

一般廃棄物熔融スラグの圧縮・せん断特性

福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 西松建設(株) 正会員 倉岡 豊
福岡大学工学部 学生員○佐藤 美幸 西松建設(株) 正会員 北村久美子
福岡大学大学院 学生員 権藤 清路

1. 目的 近年、一般廃棄物焼却残渣の最終処分場用地の確保とその残余年数の減少が大きな社会問題¹⁾となってきた。一般廃棄物の減容化策として熔融固化法²⁾があり、この方法は、焼却灰の無害化、再資源化の面から注目されている。しかし、熔融スラグは、莫大なコストをかけて生成されるにも関わらず、その多くは有効利用されることなくそのまま埋立処分されている。したがって、土木工事のように大量消費可能な有効利用策を考える必要がある。そこで本研究では、熔融スラグを土木資材へ有効利用することを考慮し、製造形式の異なる2種類の熔融スラグの力学特性の把握を目的とし、等方圧密試験及び圧密排水三軸試験(以下CD試験)を中心に各種土質試験を行った結果について報告する。

2. 試料及び実験概要

2.1 実験に用いた試料 実験には、直接式熱分解熔融炉から生成された水砕スラグ(以下スラグA)と、直接ガス化熔融炉から生成された水砕スラグ(以下スラグB)を用いた。図-1に試料の粒径加積曲線、表-1に試料の物理・力学特性、図-2に締固め曲線を示す。両スラグの密度、粒度分布等にはほとんど違いが見られなかった。しかし、熔融炉の違いによる粒子形状の違いから、締固め特性及び透水特性に違いが現われていることが分かる。この透水係数は、砂と同等の品質を有しているといえる。また、図-2に示すように両スラグともに含水比の変化に伴う乾燥密度の変化が小さく、非常に締固めづらい試料である事も示されている。

2.2 実験概要 等方圧密試験及びCD試験は、ひずみ制御式三軸せん断試験装置を使用した。供試体は、直径5cm、高さ10cmの円筒モールドに振動法で相対密度 $D_r=40, 60, 80\%$ になるように作成した。その後、炭酸ガスを30分通気させ、間隙空気と置き換えた後、脱気水を2時間通水し、飽和供試体を作成し、B値による飽和度の確認を行った。等方圧密試験は等方圧力を段階的(19.6~490kPa)に載荷させ、その際の体積変化を測定し行った。一方、CD試験は有効拘束圧 $\sigma'_c=49, 98, 196, 294, 392\text{kPa}$ の5種類で1時間等方圧密を行った後、排水条件でひずみ速度一定(0.5%/min)の圧縮せん断試験を行った。軸ひずみが15%に達した後、実験を終了させた。表-2に実験に用いたスラグAの供試体の初期状態を示す。

3. 結果報告及び考察

3.1 圧縮特性 図-3にスラグAの緩い状態の $D_r=45\%$ 、及び密な状態の $D_r=74\%$ における等方圧密試験結果を示す。この結果より求める圧密降伏応力 p_y は、 $D_r=45\%$ のとき $p_y=175\text{kPa}$ 、 $D_r=74\%$ のとき $p_y=160\text{kPa}$ であり、密な状態の方が少し小さい応力で降伏しているが、両者はほぼ同様な傾向を示している。今回行った拘束圧($\sigma'_c=49\sim 490\text{kPa}$)の範囲において、拘束圧に伴う圧縮性は小さい材料であることが分かった。

3.2 供試体密度の違いによる影響 図-4(a), (b)にスラグA及びBにおける $\sigma'_c=98\text{kPa}$ のCD試験の結果を示す。両スラグとも、表-1に示すように最大・最小間隙比の差が小さいにも関わらず、せん断に伴う軸差応力及び体積ひずみ特性に供試体密度の影響が現れている。また、軸差応力のせん断に伴う明確なピークは見られないが、ダイラテンシー特性に供試体密度の差が生じていることが分かる。

3.3 拘束圧の違いによる影響 図-5(a), (b)にスラグAにおける $D_r=80\%$ のCD試験

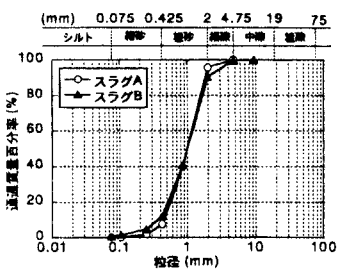


図-1 粒径加積曲線

表-1 物理・力学特性

	スラグA	スラグB
ρ_s (g/cm ³)	2.73	2.75
U_c	2.67	3.38
U_e	0.91	0.94
e_{max}	1.022	1.209
e_{min}	0.809	1.032
$e_{max}-e_{min}$	0.213	0.177
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.59	1.50
w_{opt} (%)	6.4	17
k (cm/s)	1.54×10^{-1}	7.87×10^{-2}
(締固め度95%)		

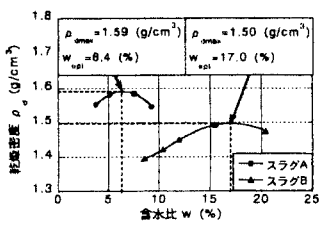


図-2 締固め曲線

表-2 初期条件と供試体密度の比較

有効拘束圧 σ'_c (kPa)	目標 D_r (%)	供試体 密度 (%)
49	40	37
	60	64
	80	83
98	40	42
	60	63
	80	81
196	40	39
	60	58
	80	78
294	40	44
	60	65
	80	77
392	40	43
	60	60
	80	80

結果を示す。(a)より、拘束圧の増加とともに軸差応力が増加し、ダイレタンシー特性が膨張から収縮へと大きく変化していることが分かる。これは、スラグが拘束圧依存性の高い材料であること

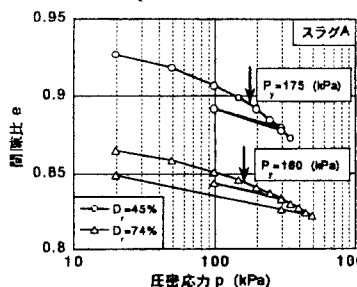
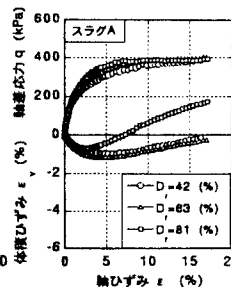
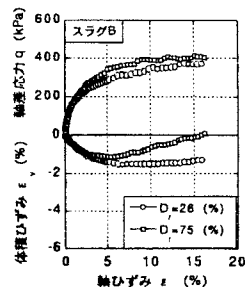


図-3 等方圧縮における e - $\log p$ 曲線



(a) スラグ A



(b) スラグ B

図-4 CD 試験結果 ($\sigma'_c = 98 \text{ kPa}$)

を示している。そこで、(b)に軸差応力を拘束圧で除した軸差応力比で示した結果を示す。この図より、スラグ A は拘束圧の増加に伴って、せん断に伴う強度が低下することが分かる。また、 $\sigma'_c = 196 \text{ kPa}$ 以上になるとせん断に伴う軸差応力比の挙動はほぼ同様な傾向を示していることも分かる。これは、図-3 に示す等方圧密の結果で示した降伏応力と関連性があることが示唆される。

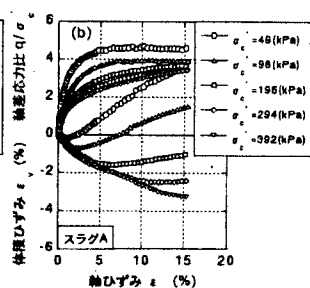
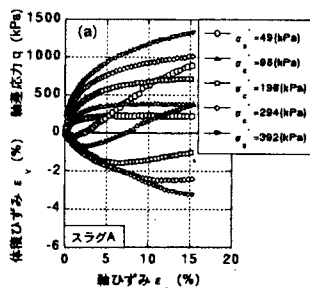


図-5 CD 試験結果 ($D_r = 80\%$)

3.4 強度定数に及ぼす拘束圧の影響 次に、

スラグの強度特性について検討するため、図-6 にモールの応力円を用いてスラグの強度定数について検討を行った。図より、スラグは拘束圧依存性が高いため、一本の破壊包絡線を引くことができないことが分かる。そこで、スラグの粘着力 c_s を 0 として最大軸差応力時に動員される内部摩擦角 ϕ_s を求めた。図-7 に ϕ_s と σ'_c の関係を示す。図より、拘束圧の増加に伴って内部摩擦角が低下することがわかった。また、圧密降伏応力 p_y 以上になるとほぼ 33° 程度に収束することが分かる。内部摩擦角 $30 \sim 35^\circ$ 以上であり、シルト分以下含有量 5% 以下、透水性が良いことから、サンドコンパクションパイル材及びサンドドレーン材の品質基準³⁾に適合し、地盤改良材としても適用可能である。

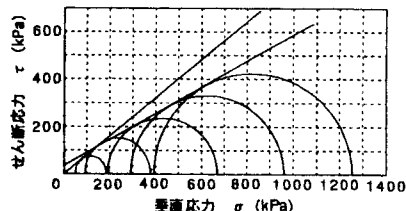


図-6 モールの応力円 ($D_r = 40\%$)

3.5 せん断試験における粒子破碎の評価 図-8 にせん断終了後の乾燥試料を用いて粒度試験を行い、せん断に伴う粒子破碎評価を行った結果を示す。ここで、破碎量の評価は B_w 法⁴⁾で行っている。その結果、わずかなばらつきが見られるが、圧密降伏応力を越えた $\sigma'_c = 196 \text{ kPa}$ 以上において粒子破碎量が急激に増加していることがわかる。したがって、スラグを利用する場合、粒子破碎の影響を十分に考えて利用用途を考えることが必要であることが示唆される。

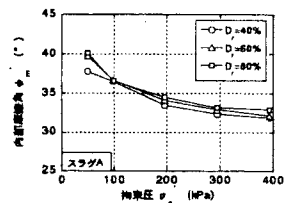


図-7 内部摩擦角と拘束圧の関係

4. まとめ 結果より以下のことが明らかになった。

- (1) スラグの強度定数は拘束圧による影響を強く受け、応力集中の生じるような場所には利用が難しい。
- (2) CD 試験の結果、スラグ A は砂と同等の値を示し、土木資材として有効利用できることが明らかになった。

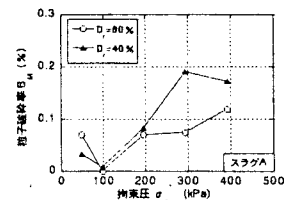


図-8 粒子破碎率と拘束圧の関係

〔謝辞〕本研究を行うにあたり、三井造船 (株) の板谷真積さんには水砕スラグの手配をして頂きました。ここに感謝の意を表します。

〔参考文献〕1)「環境白書」、環境省、2001 2)「スラグの有効利用マニュアル」、財団法人 廃棄物研究財団、pp82-94、1998 3)長田守弘ら：「都市ごみ直接溶融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、pp624-626、1999 4)石井武美：「粒子破碎の表示尺度のもつ物理的意義」、土質工学会論文報告集、Vol. 29、No. 4、pp155-164、1989