

1. スラグの有効利用の現状

各種溶融スラグには都市ごみ焼却残渣を溶融した都市ごみ溶融スラグ、下水汚泥を溶融した下水汚泥溶融スラグ、鉄鋼の製造過程での副産物である鉄鋼スラグ等がある。

都市ごみ溶融スラグは、その実施設が国内で16施設（平成9年1月現在、ごみの直接溶融(2)、焼却灰の溶融(14)）しか稼働していないこともあり、スラグの発生量が約10万t（平成7年度）と少ない上に品質の変動があるため埋立処分される場合が多く、有効利用されているスラグはその1/4の約2.5万tと微々たるものである。主な用途としては、下層路盤材、埋戻し材、アスファルト骨材、インターロッキングブロック等があげられる。

下水汚泥溶融スラグは最終安定化形態の3.6%（56000t、平成5年度）がスラグとして排出され、その内、16000tが建設資材として利用されている。

鉄鋼スラグは、銑鉄製造過程で生成される高炉スラグと製鋼過程で生成される製鋼スラグに分類され、高炉スラグはセメントや路盤材等に100%再利用（平成6年度）されている。一方、製鋼スラグは年間約1100万tが再利用（平成6年度）されているが、埋め立てに用いられる等、有効利用されているとは言い難い場合も多い。

2. 各種スラグの路盤材への適用性に関する試験

(1) 概要

ここでは、以下に示すスラグを用いて、特に環境保全性と路盤材特性の試験を行い、各種スラグの路盤材への適用性について比較検討を行った。また、鉄鋼スラグについては実路（県道）試験を行い、供用性についての検討も行った。

- ・鉄鋼スラグ：転炉スラグ(75%)、高炉徐冷スラグ(20%)、及び高炉水砕スラグ(5%)
を配合した水硬性粒度調整鉄鋼スラグ
- ・都市ごみ溶融スラグ①：プラズマ溶融炉による空冷スラグ
- ・都市ごみ溶融スラグ②：プラズマ溶融炉による水砕スラグ
- ・下水汚泥溶融スラグ①：表面溶融炉による水砕スラグ
- ・下水汚泥溶融スラグ②：堅型旋回流炉による空冷スラグ

表1 溶出試験結果の例(1)

(2) 環境保全性

スラグが路盤材として利用された場合、雨水や地下水等との接触から環境への影響が考えられる。各種スラグの溶出試験（環告13号法）の結果を表1-2に示すが、ともに有害物質の検出は見られなかった。また、3種類の溶媒を用いての溶出試験を比較しても大きな差は見られず、鉄鋼スラグでFe、Na、Ca等、下水汚泥スラグ②でZnが検出されたが、特に問題となる値ではない。しかし、鉄鋼スラグのpHはCaO起因の高いアルカリ性(11.8~11.9)を示しており、雨水時のCaO溶出が危惧される。

	鉄鋼スラグ		
	標準	硫酸 (pH4)	酢酸 (pH4)
T-Hg	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Pb	<0.01	<0.01	<0.01
Cd	<0.001	<0.001	<0.001
Cr ⁶⁺	<0.02	<0.02	<0.02
As	<0.005	<0.005	<0.005
Org-P	<0.1	<0.1	<0.1
PCB	<0.0005	<0.0005	<0.0005
CN	<0.02	<0.02	<0.02
Zn	<0.01	<0.01	<0.01
Fe	0.08	0.11	0.05
Cu	<0.01	<0.01	<0.01
Na	3	2.3	2.7
Ca	310	220	260
Cl ⁻	53.1	49.6	56.6
pH	11.8		

単位：mg/l（pHを除く）

従って、舗装の際には表層及

び側面へのアス
ファルト舗装を
確実にし、雨
水によるCaO溶
出防止を図るこ
とが必要である
と思われる。な
お、雨水溶出物

質の土壌吸着実験も

合わせて実施したが、有害物質の溶出は全て基準値以下であった。

表2 溶出試験結果の例(2)

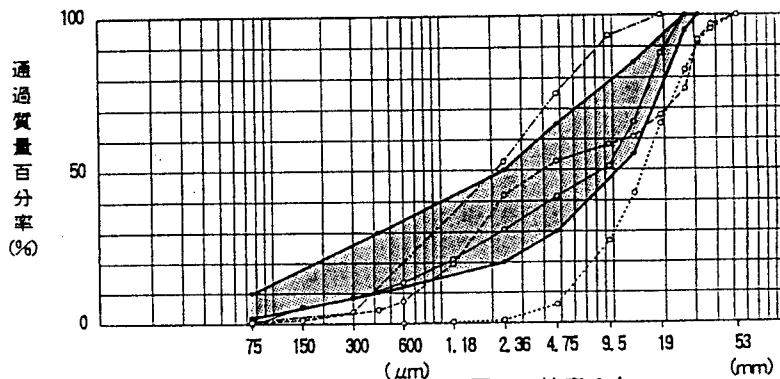
項目	標準	標準	硫酸(pH4)	酢酸(pH4)	標準	標準	pH4
T-Hg	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Pb	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.1	<0.01	<0.01
Cd	<0.005	<0.001	<0.001	<0.001	<0.01	<0.01	<0.01
Cr ⁶⁺	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.05	<0.02	<0.02
As	<0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.001	0.008
PCB	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0003	—	—
CN	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	—	—
Zn	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	—	<0.01	0.62

単位：mg/l

(3) 路盤材特性

各種スラグの基本特性試験の結果を図1及び表3に示す。

粒度分布では、各種スラグともに細粒分が少ない。物理・化学特性の試験結果によると、鉄鋼スラグは修正CBRや一軸圧縮強さ等、上層路盤材としての全ての品質規格を満足しており、十分使用が可能であると考えられる。都市ごみ溶融スラグと下水汚泥溶融スラグは修正CBRの値が小さく、上層路盤材としての規格を下回る結果となった。また、両スラグとも鉄鋼スラグと比較して水硬性、粘着力が低いため、一軸圧縮強さは鉄鋼スラグより小さい値になる。従って、上層路盤材に単体で使用するのには難しい。例えば、発生量の多い鉄鋼スラグ等、他の骨材と混合し粒度調整を行った後、強度を増加させた上で路盤材として使用されるべきであると考えられる。



凡例	
————	M-25規格
————○————	鉄鋼スラグ
-----	都市ごみスラグ①
- · - · -	都市ごみスラグ②
·····	下水汚泥スラグ①

図1 粒度分布

表3 路盤材特性試験結果の例

項目	各種スラグと品質規格	鉄鋼スラグ				道路用砕石規格	
		都市ごみスラグ①	都市ごみスラグ②	下水汚泥スラグ①	下水汚泥スラグ②	上層路盤材	下層路盤材
単位容積質量 (kg/l)		2.036			1.644	1.5以上	
実績率 (%)		71.2			61.0		
最大乾燥密度 (g/cm ³)		2.374	2.006		1.486		
最適含水比 (%)		10.6	2.00		11.0		
修正CBR (%)		80, 132*	29.7	3.3	23.5	80 以上	20 以上
一軸圧縮強さ (kg/cm ²)		12.9				12 以上	
水浸膨張比 (%)		0.009				1.5以上	1.5以上

*：締固め度90%で修正CBR80、締固め度95%で修正CBR132

(4) 実路試験結果による供用性

(2)、(3)において上層路盤材への使用が可能であると考えられる水硬性粒度調整鉄鋼スラグの供用性を確認するため、一般県道での実路試験を行った〔設計交通量(C交通)、設計CBR3、等値換算係数 $T_A=35$ 〕。上層路盤材として、鉄鋼スラグを施工する区間(延長90m)と粒度調整碎石を施工する区間(延長90m)の計180mの区間で試験舗装を行った。そこで、両区間の下層路盤(クラッシャーラン)、上層路盤、表層について道路施工時及び交通解放6ヶ月経過後における調査試験を行い比較検討をした。

表4に試験結果を示す。繰返し平板載荷試験による変形係数及び地盤係数 K_{30} は鉄鋼スラグ施工区間の方が粒度調整碎石施工区間よりやや大きい。たわみ量は上層路盤で鉄鋼スラグ施工区間の方が大きい。表層では粒度調整碎石施工区間のたわみ量の3分の1である。舗装路面のわだち掘れ量の測定結果によると両施工区間ともに横断形状の良好な仕上がり状況を示した。舗装路面の平坦性測定結果によると鉄鋼スラグ施工区間の方が良好な結果であった。また、6ヶ月後の試験結果からも特に問題なく上層路盤材として十分な適応性が確認できた。

表4 実路試験結果

調査試験項目		施工時						6ヶ月後	
		下層		上層		表層		表層	
		スラグ	碎石	スラグ	碎石	スラグ	碎石	スラグ	碎石
平板 載荷	変形係数(kgf/cm ²)	1193	350	1133	1034				
	地盤係数 K_{30} (kgf/cm ³)	68	20	64	58				
たわみ量(1/100mm)		346	345	146	109	30	94	49	77
わだち掘れ量(mm)						0	-1	0	-2
平坦性(mm)						2.31	3.25	2.39	2.74

舗装の設計は、日本道路協会のアスファルト舗装要綱やセメントコンクリート舗装要綱及び通達が全てに優先するシステムとなっている。舗装(路盤工)の使用材料は、一般的に車道部では粒度調整碎石(径40mm以下)、そして最近では水硬性粒度調整鉄鋼スラグ(HMS 径25mm以下)でも可とされている。水硬性粒度調整鉄鋼スラグの使用については、以下のような条件設定がなされているので注意を要する。

- ①工事場所が供給可能地区内であること ②道路に近接した飲料水井戸及び養魚池等がないこと
- ③水田の場合は、田面とスラグ路盤底面の差が30cm以上あること。
- (側溝、擁壁等が完備されている場合は可)
- ④等値換算係数を考慮して粒度調整碎石と経済比較を行うこと。

3. まとめ

- ・都市ごみ溶融スラグ及び下水污泥溶融スラグを道路用路盤材として使用するには、水砕スラグは空冷スラグに比し強度が低いため、適切な粒度調整を行い、両スラグとも路盤材としての強度を満足させなければならない。さらに、他の骨材と混合して使用することが必要である。
- ・転炉スラグを75%配合した鉄鋼スラグは、上層路盤材として十分な強度が得られ供用可能であることが分かった。
- ・今後の課題としては、各種スラグの特徴を生かした使用を促進するべきである。例えば、鉄鋼スラグに不足している粒径を補うように他のスラグやコンクリート塊等を混合し、上層路盤材としての品質規格を保持できるような検討が望まれる。また、スラグの有効利用を図るため溶融条件の調整及びスラグの品質改良を含め安定した品質のスラグとすることが必要である。
- ・環境保全性については、焼却灰やその溶融スラグ等を用いた成型物は、比表面積の減少、透水性の減

少、固化による有害物質の封じ込め等により、有害物質が溶出し難い状態であると考えられ、各種スラグとも短期では問題のないことがわかったが、今後Pb、Cr⁶⁺等の重金属類については溶融処理結果の確認として土壌環境基準（環告46号法）、アベイラビリティ法、炭酸ガス飽和法との比較、さらに中長期での実環境下での溶出挙動チェックという視点での検討が安全性評価のために必要である。また、スラグの再利用を想定した安全性評価としての溶出試験と判定項目等その内容についての検討も必要と思われる。その結果として有効利用する際、使用用途を考慮し管理することもありえると考えられる。

- 【参考文献】 1) 清水 治 他：表面溶融による下水汚泥の処理とリサイクル、資源環境対策 vol. 30 No. 12
2) 清水 治 他：汚泥溶融スラグの骨材利用、骨材資源 通巻No.93、1992年
3) 渡部 春樹：汚泥処理技術の現状と将来展望、下水道協会誌 vol. 33, No.98, 1996年
4) 中川 美利他：各種スラグの道路用路盤材に関する試験について 第6回廃棄物学会
5) 中川 美利他：各種スラグの道路用路盤材への適用性について

第18回全国都市清掃研究発表会