

港湾工事に用いる溶融スラグの特性について

On the characteristic of melting slag for the port construction.

三好宏昌*・成瀬英治**・在間勇二***

MIYOSHI Hiromasa, NARUSE Eiji and ARIMA Yuuji

* 前 (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 前 (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹兼第二調査部長

*** (社) 日本産業機械工業会 エコスラグ利用普及センター 技術部長

The melting slag is made heated refuse and sludge, melted and solidified. It is called 『the ecology slag』 which satisfy the safety standard of related laws and regulations. The physical and chemical characteristics necessary for design and construction works was summarized in order to utilize effectively as a material for the harbor construction.

Key Words : melting, slag, harbor construction

1. はじめに

溶融スラグは、ごみや下水汚泥等を加熱し、溶融・固化してできたもので、“天然の砂や石”と同様な粒度分布や強度を有している。この溶融スラグのうち関連法規の安全基準を満足するものは『エコスラグ』と呼ばれ、現在、建築・土木資材（路盤材、アスファルト合材等）分野を中心に有効利用されている。しかし、エコスラグの利用率は全国のエコスラグ発生量の6割程度に留まっており、今後予想されるエコスラグの発生量増加、処分地の逼迫等を考慮すると、更なる有効利用を図っていく必要がある。本稿は、このようなエコスラグを港湾工事に用いる材料として有効利用するために、設計・施工に必要な、エコスラグの物理的・化学的特性の一部をとりまとめたものである¹⁾。

2. 概要について

ここでは、エコスラグを天然砂の代替材料として、港湾工事に使用する場合について検討する。また、対象とするエコスラグは、関連する JIS 等で規定される溶出量及び含有量の安全基準を満足したものとす。

2.1 製造

廃棄物処理工程における溶融処理は、都市ごみ又は下水汚泥の焼却灰等の焼却残さの減容化及び無害化を目的に開発された。その後、都市ごみ又は下水汚泥を直接に溶融する処理方式も実用化され、現在は両方式が併用されている。いずれの溶融スラグも冷却方式により水砕スラグと徐冷スラグに分類できる。しかし、冷却方式の違いから生じる溶融スラグの物理的、化学的差異はほとんど無く、水砕スラグと徐冷スラグは、粒径と外観の違い

がある程度である。

・焼却灰を溶融後に冷却して製造

都市ごみ → 焼却炉 → 灰溶融炉 → 溶融スラグ（水砕、徐冷）

下水汚泥 → 焼却炉 → 灰溶融炉 → 溶融スラグ（水砕、徐冷）

・都市ごみ又は下水汚泥を直接溶融し、冷却して製造

都市ごみ → ガス化溶融炉 → 溶融スラグ（水砕、徐冷）

下水汚泥 → 乾燥機 → 汚泥溶融炉 → 溶融スラグ（水砕、徐冷）

2.2 加工

スラグ製造工程の最終段階において、溶融スラグを冷却する方式として、「水砕」と「徐冷」がある。水砕は、エコスラグを骨材等砂状粒子として利用する場合に用いられる冷却方式である。溶融スラグは水中で急冷されるため、通常は数mm程度の砂状となる。冷却過程によっては針状のスラグが混入することもあり、必要に応じて破碎等の整粒設備で針状物を取除く。

一方、徐冷は、砕石等塊状で利用する場合に用いられる冷却方式である。徐冷スラグは空気中で時間をかけて冷却されるため、通常は数cmから数10cmの塊状となる。一般に利用目的に合わせて破碎処理等の粒度調整を行う。いずれのスラグも利用条件によっては、何ら加工されずに使用される場合もある。

2.3 外観

エコスラグの外観は、冷却方式により異なる。徐冷スラグは空気中でゆっくり冷却温度を制御して結晶化を促進させるため、表面が光沢を持っている。水砕スラグは水中で急冷し硬化させるため、砂状である。（写真-1）

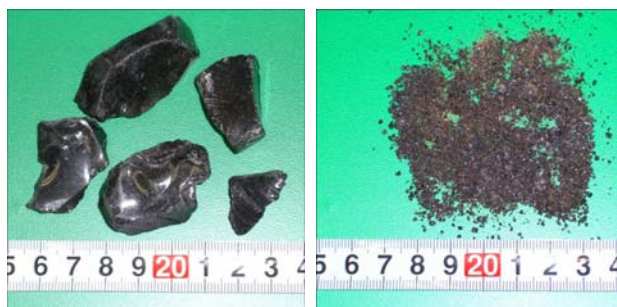


写真-1 徐冷スラグ (左) 水砕スラグ (右)

3. 物理的性質について

3.1 粒度

(1) 水砕スラグ

都市ごみ又は下水汚泥を原料とする各水砕スラグについて、破碎の有無による粒度分布測定結果を図-1～図-3に示す。なお、破碎ありのデータは、下水汚泥スラグのデータが少なかったため両者データを合わせて示す。

水砕スラグは、破碎の有無に関わらず、原料（都市ごみ又は下水汚泥）の違いによる粒度分布に大きな差はない。破碎なしの場合（図-1、図-2）でも粒度分布は比較的均一で、粒径 D_{50} は9割以上の試料で $0.7 \sim 2.5 \text{ mm}$ の範囲にある。破碎ありの場合（図-3）、破碎なしの場合に比べ粒度は若干細くなるとともに分布は均一化され、粒径 D_{50} は9割以上の試料で $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ の範囲となる。水砕スラグは、図-1～図-3に示したように破碎の有無によらずにサンドコンパクションパイルに用いられた天然砂の粒度分布の実績範囲内にはほぼ収まる。なお、 0.075 mm 以下の細粒分は破碎なしでは $2 \sim 5 \%$ 以下であり（図-1、図-2）、バーチカルドレーン工法のように透水性を重視する土木材料としては、細粒分が少ない点で優れた材料といえる。なお、水砕スラグはスラグ流下が少量の場合には冷却過程で針状の粒子が発生して操作性が悪くなることもある。この対策として、あらかじめ針状の粒子を低減させるために破碎することもある。

(2) 徐冷スラグ

徐冷スラグの粒度は冷却条件により大きく異なるため、一般的な粒度分布を示すことはできない。粒度分布の大部分が 10 mm を超える場合もあれば、比較的水砕スラグに近い粒度分布の場合もあるが、一般に徐冷スラグは水砕スラグより粗い粒度分布をもつ。そのため、徐冷スラグをサンドコンパクションパイル工法やバーチカルドレーン工法の砂代替材料として用いる場合には、破碎による粒度調整が必要である。

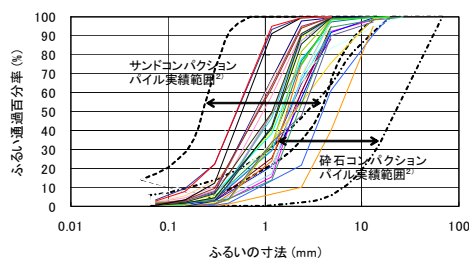


図-1 粒度分布 (都市ごみ, 水砕スラグ, 破碎なし)

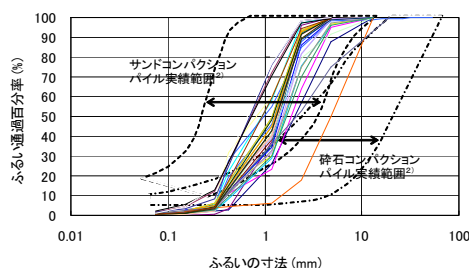


図-2 粒度分布 (下水汚泥, 水砕スラグ, 破碎なし)

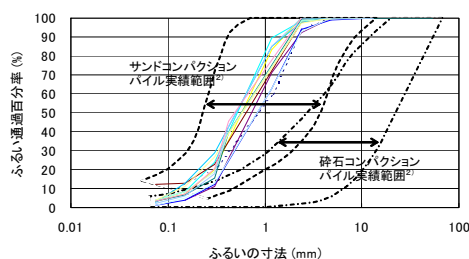


図-3 粒度分布 (都市ごみ・下水汚泥, 水砕スラグ, 破碎あり)

3.2 単位体積重量

エコスラグ、天然砂・砂利、鉄鋼スラグ及び高炉水砕スラグの単位体積重量を表-1^{2), 3), 4), 5)}に示す。

乾燥状態でのエコスラグの単位体積重量は JIS A1104 に従い測定したもので、試料を比較的密に詰めたときの値を表している。実測データから 平均値は 16.8 kN/m^3 となり、天然砂と同等の乾燥重量をもっている。このときの飽和湿潤単位体積重量を試算すると、おおむね 20.5 kN/m^3 の値となり、天然の砂又は砂利と同等の値となる。なお、製鋼スラグや高炉水砕スラグと比較すると、エコスラグの単位体積重量は天然砂に近い値を有している。

表-1 単位体積重量の比較 (kN/m^3)

エコスラグ ²⁾		天然の砂・砂利 ³⁾		製鋼スラグ ⁴⁾	高炉水砕スラグ ⁵⁾
乾燥	飽和	乾燥	飽和	湿潤 (含水比5%換算)	湿潤
16.8	20.5	16.0	20.0	21.0～23.0	12.7

4. 力学的性質について

4.1 透水性

エコスラグの透水性は天然砂と同等と考えられる。

都市ごみ水砕スラグを対象とした室内試験では、透水係数は表-2に示すように $10^{-3} \sim 10^0$ cm/s の範囲にある。これは天然の細砂・中砂と同等である。また、締固めによる破碎試験を実施した試料も透水係数は、 10^{-2} cm/s のオーダー⁶⁾であった。

間隙比が増加すると、図-4に示すように天然砂と同様に透水係数が大きくなる傾向^{7),8),9)}を示す。

下水汚泥スラグについては試験例がないが、水砕スラグの場合では、その粒径分布が同等であることから都市ごみと同等と考えられる。透水係数が重要な施工の場合は、透水試験を実施する必要がある。

表-2 透水係数 (都市ごみ・水砕)

項目	試料1 ⁷⁾	試料2 ⁷⁾	試料3 ⁷⁾	試料4 ⁷⁾	試料5 ⁸⁾	試料6 ⁸⁾
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.52	1.55	1.59	1.62	1.48	1.57
間隙比 e	0.814	0.779	0.734	0.702	0.949	0.838
透水係数 k (cm/s)	1.64×10^{-1}	1.37×10^{-1}	1.05×10^{-1}	8.66×10^{-2}	3.97×10^{-1}	2.83×10^{-1}

項目	試料7 ⁸⁾	試料8 ⁸⁾	試料9 ⁸⁾	試料10 ⁸⁾	試料11 ⁹⁾	試料12 ⁹⁾
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.66	1.75	—	1.50	1.70	1.74
間隙比 e	0.738	0.649	—	0.877	0.662	0.608
透水係数 k (cm/s)	1.84×10^{-2}	1.23×10^{-1}	2.47×10^{-2}	2.20×10^{-1}	5.99×10^{-2}	5.76×10^{-2}

項目	試料13 ⁸⁾	試料14 ⁸⁾	試料15 ⁸⁾	試料16 ⁸⁾
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.79	1.81	1.84	1.86
間隙比 e	0.574	0.560	0.535	0.515
透水係数 k (cm/s)	5.96×10^{-2}	5.02×10^{-2}	3.41×10^{-2}	2.79×10^{-2}

* 締固めによる破碎試験後⁶⁾

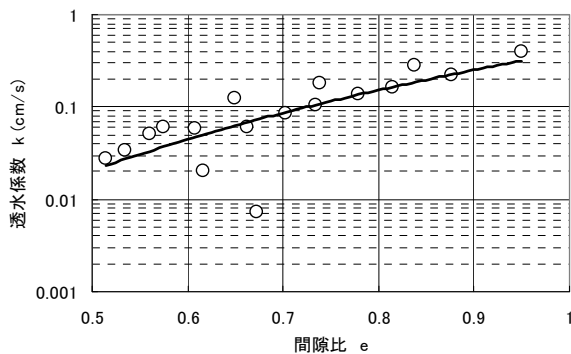


図-4 間隙比と透水係数の関係

4.2 水硬性

エコスラグはカルシウムを含むため水硬性の可能性はある。しかし、水硬性要因のカルシウム分及び塩基度 (CaO/SiO₂ 比) は、共に下記の確認試験に用いたエコスラグでは表-3に示すような値であり、潜在水硬性があるとされる鉄鋼スラグ (高炉スラグ及び製鋼スラグ) の塩基度 (高炉スラグで約 1.2, 製鋼スラグで 1.5~4) よりおおむね低い。

さらに、高炉水砕スラグの水硬性は「粒子破碎」 (D₅₀ の粒径を 60% 程度の粒径になるまで磨砕) や「微粉末の存在」 (間隙水重量の 22%, 乾燥重量の 6~7%) が前提となっている^{10) 11) 12)}のに対し、エコスラグでは運搬時や施工時の振動・衝撃に対する細粒分の発生量が小さく、水硬性を生じる要因は小さいため、エコスラグの水硬性はないものと考えてよい。

ただし、エコスラグの水硬性に関する試験例は少なく、塩基度が高く、かつ、粒子破碎の発生が懸念される場合には、透水試験と強度に関する試験を行って水硬性の有無を確認することが必要である。

表-3 水硬性に用いたエコスラグの化学成分¹³⁾

成分	試料	エコスラグ A	エコスラグ B
	都市ごみ	下水汚泥	
CaO (wt%)		25	9
SiO ₂ (wt%)		41	22
Al ₂ O ₃ (wt%)		15	18
塩基度 (CaO/SiO ₂ 比)		0.61	0.41

4.3 破碎特性

エコスラグの突固め、振動及び乾湿繰り返しによる粒子破碎試験結果¹⁴⁾によると、この試験条件下では礫分が若干砂分に変化するだけで細粒化はないことが確認され、粒子破碎はほとんど発生しないと考えられる。

また、エコスラグの試験施工のために、室内破碎試験を行った結果¹⁵⁾、天然砂に比べ若干細粒化しやすい傾向が見られるが、サンドコンパクションパイル材料として問題ない範囲の破碎しか生じないことが報告されている。サンドコンパクションパイル工法の施工における一般的な加振時間は 15 ~ 20 分 (施工深度 20 m 程度) であるのに対し、室内試験では 60 分間加振を行っており、これは実際の施工を上回る条件と考えられる。

したがって、エコスラグは、サンドコンパクションパイル工法などの施工に伴う粒度組成を大きく変えるような粒子破碎は起きないものと考えられる。

5. 化学的性質について

5.1 化学成分

エコスラグは、酸化アルミニウムは約 10~30%, 二酸化ケイ素は約 30~60%, 酸化カルシウムは約 10~30% の範囲にある。

表-4 にエコスラグ、鉄鋼スラグ及び天然石材の化学成分^{2), 4) 16)}を示す。また、塩基度 (CaO/SiO₂) は 0.1~1.5 の範囲にある。安山岩等の天然材と同様に二酸化ケイ素が主成分で、高炉スラグや製鋼スラグに比べて酸化カルシウムや塩基度が低い物が多い。エコスラグを構成する

代表3成分はほぼ一定の範囲に分布しているが、CaOは幅広く分布している。これは排ガス処理方式の差異による飛灰中のCa含有量や飛灰混合率の差によるところが大きい。なお、熔融炉形式（灰熔融炉，ガス化熔融炉，汚泥熔融炉）や冷却方式（水砕又は徐冷）がエコスラグの化学成分に及ぼす影響は少ない。

表-4 化学成分

化学成分	単位	エコスラグ ²⁾	製鋼スラグ ⁴⁾	高炉スラグ ^{1,4)}	山土 ⁴⁾	安山岩 ⁴⁾
SiO ₂	wt %	21.6~57.3	10.5~21.0	33.8	59.6	59.6
CaO	wt %	8.9~43.3	34.4~54.7	41.7	0.4	5.8
Al ₂ O ₃	wt %	8.8~39.5	1.6~8.7	13.4	22	17.3
MgO	wt %	0.2~6.5	2.9~8.7	7.4	0.8	2.8
Fe ₂ O ₃	wt %	0.3~12.6	7.6~22.4*	0.4*	—	3.1**
Na ₂ O	wt %	0.2~10.0	—	—	—	—
K ₂ O	wt %	0.3~2.8	—	—	—	—

注記)*全鉄量として、**FeOとして

5.2 有害物質の溶出量及び含有量

JIS A 5031（一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を熔融固化したコンクリート用熔融スラグ骨材）又はJIS A 5032（一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を熔融固化した道路用熔融スラグ）で規定されている溶出量及び含有量の安全基準を満足する熔融スラグだけをエコスラグと称し，利用の対象とする。

有害物質の溶出量及び含有量基準を表-5及び表-6に示す。なお，エコスラグは約1200℃以上の高温で処理されるので，有機系有害物は含まない。

表-5 熔融スラグに係る溶出量基準

項目	単位	溶出量基準
カドミウム	mg / l	0.01 以下
鉛	mg / l	0.01 以下
六価クロム	mg / l	0.05 以下
砒素	mg / l	0.01 以下
総水銀	mg / l	0.0005 以下
セレン	mg / l	0.01 以下
ふっ素	mg / l	0.8 以下
ほう素	mg / l	1 以下

表-6 熔融スラグに係る含有量基準

項目	単位	含有量基準
カドミウム	mg / kg	150 以下
鉛	mg / kg	150 以下
六価クロム	mg / kg	250 以下
砒素	mg / kg	150 以下
総水銀	mg / kg	15 以下
セレン	mg / kg	150 以下
ふっ素	mg / kg	4000 以下
ほう素	mg / kg	4000 以下

6. おわりに

エコスラグの港湾工事への利用実績はまだ少なく，参考にしたデータは，必ずしも十分なものではないが，今

後，エコスラグの利用が各地で促進され，使用実績が増えていくことによりデータが補完されると考えられる。

最後になりましたが，本稿は，(社)日本産業機械工業会より受注し作成した「港湾工事用エコスラグ利用手引書」の内容の一部をとりまとめたものである。作成に当たっては，東洋大学の福手教授を委員長とする検討委員会の委員の方々に貴重なご意見を頂いた。ここに記して，厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (社)日本産業機械工業会・(財)沿岸技術研究センター：港湾工事用熔融スラグ 報告書，平成18年3月
- (社)日本産業機械工業会エコスラグ利用普及センター発行：循環社会の輪をつなぐごみと下水の熔融スラグ（エコスラグ）有効利用の課題とデータ集（2005年度版）
- (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），平成11年4月
- (財)沿岸開発技術研究センター・鉄鋼スラグ協会：港湾工事用製鋼スラグの利用手引書，平成12年3月
- (財)沿岸開発技術研究センター・鉄鋼スラグ協会：港湾工事用水砕スラグの利用手引書，平成元年8月
- 白倉 光雄：サンドコンパクションパイル工法へのスラグ利用について，平成7年度東京都清掃技報第20号，1996。
- 長田守弘・西原信義・長田昭一・三浦仁・森田由紀雄・諏訪朝夫：都市ごみ直接熔融スラグの地盤改良材としての適用性に関する基礎試験，第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集，1999。
- 川崎製鉄（株）等：プラズマ式ごみ焼却灰熔融スラグの地盤改良材としての適用試験報告書，平成7年9月
- 東京都環境局提示，平成16年度試験結果
- 高橋邦夫・菊池喜昭・尾島啓介・星秀明・篠崎晴彦：高炉水砕スラグの固結に及ぼす要因について（その1：各種要因の影響）土木学会第57回年次学術講演会，平成14年9月
- 高橋邦夫・菊池喜昭・元木卓也・鈴木操・中川雅夫：高炉水砕スラグの固結に及ぼす要因について（その2：粒度の影響）土木学会第57回年次学術講演会，平成14年9月
- 中島研司・菊池喜昭・水谷崇亮・村田智佳：高炉水砕スラグ微粉末を添加した高炉水砕スラグの硬化現象，第40回地盤工学研究発表会，2005年7月
- (社)日本産業機械工業会：平成14年度 汚泥や焼却灰の減容化・循環に関する研究 報告書，平成15年6月
- 川崎製鉄（株）等：プラズマ式ごみ焼却灰熔融スラグの地盤改良材としての適用試験報告書，平成7年9月
- 東京都清掃局・基礎地盤コンサルタンツ（株）：中防スラグ有効利用調査（SCP地盤改良試験）報告書，平成6年3月
- 鉄鋼スラグ協会発行：鉄鋼スラグの特性と有用性（パンフレット），平成17年度版