

多様な母体土における鉄鋼スラグ混合土の強度発現要因の検討

Study on factors in the development of strength in various steel-slag mixed soil

片岡 沙都 紀

Satsuki Kataoka

吉本 昌 弘

Masahiro Yoshimoto

1. はじめに

道路や宅地などといった盛土を施工の際、現地より発生した細粒分の多い土を盛土材としてやむを得ず利用する場合には、セメント系固化剤を使用することが一般的となっている。しかし、セメントは生産時に大量の二酸化炭素を排出するため、カーボンニュートラルの達成が国家レベルでの大きな課題となっている昨今の現状を鑑みると、セメントに代わる新たな固化剤の利用が急務であると考えられる。著者らはこれまで、セメント同様に水硬性を有する鉄鋼スラグに着目してきた。鉄鋼スラグは、鉱石から鋼を取り出す段階で生まれるシリカなどの鉄以外の成分が、石灰と溶融・結合した副産物である。鉄鋼スラグ混合土の強度発現は、鉄鋼スラグの水和反応に伴うカルシウム分の溶出により炭酸カルシウムが形成され土粒子間を結合することに起因しており¹⁾、著者らのこれまでの研究においても、現地発生土に鉄鋼スラグを混合させることによる盛土材料としての有用性について検討しており、材料の粒度や締固めが改善されて、かつ盛土強度の増強にも繋がるといった成果を得ている²⁾。

一方で、鉄鋼スラグは潜在水硬性を有するため、アルカリなどの刺激剤が存在すると、水和反応により難溶性の水和物が形成されて固化が進むことが知られている^{例えば 3)}。アルカリ刺激剤に関する検討は主にコンクリートの分野において多く検討されてきているが、地盤工学的な側面からアルカリ刺激剤の効果を検討している例は少ない^{例えば 4)}。そこで本論文では、鉄鋼スラグ混合土の固化促進のためのアルカリ刺激剤として「尿素」に着目した。尿素は、加水分解作用によって炭酸カルシウムが析出しやすい弱アルカリ性の環境下に整える pH 上昇と、炭酸カルシウムの析出に必要な二酸化炭素の供給を同時に行うことができる⁵⁾。

本研究では、鉄鋼スラグ混合土内における尿素的アルカリ刺激剤として効果について検証するために、鉄鋼スラグ混合土の強度への寄与を力学試験にて検証した上で、その促進要因について走査型電子顕微鏡（以下、SEM と記載）を用いた微細構造の観察や、エネルギー分散型 X 線分光法（以下、EDX と記載）による元素分析を実施した。

2. 使用した試料について

本研究では、3 種類の母体土と 1 種類の鉄鋼スラグを用意した。各々を所定の配合率で混合させてスラグ混合土とし、各種土質試験を行った。母体土の内訳は、市販されているまさ土（以下、まさ土と記載）、兵庫県内の同一施工現場にて採取した現地土 2 種（以下、現地土 A および B と記載）である。また鉄鋼スラグに関しては、転炉系製鋼スラグを使用した。各母体土単体での物性値を表-1 に示すが、現地土 B が他の母体土と比較して細粒分含有量が高いことがわかる。

各鉄鋼スラグ混合土の粒径加積曲線と締固め曲線を、図-1 および図-2 に示す。ここで配合する鉄鋼スラグの配合割合に関しては、これまでの著者らの研究成果から、強度発現やアルカリ流出水の周辺環境への影響などを考慮して、およそ体積比で 30%前後が望ましいという知見が得られている⁶⁾。この研究成果を参考とし、まさ土は鉄鋼スラグの混合割合を体積比で 25%（土：スラグ＝3：1）、現地土 A、B は盛土施工現場の条件から体積比で 33%（土：スラグ＝2：1）となるように混合させた。

図-1 の粒径加積曲線より、特に現地土 B の粒度が鉄鋼スラグの混合により大幅に改善された。現地土 B は細粒分含有

表-1 各母体土の物性値の比較

	土粒子 密度 (g/cm^3)	最大乾 燥密度 (g/cm^3)	最適含 水比 (%)	粒度					
				礫分 (%)	砂分 (%)	細粒分 (%)	均等係数 U_c	曲率係数 U'_c	平均粒径 (mm)
まさ土	2.731	1.848	15.6	19.3	60.6	19.6	71	3.5	0.58
現地土 A	2.616	1.890	13.1	34.6	55.2	10.2	22	1.5	0.99
現地土 B	2.628	1.625	18.8	4.1	42.3	53.6	-	-	0.05

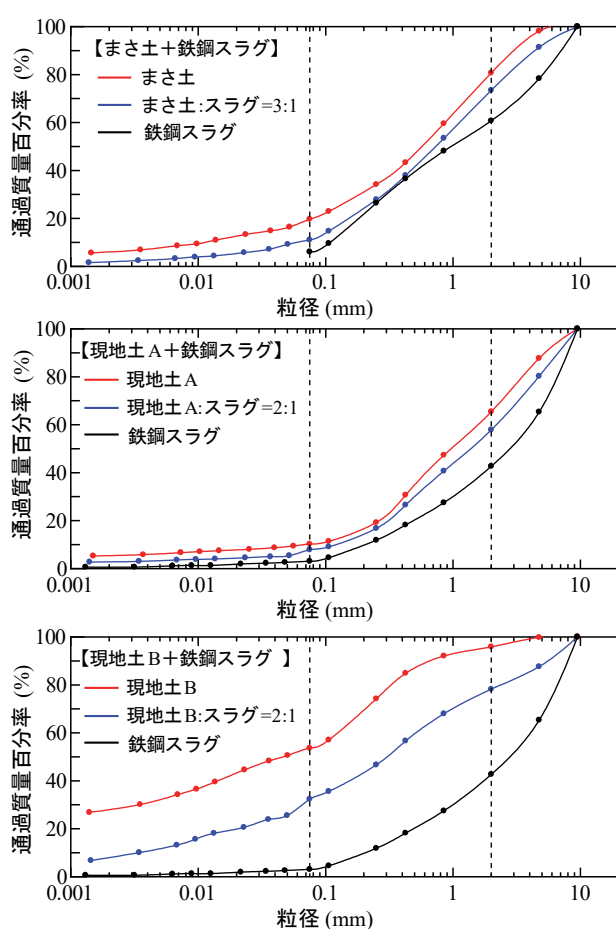


図-1 粒径加積曲線

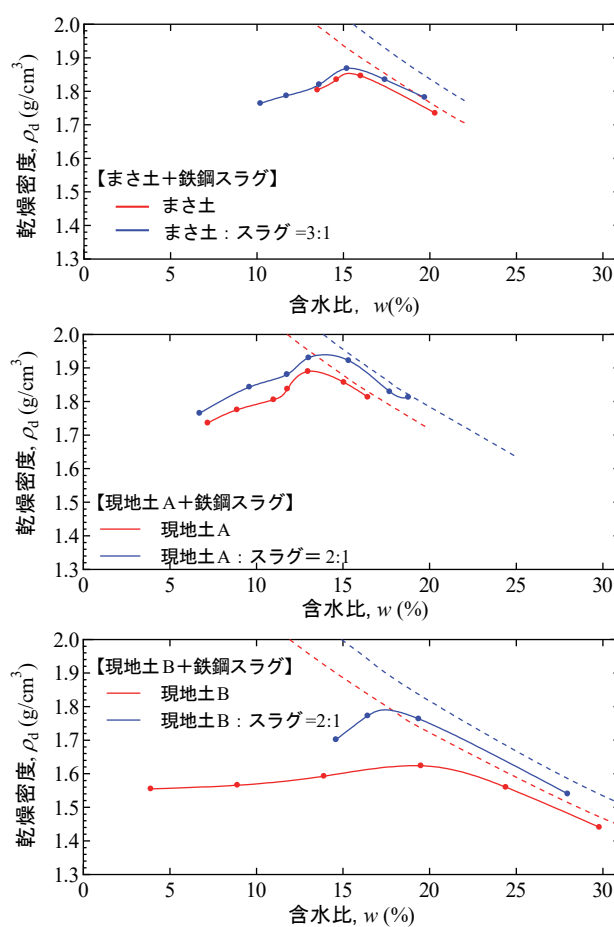


図-2 締固め曲線

率が 50%以上、自然含水比が約 30%であり、粘土のような塊で扱いが非常に困難な低品質土である。この土に粗粒土を多く含む鉄鋼スラグを配合することで、混合土としての細粒分含有率が 21.3%にまで減少するといった粒度改善（細粒分含有量の低下）が確認された。一方で、まさ土と現地土 A は現地土 B と比較して粒度分布は良好であるため、鉄鋼スラグの配合による粒度の変化は小さくなったものと思われる。また、図-2 の締固め曲線より、全ての試料で鉄鋼スラグの混合による最大乾燥密度の増加が確認できた。ここで、まさ土と現地土 A は、土単体での粒度分布が良いため、締固め曲線の形状に大きな変化は見られないが、現地土 B については鉄鋼スラグ混合土とすることで混合土内部における細粒分の低下および粗粒分の増加により粒度が改善されたため、締固めが良好となったために、結果として最大乾燥密度が約 $0.15\text{g}/\text{cm}^3$ 増加し、かつ緩やかな曲線から鋭い曲線へと変化するという締固め特性の向上が伺えた。

表-2 作製した供試体の尿素混合率 一覧

尿素混合率 (vol %)	まさ土+鉄鋼スラグ混合土 (鉄鋼スラグ混合率 25%)	現地土 A+鉄鋼スラグ混合土 (鉄鋼スラグ混合率 33%)	現地土 AB+鉄鋼スラグ混合土 (鉄鋼スラグ混合率 33%)
0	○	○	○
0.5	○		
1	○	○	○
2	○		
3	○		
4	○	○	○
5	○		

3. 一軸圧縮試験

3. 1 供試体の作製方法

本研究で使用した供試体は、直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体に対して図-2 に示す締固め曲線を利用し締固め度が 90%、初期含水比を最適含水比となるように作製した。表-2 に尿素混入条件をまとめたものを示す。ここで、供試体内に混入した尿素は純度 99.0%のものを利用しており、尿素的混合率は、尿素のかさ比重を 0.72g/cm^3 (当該実験より算出) として、供試体体積全体に含まれる量を計算した。例えば尿素混合率 1%の場合には、供試体内部には 1.42g の尿素が含有していることになる。まさ土+鉄鋼スラグ混合土は、尿素混入率を 0、0.5、1、2、3、4、5%の計 6 条件実施して尿素混入率と強度発現との関係性について検討した。一方で、現地土 A・B+鉄鋼スラグ混合土は、まさ土で実施した結果を参考として、尿素混入率を 0、1、4%の 3 条件として、各供試体での強度発現の違いを検証した。

試験試料は、まず各母体土と鉄鋼スラグを必要量混合して攪拌機を用いて十分に攪拌して鉄鋼スラグ混合土を作成した後に、尿素を各必要割合分溶解させて作成した尿素水を最適含水比になるように鉄鋼スラグ混合土内に入れ、再度十分に攪拌した。なお、尿素は溶解度が高く水に容易に溶けるので、含水比調整時に間隙水中に十分に溶解されている。その後、締固め度を 90%となるように 3 層で静的に締固めた後に、含水比が変化しないようにラップや濡れタオル等を用いて供試体を包み、所定の養生日数 (7、28 日) まで恒温 (室温を約 20°C で一定とした) にて養生した。一定期間養生の後、一軸圧縮試験 (試験方法は JIS A 1216 に準拠) を実施した。

3. 2 試験結果および考察

図-3 は、供試体の養生が 7 日および 28 日後における一軸圧縮試験より得られた一軸圧縮強度を、尿素混合率との関係で示したものである。

養生 7 日の試験結果では、どの尿素混合率とした場合においても一軸圧縮強度は 200kN/m^2 から 400kN/m^2 であり、母体土の違いによる影響もほとんど見られない。

養生 28 日の試験結果では、母体土により強度の出

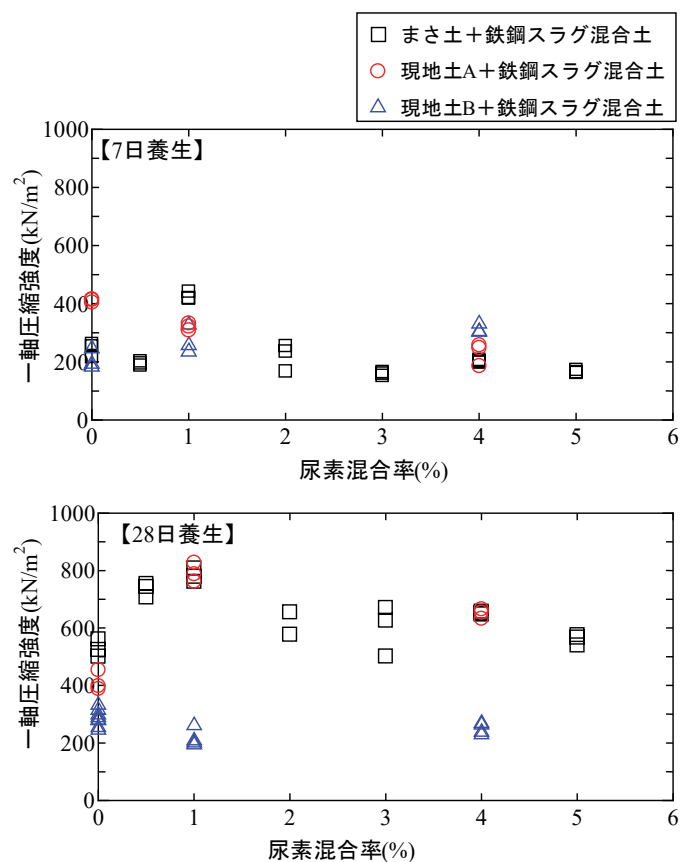


図-3 尿素混合率と一軸圧縮強度との関係

方に違いが生じ、母体土をまさ土および現地土 A とした場合には、尿素混合率が 1%とした時に高い強度が得られた。各々の試料における尿素 0%と 1%の強度差は、まさ土+鉄鋼スラグ混合土で約 1.6 倍、現地土 A+鉄鋼スラグ混合土で約 2 倍の強度増加となった。ただし、双方の試料とも、これ以上尿素の混合率を上げて強度は低下する傾向となっている。一方で、現地土 B+鉄鋼スラグ混合土の結果を見ると、尿素混合率に関わらず一軸圧縮強度は $200\text{kN/m}^2 \sim 300\text{kN/m}^2$ 程度となり、尿素混合による強度への影響が確認できなかった。また、現地土 B+鉄鋼スラグ混合土では、7 日養生と 28 日養生での強度差も確認できていないことから、まさ土や現地土 A とは明らかに異なる傾向を示していることが伺える。著者らのこれまでの研究から、現地土 B のような細粒分が 50%を超えるような母体土には、鉄鋼スラグだけでは混合による強度増加は見込めないことが確認できていることから、今回のように母体土自体の細粒分が多くなってしまうと、いくらアルカリ刺激剤として尿素を入れたとしてもその効果は得られないことが示唆される。

4. 化学分析からみる一軸圧縮強度への影響

一軸圧縮試験の結果から、まさ土+鉄鋼スラグ混合土および現地土 A+鉄鋼スラグ混合土において尿素添加により強度に明確な違いが生じた。また双方の試料ともに、尿素混合率が 1%の際に一軸圧縮強度が最大となることを確認した。本章では、鉄鋼スラグ混合土の一軸圧縮強度向上に尿素がどのように影響しているのかを化学的視点から検証するため、SEM による微細構造の観察および EDX による供試体内部の生成物の状況について分析した。なお、使用した試料は現地土 A を対象として、尿素混合率を 0%および 1.0%の 2 種類に対して各々分析を実施した。

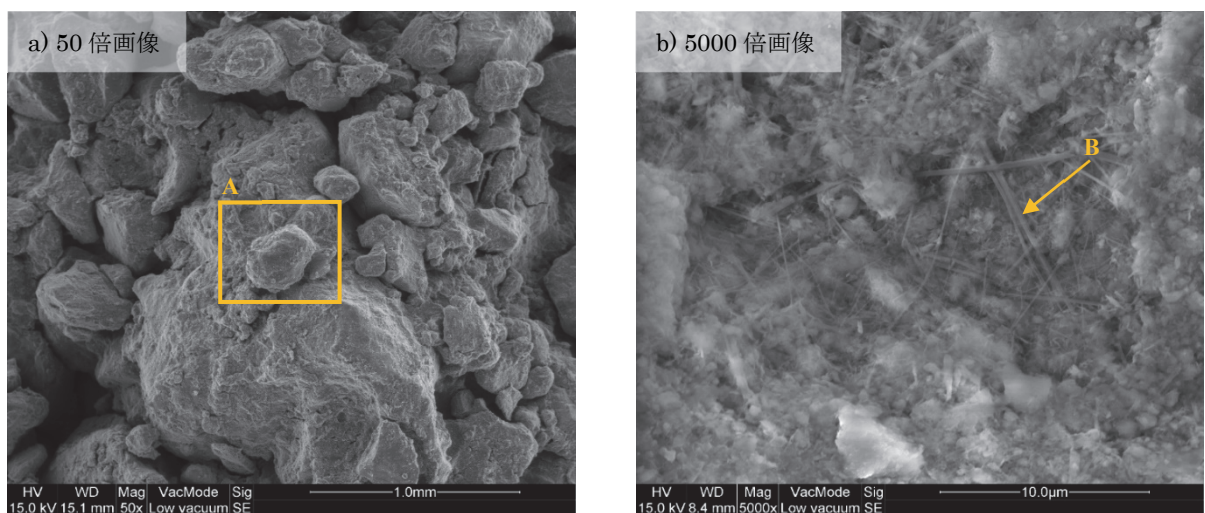


写真-1 SEM 画像（尿素混合率 0%）

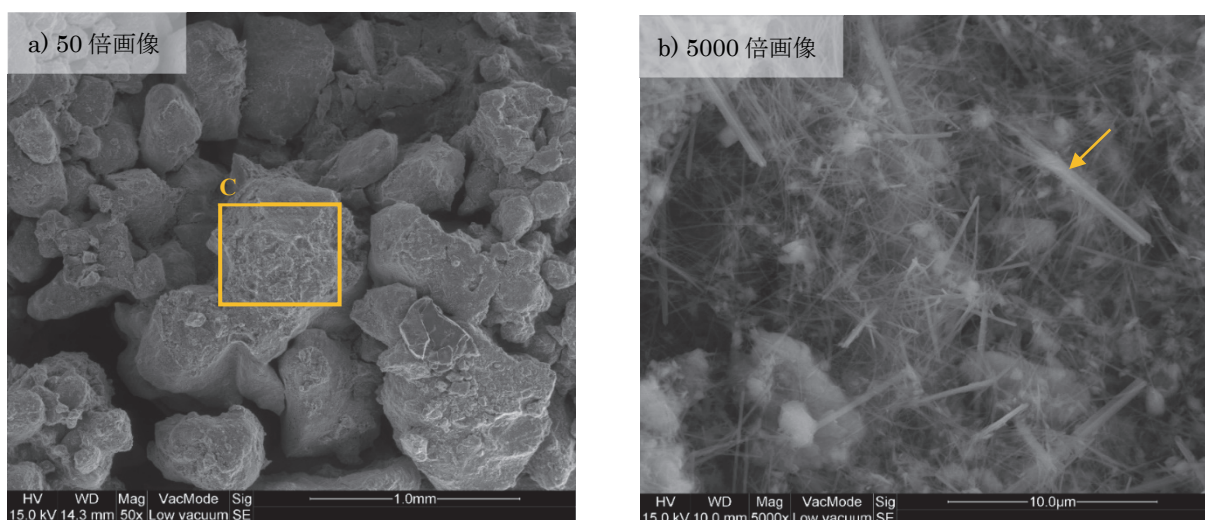


写真-2 SEM 画像（尿素混合率 1%）

はじめに、各試料の粒子結合状態の評価を目的とし、一軸圧縮試験用に別途作製した供試体試料を使用して、その破断面の内部構造を SEM にて観察した。写真-1 および写真-2 に得られた画像を示す。なお、画像は双方とも 50 倍（写真-1a）、写真-2a）、5000 倍（写真-1b）、写真-2b）で撮影したものであり、5000 倍の画像は 50 倍の画像より拡大したものである（写真内□で示す箇所）。5000 倍画像を見ると、双方ともエトリンサイトと呼ばれる針状の物質が確認できる。これは鉄鋼スラグの水和反応により生成される物質であり、水硬性の一因となっている⁸⁾。また、画像を見る限りではあるが、尿素混合率が 1% の試料内部のほうが、エトリンサイトの生成がより多いことが伺える。供試体作製時に尿素を混合する際、尿素は含水比調整で使用する蒸留水に十分溶解させて混合していることから、鉄鋼スラグが水と接触するよりも前に尿素が水に溶解し、鉄鋼スラグの水和反応を促進させた可能性が考えられる。

ここで、SEM 画像中の広範囲部（A、C）およびエトリンサイト部（B、D）の箇所にて EDX による構成元素の分析を行った。なお、EDX は、電子線照射により発生する特性 X 線をエネルギーで分光して検出するものであり、特性 X 線は元素固有であることから、照射により試料内部を構成する元素の同定が行える。

図-4 および図-5 に、EDX 分析により得られた構成元素を示す。図中、横軸は確認できた各元素、縦軸は分析できた各元素の質量濃度を 100 とした際に、それぞれの元素割合を比率で示したものである。双方の分析結果とも、エトリンサイト部のカルシウム（Ca）濃度が高くなっていることが伺えるが、その割合は、尿素を含有する試料でより顕著となっており、試料内における広範囲部（C）とエトリンサイト部（D）での Ca 濃度の差は約 3 倍近いことが確認できた。先にも示した通り、尿素の加水分解による炭酸カルシウム（ $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ）の析出においては、アンモニア（ NH_3 ）が生じることで内部が弱アルカリ性に変化し、よりカルシウム化合物が生成されやすい環境に整えられるとされている⁹⁾。別途、供試体作製時の混合水の pH を計測したところ、尿素なしのほうは pH=7.8 であったのに対し、尿素 1% 混合水では pH=8.4 となっており、約 0.6 の上昇が確認できた。これより、今回使用した尿素がアルカリ刺激剤として Ca 濃度の変化に寄与したことが伺える。なお、本論文ではエトリンサイト部での EDX 分析は双方とも 1 か所ずつの計測結果を示しているが、分析時に他のエトリンサイトについても同様に調べたところ、今回結果で示したように、尿素混合試料で高い Ca 濃度の検出が確認できた。したがって、供試体内に尿素が均一に間隙水に溶解して部分的ではなく供試体全体のエトリンサイトの Ca 濃度が増加し、水和物生成量が増加して強度増加に繋がっている可能性が示唆される。

なお、今回の分析では、尿素混合の有無による結果を示すところまでとなったが、図-3 の一軸圧縮強度を見る限り、尿素混合率がある一定量を超えると強度は低下していく傾向が見られていることから、今後は溶出イオンとの関係や強度増加に役割を果たす化合物の特定といった検討も必要であると考えている。

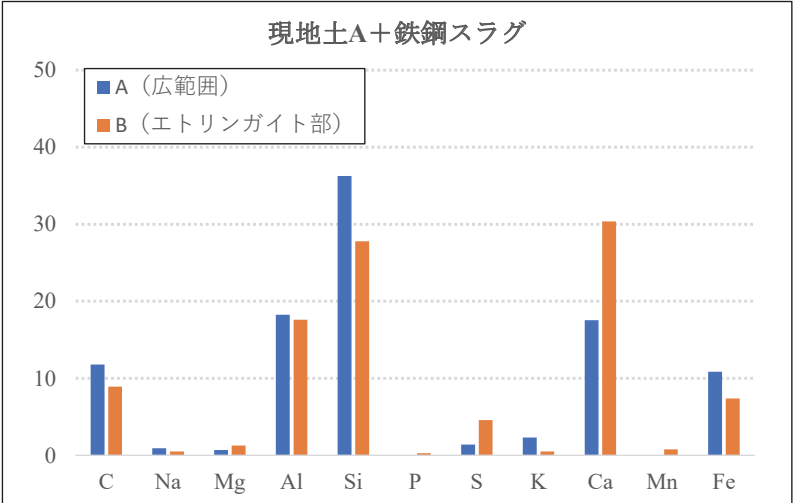


図-4 EDX 分析結果（尿素混合率 0%）

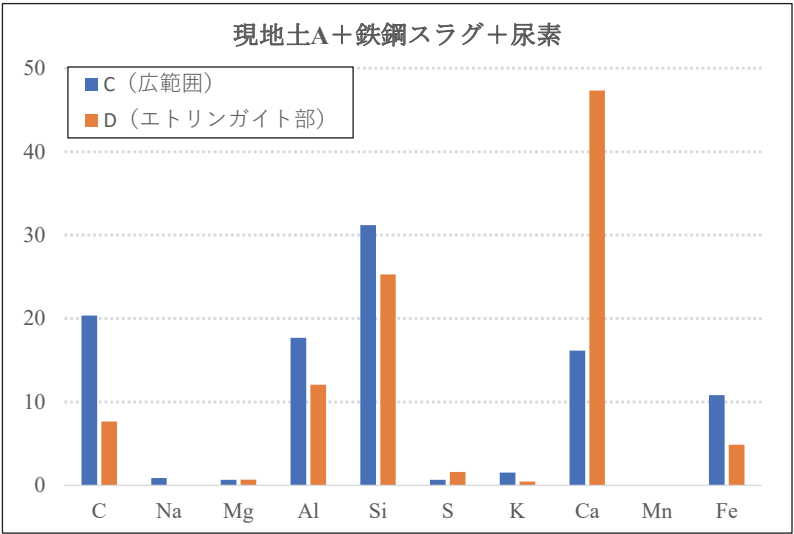


図-5 EDX 分析結果（尿素混合率 1%）

5. おわりに

本研究では、鉄鋼スラグ混合土の強度発現因子としてのアルカリ刺激剤として尿素に着目し、その効果を一軸圧縮強度、SEM 画像および EDX 分析により総合的に検証した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 一軸圧縮強度より、まさ土および現地土 A においては、尿素を適量混合することで一軸圧縮強度が促進する傾向が確認された。一方で、細粒分が多い現地土 B では鉄鋼スラグおよび尿素混合による強度効果が見られなかったことから、尿素による強度の促進効果は、これまでの知見からも確認できているような鉄鋼スラグ混合による改良効果が見られるような一定の細粒分含有量を有する母体土に限定されることがわかった。
- 2) 尿素含有による強度促進メカニズムとしては、含水比調整に使用する土に予め尿素を溶解させることで pH が上昇し、弱アルカリの環境が整備された状況下において、鉄鋼スラグと弱アルカリの間隙水が接触することでアルカリ刺激となって鉄鋼スラグからの成分溶出が進み、エトリンガイト部分の Ca 濃度上昇に寄与することが確認された。

今回の試験で、尿素がアルカリ刺激剤として有用であることが確認できたが、これを実用化していくためには、改良の必要性を判断するための簡易な指標が必要となる。また今回のように強度試験の度に SEM 観察や EDX 分析を行うことは困難なため、溶出イオンの分析や化合物析出量の評価により強度増加が得られるかといったより現実的な手法を検討していく必要があるものと考ええる。

謝 辞

本研究は、令和 4 年度建設工学研究所一般研究助成によって実施したものである。また、SEM および EDX 分析結果の考察にあたっては、株式会社コベルコ科研の山下岳史氏にご協力いただいた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 稲積真哉, 新坂孝志, 橋本亮, 岩本遼生: 地盤改良固化材としてのシリカ系混合固化材の硬化機構および硬化時間に関する実験的検討, 材料, Vol.69, No.1, pp.91-96, 2020
- 2) 片岡沙都紀, 竹中奨偉, 澁谷啓, 吉田仁, 山田節也, 松元弘昭: 鉄鋼スラグの地盤改良材としての工学的適用性に関する検討, 第 15 回地盤改良シンポジウム論文集, p107-112, 2022
- 3) 菊本統, 石野守: 高炉水砕スラグの潜在水硬性と微視的構造の変化, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.72, No.2, p117-125, 2016
- 4) 篠原晴彦, 松田博, 坂井悦郎, 小野幸一郎, 鈴木操, 中川雅夫: 高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.62, No.4, p858-869, 2006
- 5) 川崎了: 微生物機能を利用した地盤改良技術, Journal of MMIJ, Vol.131, p155-163, 2015
- 6) 植松尚大, 片岡沙都紀, 田口未由希, Tara Nidhi Lohani, 澁谷啓: 鉄鋼スラグ混合土の透水性および一軸圧縮強度特性について, 第 50 回地盤工学研究発表会論文集, p641-642, 2015
- 7) 小畑孝太, 吉本昌弘, 片岡沙都紀, 河井克之, 澁谷啓: 各種要因が鉄鋼スラグ混合土の一軸圧縮強度特性に与える影響, Kansai Geo-Symposium 2021 論文集, Vol.9, p150-154, 2021
- 8) 平井壮, 水谷崇亮, 菊池喜昭, 川端雄一郎: 製鋼スラグ混合土の配合・混合条件がその力学特性に与える影響について, 港湾空港技術研究所報告, Vol.51, No.3, p77-106, 2012

著 者

片岡 沙都紀 研究員 (非常勤), 博士 (工学), 地盤工学
 吉本 昌弘 パシフィックコンサルタンツ株式会社, 修士 (工学)