都市ごみ直接溶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†

長 田 守 弘* 西 原 信 義* 長 田 昭 一*
三 浦 仁** 森 田 悠 紀 雄*** 諏 訪 朝 夫***The Fundamental Tests on Application of MSW Direct Melting Slag
as Soil Improvement Material

by

Morihiro OSADA*, Nobuyoshi NISHIHARA*, Shouichi OSADA*

Hitoshi MIURA**, Yukio MORITA*** and Asao SUWA***

In the metro area, cheap and high quality ground improving material for backfilling is in shortage and development of its alternative is required. On the other hand, volume reduction, harmlessness and recycling of municipal solid waste (MSW) becomes necessary due to present MSW dumping sites are almost beyond their capacity. In these situations, we studied, through chemical, physical and mechanical testing, the applicability of MSW direct melting slag as ground improving material which is produced from "direct melting, recycling system" developed by us. As a result, we confirmed that the MSW direct melting slag cleared the standard of ground improving material with excellent applicability. The ground improving method stands for Sand Compaction Pile Method and Sand Drain Method in this report.

Key words : MSW direct melting slag, Ground improving material, Sand Compaction Pile, Sand Drain

1 は じ め に

我が国では、廃棄物の最終処分場が不足し、また新たな最終処分場の取得が困難であることから、廃棄物の処理においては減容化、無害化、再資源化が求められている。こうした中で、筆者らは、都市ごみ（家庭、商店および事務所などから排出されるごみ）を溶融処理し、スラグに転換する「直接溶融、資源化システム」¹⁾を開発し、そこで発生したスラグを土木・建築用材料として有効利用してきた。

一方、首都圏では、近年、埋立地に用いる安価で良質の地盤改良材が不足してきており、代替材の開発が望まれている。今回、溶融スラグの用途拡大の取り組みとして、地盤改良材としての適用性について基礎試験を実施し、良好な結果を得たので報告する。対象とする地盤改良工法は、サンドコンパクションパイル工法およびサンドドレーン工法の二種類である。

2 溶融スラグの基本特性

直接溶融炉にて生成された溶融スラグの化学組成は、Table I に示すように二酸化ケイ素 (SiO_2)、酸化カルシウム (CaO)、酸化アルミニウム (Al_2O_3) が主成分であり、高炉スラグとほぼ同じである。また、石英、長石などからできている一般的な砂と比較すると、酸化カルシウム (CaO) では多く含むが、二酸化ケイ素 (SiO_2)、酸

化アルミニウム (Al_2O_3) では同程度の比率を示す。さらに、自己硬化性や自己崩壊性はほとんど無い。

溶融スラグの溶出試験結果を Table II に示す。全ての項目は、「一般廃棄物の溶融固化物に係わる目標基準」をクリアーし、環境への影響は問題ないと考えられる。

Table I. Chemical composition of melting slag.

	Test result (%)	Blast-Furnace Slag (%)	Sand ²⁾ (%)
SiO_2	38.3	30~41	59.4
CaO	32.0	35~40	5.1
Al_2O_3	19.7	12~20	15.4
MgO	2.1	3~7	3.5
Na_2O	1.5	0.23	7.0
K_2O	0.4	0.24	
Fe_2O_3	0.4		3.1

Table II. Leaching test result of slag.

	Test result	Standard for recycling (mg/ℓ)	Lower limit of analysis (mg/ℓ)
Cadmium	N.D.	0.01	0.001
Lead	N.D.	0.01	0.005
Hexachrome	N.D.	0.05	0.04
Arsenic	N.D.	0.01	0.005
Total mercury	N.D.	0.0005	0.0005
Selenium	N.D.	0.01	0.002

† 原稿受理 平成 11 年 4 月 12 日 Received Apr. 12, 1999

* 新日本製鐵(株) 〒100-0004 東京都千代田区大手町, Nippon Steel Corporation, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-0004

** 正 会 員 東亜建設工業(株) 〒102-0081 東京都千代田区四番町, Toa Corporation, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0081

*** 正 会 員 基礎地盤コンサルタンツ(株) 〒135-0016 東京都千代田区九段北, Kiso-jiban Consultants Co., Ltd., Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8220

3 試験概要

3・1 試料

溶融スラグから、任意に一定量取り出して全体を混合し、4分法により採取したものを試料とした。

3・2 試験方法および試験手順

溶融スラグ（以下、当該スラグと称す）の物理特性、力学特性などを明らかにするため、Fig. 1の試験手順に基づいて試験を行った。

Fig. 1. Test procedure.

基本物性試験は、当該スラグの密度、粒度分布、最大密度および最小密度を求めるために土粒子の密度試験、粒度試験、最大密度・最小密度試験を3個行い、平均値を算出した。

突固めによる粒子破碎試験および衝撃による粒子破碎試験は、サンドコンパクションパイル打設に伴う当該スラグの粒子破碎程度を検討する資料とするために実施した。突固めによる粒子破碎試験は、JSF T 711「突固めによる土の締固め試験」(A) 法に基づいて以下の内容で行い、試験後に粒度試験を実施した。

- モールド径 $\phi 10\text{cm}$ 、ランマー重量 2.5kg 、試料は表面乾燥状態。
- 突固めエネルギー 6 種類
($E_c = 0.11, 0.22, 0.33, 0.44, 0.55, 0.66\text{MJ/m}^3$)
- 非繰返し法

衝撃による粒子破碎試験は、JISA 1121「ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験」に準じて、回転回数 $N = 500$ 回（同規格の最小）と $N = 1000$ 回（同規格の最大）の2種類で行い、試験後に粒度試験を実施した。

乾湿繰返しによる粒子破碎試験は、当該スラグが地下水位以浅で乾湿の繰返しを受けた場合の細粒化に及ぼす程度を評価する資料とするために実施した。試験は、乾燥・湿潤を24時間毎に所定回数（1回、2回、3回、4回、5回：1回は2日間）繰返した後、粒度試験を行って粒子破碎の状況を確認した。

透水試験は、当該スラグの締固め後の透水係数を確認するため、JIS A 1218「土の透水試験法」（定水位透水

Table III. Index properties of slag samples.

	S-1	S-2	S-3	Ave.
ρ_s (g/cm^3)	2.766	2.756	2.749	2.757
Gravel (%)	17.1	13.4	17.1	15.9
Sand (%)	82.1	86.6	82.0	83.2
Silt (%)	0.8	1.0	0.9	0.9
Clay (%)				
Coefficient of Uniformity	3.37	3.23	3.29	3.30
Coefficient of Curvature	1.17	1.14	1.10	1.14
D_{10} (mm)	0.392	0.388	0.395	0.392
D_{50} (mm)	1.126	1.080	1.115	1.107
ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.569	1.585	1.619	1.591
ρ_{dmin} (g/cm^3)	1.219	1.232	1.246	1.232

試験）に準拠して実施した。供試体寸法は、直径 10cm 、長さ 12.75cm とし、供試体の密度は、密度の変化による透水係数の変化を確認するため突固め試験で求めた乾燥密度から下限値、上限値および中間値を目安に4種類とした。また、衝撃による粒子破碎試験後（回転回数 $N = 1000$ 回）の試料を用いて透水試験を1試料実施した。

三軸圧縮試験 (CD) は、当該スラグの締固め後の強度（内部摩擦角 ϕ_d 、粘着力 C_d ）を求めるために実施した。供試体寸法は直径 5cm 、高さ 10cm とし、供試体の密度は、密度の変化によるせん断強度の変化を確認するため透水試験と同じように4種類とした。また、試験時の圧密圧力は、地盤改良深さを $0\text{m} \sim 30\text{m}$ 程度と想定して、 $29.4, 58.8, 117.7, 235.4\text{KN/m}^2$ の4段階とした。さらに、衝撃による粒子破碎後（回転回数 $N = 1000$ 回）の試料を用いて、三軸圧縮試験 (CD) を1試料実施した。なお、透水試験および三軸圧縮試験 (CD) の終了後に供試体の粒度を確認するため、粒度試験を実施した。

4 試験結果

4・1 基本物性試験結果

当該スラグ（基本物性 S-1, 2, 3）の試験結果を Table III に示す。密度は、二酸化ケイ素 (SiO_2) が多く含有するため、石英鉱物とほぼ同じ密度 (≈ 2.7)³⁾ を示し、一般的な砂と同程度の値を有する。粒度組成は、礫分 15.9% 、砂分 83.2% 、シルト分・粘土分 0.9% から構成され、砂分が主体でシルト分・粘土分は微量である。また、粒度は、Fig. 2 の粒径加積曲線に示すように均等粒度 ($U_c < 10$) で粗砂（粒径 $0.85\text{mm} \sim 2\text{mm}$ ）が多く、平均粒径 D_{50} は 1.10mm である。粒子形状の丸みの程度⁴⁾ は、かどばっている (Angular)。当該スラグの最大密度 ρ_{dmax} および最小密度 ρ_{dmin} は、一般的に知られている豊浦標準砂 ($\rho_{dmax} = 1.646\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin} = 1.332\text{g/cm}^3$) よりも若干小さめである。⁵⁾

4・2 突固めによる粒度破碎試験結果

突固め後 (Test-B) の粒径加積曲線を Fig. 2 に示す。突固め後の粒径加積曲線は、試験前（基本物性 S-1, 2, 3）とほぼ同じ傾向にあり、突固めによる粒子破碎はほとんど無いと判断される。これは、当該スラグが硬質の石英、長石鉱物からなることによるものと考えられる。

Fig. 3 は、乾燥密度 ρ_d と突固めエネルギーの関係を示したものである。乾燥密度 ρ_d は、突固めエネルギー E_c の増加に伴い $E_c = 0.11\text{ (MJ/m}^3\text{)}$ では $\rho_d = 1.522$

(g/cm^3), $E_c = 0.66 \text{ (MJ}/\text{m}^3)$ では $\rho_d = 1.618 \text{ (g}/\text{cm}^3)$ と大きくなり, 間隙比 e は $E_c = 0.11 \text{ (MJ}/\text{m}^3)$ では $e = 0.811$, $E_c = 0.66 \text{ (MJ}/\text{m}^3)$ では $e = 0.704$ であった. 乾燥密度 ρ_d の増加は, 一般的な自然砂と比べると小さいが, これは, 当該スラグが均等粒度のかどばった粒子形状のために粒子同士がかみ合い, 突固めエネルギーが増加しても大きな空隙ができて乾燥密度が増加しにくいものと考えられる. また, 一般的には, 均等係数が小さいものほど締まりにくく, 乾燥密度が小さくなる傾向にあり, これと一致する.⁴⁾

4.3 衝撃による粒子破碎試験結果

すりへり試験後 (Test-C 回転回数 500 回, 1000 回) の粒径加積曲線を Fig. 2 に示す. 試験後の粒度は, 試験前 (基本物性 S-1, 2, 3) の粒度と比較すると, 礫分が少なくなり, 砂分とシルト分・粘土分が多くなった. 回転回数 $N = 1000$ 回の場合では試験前後に礫分が $15.9\% \rightarrow 0.0\%$, 砂分が $83.2\% \rightarrow 94.7\%$, シルト分・粘土分が $0.9\% \rightarrow 5.3\%$ へと変化した. 表面性状からは, かどばった粒子の端部が摩耗して若干丸みを帯び, 粒径が小さくなったものと考えられる.

4.4 乾湿繰返しによる粒子破碎試験結果

乾湿繰返し後の粒径加積曲線を Fig. 4 に示す. これによると, 乾湿繰返し後の粒径加積曲線は, 試験前 (基本物性 S-1, 2, 3) の粒径加積曲線と同じ傾向にあり, 乾湿繰返しによる粒子破碎はほとんど無いと判断される. 一般に, 砂の乾湿繰返しによる粒子破碎は, 岩石鉱物が粘土鉱物などに変化する際の体積膨張によるものと考えら

Fig. 2. Grain size distribution of slags after compaction and abrasion tests.

Fig. 3. Dry density versus compaction effort.

れているが, 当該スラグにはこの物理的風化がなく, 安定していると言える.

4.5 透水試験および三軸圧縮試験 (CD) 結果

透水試験および三軸圧縮試験 (CD) は, 供試体の乾燥密度 ρ_d を $1.52, 1.55, 1.59, 1.62 \text{ g}/\text{cm}^3$ の 4 種類に設定して実施した. 試験結果を Table IV および Fig. 5, 6 に示す.

透水試験から求めた透水係数 k は, 乾燥密度 ρ_d が大きくなると透水係数が小さくなる一般的な傾向を示すが, $k = 8.66 \times 10^{-2} \sim 1.64 \times 10^{-1} \text{ cm}/\text{sec}$ と比較的大きく, 砂・礫の透水性を有する. これは, 当該スラグの粒径 ($D_{50} = 1.107 \text{ mm}$) が大きく, 均等粒度のかどばった粒子形状のために大きな空隙ができ, 透水係数が高くなったものと考えられる. 当該スラグよりも粒径の小さな豊浦標準砂 ($D_{50} = 0.175 \text{ mm}$) の場合では, 同程度の間隙比 ($e = 0.70 \sim 0.80$) で $k = 2.5 \times 10^{-2} \sim 3.5 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{sec}$ とやや小さな値を示す.⁶⁾

一方, 衝撃による粒子破碎試験後 (すりへり試験: 回転回数 $N = 1000$ 回) の透水係数 k は, $k = 2.06 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{sec}$ を示し, 自然状態よりも 1 オーダー程度低下した. これは, 礫分の減少, 粘土・シルト分の増加により空隙が小さくなったことによるものと考えられる.

三軸圧縮試験 (CD) から求めた内部摩擦角 ϕ_d と粘着力 C_d は, $\phi_d = 35.5 \sim 37.5$ 度, $C_d = 31.4 \sim 35.3 \text{ kN}/\text{m}^2$ を示し, 乾燥密度 ρ_d の増加 (相対密度の増加) とともに大きくなる一般的な傾向が見られる. この時の相対密度 Dr および間隙比 e は, $Dr = 80 \sim 100\%$, $e = 0.80 \sim 0.68$ に相当する. なお, せん断時の主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) は, 軸ひずみ $2 \sim 3\%$ 付近でピークを示し, 体積ひずみはいずれも軸ひずみ 1% 付近より減少から増加に転じ, 密な状態での傾向を示した. 当該スラグの内部摩擦角 ϕ_d は, 丸みを帯びた豊浦標準砂での値 $\phi_d = 35 \sim 37$ 度⁷⁾ ($e = 0.70 \sim 0.80$ の時) と比べると, ほぼ同じ傾向を示す. 一般に, 内部摩擦角 ϕ_d は, 粒子形状がかどばっている方が丸いものより大きくなり, 粒径の違いによる影響は比較的少ないが,⁴⁾ 当該スラグの傾向からは認められない.

一方, 衝撃による粒子破碎試験後 (すりへり試験: 回転回数 $N = 1000$ 回) の内部摩擦角 ϕ_d と粘着力 C_d は, $\phi_d = 35.5$ 度, $C_d = 5.9 \text{ kN}/\text{m}^2$ を示し, 粘着力が小さくな

Fig. 4. Grain size distribution of slags after cyclic drying test.

Table IV. Permeability and strength parameters (CD).

	B-1 $\rho d=1.52$ (g/cm ³)	B-2 $\rho d=1.55$ (g/cm ³)	B-3 $\rho d=1.59$ (g/cm ³)	B-4 $\rho d=1.62$ (g/cm ³)	B-5 * $\rho d=1.52\sim 1.55$ (g/cm ³)
k (cm/sec)	1.64×10^{-1}	1.37×10^{-1}	1.05×10^{-1}	8.66×10^{-2}	2.06×10^{-2}
Cd (KN/m ²)	31.4	33.3	34.3	35.3	5.9
ϕd (deg.)	35.5	35.6	36.8	37.5	35.5

* Samples After Abrasion Test (N=1000)

Fig. 5. Permeability and dry density.

Fig. 6. Internal friction angle, cohesion and dry density in triaxial compression test (CD).

る。これは、シルト分・粘土分が多くなった分、相対密度が小さくなったことによるものと考えられ、せん断時の体積ひずみの増加傾向からも、このことが判断される。

なお、試験後に供試体の粒度試験を実施し、試験前(基本物性 S-1, 2, 3)の粒度試験結果と比較を行ったところ変化がなかった。

4・6 地盤改良材としての適用性の検討結果

一般的に用いられているサンドコンパクションパイル材の粒度および強度の品質基準、並びにサンドドレーン材の品質基準をまとめたものを Table V に示すが、当該スラグは、これらの品質基準に適合する。

Table V. Specification of grain size and strength, soil improvement material..

Soil improvement Material	Gradation Quality	Strength Quality
Sand Compaction Pile Material	Silt and Clay $\leq 5\sim 15(\%)$ with High Permeability	N Value of Improved Pile $e \geq 15$ or $\phi \geq 30\sim 35(\text{deg.})$
Sand-Drain Material	Silt and Clay $\leq 5(\%)$ with High Permeability	—

5 結 論

① 基本物性について

当該スラグは、化学的に安定して環境への影響がなく、均等粒度で一般的な砂の物理特性を有する。

② 粒子破碎について

当該スラグの粒子は、硬質で突固めによる粒子破碎、乾湿繰返しによる粒子破碎は認められない。衝撃(ロサンゼルス試験機によるすりへり試験)による粒子破碎は、多少認められるがサンドコンパクションパイル施工時のバイブロ振動による粒子破碎エネルギーがこのすりへり試験での粒子破碎エネルギーよりもかなり小さいことから粒子破碎の程度は僅かであると考えられる。

③ 透水性について

当該スラグは、透水係数(k)が $k = 1 \times 10^{-1}$ cm/sec 前後にあり、砂～礫の透水性を有する。

④ 強度特性について

三軸圧縮試験(CD)による当該スラグの内部摩擦角 ϕd 、粘着力 Cd は、乾燥密度 $\rho d = 1.52 \sim 1.62$ g/cm³ (相対密度 $D_r = 80 \sim 100\%$)の時に、 $\phi d = 35.5 \sim 37.5$ 度、 $Cd = 31.4 \sim 35.3$ KN/m² と大きな値を示す。また、 ϕd 、Cd は、一般的な砂と同様に乾燥密度の増加(相対密度の増加)とともに大きくなる傾向がある。

⑤ 地盤改良材としての適用性について

当該スラグは、サンドコンパクションパイル材およびサンドドレーン材の品質基準に適合し、地盤改良材として適用可能である。

参 考 文 献

- 1) 長田守弘, 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, p.136 (1998).
- 2) 吉田信夫, 土木施工, 22, 3, 45 (1981).
- 3) 地盤工学会, “地盤工学ハンドブック”, p.292 (1999).
- 4) 三木五三郎, 齊藤孝夫, “土の工学的分類とその利用”, p.136 (1979) 鹿島出版会.
- 5) 土質工学会, “土質試験の方法と解説”, p.110 (1990).
- 6) 齊藤孝夫, 三木五三郎, 第9回土質工学研究発表会, p.89 (1974).
- 7) 土質工学会, “N 値および C・ ϕ 考え方と利用法”, p.139 (1992).