

熔融スラグの有効利用技術

No. 150

国土交通省東北地方整備局東北技術事務所 所長

調査試験課長

調査試験課材料試験係長

なるみ 鳴海 繁美
いのうえ ひろやす
ふじしろ 博泰
たかし 隆

1. はじめに

東北地方整備局は、東北地方の地域特性、道路技術へのニーズ等を踏まえ、「ゼロエミッション社会を目指すための技術」を平成10年度を初年度とする「新道路五カ年計画（東北地方建設局版）」の技術研究開発分野の一つとして設定した。そして、平成11年3月にこの技術の研究開発に関して審議、提言を行うための「ゼロエミッション社会を目指す技術開発委員会（委員長：柳沢栄司八戸工業高等専門学校校長）」を設置した。また、同技術に関する専門的かつ具体的な検討作業を行う「廃棄物・熔融スラグ利用技術等専門部会（専門部会長：遠藤孝夫東北学院大学工学部教授）」を委員会（以下専門部会を含め委員会という）に設置した。

近年、一般廃棄物の熔融固化技術が進展し、これにより生成される熔融スラグの生成量の増大が見込まれている。しかし、委員会設置当時、その有効利用技術がまだ確立されていないのが現状であった。このため、「建設副産物の熔融固化及び熔融スラグの有効利用技術の開発」を技術研究開発テーマに、委員会を通じて、熔融スラグが一般土木材料として使用可能であるか適用範囲、安全

性の確認、品質管理等について検討を行ってきた。

本稿は、委員会において審議されてきた熔融スラグの有効利用技術について概要を示したものである。

2. 熔融固化技術の概要

(1) 熔融スラグの分類

熔融スラグは、燃焼熱や電気から得られた熱エネルギー等により、一般廃棄物を直接、または焼却残さ等を高温条件下で熔融した後、冷却して生成される固化物をいう。

冷却・固化方法により、水砕スラグ、空冷スラグ、徐冷スラグに分類される。このうち、水砕スラグ（写真－1）は、高温熔融物を水中に直接投入し、急冷・固化して生成されるスラグで、ガラ



写真－1 熔融スラグ（水砕スラグ）

ス質で細粒状または砂状であることを特徴とし、主に細骨材に用いられる。

(2) 溶融固化方式

溶融固化方式には、高温条件下で廃棄物を熱分解し発生ガスを燃焼するとともに、灰、不燃物等を溶融する機能を有する「ガス化溶融方式」と廃棄物の焼却処理によって排出される残さ（焼却灰、飛灰）を燃料の燃焼熱や電気から得られた熱エネルギー等により溶融する「灰溶融方式」に大別される。東北管内においては、岩手県釜石市が全国に先駆けて、昭和54年からガス化溶融方式による一般廃棄物の溶融固化を行っている。

(3) ガス化溶融方式の区分

現在、国内で建設されているガス化溶融炉は、ガス化溶融一体型（シャフト炉式、サーモンセレクト方式）およびガス化溶融分離型（キルン式、流動床式）の4種類に分類される。

3. 溶融スラグの安全性

(1) 溶融スラグの一般的な特性

溶融スラグ焼却残さ等に含まれるダイオキシン類は、熱分解されスラグ中には含まれないが、微量の重金属を含んでいる。この重金属は、スラグの主成分であるシリカ（ SiO_2 ）による網目構造のガラスによって固定され、溶出しにくくなっている。表－1に溶融スラグの化学分析結果を示す。

〈参考〉 表－1 溶融スラグの化学分析（%）

SiO_2	Al_2O_3	FeO_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O
35.16	14.78	4.55	38.79	2.01	0.01	2.70
K_2O	TiO_2	P_2O_3	MnO	Cl^-	Loss	
0.32	0.91	0.29	0.47	0.015	－0.55	

(2) 重金属類の溶出試験

溶融スラグを建設資材として使用する場合、事前に溶融固化施設管理者（発生者）による安全性の確認が行われているものを用いることを原則とする。安全性の確認は、「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用の実施の促進について（平成10年3月26日厚生省通達、生衛発第508号）」に示されているカドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレンの6項目に、環境庁告示第46号の改正（平成13年3月28日環告16）による「ふっ素」「ほう素」を加えた8項目について、それぞれの溶出基準により判定する。溶出試験は、環境庁告示第46号に示す試験方法により行うものとする。表－2に溶融スラグ単体の溶出試験結果を示す。8項目の重金属類はいずれも基準値以内となっている。

4. 溶融スラグの有効利用

技術検討は、東北管内で最も発生量の多いガス

〈参考〉 表－2 溶融スラグの重金属類溶出試験結果例

項目	溶出基準	溶融固化方式別溶出試験結果※			
		釜石（H10年）	釜石（H11年）	釜石（H13年）	酒田（H13年）
カドミウム	$\leq 0.01 \text{ mg/l}$	$< 0.0005 \text{ mg/l}$	$< 0.0005 \text{ mg/l}$	$< 0.001 \text{ mg/l}$	$< 0.001 \text{ mg/l}$
鉛	$\leq 0.01 \text{ mg/l}$	0.003 mg/l	$< 0.001 \text{ mg/l}$	0.004 mg/l	$< 0.001 \text{ mg/l}$
六価クロム	$\leq 0.05 \text{ mg/l}$	$< 0.005 \text{ mg/l}$	$< 0.005 \text{ mg/l}$	$< 0.005 \text{ mg/l}$	$< 0.005 \text{ mg/l}$
砒素	$\leq 0.01 \text{ mg/l}$	$< 0.001 \text{ mg/l}$	$< 0.001 \text{ mg/l}$	$< 0.001 \text{ mg/l}$	$< 0.001 \text{ mg/l}$
総水銀	$\leq 0.0005 \text{ mg/l}$	$< 0.0005 \text{ mg/l}$	$< 0.0005 \text{ mg/l}$	$< 0.0005 \text{ mg/l}$	$< 0.0005 \text{ mg/l}$
セレン	$\leq 0.01 \text{ mg/l}$	$< 0.002 \text{ mg/l}$	$< 0.002 \text{ mg/l}$	$< 0.002 \text{ mg/l}$	$< 0.002 \text{ mg/l}$
ふっ素	$\leq 0.8 \text{ mg/l}$	—	—	$< 0.05 \text{ mg/l}$	$< 0.05 \text{ mg/l}$
ほう素	$\leq 1 \text{ mg/l}$	—	—	$< 0.007 \text{ mg/l}$	$< 0.007 \text{ mg/l}$

※ 1 平成13年3月以前は6項目のみ実施

2 釜石：シャフト炉式、酒田：流動床式

化熔融炉の水砕スラグを中心に行った。以下に、水砕スラグを他の材料と混合または単独で、プレキャストコンクリート製品、アスファルト混合物、埋戻し材等に使用する細骨材および砂の代替材としての適用性について述べる。

(1) プレキャストコンクリート製品（無筋・鉄筋）への適用

ここで対象とするプレキャストコンクリート製品とは、主に道路用コンクリート側溝、フリューム、道路用境界ブロック、積みブロック、L型擁壁、舗装用平板等である。

設計基準強度30N/mm²のプレキャストコンクリート製品の試作および試験施工を実施し、プレキャストコンクリート製品の細骨材としての適用性を確認した（表－3を参照）。ただし、現時点では、他の十分な試験データ、使用実績が少なく、実用に供するコンクリートの要求特性、適用構造物の種類および環境条件等に応じて、コンクリートの品質を試験練りによって事前に確認しなければならない。

なお、熔融スラグ細骨材は、破碎・磨砕等の整粒処理および磁力選別による金属除去等の改質加工が行われているものを標準とする。これは、次に述べるアスファルト混合物への適用についても同様である。

コンクリートに用いる熔融スラグ細骨材は、コンクリートの品質に悪影響を及ぼす物質を有害量含んではならない。熔融スラグの品質は、熔融方式・冷却方式等により異なることが考えられ、品質によっては、熔融スラグ中の塩素、アルカリの影響、また、含有する金属類とアルカリまたは水との反応によるセメント硬化体の膨張などが懸念される。そのため、コンクリートの要求特性、適用構造物の種類および環境条件等に応じて、その品質試験項目と品質基準を定める必要がある。

物理的性質については「JIS A 5005 コンクリート用碎石及び砕砂」、化学成分については「JIS A 5011-1～3 コンクリート用スラグ骨材（第1部～第3部）」に示される規定に適合しなければならない。熔融スラグの化学的性状および物理

〈参考〉 表－3 製品の曲げ強度（材齢14日・蒸気養生）

試験施工場所	製品名	JIS 規格値 (kN)	最大曲げ荷重 (kN)
Y 道路	ベンチフリューム 400 2種	35	42.5
K.BP			36.3
K 堤防	U 型側溝（2種 300B）	58(29)	84.0
S.BP(1)	ベンチフリューム 600 2種	32.5	39.0
S.BP(2)	落蓋式 U 型側溝（1種400B）	44(22)	75.0

※ JIS 規格値 ベンチフリューム JIS A 5372 附 9
U 型側溝 JIS A 5372 附 3
落蓋式 U 型側溝 JIS A 5345
()内は 1m 当たりの規格値

〈参考〉 表－4 化学成分例

化学成分	規定値	測定値	試験方法
酸化カルシウム(CaO として)	45.0%以下	14.8	原子吸光法
全硫黄(S として)	2.0%以下	0.10	蛍光 X 線分析法
三酸化硫黄(SO ₃ として)	0.5%以下	0.27	重量法
金属鉄(Fe として)	1.0%以下	検出されず	EDTA 滴定法
塩化物(NaCl として)	0.03%以下	0.003	硝酸銀滴定法
金属アルミニウムによる膨張率	2.0%以下	－1.39	JSCE-F 522-1999

〈参考〉 表－５ 物理的性質例

項目	規定値	溶融固化方式別試験結果			
		シャフト炉	キルン	サーモセレクト	流動床
絶乾密度	2.5g/cm ³ 以上	2.74	2.80	2.81	2.89
吸水率	3.0%以下	0.85	0.21	0.24	0.25
安定性	10%以下	0.3	0.4	0.1	0.0
粒形判定実積率	53%以上	57.7	60.0	61.6	65.7
洗い試験損失量	7.0%以下	1.8	2.0	2.4	4.4
有機不純物	標準色より淡い	標準色より淡い	標準色より淡い	標準色より淡い	標準色より淡い
アルカリシリカ反応	無害	無害	無害	無害	無害

的性状についての試験結果例を表－４，５にそれぞれ示す。

これまでの試験・検討結果から一定条件のもとでは、溶融スラグ混合率の増加に伴いコンクリートの強度が低下する傾向があることを確認している。また、溶融スラグ混合率が質量比50%以下の範囲であれば、コンクリートの性状は普通細骨材を使用したコンクリートの場合とほぼ同等になる

ことを確認している。水セメント比は、通常のプレキャストコンクリート製品と同等の55%以下とすることを標準とする。

(2) アスファルト混合物への適用

溶融スラグ細骨材を使用するアスファルト混合物は、「アスファルト舗装要綱（社）日本道路協会」等の関連する指針・基準類に適合するものとする。

〈参考〉 表－６ 溶融スラグを混合したアスファルト混合物の試験結果例

項目		混合物の種類	密粒度アスファルト混合物(13F)		
			比較標準混合物	スラグ10%混合	基準値※
骨材合成粒度 (通過質量%)	19.0 mm		100.0	100.0	100
	13.2 mm		99.3	99.3	95～100
	4.75 mm		64.1	64.0	52～72
	2.36 mm		50.0	50.1	40～60
	600 μm		35.0	35.1	25～45
	300 μm		24.5	24.3	16～33
	150 μm		11.3	10.6	8～21
	75 μm		8.7	8.5	6～11
最適アスファルト量		(%)	6.2	6.2	6～8
マーシャル特性値	密度	(g/cm ³)	2.377	2.383	—
	空隙率	(%)	3.9	3.7	3～5
	飽和度	(%)	79	79	75～85
	安定度	(kN)	13.80	12.75	4.9以上
	フロー値	(1/100cm)	36	33	20～40
	残留安定度	(%)	92	88	75以上
動的安定度		(回/mm)	610	600	—
ラベリング摩耗量		(cm ²)	1.12	1.38	—

※基準値は「アスファルト舗装要綱」（社）日本道路協会を参照。

出典：「都市ごみ溶融スラグのアスファルト骨材への利用」（平成11年2月）〈北野和敏ら〉

溶融スラグ細骨材は、アスファルト混合物の品質に悪影響を及ぼす物質を有害量を含んではならない。物理的性質については、「JIS A 5001 道路用碎石」「JIS A 5015 道路用鉄鋼スラグ」、化学成分については、「JIS A 5011-2 コンクリート用スラグ骨材—第2部 フェロニッケルスラグ骨材」に示される規定に適合しなければならない。

溶融スラグ細骨材を用いた基層および表層用のアスファルト混合物の配合設計は、所定の品質の材料を用い、安定性と耐久性に優れ、敷き均し、締固めなどの作業が行いやすい混合物が得られるように行わなければならない。

溶融スラグ細骨材混合率は、既往文献の室内試験等の研究成果では、質量比20%程度までは使用が可能であるとされるが、既往の施工実績や安定供給と定量使用の観点等から、10%程度以下での使用が推奨される。混合率を質量比10%以下で配合したアスファルト混合物を用いて試験施工を行い、アスファルト混合物の細骨材としての適用性を確認しており、この混合率を標準とした。参考として表―6に試験結果例を示す。

耐久性に関して耐流動対策、耐摩耗対策および耐はく離防止対策等が求められる場合には、所要の検討試験等を行い適用性を評価するものとする。

(3) 埋戻し材等への適用

溶融スラグは砂状であるため、スラグ単独での利用あるいは砂との混合による利用のどちらでも使用が可能である。ただし、スラグ単独で使用する場合は、締固め度が小さい傾向があるため、施工時に注意する必要がある。

(4) 取り扱い

溶融スラグには、針状のものが含まれている可能性がある。運搬、製造時およびコンクリートの練り混ぜ時は、必要に応じて、防塵めがね、防塵マスク、手袋等を着用し、溶融スラグの取り扱いに注意を要する。

5. ガイドライン（案）の作成

溶融スラグは、一般土木材料として十分に使用可能であることが確認された。これにより、その有効利用に際して技術基準となる「溶融スラグの有効利用に係わるガイドライン（案）」を最終成果としてとりまとめた。

6. 他機関の動向

溶融スラグに関して、平成14年7月に経済産業省からTR（標準情報：準JISとして位置付けられるもの、TR A0016, A0017）が公表されている。TRでは、適用範囲（主に無筋コンクリートを対象）、安全性の確認（ふっ素、ほう素を除く6項目を規定）、品質確認方法（受渡当事者間の協定による）等についてガイドライン（案）と相違が見られるため、今後原因等を明確にしTRに対し意見を提案して行く予定である。

7. おわりに

ガイドライン(案)は、東北技術事務所のホームページ(URL：<http://www.thr.mlit.go.jp/tougi>)上で公表する予定である。

今後は、ガイドライン（案）を現場に導入し、溶融スラグの本格的な有効利用を図っていききたい。

【参考文献】

- 1) 「溶融スラグの有効利用に係わるガイドライン（案）」ゼロエミッション社会を目指す技術開発委員会（2003年2月）
- 2) 北辻，田中，遠藤，鳴海：「都市ごみガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用」コンクリート工学論文集，Vol.13，No.2（平成14年5月）