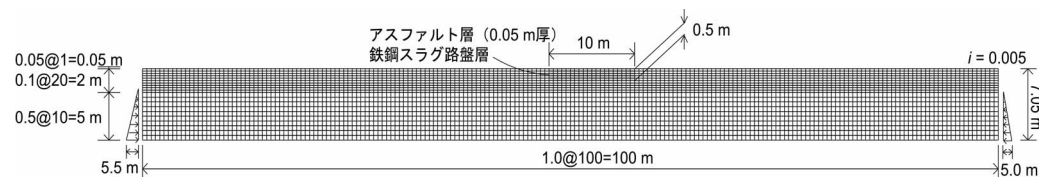


図-5 解析対象断面の一例

に示す条件で変化させた場合の環境影響を評価した。なお、降雨浸透量については、日本における平均的な年降雨量 1,600 mm/year の 50%, 10%, 5%, 2% 値を採用した。環境影響の評価の指標としては、10 年経過時点での地下水中の F 濃度に基づいて、米国環境保護庁が示しているフッ素による健康被害発生の閾値となる摂取量 (0.06 mg/kg-body-weight/day) に不確実性係数 100 を適用し、地下水を日常的に飲用した場合の健康リスクを算定した。スラグからの F 溶出濃度の評価にあ

たっては、浸透流解析によって予め浸透流量を求め、カラム溶出試験で得られた液固比で示した累積流量と溶出量の関係から、原位置で想定される浸透流量に対応する溶出濃度を固定濃度として与えている²⁾。例えば、10 年間に渡って 160 mm/year の割合で降雨浸透が生じる場合、想定断面におけるスラグ層中の浸透量を液固比で表すと高々 0.32 程度である。このことから、溶出濃度の評価に際しては浸透流量の小さい段階での値が重要となるが、一般的に流量が小さい段階では JLT46 の溶出濃度と比較して高濃度となることから、留意が必要である。表-3 に評価結果を示す。算出した Risk 値はいずれも 1 を下回っており、Slag-3 のように土壤環境基準を満たす F 溶出濃度を示す鉄鋼スラグであれば、周辺環境への負荷は無視できるレベルであるといえる。算出された Risk 値はスラグ層下部での F の浸透 Flux とほぼ線形的な関係を示しており、降雨浸透量が多い場合や湿潤地盤と比較して浸透時の実流速が高い乾燥地盤において Risk が高い値を示す。このことから、廃棄物の有効利用に伴う環境影響の評価にあたっては、Flux の観点からの評価が重要になるといえる。

【参考文献】 1) 嶋田大士・嘉門雅史・勝見 武・乾 徹 (2004): 一般廃棄物焼却灰の熔融スラグを地盤材料として利用する際の環境影響に関する研究, 平成 16 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 投稿中。 2) 嘉門雅史・宮城大助・乾 徹・勝見 武 (2004): 鉄鋼スラグの地盤材料としての利用時における環境リスクの実験的検討, 第 39 回地盤工学研究発表会, 投稿中。

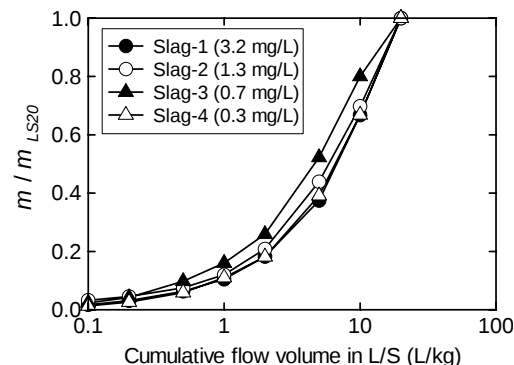


図-3 鉄鋼スラグのカラム溶出試験結果 2

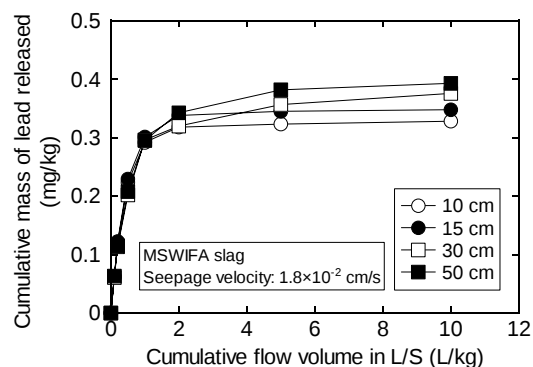


図-4 MSWIFA スラグのカラム溶出試験結果

表-3 解析ケースと環境影響評価の結果

Case	地下水位 深さ (m)	降雨浸透量 (mm/year)	地盤	浸透 Flux (mg/m/day)	Risk 値
1	4.8	160	乾燥	1.0×10^0	5.0×10^{-2}
2	3.8	160	乾燥	1.0×10^0	5.2×10^{-2}
3	2.8	160	乾燥	1.0×10^0	5.4×10^{-2}
4	1.8	160	乾燥	1.0×10^0	5.5×10^{-2}
5	4.8	800	乾燥	2.2×10^0	8.8×10^{-2}
6	4.8	80	乾燥	5.0×10^{-1}	2.7×10^{-2}
7	4.8	32	乾燥	2.0×10^{-1}	1.2×10^{-2}
8	4.8	160	湿潤	7.6×10^{-1}	3.1×10^{-2}