

(技術資料)

地盤改良材としての鉄鋼スラグの利活用

陣内綾音*1・松元弘昭*1・唯井力造*1

Utilization of Steel Slag as Soil Stabilizer

Ayane JINNOUCHI・Hiroaki MATSUMOTO・Rikizo TADAI

要旨

鉄鋼スラグは、環境負荷の低減および資源循環の観点から注目される建設資材であり、近年では地盤改良材としての適用実績が拡大している。本稿では、鉄鋼スラグの物理的・化学的特性を概説するとともに、地盤の支持力向上に寄与する二つの効果——締固め性の向上による内部摩擦角 (ϕ) の増大と、水硬性による粘着力 (c) の増大——に着目した地盤改良技術を紹介する。さらに、実際の現場での適用事例を通じて、スラグ混合率の最適化や強度発現の経時変化、環境安全性について検討したうえで、今後の課題と展望を示す。

Abstract

Steel slag is a construction material that has garnered attention for its potential to reduce environmental load and enhance resource circulation. In recent years, its use as a soil stabilizer has been expanding. This paper outlines the physical and chemical properties of steel slag. It introduces a soil stabilization technology that focuses on two effects that contribute to improving the bearing capacity of the ground: an increase in the internal friction angle (ϕ) thanks to improved compaction, and an increase in adhesion (c) owing to hydraulicity. Furthermore, through application examples from actual sites, the optimization of the slag mixing ratio, changes in the strength expression over time, and environmental safety are examined to identify future challenges and prospects.

検索用キーワード

鉄鋼スラグ, 地盤改良, 締固め特性, 水硬性, CBR 試験, 一軸圧縮試験

まえがき=我が国は、急しゅんな地形とぜい弱な地質が広く分布していることに加え、梅雨や台風など湿潤な気候の影響により、従来から自然災害による甚大な被害に見舞われてきた。近年では地球温暖化による集中豪雨の増加など気候変動の進行により、土砂災害の発生リスクが一層高まっている。こうした災害の激甚化・頻発化に対応するためには、より強くしなやかな地盤の形成が求められている。

このような背景のもと、鉄鋼スラグは、軟弱な地盤を強化する有効な材料として注目されており、これまでさまざまな改良技術の開発^{1)~6)}が進められ、実績を積み重ねてきた。

本稿では、鉄鋼スラグの物理的・化学的特性や地盤改良技術の概要を紹介するとともに、当社の適用事例について述べる。

1. 鉄鋼スラグの特性と用途

1.1 鉄鋼スラグの特性

鉄鋼スラグは、製造工程により高炉スラグと製鋼スラグに大別される(図1)。

高炉スラグは、鉄鉱石から鉄を取り出す高炉から生成するスラグであり、熔融状態からの冷却・固化方法の違いにより、高炉水砕スラグと高炉徐冷スラグに分類され

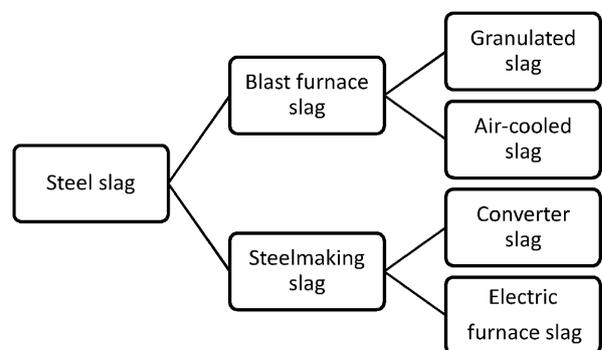


図1 鉄鋼スラグの種類
Fig.1 Classification of steel slag

る。高炉水砕スラグは、加圧水によって熔融状態から一気に冷却され、ガラス質で粒状となる。高炉徐冷スラグは、ヤードに流し出されてゆっくりと冷却され、結晶質の岩石状となる。

いっぽう、製鋼スラグは、鋼を製造する製鋼工程で生成するスラグであり、転炉をはじめ複数の精錬炉から生成する転炉系スラグと、スクラップを原料とする電気炉製鋼工程で生成する電気炉スラグに分類される。転炉系スラグは、高炉徐冷スラグと同様の冷却方法により、結晶質の岩石状になる。鉄分を多く含むため、天然砕石に比べ粒子密度と硬度が高く耐摩耗性に優れる点が特徴で

*1 鉄鋼アルミ事業部門 資源化推進部

ある。なお、本稿で対象とする製鋼スラグは、転炉系スラグに限定し、電気炉スラグは対象外とする。

表1にそれぞれの化学組成を示す⁷⁾。鉄鋼スラグは、酸化カルシウム (CaO) と二酸化ケイ素 (SiO₂) を主成分とし、その他の成分として、高炉スラグは、酸化アルミニウム (Al₂O₃) や酸化マグネシウム (MgO)、少量の硫黄 (S) を含み、製鋼スラグは、酸化鉄 (FeO) や酸化マグネシウム (MgO) を含む。高炉スラグは、セメントと同様の化学成分を有することが特徴である。

鉄鋼スラグは、それぞれが持つ物理的・化学的特性を活用した多様な用途が開発され、建設資材としてさまざまな場面で利用されている⁷⁾。以下に鉄鋼スラグの主要な用途を示す。

1.2 用途

1.2.1 セメント・コンクリート用

高炉スラグは、その約90%がセメント・コンクリート用途に利用されている。当社では、高炉水砕スラグを粉砕し、石こうを添加した高炉スラグ微粉末（製品名：ケイメント[®]）を製造・販売しており、これは主に高炉セメントの原料として用いられている。

高炉セメントは、ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混合したセメントであり、高炉スラグの含有率に応じてA種（5%超～30%以下）、B種（30%超～60%以下）、C種（60%超～70%以下）に分類される。国内で最も流通している高炉セメントはB種である。

表2にセメント1tあたりのCO₂排出量を示す⁷⁾。ポルトランドセメントのCO₂排出量のほとんどは、製造過程で石灰石を焼成することにより発生する。いっぽう、高炉スラグ微粉末は、焼成工程がなく、乾燥および粉砕プロセスで製造できるため、ポルトランドセメントに比べCO₂排出量が少ない。そのため、高炉セメントB種は、ポルトランドセメントと比較してCO₂排出量を42%削減することができる⁷⁾。

1.2.2 道路用

製鋼スラグは、その約50%が道路用路盤材として利用されている。道路用路盤材として販売される鉄鋼スラグ製品は、JIS A 5015「道路用鉄鋼スラグ」に規格されており、その品質が保証されている。代表的な鉄鋼スラグ路盤材である水硬性粒度調整スラグ (HMS-25) は、同じ耐久性や強度を実現するために必要なスラグの置換割合を示す等値換算係数が0.55と高く、一般的な碎石（粒度調整碎石）の0.35と比較して、より少ない量で同等の性能を発揮できる。これにより、路盤の断面を薄くすることが可能となる。また、施工後の長期的な水硬性発現により、高い耐久性を保持し、インフラのライフサイクルコストの低減に貢献することができる。このことから、鉄鋼スラグ混入路盤材は、グリーン購入法における特定調達品目に指定されており、環境保全に資する材料としても広く認知されている。

1.2.3 地盤改良用

製鋼スラグは道路用路盤材のほか、地盤改良材として利用されている。これまでの研究により、製鋼スラグを軟弱な土に適切な割合で混合することで、地盤の強度が増大することが報告されている^{1)~6)}。2021年10月には、兵庫県の土木請負工事必携に、「鉄鋼スラグ混合土を用いた軟弱土改良の設計施工マニュアル⁸⁾」が示され、公共工事における鉄鋼スラグ混合土の適用促進が進められている。このような取り組みにより、近年、実際の工事における地盤改良工法の適用件数が着実に増加している。

2. 鉄鋼スラグによる地盤改良

2.1 地盤改良の概要

2.1.1 地盤改良の目的

軟弱な地盤に構造物を構築した場合、地盤の変形や沈下などにより、構造物に傾斜などの影響をおよぼす可能

表1 鉄鋼スラグの化学組成例

Table 1 Chemical composition of steel slag and other materials

	(mass %)		
	Blast furnace slag	Steelmaking slag	Ordinary portland cement
CaO	41.7	45.8	64.2
SiO ₂	33.8	11.0	22.0
T-Fe	0.4	17.4	3.0
MgO	7.4	6.5	1.5
Al ₂ O ₃	13.4	1.9	5.5
S	0.8	0.06	2.0
P ₂ O ₅	<0.1	1.7	—
MnO	0.3	5.3	—

表2 セメント1tあたりのCO₂排出量の一例

Table 2 Example of CO₂ emissions per ton of cement

Emission source	Ordinary portland cement (g)	Blast furnace cement type B (g)	Reduction (g)	Reduction Rate (%)
Limestone calcination	476	270	206	43
Other process energy	283	170	113	40
total	759	440	319	42

性がある。そのため、地盤改良は、地盤の支持力を高めて構造物を安全かつ安定して支えるために行われる。地盤の支持力は、土の構造や性質に大きく影響される。

以下に土の構造と支持力について述べる。

2.1.2 土の構造

土は、種々の粒径を持つ土粒子の集合からなり、固体(土粒子)、液体(水)、気体(空気)の3相からなっている。土粒子は、粒径の違いによって、0.075 mmから75 mmまでの粗粒分、0.075 mm以下の細粒分に分類され、それぞれ、粗粒分の質量が全体の50%以上を占める土を粗粒土、細粒分の質量が全体の50%以上を占める土を細粒土と呼ぶ。

土の力学的性質は、主として①土粒子の形状と大きさ、②土粒子の詰まり具合、③水、空気の量やそれらの性質、④土粒子同士の相互作用、および⑤土粒子と水・空気との相互作用などに支配される。また、これらの要素は土の構造と深い関係がある。

粗粒土は、粒径が大きいので、土粒子が重力の作用で互いにかみ合う単粒構造を形成する(図2)⁹⁾。大きな粒子から小さな粒子まで一様に混合していると密な状態になるが、同じ大きさの粒子ばかりだと間隙が多くゆるい状態になる。

いっぽう、細粒土は、土粒子の比表面積が大きく、その表面に電荷を帯び、水分子やイオンを吸着する。このため、土粒子間に粘着力が働き、堆積中にはちの巣構造を形成する(図3)⁹⁾。はちの巣構造は、単粒構造に比べ、間隙が大きいので、外的な力の作用を受けると、土粒子が不安定になり、軟弱な土になりやすい。

2.1.3 地盤の支持力

地盤に求められる支持力は、構築する構造物の形式、規模あるいは重要性によって決まり、土のせん断強さで

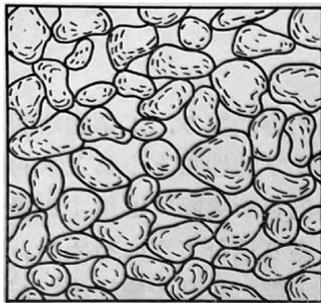


図2 単粒構造
Fig.2 Single-grained structure

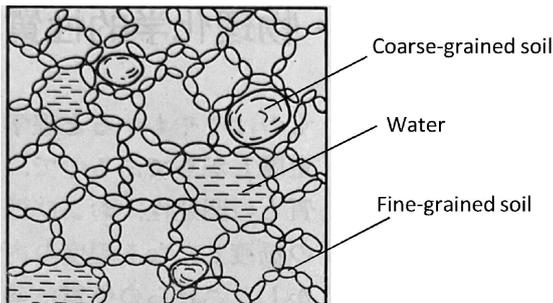


図3 はちの巣構造
Fig.3 Honeycomb structure

評価される。土は引張力や曲げに抵抗する強さはほとんどないため、圧縮力のみで抵抗する材料として取り扱う。圧縮力による土の破壊現象は、破壊面がすべり面を形成し、せん断破壊する。せん断破壊しないように抵抗する力がせん断強さであり、以下のクーロンの式で表される⁹⁾。

$$s = c + \sigma \tan \phi$$

ここに、

s: 土のせん断強さ (kN/m²)

c: 粘着力 (kN/m²)

σ : せん断面上に働く垂直応力 (kN/m²)

ϕ : 内部摩擦角 (°)

粘土や固結した土のように自立可能な土は、垂直応力がゼロでも粘着力(c)によりせん断強さを持つ。いっぽう、乾燥した砂などの粗粒土は、粘着力(c)がほとんどなく、内部摩擦角(ϕ)によってせん断強さが決まる。したがって、地盤のせん断強さを増大するためには、内部摩擦角(ϕ)または粘着力(c)のいずれか、あるいは両方を増大させる必要がある。

2.1.4 地盤改良工法

内部摩擦角(ϕ)または粘着力(c)を増大させる工法として、以下の二つが挙げられる。

(1) 締固めによる密度の増大(ϕ の増大)

土の工学的性質は、土粒子の詰まり具合、すなわち土の密度に大きく依存する。土粒子を密に詰めると粒子間のかみ合わせが増えるため、土の強度や剛性は増加する。また、間隙が減少することで、透水性が低下し、遮水性能が向上する。このように外力を加えて土粒子を強制的に密に詰めることを「締固め」といい、内部摩擦角(ϕ)の増大を目的とする。

(2) 固化によるせん断強さの増大(cの増大)

固化材を土の間隙に注入する、または混合することで土を固化させるものである。これは、粘着力(c)の増大を目的とする。一般的に固化材にはセメント系固化材や石灰系固化材などが用いられている。

鉄鋼スラグによる地盤改良は、①粒度分布の改善による締固め特性の向上(ϕ の増大)、②スラグの水硬性による固化効果(cの増大)があり、上記の二つの効果を併せ持つことが特徴である。

以下にそれぞれの評価方法を示す。

2.1.5 評価方法

(1) 締固め特性の評価

締固め特性は、締固め試験(JIS A 1210)で得られる締固め曲線から判断できる。締固め特性は、土の種類により大きく異なる。図4に土の粒径加積曲線を図5にそれらに対応する締固め曲線の関係を示す¹⁰⁾。粒径加積曲線において、さまざまな粒径を含む土は粒度分布が良好であるとされ、①に近づくほど粒度分布は良好である。とくに砂質系の土がこれに該当する。また、締固め曲線は、一般に細粒分が多い土ほどなだらかな形状を示し、右下方に位置する傾向がある。これは、含水比が高く、乾燥密度(土の体積に対する土粒子部分の割合)が低い状態を示している。これに対して、粒度分布の良い

砂質系の土ほど締固め曲線は鋭く立った形状を示し、左上方に位置する。これは、含水比が低く、乾燥密度が高い状態を表す。すなわち、粒度分布が良い土ほど、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) が高く、最適含水比 (W_{opt}) が低くなる傾向がある。このような土は締固めする際に水分管理がしやすく、締固め性に優れた土であるといえる。

また、締め固めた土の強度、剛性、変形性などの力学特性は、一般的にCBR (California Bearing Ratio) 試験 (JIS A 1211) を用いて評価する。CBR試験では、粒径37.5 mm以下の改良土を用い、モールドに成形・締固めた供試体を作製する。必要に応じて4日間の浸水養生を行い、直径50 mmのピストンを1.25 mm/minで貫入させ、2.5 mmと5.0 mmの深さでの荷重を測定し、標準碎石との比較によりCBR値 (%) を算出する。CBR試験は、主に道路の舗装設計における路床・路盤の支持力を求めるための試験である。CBRが3%未満の場合、または路床のCBRが目標とする値を下回る場合には、改良を行う必要がある¹¹⁾。

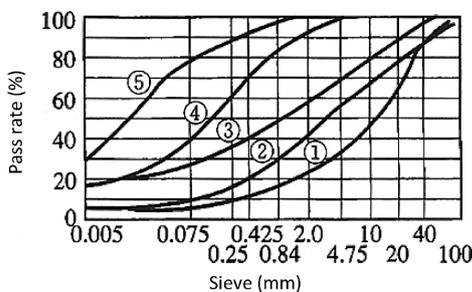


図4 粒径加積曲線
Fig.4 Grain size distribution curve

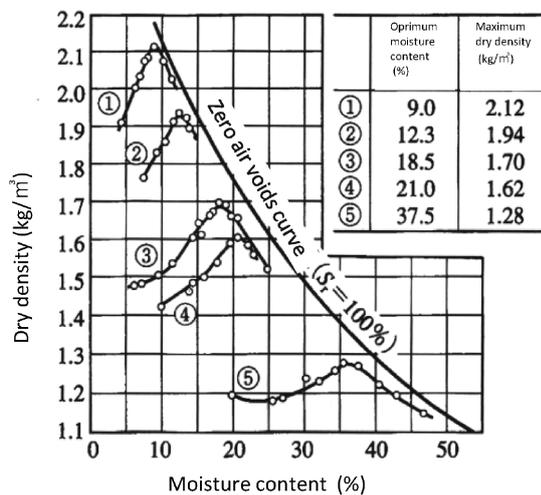


図5 締固め曲線
Fig.5 Compaction curve

表3 原土および鉄鋼スラグの物理的特性
Table 3 Physical characteristics

	On site soil	Steelmaking slag
Soil particle density (Mg/m³)	2.6	3.14
Maximum grain size (mm)	37.5	37.5
Uniformity coefficient	-	15
Classification name of geomaterials	Gravelly fine-grained soil mixed with sand	Gravel mixed with sand

(2) 固化強度の評価

固化強度 (粘着力) は、一軸圧縮試験 (JIS A 1216) を用いて評価する。一軸圧縮試験では、改良土を9.5 mmふるいにかけて、直径50 mm、高さ100 mmの供試体を作製する。改良後は7日、14日、28日などの養生期間を経て試験を実施する。供試体に一定速度で圧縮荷重を加え、最大荷重を断面積で割って一軸圧縮強度を算出する。一軸圧縮強さは、主に構造物基礎地盤の支持力や土圧、斜面の安定などの安定性評価に用いられる。

以下に、上述したそれぞれの改良効果に着目して改良した事例を示す。

2.2 鉄鋼スラグによる地盤改良

2.2.1 締固め特性の改善 (道路路床用途の事例)

締固め特性を改善し、道路路床として使用した事例を示す。本事例では、道路路床としてCBR = 20%が目標強度であったが、原土では強度を満たせなかったため、鉄鋼スラグを用いた地盤改良が検討された。そこで、目標強度を確保するために必要なスラグの適切な混合率について検討を行った。

(1) 原土と鉄鋼スラグ物理的特性

表3および図6に原土と鉄鋼スラグの物理的特性と粒径加積曲線を示す。鉄鋼スラグに比べ、原土は細粒分の割合が多いことを示している。

また、図7は地盤材料の三角座標による分類である。地盤材料の三角座標では、左斜辺がれき分、底辺が砂分、右斜辺が細粒分のそれぞれ含有率を表し、左下に位置するほど、れき分が多いことを示す。鉄鋼スラグの混合比が増加するに従い、細粒分が低下して左下に移動する。

(2) 混合率の決定

図8にこれまでさまざまな原土に対して行ってきたCBR試験の結果を示す。細粒分含有率とCBR値には相関が見られ、細粒分が少ない、すなわち、粗粒分が多いほどCBR値は高くなることがわかる。この関係より、今回の目標強度CBR = 20%以上を達成するには、細粒分含有率を原土の64%から、おおよそ40%程度まで低減する必要があると推定された。

CBR試験の結果を図9に示す。実際に、鉄鋼スラグを33%混合することで、目標強度を達成することが確認でき、この混合率に決定した。

また、CBR試験は、JIS A 1211に基づいて実施し、供試体は水中で4日間養生している。そのため、水和反応は十分に進行していないと考えられるため、強度発現機構は主に内部摩擦角 (ϕ) の改善によるところが大きい

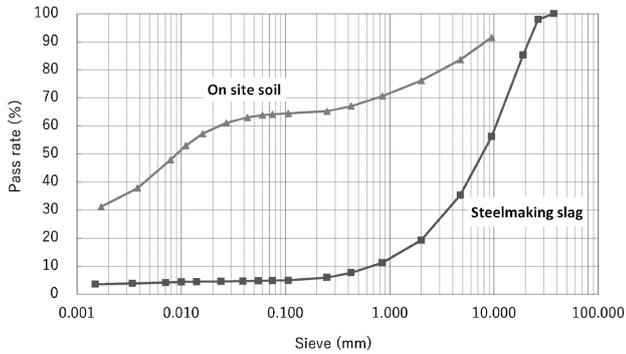


図6 粒径加積曲線
Fig.6 Grain size distribution curve

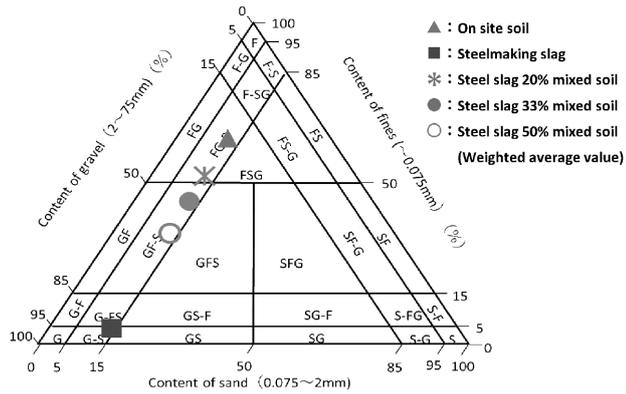


図7 原土および鉄鋼スラグの三角座標による分類
Fig.7 Classification of soils for engineering purposes

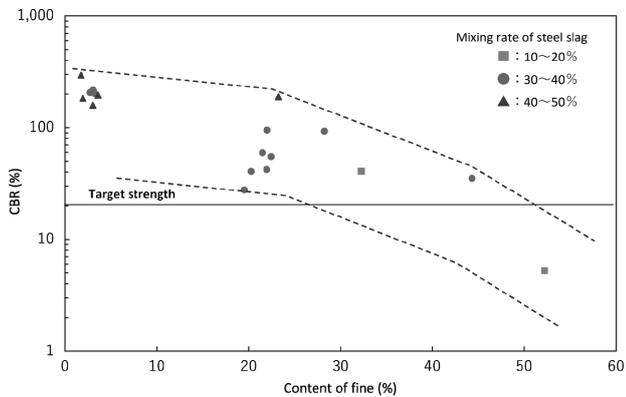


図8 CBRと細粒含有率の相関
Fig.8 Relationship between CBR and fines content

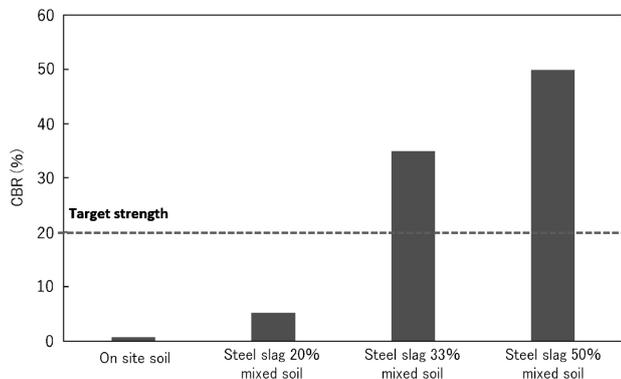


図9 室内CBR試験結果
Fig.9 Indoor CBR test results

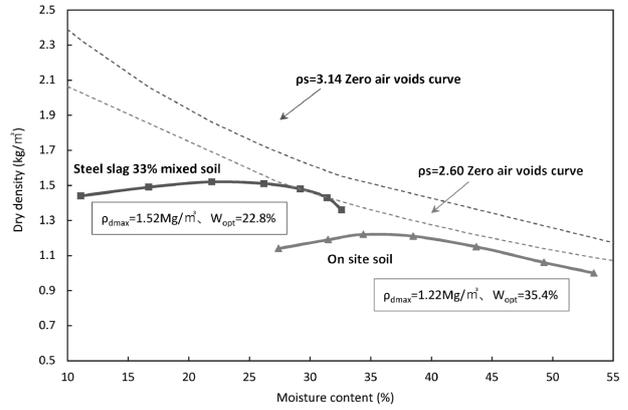


図10 締固め曲線
Fig.10 Compaction curve

と考えられる。

(3) 改良土の締固め性評価

原土に鉄鋼スラグを体積比で33%混合した改良土の締固め曲線を図10に示す。鉄鋼スラグ33%混合土は、原土と比較して最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) が高く、最適含水比 (W_{opt}) が低くなっていることがわかる。鉄鋼スラグを33%混合することで、粒度分布が改善され、締固め性が向上することが示された。

2.2.2 固化強度の改善 (仮設道路用途の事例)

つぎに、固化強度を改善し、仮設道路に使用した事例を示す。本事例では、仮設道路用の地盤として、一軸圧縮強さ = 200 kN/m^2 が目標強度であったが、原土およびセメント改良では強度を満たせなかったため、鉄鋼スラグを用いた地盤改良が検討された。そこで、目標強度を確保するために必要なスラグの適切な混合率について検討を行った。

(1) 原土と鉄鋼スラグの物理的・化学的特性

表4および図11に、原土と鉄鋼スラグの物理的特性と粒径加積曲線を示す。鉄鋼スラグに比べ、原土は細粒分の割合が多いことを示している。

また、図12に原土と鉄鋼スラグ混合土の三角座標による分類を示す。原土は砂まじり細粒土 (F-S)、鉄鋼スラグは、砂質れき (GS) に分類され、鉄鋼スラグを混合することで、左下 (れき側) に近づくが、原土の細粒分は86%と非常に高く、仮に鉄鋼スラグを33%混合しても細粒分は59%程度の低減に留まる。このため、内部摩擦力による改善は限定的であり、固化強度の改善が求められる。

図13は実際に改良した地盤の断面である。下層が改良前の原土、上層が原土とスラグを混合した改良土である。ここで用いた原土は、九州地方に広く分布する黒ぼくである。黒ぼくは火山灰土と腐植物質で構成され、有機物の含有量が高い。また含水率が高い特徴を有しており、その性質から特殊土に分類され、セメント系改良材による改良効果が得られにくい土質として知られている¹²⁾。これは、黒ぼくが腐植物質を含んだ有機質土壌であり、フミン酸やフルボ酸などを多く含むことに起因する。これらの有機酸は、セメントの水和反応に必要なカルシウムイオン (Ca^{2+}) と反応し、不溶性の有機カルシウム塩を形成する。その結果、水和反応が進まず、セメ

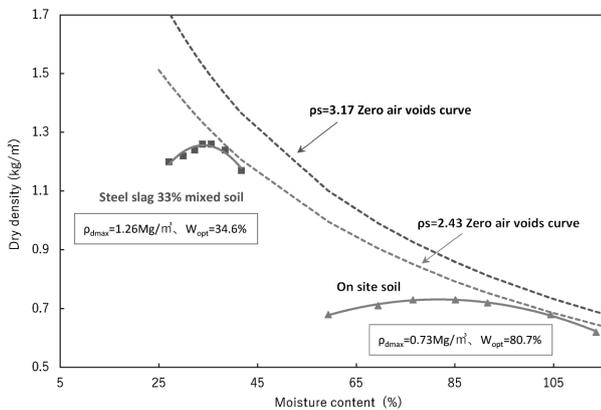


図15 締めめ曲線
Fig.15 Compaction curve

進が期待される。図16に原土に対し、4種類の製鋼スラグを体積比で50%混合した混合土の一軸圧縮強さの経時変化を示す。いずれの試料も、7日、28日と材齢の進行に伴い強度が増加することが確認された。この強度発現は、鉄鋼スラグに含まれる石灰分 ($f\text{-CaO}$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) が土中のシリカなどと反応することによるものである。材齢7日までの強度発現は、アルミネート相 (C_3A) およびエーライト (C_3S) から放出されるカルシウムイオン (Ca^{2+}) が、ケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H ゲル) およびアルミン酸カルシウム水和物を形成することによると考えられる¹⁴⁾。さらに、長期的な強度発現には、水和反応で生成される水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) と土中成分とのポゾラン反応が寄与していると考えられる¹⁴⁾。

2.2.4 環境安全性

製鋼スラグを混合した際に、水和反応で生成される水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) は、水中でカルシウムイオン (Ca^{2+}) と水酸化物イオン (OH^-) に解離することでpHが12以上となり、改良土はアルカリ性を呈す。改良土表面のpHの経時変化を図17に示す。

pHは28日経過すると原土とほぼ同じpH9程度まで低下することがわかる。これは、改良土表面の水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) が空気中の炭酸ガス (CO_2) の作用により、炭酸化するためと考えられる。

2.3 今後の課題

改良土の強度発現には、原土の性状、スラグの性状、および改良土の養生条件が大きく影響する。原土の性状としては、含水比、細粒分含有率、有機分含有量、さらには組成・成分が関与しており、これらの要素が改良の効果左右する重要な因子となる。スラグの性状においては、Ca含有量や粒度分布が強度発現に影響をおよぼし、適切な調整が求められる。また、原土とスラグの混合量や混合後の改良土の養生温度も重要な因子であり、適切な養生条件の設定が強度の向上に寄与する。今後は、これらの因子が強度発現におよぼす影響を詳細に検討し、その関係性を明らかにすることが、地盤改良のさらなる普及に向けた重要な課題となる。

むすび 鉄鋼スラグは、省資源・省エネルギー・ CO_2 削減の観点から、環境負荷の低減に寄与する建設資材とし

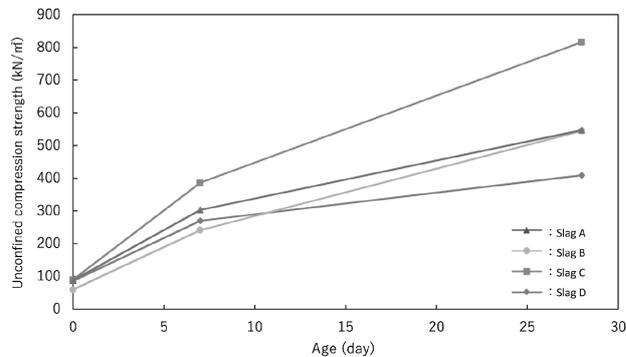


図16 一軸圧縮強さの経時変化
Fig.16 Change over time in unconfined compression strength

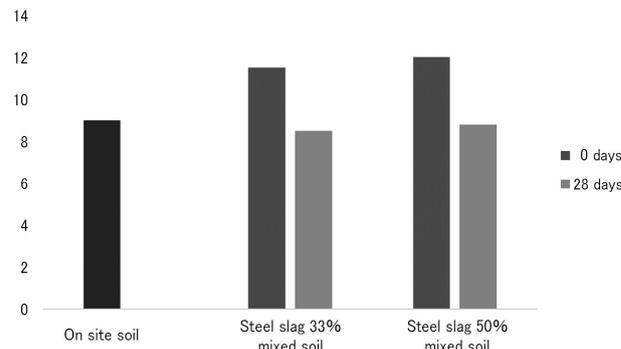


図17 pHの経時変化
Fig.17 Change over time in pH

て重要な役割を果たしている。とくに、国土強じん化対策においては、その特性を活かした地盤改良材としての利用が期待される。鉄鋼スラグの利活用を促進することで、国土強じん化の推進に加え、天然資源の保全や循環型社会のさらなる発展にも寄与し、持続可能な社会の構築に貢献することができる。今後も、鉄鋼スラグの利用拡大に向けて、さらなる研究・開発の推進と実用化に向けた取り組みを継続していくことが求められる。

参考文献

- 植松尚大ほか. 第50回地盤工学研究発表会発表講演集. 2015, p.641-642.
- 片岡沙都紀ほか. Kansai Geo-Symposium 2015 論文集. 2015, p.25-30.
- 片岡沙都紀ほか. 第13回地盤改良シンポジウム論文集. 2018, p.59-64.
- 李俊憲ほか. 第58回地盤工学研究発表会発表講演集. 2023, ROMBUNNO. 13-12-4-03.
- 片岡沙都紀ほか. 地盤改良シンポジウム論文集 (CD-ROM). 2022, ROMBUNNO. 03-02.
- 堀田崇由ほか. 第60回地盤工学研究発表会. 2025.
- 鉄鋼スラグ協会. 環境資材 鉄鋼スラグ. <https://www.slg.jp/>. (参照 2025-06-23).
- 兵庫県. 鉄鋼スラグ混合土を用いた軟弱土改良の設計施工マニュアル. 2021.
- 社団法人土質工学会. 土質工学ハンドブック. 1982.
- 公益社団法人地盤工学会. 土の締めめ. 2012.
- 公益社団法人日本道路協会. 舗装設計便覧. 2006.
- 原田正之ほか. 土木学会論文集 E1 (舗装工学). 2013, Vol.69, No.3, I-215~I-219.
- 一般社団法人セメント協会. セメント系固化材による地盤改良マニュアル (第4版). 2012.
- 一般社団法人日本鉄鋼連盟. 「転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改良工法」技術資料. 2008.