

原土とスラグの種類を変化させたスラグ混合土の各種土質パラメータの変化について

鉄鋼スラグ 混合土 材料特性

九州工業大学大学院
九州工業大学大学院
関西地盤環境研究センター
松江工業高等専門学校
日本製鉄
神戸製鋼所
建設工学研究所
建設工学研究所

正会員（学生） ○升谷侑嗣，高橋一碧
国際会員 川尻峻三
正会員 李 俊憲
国際会員 堀田崇由
正会員 一村政弘
正会員 陣内綾音
国際会員 澁谷 啓
正会員 中西典明

1. はじめに

近年，盛土構築に使用する土質材料が軟弱で，必要な強度の確保が難しい場合には，セメント系固化材を加える地盤改良が広く実施されている．その一方で，セメント系固化材は製造時に大量の二酸化炭素を排出するため，環境負荷の低減を考慮した新たな地盤改良技術の開発が求められている．このような状況を背景として，鉄鋼製品の製造工程で副産物として生じる鉄鋼スラグを活用した地盤改良技術が注目されている．近年では，この鉄鋼スラグを混合した土の強度発現機構について知見が蓄積されつつある^{1),2)}．一方で，製鉄所が異なる複数のスラグに対し，種類の異なる盛土材料を混合した場合の土質パラメータの変化を網羅的に調べた事例は少ない．こうした検討は，材料特性の違いが改良土の性状に及ぼす影響を整理し，実務における適切な材料選定や適用性評価に資する基礎的知見として重要である．

本稿では，異なる2つの製鉄所から生産された鉄鋼スラグ（以下，KスラグとN1スラグとする）を大規模盛土造成時の発生土に対して混合した際の各種土質パラメータの変化について，製鋼スラグの体積混合率に着目して検討を行った結果を報告する．

2. スラグ混合土の物理的性質と粒度特性の変化

表-1 は本研究の実験対象とした原土と鉄鋼スラグの土粒子密度 ρ_s or スラグ粒子密度 ρ_s と自然含水比 w_n ，各材料の地盤材料の分類名のまとめを示している．本研究でのスラグ混合土は，大規模盛土造成工事で採取された3種類の土試料に対し，異なる製鉄所で生産された2種類の鉄鋼スラグを混合したものである．原土と製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 (m^3)」/「鉄鋼スラグと原土の総体積 (m^3)」）で定義している．図-1 および図-2 はそれぞれ K スラグ混合土と N1 スラグ混合土の $SSMR(V)$ = 0（原土），15，25，35%における粒度分布の変化を示し

表-1 スラグ混合土の物理的性質

パラメータ	旧盛土	神戸層群 凝灰岩	大阪層群 砂礫	K スラグ	N1 スラグ
粒子の密度, ρ_s (g/cm^3)	2.608	2.610	2.669	3.236	3.532
自然含水比, w_n (%)	22.2	19.4	12.0	8.2	4.0
地盤材料の 分類名	粘性土質 礫質砂	粘性土質 礫質砂	粘性土質 砂質礫	細粒分まじり 砂質礫	細粒分砂 まじり礫

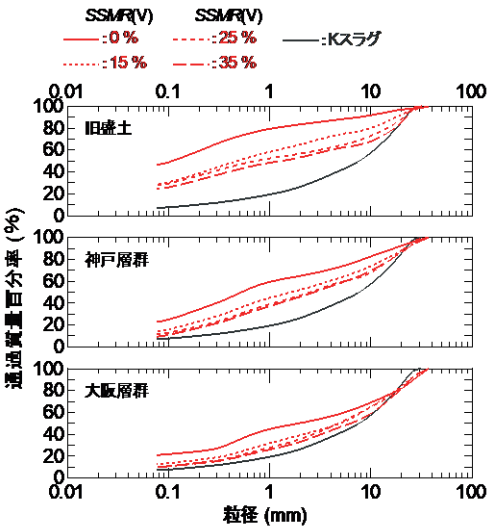


図-1 粒度分布：Kスラグ混合土

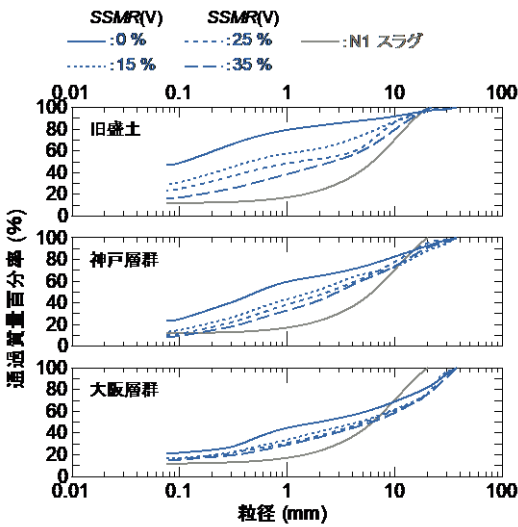


図-2 粒度分布：N1スラグ混合土

Effects of Original Soil and Slag Type on
Geotechnical Parameters of Steel Slag-
Mixed Soils

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

ている。いずれの原土においてもスラグの種類に依らず、スラグを混合することで細粒分含有率 F_c が低下し、平均粒径 D_{50} が大きくなっていた。このことから本研究で対象とした原土に対しては、スラグを混合することによる粒度改善効果が認められる。

3. 各種土質パラメータとSSMR(V)の関係

図-3 は各スラグ混合土におけるSSMR(V)と F_c の関係を示している。先述したように原土にスラグを混合することで粒度改善効果が認められたが、旧盛土の結果に代表されるように原土の F_c が大きいほどスラグによる F_c の低下量が大きくなる傾向にある。一方で、スラグの種類によっては F_c の低下傾向が異なり、粒度改善効果は混合するスラグの粒度分布の影響を受ける可能性がある。

図-4a), b) はそれぞれ B-c 法による突き固め試験で得られた締固め曲線から推定した最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、最適含水比 w_{opt} とSSMR(V) の関係を示している。 ρ_{dmax} については、原土が砂質礫に分類される大阪層群砂礫ではSSMR(V)の増加による ρ_{dmax} の上昇は緩慢である。一方で、 F_c が高い旧盛土に対してはSSMR(V)の増加に対してスラグの種類によらず ρ_{dmax} が単調に増加している。スラグの種類の違いについては、N1 スラグは K スラグと比較して ρ_s が大きいことが ρ_{dmax} に反映されている。 w_{opt} の変化については、砂質な神戸層群凝灰岩や礫質な大阪層群砂礫ではSSMR(V) = 15%以上から w_{opt} の低下が緩慢になるものの、旧盛土では上述の二つの地盤材料よりも w_{opt} の低下の割合が大きいことから、スラグの混合による土質特性の改善効果が確認できる。

次に図-5a), b) はそれぞれ圧密排水三軸圧縮試験により得られた内部摩擦角 ϕ_d 、粘着力 c_d とSSMR(V) の関係を示している。なお、三軸試験の供試体条件は締固め度 $D_c = 90\%$ 、供試体の初期含水比 $w_i = w_{opt}$ である。また、拘束圧 $\sigma_c = 100, 200, 400 \text{ kN/m}^2$ で実施した。 ϕ_d とSSMR(V) の関係は、大阪層群砂礫ではSSMR(V)に対する ϕ_d の増加は緩慢である。これは先述したように砂礫に対して粒状材料である鉄鋼スラグを混合しても土質特性の改善効果が限定的であることを示している。また、神戸層群凝灰岩についてはSSMR(V) = 15%で ϕ_d の増加が顕著となるが、SSMR(V) = 15%以上ではSSMR(V)の増加に対する ϕ_d の変化はほとんど確認できない。この傾向は図-4a)に示した ρ_{dmax} の傾向と類似している。このことから、SSMR(V)を増加させても供試体の初期乾燥密度の変化が小さいために ϕ_d の変化が緩慢であったと推定される。一方で、旧盛土の ϕ_d が変化する傾向については、図-4a)の傾向と類似しており、SSMR(V)の増加に対して ϕ_d が単調増加している。また、SSMR(V) = 15%以上の ϕ_d はスラグの違いによる影響が確認でき、K スラグの ϕ_d が大きい。これは図-3に示した F_c の変化と関係していると考えられる。つまり、K スラグでは N1 スラグよりも F_c が大きいSSMR(V)では、安定した土の骨格構造が形成されていると予想される。

4. まとめ

一連の実験結果より、スラグの混合による土質特性の改善効果は原土の土質特性に依ることが判明した。また、土の強度パラメータについては、土の骨格構造の形成がスラグの種類によって影響を受けることが示唆される結果を得た。

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。

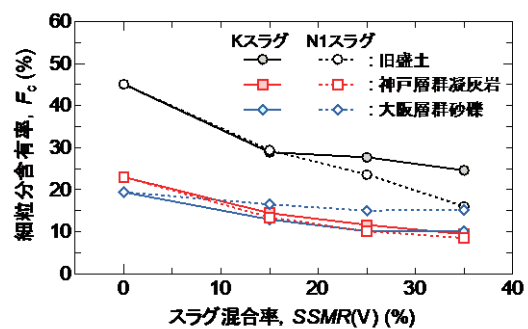
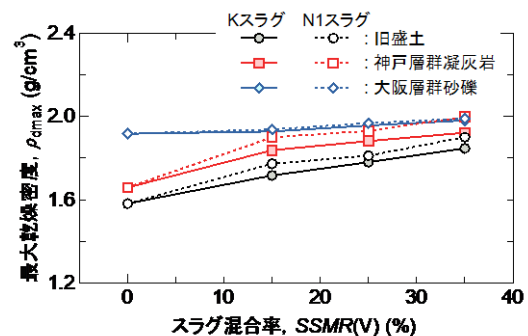
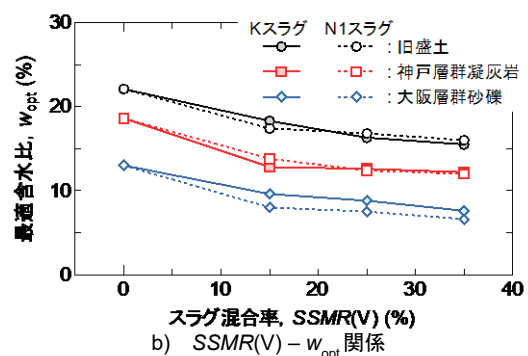


図-3 SSMR(V) - F_c 関係

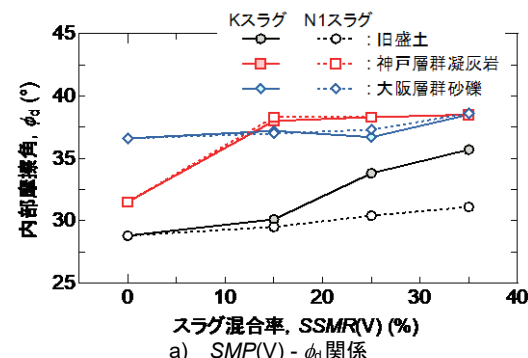


a) SSMR(V) - ρ_{dmax} 関係

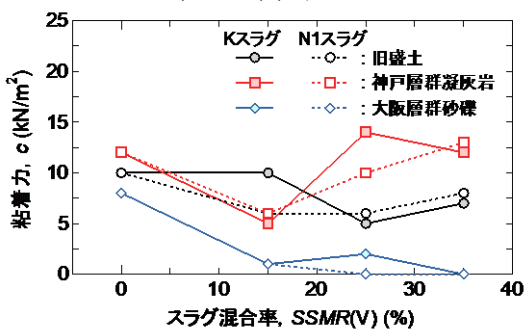


b) SSMR(V) - w_{opt} 関係

図-4 スラグの混合による締固め特性の変化



a) SMP(V) - ϕ_d 関係



b) SMP(V) - c_d 関係

図-5 スラグの混合による強度パラメータの変化