

原土の土質特性が異なる鉄鋼スラグ混合土の三軸圧縮試験の力学特性について

鉄鋼スラグ 混合土 三軸圧縮試験	九州工業大学大学院	正会員（学生）	○高橋一碧，升谷侑嗣
	九州工業大学大学院	国際会員	川尻峻三
	関西地盤環境研究センター	正会員	李 俊憲
	松江工業高等専門学校	国際会員	堀田崇由
	建設工学研究所	国際会員	澁谷 啓
	建設工学研究所	正会員	中西典明
	日本製鉄	正会員	一村政弘

1. はじめに

近年，盛土施工に用いる盛土材料が軟弱で所要強度の確保が困難な場合，セメント系固化剤を添加した地盤改良が広く採用されている．一方，セメント系固化剤は製造時に多量の二酸化炭素を排出することから，環境負荷低減の観点からの代替的な地盤改良手法の開発が求められている．このような背景の下，鉄鋼製品の製造過程で副産物として発生する鉄鋼スラグを利用した地盤改良手法が注目されている．しかし，鉄鋼スラグの一種である製鋼スラグの混合土の強度発現機構については一定の知見が蓄積されている¹⁾．製鋼スラグを混合した土の力学特性に関しては，陸域の盛土材料を主対象とした体系的な研究成果²⁾が必ずしも十分ではなく，適用性評価に向けた基礎的検討の蓄積が求められている．

本稿では，製鋼スラグを混合する原土の土質および供試体の養生日数が強度特性へ与える影響を検討するため，三軸圧縮試験を行った結果について報告する．

2. スラグ混合土の物理的性質

本研究の実験対象としたスラグ混合土は，大規模盛土造成工事で採取された2種類の土試料（粘性土質砂質礫，細粒分まじり砂質礫）を原土としている．原土と鉄鋼スラグの混合比は，湿潤体積混合率 $SSMR(V)$ （締固め前の含水状態における「鉄鋼スラグの体積(m³)」/「鉄鋼スラグと原土の総体積(m³)」）で定義している．表-1 は本研究で用いた原土およびスラグ混合土の土粒子密度 ρ_s と，突固めによる土の締固め試験（B-c 法）によって得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} ，最適含水比 w_{opt} を示している．なお，鉄鋼スラグの粒子密度 $\rho_{slag} = 3.646 \text{ g/cm}^3$ である．いずれの原土においても鉄鋼スラグを混合し， $SSMR(V)$ を増加させると ρ_{dmax} が大きくなり， w_{opt} が小さくなった．一方で，細粒分まじり砂質礫の混合土では，一部のケースで w_{opt} が原土よりも大きくなった．これは粘性土質砂質礫の混合土とは異なる傾向であるが，原因は不明である．また，粘性土質砂質礫の混合土の粒度分布を図-1 に，細粒分まじり砂質礫の粒度分布を図-2 に示している．いずれの原土においてもスラグを混合し， $SSMR(V)$ を増加させることで平均粒径 D_{50} が大きくなり，細粒分含有率が低下した．

3. 実験結果および考察

スラグ混合土の力学特性を把握することを目的として，三軸圧縮試験を実施した．本実験では，同一試料，同一の混合率で作製した3本の供試体にそれぞれ 100 kN/m²，200 kN/m²，400 kN/m² の拘束圧 σ_c を与えて縦軸方向に圧縮応力を与える圧密排水三軸圧縮試験を行った．なお，供試体サイズは直径 150mm，高さ 300mm とし，供試体の締固め度 D_c は 90% とし，供試体の初期含水比 w_i は最適含水比 w_{opt} とした．三軸圧縮試験の試験方法や供試体の飽和化などは地盤工学会基準に準拠した．図-3 に実験によって得られた代表的な結果として，粘性土質砂質礫混合土の $SSMR(V) = 35\%$ 供試体の偏差応力 $q(=$

表-1 スラグ混合土の物理的性質のまとめ

原土	SSMR(%)	土粒子密度 $\rho_s \text{ (g/cm}^3\text{)}$	最大乾燥密度 $\rho_{dmax} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	最適含水比 $w_{opt} \text{ (%)}$
粘性土質砂質礫	0	2.557	1.562	19.2
	15	2.803	1.648	15.3
	25	2.892	1.744	15.0
	35	3.130	1.784	14.5
細粒分まじり砂質礫	0	2.673	1.501	13.7
	15	2.944	1.590	18.2
	25	3.057	1.697	17.4
	35	3.257	1.725	17.2

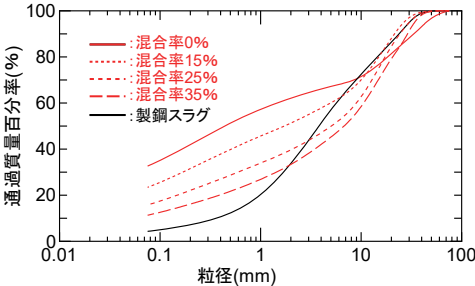


図-1 粒度分布：粘性土質砂質礫

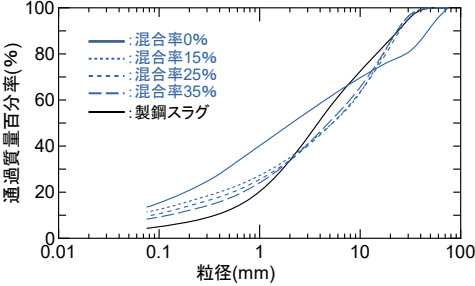


図-2 粒度分布：細粒分まじり砂質礫

Mechanical properties of steel slag-mixed soils with different soil properties obtained by triaxial compression tests.

Takahashi I., Masutani Y, Kawajiri S. (Kyushu Institute of Technology)
Lee J.H.(Kansai Geo Environment Research Center), Ichimura M.(Nippon Steel)
Horita T.(National Institute of Technology, Matsue College), Nakananishi N, Shibuya S.(CERI)

$\sigma_1 - \sigma_3$ - 軸ひずみ ε_a および体積ひずみ ε_v - 軸ひずみ ε_a 関係を示す。全体的な傾向として、 ε_a の増加とともに q が増加し、 ε_v は圧縮傾向を示すこと、最大偏差応力 $q_{\max}$ が σ_c の大きさに応じて大きくなることは、緩詰めの際質土や砂質土と同様の力学挙動を呈しているといえる。ここで、 $\varepsilon_a < 5\%$ 程度までの小～中ひずみ領域に着目すると、材齢 28 日の q は、材齢 0 日より明らかに大きい。別途算出した σ_c で正規化した割線ヤング係数 E_{50}/σ_c は 28 日の養生後には 1.17~7.11 倍となり、スラグ混合によって変形特性が改善されることを確認している。また、細粒分まじり砂質礫混合土の E_{50}/σ_c においても 28 日の養生後に約 1.1~2.4 倍に増大し、変形特性が改善されることを確認している。一方で、軸圧縮が終了する $\varepsilon_a = 15\%$ の大ひずみ領域での q は養生日数に依らず同程度の値となっている。このことから鉄鋼スラグの混合で期待できる自硬性（潜在水硬性）の効果は、本実験で用いた原土の範囲では小～中ひずみ領域における変形特性の改善として現れるといえる。しかし、ひずみが大きい領域の強度特性は養生日数の影響が小さいことがわかった。

表-2、表-3 は、それぞれ粘性土質砂質礫混合土と細粒分まじり砂質礫混合土に対する圧密排水三軸圧縮試験から得られた有効応力表示での力学パラメータ（粘着力 c_d 、内部摩擦角 ϕ_d ）のまとめを示している。また、図-4、図-5 は、それぞれ $SSMR(V) \sim c_d$ 、 $SSMR(V) \sim \phi_d$ の関係を示している。粘性土質砂質礫混合土では、 $SSMR(V)$ に依らず養生日数の増加に伴い c_d が増大する傾向にあった。一方で、細粒分まじり砂質礫混合土の c_d は養生日数の増加に伴いやや低下する傾向にあった。このことからスラグ混合で期待できる潜在水硬性による粘着力の増大の程度は、原土の土質特性に依存すると予想される。

ϕ_d については、粘性土質砂質礫混合土と細粒分まじり砂質礫混合土ともに $SSMR(V)$ とともに増加した。これは粒径が大きいスラグを混合することで、いわゆる ϕ 材の特性が強い材料特性へ変化したためと考えられる。このような $SSMR(V)$ の増加による ϕ 材への変化は、 $SSMR(V)$ の増加によって c_d が低下する傾向と符合している。ここで $SSMR(V)$ の増加に伴う ϕ_d の変化量に着目すると、粘性土質砂質礫混合土では $SSMR(V)$ に対して ϕ_d が単調に増加しているが、細粒分まじり砂質礫混合土では ϕ_d が $SSMR(V) = 15\%$ で顕著に増加した。このことから先述の c_d と同様に三軸圧縮試験から得られるスラグ混合土の強度パラメータは原土の土質特性に依存しているといえる。また、 ϕ_d の増加傾向は、スラグを混合することで安定した骨格構造を形成できる原土の粒度特性が存在する可能性を示唆している。

4. まとめ

三軸圧縮試験の結果より、スラグ混合率の増加に伴う混合土の強度パラメータ（ c_d 、 ϕ_d ）の変化は原土の土質特性の影響を受けることがわかった。 c_d については養生によって自硬性が発揮され、混合土の粘着力が増加する傾向が確認された。

参考文献

1) 杉村ら：製鋼スラグを混合した特殊土の化学および一軸圧縮強度特性，地盤工学ジャーナル，Vol.15，No.3，pp.509-517，2020。2) 片岡ら：鉄鋼スラグ混合土を用いた実大道路盛土での現場実証実験，第 13 回地盤改良シンポジウム論文集，pp.59-64，2018。

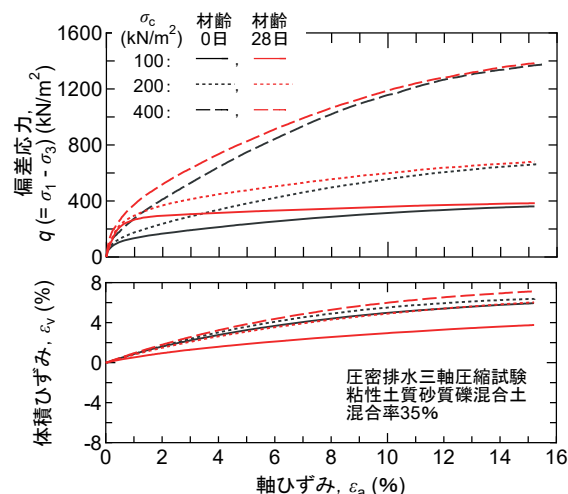


図-3 $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$, ε_v - 軸ひずみ ε_a 関係

表-2 粘性土質砂質礫混合土の c_d および ϕ_d

SSMR(V)	材齢 0 日		材齢 28 日	
	c_d	ϕ_d	c_d	ϕ_d
0%	6	33.8	—	—
15%	4	36.9	11	37.2
25%	4	37.9	11	37.3
35%	2	38.9	8	38.8

表-3 細粒分まじり砂質礫混合土の c_d および ϕ_d

SSMR(V)	材齢 0 日		材齢 28 日	
	c_d	ϕ_d	c_d	ϕ_d
0%	21	27.8	—	—
15%	29	34.1	27	34.0
25%	29	34.9	22	35.9
35%	20	36.9	20	37.2

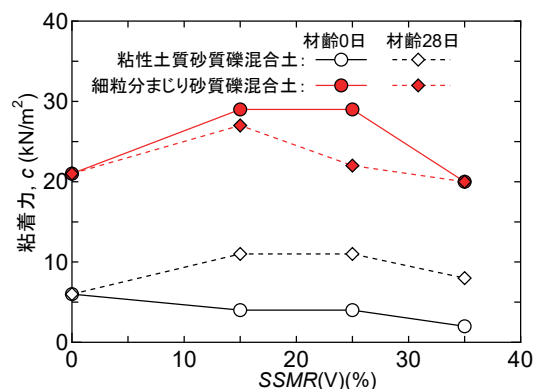


図-4 $SSMR(V) - c_d$ 関係

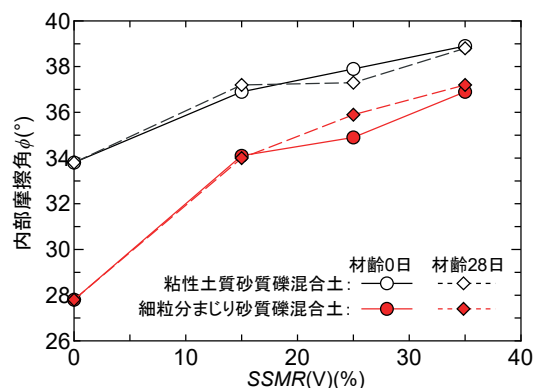


図-5 $SSMR(V) - \phi_d$ 関係