

鉄鋼スラグ混合土における鉄鋼スラグ混合率と締固め特性および CBR 値の相関性

改良土 スラグ CBR

(一財) 建設工学研究所 (CERI)
(協) 関西地盤環境研究センター
サンヨーコンサルタント (株)
九州工業大学
松江工業高等専門学校
日本製鉄(株)
パシフィックコンサルタンツ (株)

正会員
正会員
正会員
国際会員
国際会員
正会員
非会員

○中西典明・国際会員 瀧谷啓
李俊憲・正会員 松川尚史
堀田昌吾
川尻峻三
堀田崇由
一村政弘
和氣英雄

1. はじめに

既往の研究では、鉄鋼スラグを細粒分リッチな低品質土に「粒度改善材」として適切な配合割合（容積比で、鉄鋼スラグ：土＝1：3 程度）で混合攪拌することで、締固め特性および強度特性の両者が向上することが報告されている¹⁾。また、低品質の盛土材料に鉄鋼スラグの混合することで、室内 CBR と簡易支持力測定（キャスポル試験）による換算 CBR 値の双方が大きく増加することが報告されている²⁾。令和 6 年に防府市内の盛土高さ 1.5m の盛土造成工事において、低品質の現地発生土の有効利用を目的として、調整池からの浚渫土と鉄鋼スラグ（ジオタイザー：軟弱地盤改良用石灰系粒度調整材）を所定のスラグ混合率（SSMR）³⁾で混合し、盛土材料として使用した。本研究では、この盛土材料を対象として一連の室内土質試験⁴⁾（物理試験、突固めによる土の締固め試験、設計 CBR）を行い、スラグ混合率と締固め特性、CBR 値の関係を確認した。さらに実盛土の現場 CBR 試験とキャスポルによる盛土の CBR 値を設計 CBR 値の計測結果と比較し、室内試験結果と実盛土の CBR の相関を確認した。

2. 室内試験結果

表-1 は、現地発生土および鉄鋼スラグの物理的特性を示す。土粒子の密度は現地発生土が 2.574Mg/m³、鉄鋼スラグが 3.306Mg/m³である。地盤材料の工学的分類名は、現地発生土が、「細粒分まじり礫質砂」、鉄鋼スラグは、「砂細粒分まじり砂質礫」に分類される。

表-1 原土（浚渫土）および鉄鋼スラグの物理的特性³⁾

項 目	浚渫土	鉄鋼スラグ
土粒子の密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.574	3.306
礫分(2～75mm)(%)	39.2	68.3
砂分(0.075～2mm)(%)	48.7	26.3
細粒分(0.075mm未満)(%)	12.1	5.4
最大粒径(mm)	26.5	26.5
50%粒径 D_{50} (mm)	1.1	5.3
地盤材料の分類名	細粒分まじり礫質砂	細粒分まじり砂質礫
分類記号	SG-F	GS-F

図-1 に、現地発生土および鉄鋼スラグそれぞれの粒径加積曲線を実線で示し、SSMR=25%、33%、50%の粒径加積曲線を点線で示す。SSMR の増加とともに礫分が増加し、細粒分が 12%から約 5%に減少した。

図-2 に、鉄鋼スラグの容積配合率（SSMR(V)）を変えた 6 種類の混合土の締固め曲線を示す。図のゼロ空気間隙曲線は、計算値で求めた混合土の土粒子密度から算出した（表-2）。

鉄鋼スラグ混合土は混合する鉄鋼スラグの土粒子密度が原土の土粒子密度よりも大きいため、図 2 の粒径加積曲線において、最大乾燥密度のみで締固め性能を評価することができない。これに対し、混合土の土粒子密度を混合率によって加重平均した土粒子密度 ρ_{sm} (加重平均土粒子密度) に対する最大乾燥密度の割合（ ρ_{dmax}/ρ_{sm} ）によって、締固め性能を評価した（表-2）。図-3 では、SSMR に比例して ρ_{dmax}/ρ_{sm} の割合の増加が見られ、 ρ_{dmax}/ρ_{sm} は、原土の 70%から SSMR=50%で 74.4%に上昇している。これは、スラグ混合によって、締め固めた土の密度増加が生じていると考えられ、鉄鋼スラグ混合による締固め性能の向上を示すものであると考える。

Correlation between steel slag mixing ratio, compaction characteristics, and CBR values in steel-slag-mixed soil

Nakanishi, N., Shibuya, S. (C.E.R.I), Lee, J.H., MATSUKAWA.H (Kansai Geo Environment Research Center), HORITA, S. (Sanyo Consultant CO., LTD.), KAWAJIRI, S. (Kyushu Inst. of Tech.), HORITA, T (National Institute of Technology, Matsue College), Ichimura, M. (Nippon Steel Corporation), Wake H. (Pacific Consultant CO., LTD.),

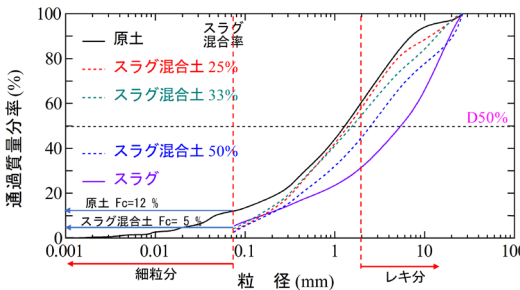


図-1 粒径加積曲線³⁾に加筆

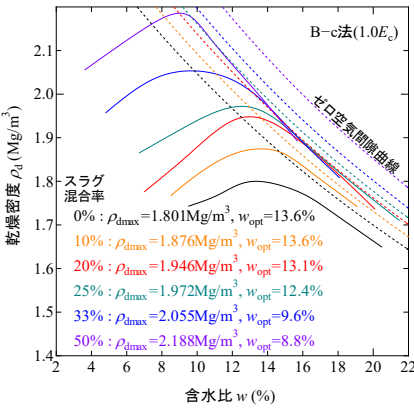


図-2 締固め曲線

表-2 加重平均土粒子密度による締固め性能評価

混合率 (%)		混合率相当重量 (Mg)		加重平均 密度 ρ_{sm} (Mg/m ³)	最大乾燥 密度 ρ_{dmax} (Mg/m ³)	ρ_{dmax}/ρ_{sm} (%)
原土	鉄鋼スラグ	原土	鉄鋼スラグ			
100	0	2.574	0.000	2.574	1.801	70.0
90	10	2.317	0.331	2.648	1.876	70.8
80	20	2.059	0.661	2.720	1.946	71.5
75	25	1.931	0.827	2.758	1.972	71.5
67	33	1.725	1.091	2.816	2.055	73.0
50	50	1.287	1.653	2.940	2.188	74.4
土粒子密度 (Mg/m ³)		2.574	3.306			

表-3 に、現場盛土材料の原土である浚渫土の設計 CBR 値を示す。原土の CBR 値は 0.6~2.0%，自然含水比は 14.8%~27.3%の範囲にあり、盛土材として不適切な低品質土である。

表-3 原土(浚渫土)における設計 CBR 値³⁾

試料番号	No.3	No.6	No.9	No.12
自然含水比 w_n (%)	27.3	27.0	21.7	14.8
CBR(%)	0.3	0.5	0.6	2.0

図-4 に、SSMR=10%，20%，25%，33%，50%における鉄鋼スラグ混合土の材齢と修正 CBR 値の関係を示す。いずれの混合率においてもスラグ混合土の CBR 値は材齢 28 日までは直線的に増加するが、それ以降の増加率は材令 84 日までの増加率は小さい。このことから、設計 CBR 値はセメント改良と同様に材齢 28 日の CBR 値で規定すれば安全側に評価できると考えられる。次に図-5 に CBR 値と SSMR の関係を示す。この図から、材齢に関係なく、CBR 値とスラグ混合率は比例関係にあり、修正 CBR がスラグ混合率の一次関数で予測できることを示すものである。

3. 現場 CBR 試験

本現場では、事前の室内試験結果を踏まえて、盛土材は鉄鋼スラグ：土=1：2 の割合 (SMR=33%) で混合した。施工後実施した現場 CBR⁵⁾、キャスポル⁵⁾、の結果と室内修正 CBR 値の関係を図-6 に示す。現場 CBR 値は材齢 28 日で室内試験値 35.47%の約 60%の 21.1 %となった。この結果から、実盛土の CBR 値を室内試験値の 60%以下として良いと考えられるが、この低減率は、原土の土質によって変化する可能性が高く、今後、事例を重ねて精査していく必要がある。また、現場 CBR 値は材齢 7 日において室内試験値を大きく上回って現場 CBR 値は材齢 28 日の CBR 値を上回っている。施工者の実施した現場密度試験では当該盛土の締固め度は $D_c=97.5\%$ 、 94.6% と室内 CBR 試験試料の締固め度 90%よりも極めて高い締固め状態となっており、スラグ混合土の締固め性能向上効果によって早期に高い CBR 値が発現したものと推定する。また、キャスポル、現場 CBR とともに CBR 値が低下している傾向を示すが、材齢 28 日、64 日の調査の前日に数mmの降雨があり、スラグ混合土表層への雨水の浸透による粘着力の低下が影響したものと推定する。

4. まとめ

一連の室内試験より、鉄鋼スラグを低品質な現場発生土に混合すると締固め特性が向上し、CBR 値が大きく増加することが分かった。また、CBR 値は材齢 28 日以降の強度増加は比較的緩やかであることから、設計 CBR 値として材齢 28 日の CBR 値を用いることが妥当と考えられる。また、CBR 値はスラグ混合率の一次関数で示されることが分かった。さらに、鉄鋼スラグ混合土は粒度改善効果により締固め性能が高く、早期に高い CBR 値を発現することを確認した。この性質は、災害時の道路復旧や緊急時の道路建設への適用性に優れる材料であることを示すものである。今後、施工性に優れ環境にもやさしいリサイクル材料である鉄鋼スラグの盛土や路床への有効利用の拡大が期待される。

本研究は、日本製鉄株式会社との「鉄鋼スラグ混合土の盛土材料としての適用性に関する共同研究」の一貫として実施した。関係各位のご助力に深く感謝致します。

【参考文献】

1) 片岡沙都紀, 澁谷啓, 河井克之, 石原朱莉, 山里拓也, 丁経凡, 佐藤厚子：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. 2) 李俊憲, 松川尚史, 中村高志, 松元弘昭, 片岡沙都紀, 澁谷啓：鉄鋼スラグ混合土を用いて造成した道路路床の支持力に関する事例研究, 第 58 回地盤工学研究発表会, 13-12-4-03, 2023. 3) 澁谷啓, 李俊憲, 鉄鋼スラグ混合土盛土のための室内土質試験方法, 第 61 回地盤工学研究発表会, 投稿中, 4) 李ら, 鉄鋼スラグ混合土盛土の室内配合試験. 第 60 回地盤工学研究発表会, 24-9-3-05, 2025. 5) 堀田ら：鋼鉄スラグ混合土盛土地盤の原位置試験調査 その 1: CBR 試験, キャスポル, 簡易動的コーン貫入試験, 第 60 回地盤工学会研究発表会, 24-9-3-06, 2025.

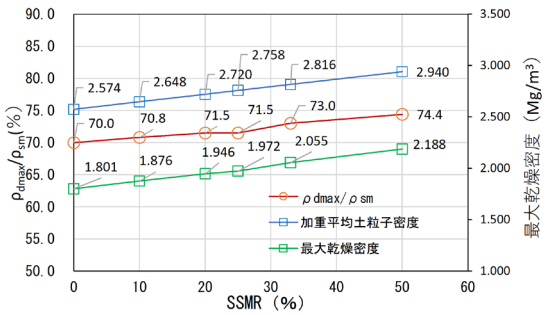


図-3 加重平均土粒子密度と最大乾燥密度

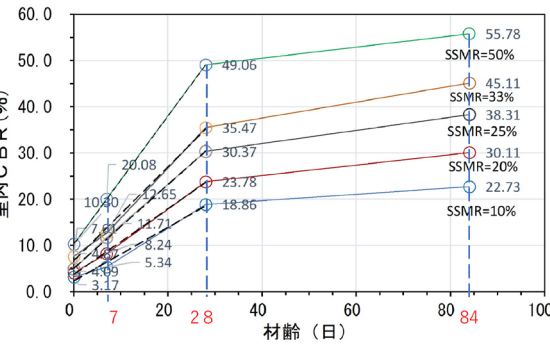


図-4 スラグ混合率-CBR 値

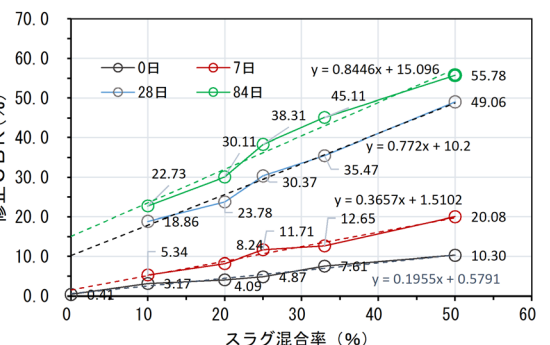


図-5 スラグ混合率-CBR 値

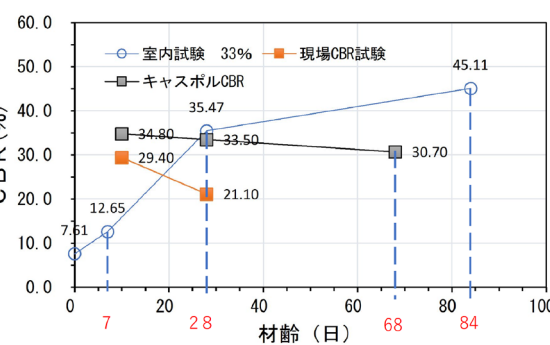


図-6 室内 CBR と現場 CBR