

鉄鋼スラグ混合土盛土のための室内土質試験方法

盛土 鉄鋼スラグ 室内試験

(一財) 建設工学研究所 (CERI)
(協) 関西地盤環境研究センター国際会員 ○渋谷 啓
正会員 李 俊憲

1. はじめに

現地発生土に鉄鋼副産物である鉄鋼スラグを混合攪拌することにより粒度分布を改善し、この鉄鋼スラグ混合土 (Steel-slag Mixed Soil, 以下 SMS) を締固めて盛土を造成する実現場を想定する。鉄鋼スラグは、土質分類における砂礫相当の粒子（粒子直径が 0.075mm～75mm）が卓越した材料であり、出自は鉄鉱石であるから粒子そのものが硬くて角張っている点に特長がある。総じて細かい粒子が主体で水を多く含む低品質土に、この種の特長を有する鉄鋼スラグ粒子を混合した場合、低品質土の締固めが可能あるいは容易になり、内部摩擦角 ϕ が大きくなり、せん断強度が増加する。内部摩擦角が大きいと、盛土に作用する土被り圧が大きくなるにつれせん断抵抗力が大きくなるため、固化（セメント）系改良土と比較して、とりわけ高盛土では合理的な改良方法となる。一方、原土のアロフェン含有量の多少、現場の水環境等に応じて、粒子間のセメンテーションによる粘着力 c の増大も期待できる^{1)~3)}。本稿では、SMS 盛土の工学的性質を明らかにし、締固め管理値および設計値を求めるための各種室内土質試験方法について述べている。

2. 用語および基本的物理量の定義

SMS の湿潤体積混合率 SSMR(V) と乾燥重量混合比 SSMR(W) を以下に定義する。

- **湿潤体積混合率 SSMR(V)**：締固め前の自然含水状態における「鉄鋼スラグの体積 (m³)」/「鉄鋼スラグと原土の総体積 (m³)」×100(%)
例：原土 3m³ と鉄鋼スラグ 1 m³ を混合したとき、SSMR(V)=25%
- **乾燥重量混合比 SSMR(W)**：「鉄鋼スラグの乾燥重量 (kgf)」/「原土の乾燥重量 (kgf)」×100(%)
例：乾燥状態の原土 1,000kgf と乾燥状態の鉄鋼スラグ 400kgf を混合したとき、SSMR(W)=40%
- **粒子比重 G** ：土粒子、鉄鋼スラグ、水それぞれの単位体積質量を ρ_{soil} , ρ_{slag} , ρ_w と表記し、 $\rho_w=1.0 \text{ g/cm}^3$ と仮定すると、 $G_{slag}=\rho_{slag}$, $G_{soil}=\rho_{soil}$ となる。
通常、 $G_{slag}=3.1\sim3.6 \text{ g/cm}^3 > G_{soil}=2.6\sim2.7 \text{ g/cm}^3$ である。
- **鉄鋼スラグ混合土(SMS)粒子の平均比重 G_{SMS}** （無次元）。図1を参照して、

$$G_{SMS} = (1 + (\text{SSMR(W)} / 100) / \{1/G_{soil} + (\text{SSMR(W)}/100)/G_{slag}\}) \quad \text{式 1}$$

例： $G_{soil}=2.700 \text{ g/cm}^3$, $G_{slag}=3.200 \text{ g/cm}^3$ で、SSMR(W)=40% のとき、 $G_{SMS}=2.826 \text{ g/cm}^3$

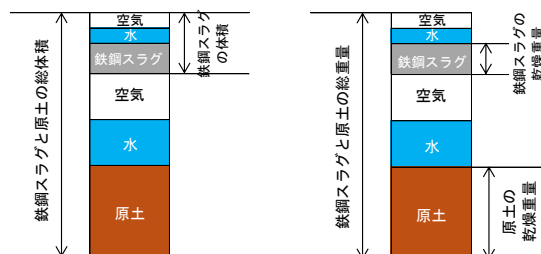


図1 鉄鋼スラグ混合土の湿潤体積混合率 SSMR(V) (左) と乾燥重量混合比 SSMR(W) (右)

3. 原土および鉄鋼スラグの各種室内土質試験

- 原土の工学的な物理特性、透水性、締固め特性およびせん断強さを求める試験
 - ① 土粒子密度試験(JIS A 1202)
 - ② 含水比測定(JIS A 1203)
 - ③ 粒度試験(JIS A 1204)
 - ④ 締固め試験(JIS A 1210)
 - ⑤ 土の液性限界・塑性限界試験(JIS A 1205)
 - ⑥ 三軸圧縮試験(JGS 0520-0524)
 - ⑦ 透水試験(JIS A 1218)
- 鉄鋼スラグの工学的な物理特性を求める試験
 - ① スラグ粒子密度試験(JIS A 1202)
 - ② 含水比測定(JIS A 1203)
 - ③ 粒度試験(JIS A 1204)
- 鉄鋼スラグ混合土(SMS)の物理特性、透水性およびせん断強さを求める試験

盛土造成現場での一般的な撒き出し厚管理による締固め施工を想定して、鉄鋼スラグの混合量は、湿潤体積混合率 SSMP(V)(%) で定義していること、粒子比重が土とスラグで異なること、の2点に注意すると、以下のような工夫が必要である。室内では、まず、既知の容量 $V_{cup}(\text{cm}^3)$ の器と秤を用いて、湿潤状態の原土に圧力をかけないように静かに投入し、湿潤重量 $W_{soil}(\text{g})$ を測定して湿潤単位体積重量 $\gamma_t(\text{soil}) = W_{soil}/V_{cup}(\text{g/cm}^3)$ を求める。同時に、含水比 $w_n(\text{soil})(\%)$ を測定する。同様に、鉄鋼スラグ重量 W_{slag} を測定して湿潤単位体積重量 $\gamma_t(\text{slag}) = W_{slag}/V_{cup}(\text{g/cm}^3)$ を求める。同時に、含水比 $w_n(\text{slag})(\%)$ を測定する。つぎに、乾いたバット内に所定の湿潤体積混合率 SSMP(V)(%) となるように必要量の原土と鉄鋼スラグを投入し、鉄鋼スラグが満遍

なく混ざるまで十分に攪拌する。鉄鋼スラグが満遍なく混合されているかどうかは、既知の容量 $V_{cup}(cm^3)$ の器を用いてバット内の複数箇所から試料を採取し、重量のバラツキの程度で判断する。また、バット内の複数箇所から採取した試料の粒子平均比重 G_{SMS} を測定して計算値（式1参照）に対するバラツキの程度により判断する。

一方、原土および鉄鋼スラグの締固め前の乾燥単位体積重量は、それぞれ以下の式で表される。

$$\gamma_d(soil) = \gamma_t(soil) / (1 + w_n(soil) / 100) \quad (g/cm^3) \quad \text{式 2}$$

$$\gamma_d(slag) = \gamma_t(slag) / (1 + w_n(slag) / 100) \quad (g/cm^3) \quad \text{式 3}$$

よって、計算上の鉄鋼スラグ混合土（SMS）の乾燥重量混合比 $SSMR(W)$ (%) は以下となる。

$$SSMR(W) = (\gamma_t(slag) / \gamma_t(soil)) \times \{(1 + w_n(soil) / 100) / (1 + w_n(slag) / 100)\} \times \{(SSMR(V) / 100) / (1 - (SSMP(V) / 100))\} \times 100 \quad (\%) \quad \text{式 4}$$

● 粒子の密度試験(JIS A 1202)：JIS A 1202 では、ピクノメーター容量 50ml の場合には目開き 4.75mm の炉乾燥試料を 10g 以上使用すると規定されている。鉄鋼スラグ混合土(SMS)は、比重の異なる鉄鋼スラグと土との混合体であるため、10g 程度の試料の量では測定値のバラツキが大きくなる。安定した測定値を得るためには、通常の 2.5～5.0 倍の試料が必要となる。

● 締固め試験(JIS A 1210)：試料の粒度に応じて、JIS A 1210 で規定されている方法で実施する。なお、鉄鋼スラグ混合土(SMS)の試験結果の整理においては、以下の諸量を用いる。

$$\text{間隙比} : e_{SMS} = G_{SMS} / \gamma_d(SMS) - 1 \quad (\text{無次元}) \quad \text{式 5}$$

$$\text{飽和度} : S_r(SMS) = (w_{SMS} \cdot G_{SMS} / e_{SMS}) \times 100 \quad (\%) \quad \text{式 6}$$

$$\text{最適含水比} : w_{opt}(SMS) = (S_{r,opt}(SMS) \times e_{min}(SMS)) / G_{SMS} \quad (\%) \quad \text{式 7}$$

ここで、水の単位体積重量 $\gamma_w = 1.0 (g/cm^3)$ としている。また、 $e_{min}(SMS)$ は、室内締固め試験において、一定の締固めエネルギーで締固めたときの最大乾燥重量 γ_{dmax} における最小間隙比である。

● 三軸圧縮試験(JGS 0520-0524)：新設盛土の設計強度を求めるために、湿潤体積混合率 $SSMP(V)$ を変えた複数の試験を実施することが望ましい。供試体は、事前の締固め試験より求めたそれぞれの $SSMP(V)$ における最適含水比に水分調整し、現場の締固め管理における締固め度 $D_c = (\text{供試体の乾燥密度} / \text{最大乾燥密度}) \times 100 (\%)$ の管理基準値（下限値）となるように密度調整する。供試体は養生をしないことを原則とするが、鉄鋼スラグの自硬性による粘着力の増加が見込める場合には、養生日数 7 日、28 日の試験を追加で実施し、材齢による強度増加を評価するのが望ましい。締固め管理基準値は全測定値の許容下限値なので、通常、実際の締固め度の平均値は管理基準値よりも 5% 程度は大きくなる。また、レベル 2 設計地震動に対する安定性を確認する解析に備えて、より現実的な現場締固め状態での強度を把握しておくことが望ましい。したがって、締固め度 95～97% 程度の供試体での実験も行っておくことが望ましい。



写真1 原土と鉄鋼スラグの攪拌状況

4. まとめ

本稿では、鉄鋼スラグ混合土盛土の工学的性質を明らかにし、締固め管理値および設計値を求めるための室内土質試験方法についてまとめた。別稿群では、ある大規模盛土造成予定地で採取した 5 種類の現地発生土を用いた試験結果を報告している。これら原土は、いずれもアロフェン含有量が小さいため、現場での締固め施工後に、時間の経過とともに SMS 粒子間のセメンテーションによる粘着力 c の増大、即ちせん断強度の増加も期待できるが、一連の実験では全ての供試体の養生期間を 0 日としているため、今回は、SMS の自硬性による剛性・強度の増加および透水性の低下はあえて評価していない。今後、地球環境に優しいリサイクル材料である鉄鋼スラグの盛土改良材としての拡大利用が見込まれる。

参考文献

- 1) 杉村 裕二, 篠崎 晴彦, 赤司 有三, 植松 尚大, 澁谷 啓, 片岡 沙都紀: 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) 杉村裕二, 澁谷啓, 片岡沙都紀, 篠崎晴彦, 植松尚大: 製鋼スラグを混合した模擬特殊土の三軸圧縮強度特性, Kansai Geo-Symposium2020 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集, pp.122-127, 2020.
- 3) 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.