

微生物活性化による鉄鋼スラグ混合土の固化促進および改良効果評価手法の確立

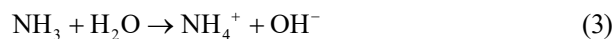
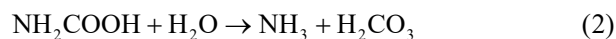
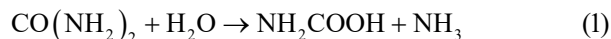
研究代表者 近畿大学理工学部社会環境工学科 教授 河井 克之

1. はじめに

低品質な建設発生土を盛土材として使用する場合、製鋼スラグを混合することで強度改善効果が見込める。その改良効果は、成分として含まれている遊離石灰からカルシウムイオンが生成される際の発熱による含水比低減、細粒分の凝集による粒度改善、炭酸カルシウム生成による固化であると言われている。しかし、製鋼スラグの品質にバラツキがあることや大量に用いた場合にアルカリ成分の滲出などが懸念されているため、これまでは主に路盤改良材などに用途が限られており、供給量が需要量を大きく上回っているのが現状である。一方、微生物の活性化により地盤材料を固化するバイオセメンテーションが注目されている。種々ある手法の中で、尿素分解菌によるカルシウムの炭酸固化が最も有力であるとされている。カルシウムイオンの炭酸固化は鉄鋼スラグの固化作用と同じであり、バイオセメンテーションの原理を活用し、地盤材料内潜在菌を活性化させることで鉄鋼スラグの地盤材料改良効果を安定的に発現させることが本研究の目的である。

2. カルシウムイオンの炭酸化による地盤材料固化

製鋼スラグの改良剤としての効果は、含有しているカルシウムイオンが炭酸化し固体として析出することに起因している。近年、同様にカルシウムイオンの炭酸固化で地盤改良を行う技術として、バイオセメンテーションというものがある。バイオセメンテーションは、微生物の持つ代謝機能を有効活用し、低品質な地盤材料を改良する技術であるが、1960年にはすでに提案されている¹⁾。当時、注目されたのは鉄バクテリアで、鉄の水酸化による土粒子間に粘着力を持たせようとしたものである。バイオフィームやシリカ化合物等に着目したものもあるが、現在、最も安定的に尿素分解菌を用いて炭酸カルシウムを析出する方法である²⁾。以下に、化学反応式を示す。



式(1)が尿素分解菌による尿素の加水分解であり、微生物が生成する尿素分解酵素ウレアーゼによる。この時発生するアンモニアは土壌の pH を上昇させ、炭酸イオンはカルシウムイオンが存在する場合、炭酸カルシウムの析出に寄与する。バイオセメンテーションの研究では、尿素分解菌とともに尿素に加え、カルシウムイオン、栄養塩を配合添加し、その

効果を検討している³⁾。ここでは、カルシウムイオン源として製鋼スラグを用い、外部から微生物を添加せず、地盤材料の潜在菌の作用で、窒素肥料として用いられる尿素のみ添加することによる、地盤改良効果について検討する。

3. 試料物性及び力学特性

(1) 試験試料

改良効果の材料依存性を検討するために、盛土材料として用いられる 6 種類の異なる粒度分布(図-1)を有する試料を用意した。図中には混合する製鋼スラグの粒度分布も一緒に示している。写真-1 に示すように、写真画像からも色合いに違いがあるのが分かるが、色合いの近い試料 A と B はともに細粒分含有率が高く、試料 E と F では色合いは似ているものの粒度分布は異なる。表-1 にそれぞれの試料の土粒子密度と 100mL の蒸留水に試料 10g を入れて得られた pH を示す。土粒子密度には鉱物組成が反映されやすいとされている。図-2 に JIS A1210 による突き固め試験 A-b 法で得られた締固め曲線を示す。細粒分が多い試料は最適含水比が高く最大乾燥密度も小さくなっている。ここで得られた最大乾燥密度と最適含水比をもとにして、以降で行う実験供試体は、直径 50mm、高さ 100mm の二つ割りモールド内で、各試料の最適含水比・3(%)の含水比、締固め度 97(%)になるように、3 層に分けて締固めて作製した。

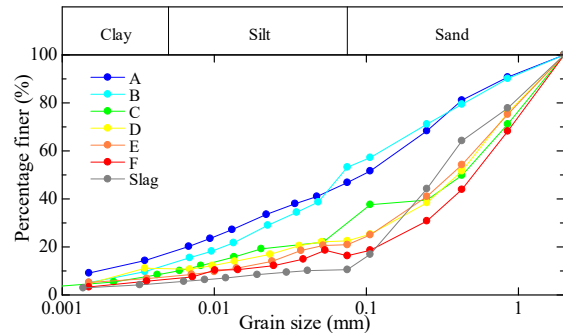


図-1 試料の粒度分布

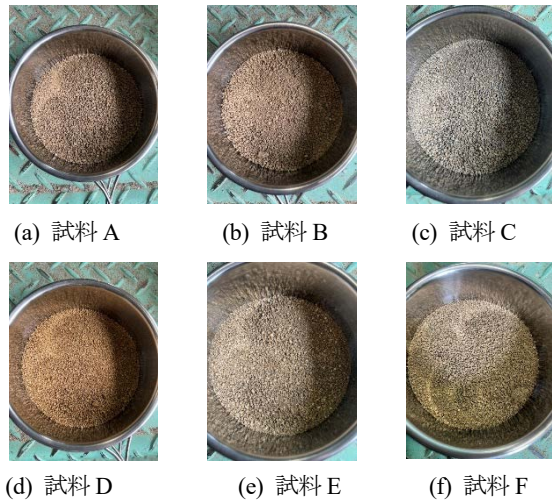


写真-1 試料の様子

表-1 土粒子比重と pH

試料	A	B	C	D	E	F
G_s	2.696	2.703	2.714	2.592	2.639	2.579
pH	6.82	7.16	7.79	6.67	6.59	7.19

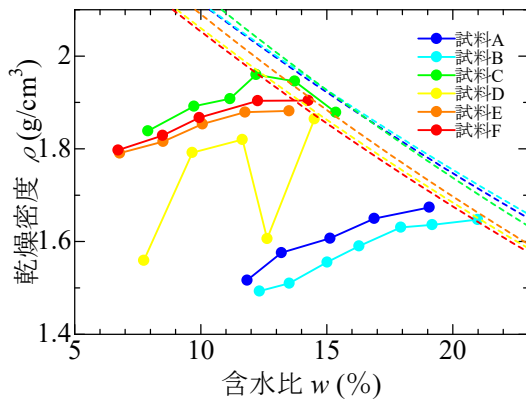


図-2 試料の締固め曲線

(2) 気乾試験と反射スペクトル特性

地盤材料を分類するうえで色は重要な要素である。物体の色は、物体が反射した光の波長によって決まる。この時の反射スペクトルは物体表面の物質構造に依存するため、反射スペクトル特性を類型化することで物質判定が行えることになる。ここでは、ハイパースペクトルカメラ(Spectral Imaging 社 SPECIM IQ: 画素数 5MP, 波長範囲 400～1000nm, 波長分解能 7nm)を用いて、気乾状態の供試体の経時的な反射スペクトルを得た。図-3 に撮影環境を示す。供試体は気乾状態で放置し、経時的な重量変化計測および基準反射板が画角内に収まる様に撮影を行った。図-4 に気乾試験における各試料の含水比変化を示す。供試体作製後が最も乾燥速度が速く、時間とともに含水比低下量が漸減していき、3 日過ぎごろから試料ごとにある含水比に収束していく様子が確認できる。この時の収束

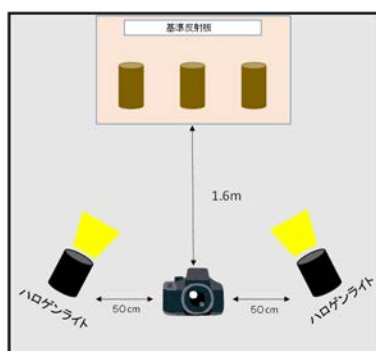


図-3 気乾試験の概要

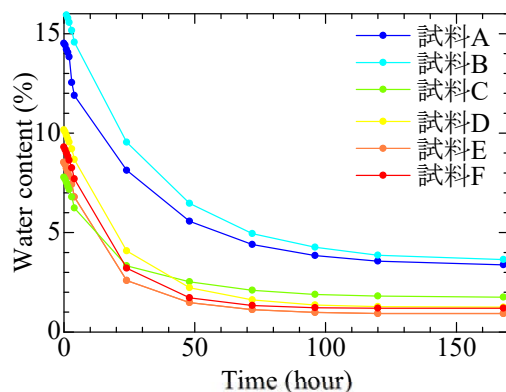


図-4 気乾試験中の含水比変化

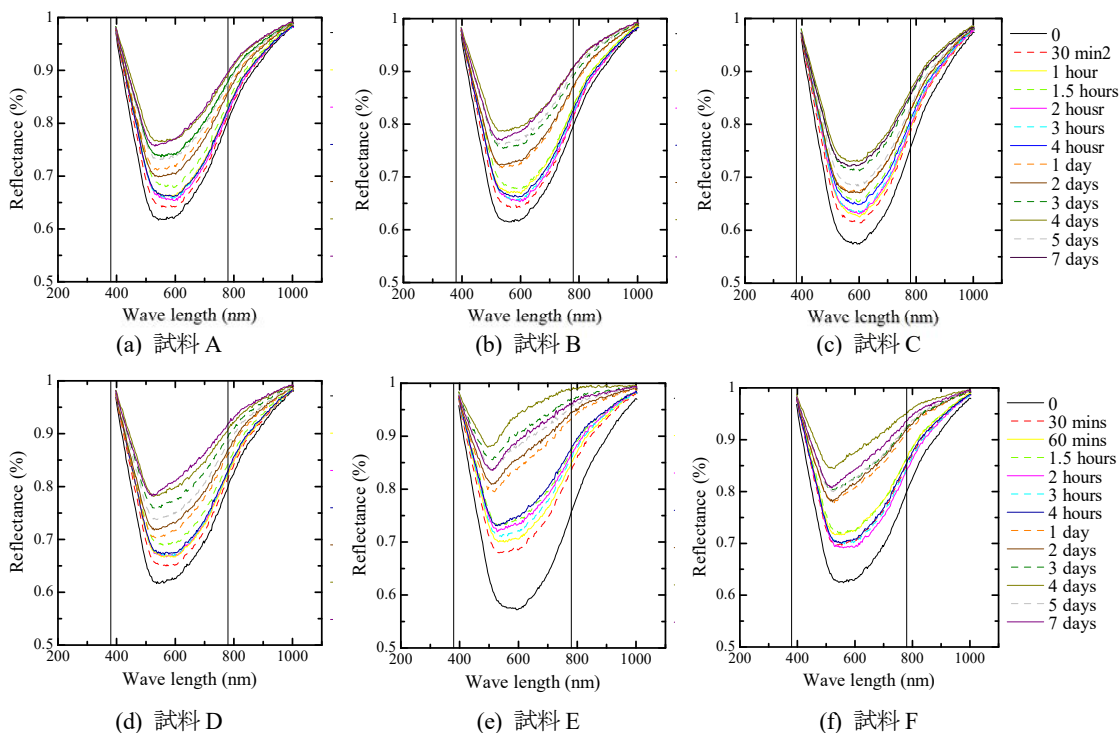


図-5 気乾試験中のスペクトル反射率変化

含水比が細粒分の多い試料 A, B は他よりも高くなっている．図-5 に気乾試験における反射率変化を示す．供試体作製直後の反射率曲線が試料ごとに異なることは，反射率が最小となる波長帯の違いから確認できる．肉眼で色合いが類似していると確認できた試料 A, B の反射率曲線が似ている一方で，試料 E, F は反射率曲線形状が異なることが分かる．土中水は特に長波長帯の光を吸収しやすいとされており，乾燥が進むことで反射率が上がっていくことで確認できる．この時，波長帯によって反射率の増分が異なるため，乾燥前後の反射率曲線形状が異なっているものもある．

(3) ウレアーゼ活性度の計測

バイオセメンテーションに重要な尿素分解菌の存在や繁殖度合いを間接的に知る方法としてウレアーゼ活性度を計測することが有効であるとされている．しかしながら，既往の研究⁴⁾では，検査試料に尿素を添加し，それから発生するアンモニウムイオン濃度の変化量計測に寄るため，バイオセメンテーションに用いる尿素量がウレアーゼ活性度計測に影響を及ぼすという問題点があった．そこで，まず電気伝導度の変化によってウレアーゼ活性度を計測する方法について検討する．Whiffin⁵⁾は次式で電気伝導度の時間変化率からウレアーゼ活性度を算出することを提案している．

$$\text{Urease activity (mM/hour)} = \frac{\Delta \text{Electrical conductivity } (\mu\text{S/hour})}{\Delta t (\text{min})} \times 10^{-3} \times 11.11 \times 60 \quad (7)$$

ここでは，4 つの異なる試料を用意し，アンモニウムイオン生成量と電気伝導度変化率計測から得られるウレアーゼ活性度について比較を行う．図-6 は，4 つの異なる試料で，1.5mol/L の尿素溶液 40mL と試料 10g を混合，1 分間攪拌した後に，1 分間隔で電気伝導度を計測した結果である．豊中市の植え込みから採取した試料では，電気伝導度が比較的大きく変化しているのが分かる．それに対して，真砂土ではほとんど電気伝導度の変化はないことが分かる．図-7 は，電気伝導度計測から(7)式を用いて算出したウレアーゼ活性度と従来のアンモニウム生成量計測から得られたウレアーゼ活性度の比較である．この結果から，電気伝導度変化率計測による方法の妥当性が確認できる．

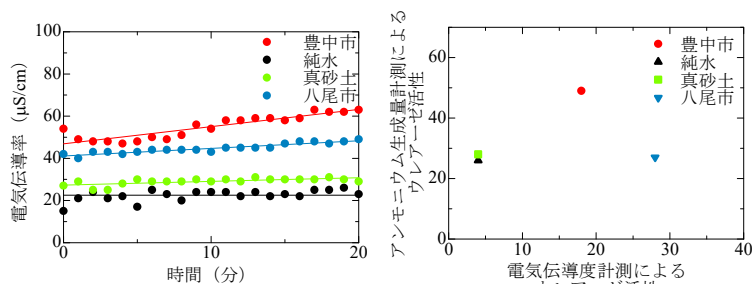


図-6 尿素溶液中での電気伝導度変化

図-7 ウレアーゼ活性度計測方法の比較



写真-2 一軸圧縮試験

(4) 一軸圧縮強度とウレアーゼ活性

試料の強度特性を調べるために各試料で締固め供試体について、ひずみ(1%/min)制御の一軸圧縮試験(写真-2)を実施した。図-8に一軸圧縮試験の結果を示す。試料 A, B は細粒分を含んでいるため保水性が高く、それによって発生するサクション(負の水圧)があることで他よりも一軸圧縮強度が強い結果となっている。図-9 に試料ごとの電気伝導計測結果を示す。電気伝導率の経時的増加傾向が大きいほど、ウレアーゼ活性が高くなるが、試料 A, C は他と比べてウレアーゼ活性が高い結果となった。

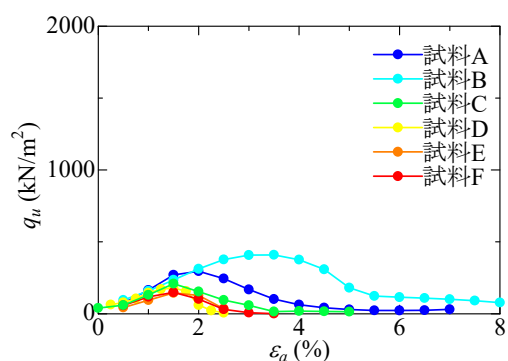


図-8 締固め供試体の一軸圧縮試験

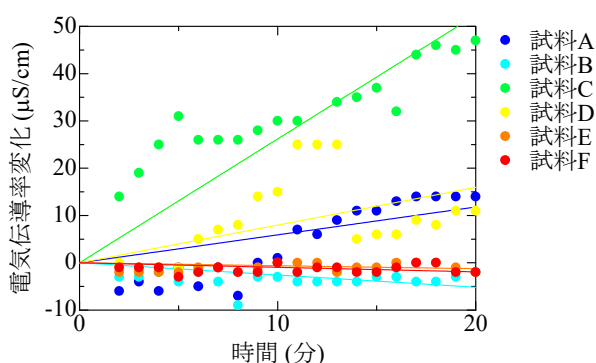


図-9 試料ごとのウレアーゼ活性計測

4. 製鋼スラグ混合土特性

(1) 供試体作製法

鉄鋼スラグの土粒子密度は 3.39g/cm^3 で、試料の土粒子密度のおよそ 1.3 倍である。混合比については、土：鉄鋼スラグの固相体積比が 3:1 とし、先に述べた試料ごとの締固め度における間隙比となる様に締固めを行った。供試体は、乾燥を防ぐため、ラップフィルムで包み、チャック付きポリ袋に入れて、養生させた。作製当日、7, 14, 28 日後に一軸圧縮試験を行うとともに、ウレアーゼ活性の計測を行った。試料 A, C, F については、バイオセメンテーションにおける炭酸基生成に用いられる尿素溶解水(0.5, 1.0, 2.0%)で含水比調整、同様に作製当日および 7, 14 日間養生後の一軸圧縮強度、ウレアーゼ活性の計測を行った。また、いずれの試験においてもハイパースペクトル撮影も実施し、改良による反射スペクトル特性変化についても検討した。

(2) 実験結果

図-10 に尿素(0%)の供試体の一軸圧縮試験結果を示す。また、図-11 は一軸圧縮試験から得られた強度変化を養生期間で比較したものである。A, B, F についてはそれほど大きくないが、その他の供試体は養生期間とともにピーク強度が約 3~4 倍程度まで大きくなっている。図-12 に養生期間ごとの電気伝導度変化を示す。当日はすべての試料で電気伝導度の上昇傾向があり、ウレアーゼ活性があることを示すが、7 日後には試料 E のみで上昇傾向が見える。試料 E は、7 日時点では十分な強度増加を示しておらず、その後大きくスラ

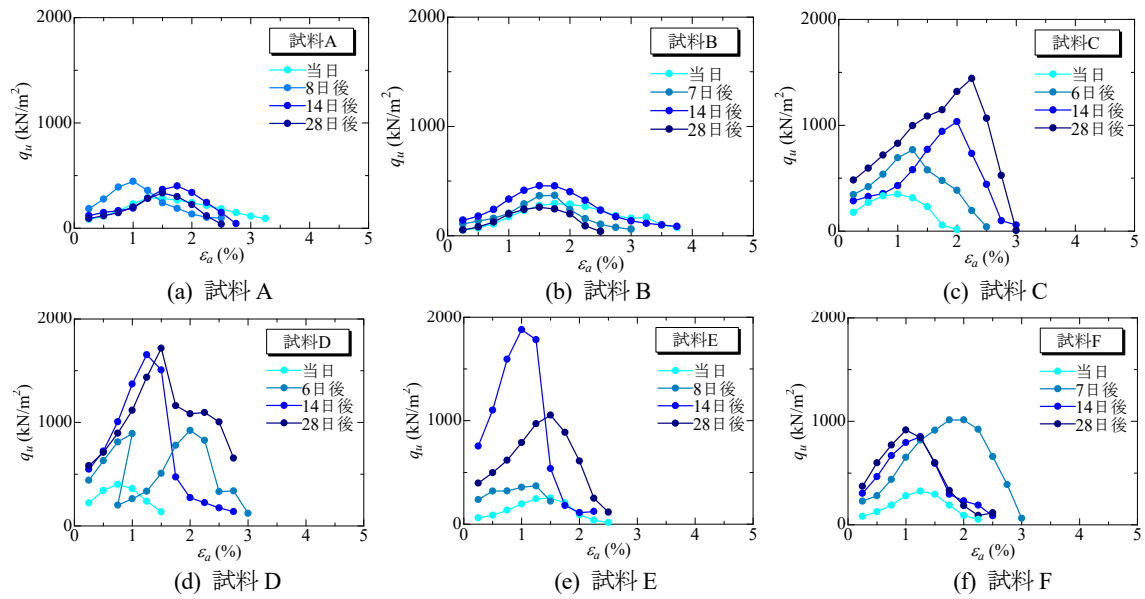


図-10 スラグ混合土の一軸圧縮試験経過

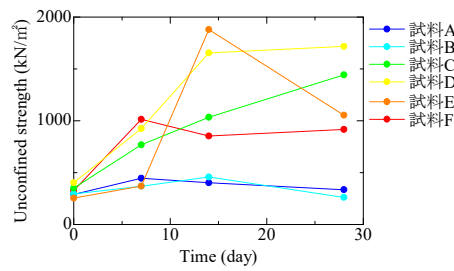


図-11 スラグ混合土の強度変化

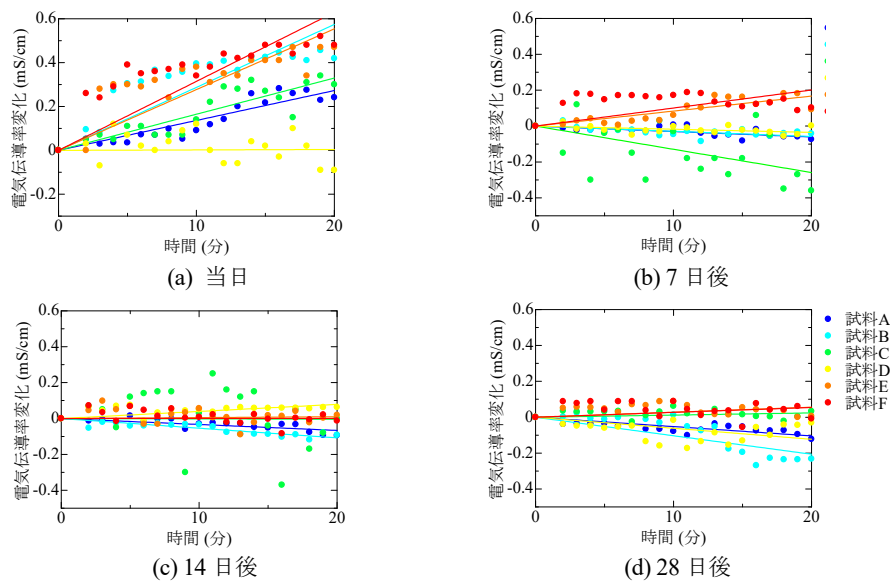


図-12 スラグ混合土のウレアーゼ活性

グ混合による改良効果が発現している。つまりウレアーゼ活性がある状態であればスラグの混合による経時的な強度増加があるものの、その後はウレアーゼ活性の消失とともに強度増加傾向が弱まることを示している。この期間のハイパースペクトル撮影による反射率変化を図-13 に示す。図-5 と比較すると供試体作製後とは反射率曲線形状がすべて異なっており、異なる材料に変化していること分かる。養生期間の乾燥による含水比変化はなく、スラグ混合による凝集、固結によって反射率が異なっている。実際、養生後に大きく強度が上がった試料では白い結晶が供試体内部に確認できた。しかし、局所的な結晶化であるため、カメラの解像度ではとらえられず全体的なスペクトル変化として現れたものと考えられる。しかしながら、強度増加とスペクトル変化に相関性を見出すまでには至っていない。ここで、スラグ混合による強度増加傾向の異なる試料 A, C, F について濃度の異なる尿素水添加による改良効果について検討した。

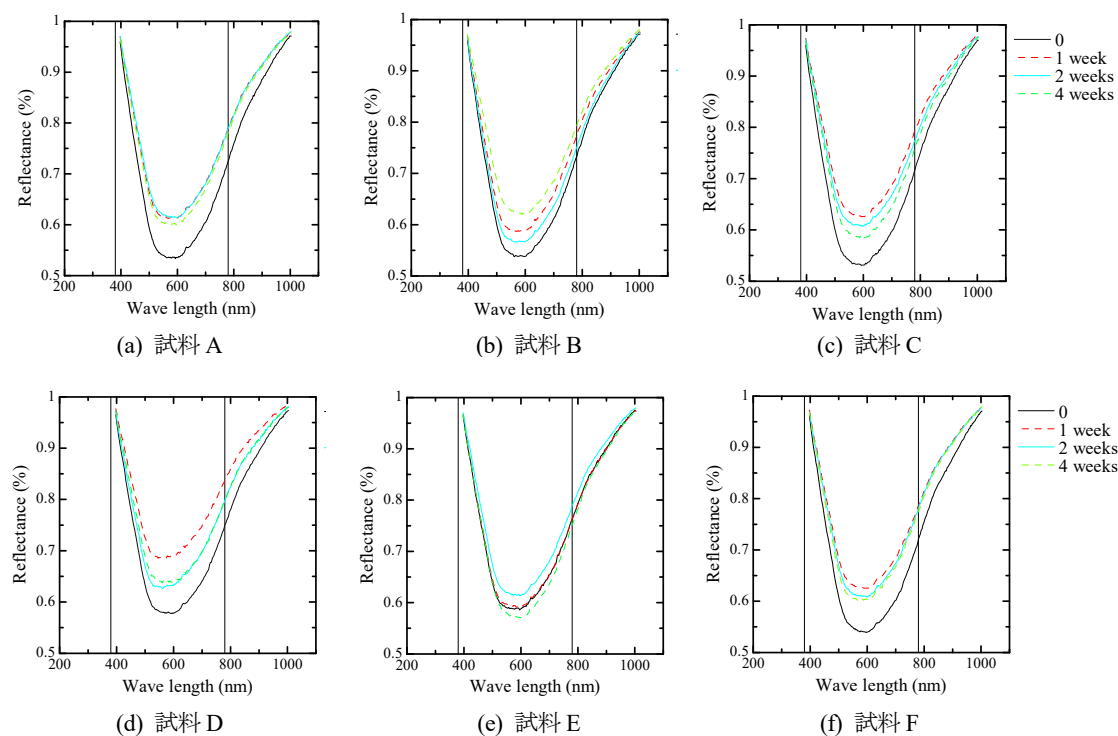


図-13 スラグ混合土養生中のスペクトル反射率変化

図-14 に一軸圧縮試験結果を示す。いずれの試料においても尿素添加によって強度が低下している。図-10 でスラグ混合により一定の改良効果の見られた試料 C, F においても試料そのままの強度程度にしか示していない。一般的に、炭酸カルシウム生成は固化より土粒子骨格を剛にし、脆性的な一軸圧縮挙動を示すことが知られているが、逆に靱性的な挙動となっていることは興味深い。また、尿素水の濃度にも相関性が見られない。

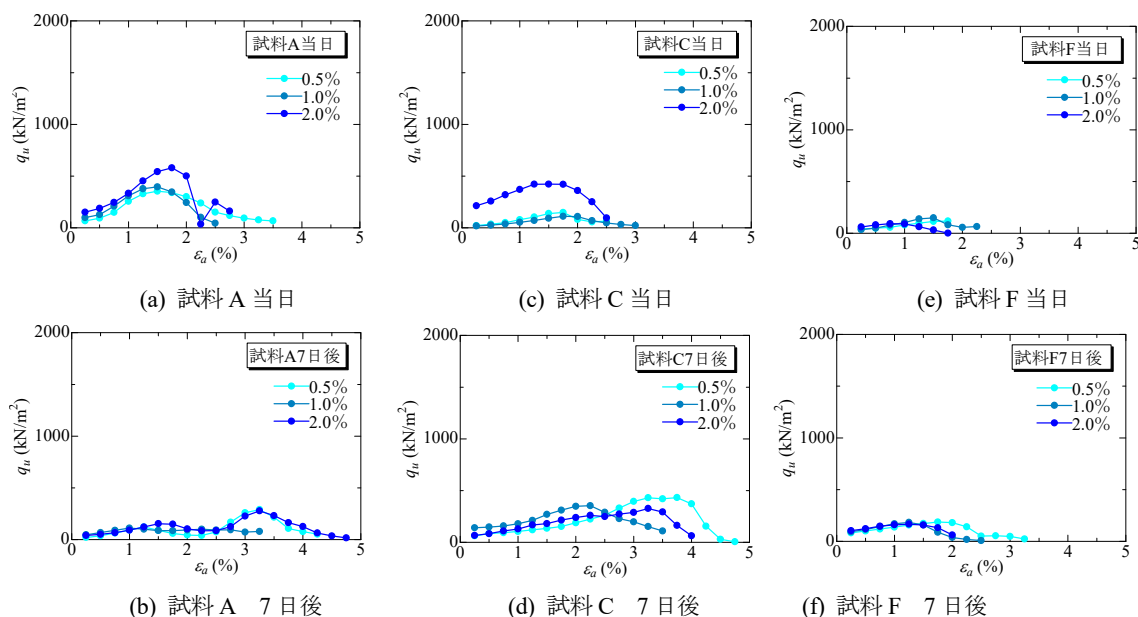


図-14 尿素溶解水スラグ混合土の強度変化

図-15 に供試体作製当日のウレアーゼ活性を示すが、いずれもウレアーゼ活性が微小である。図-16 に反射スペクトル特性を示すが、図-13 と比較すると、反射スペクトル特性にも変化はほとんど見られない。スラグ混合土では試験終了後、供試体内に明らかに小さな白い結晶が点在しているのが確認されている。肉眼でよく見ないと確認できず通常の写真画像では表現できないが、尿素溶解水を加えた供試体ではその様な結晶体は見られなかったことと図-16 の結果は一致していると言える。

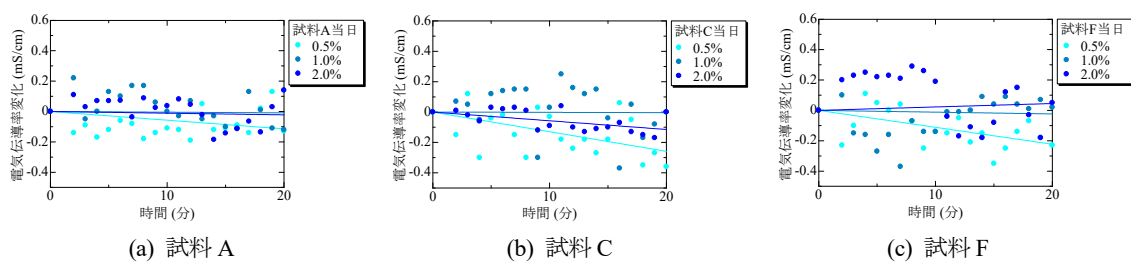


図-15 尿素溶解水スラグ混合土当日のウレアーゼ活性

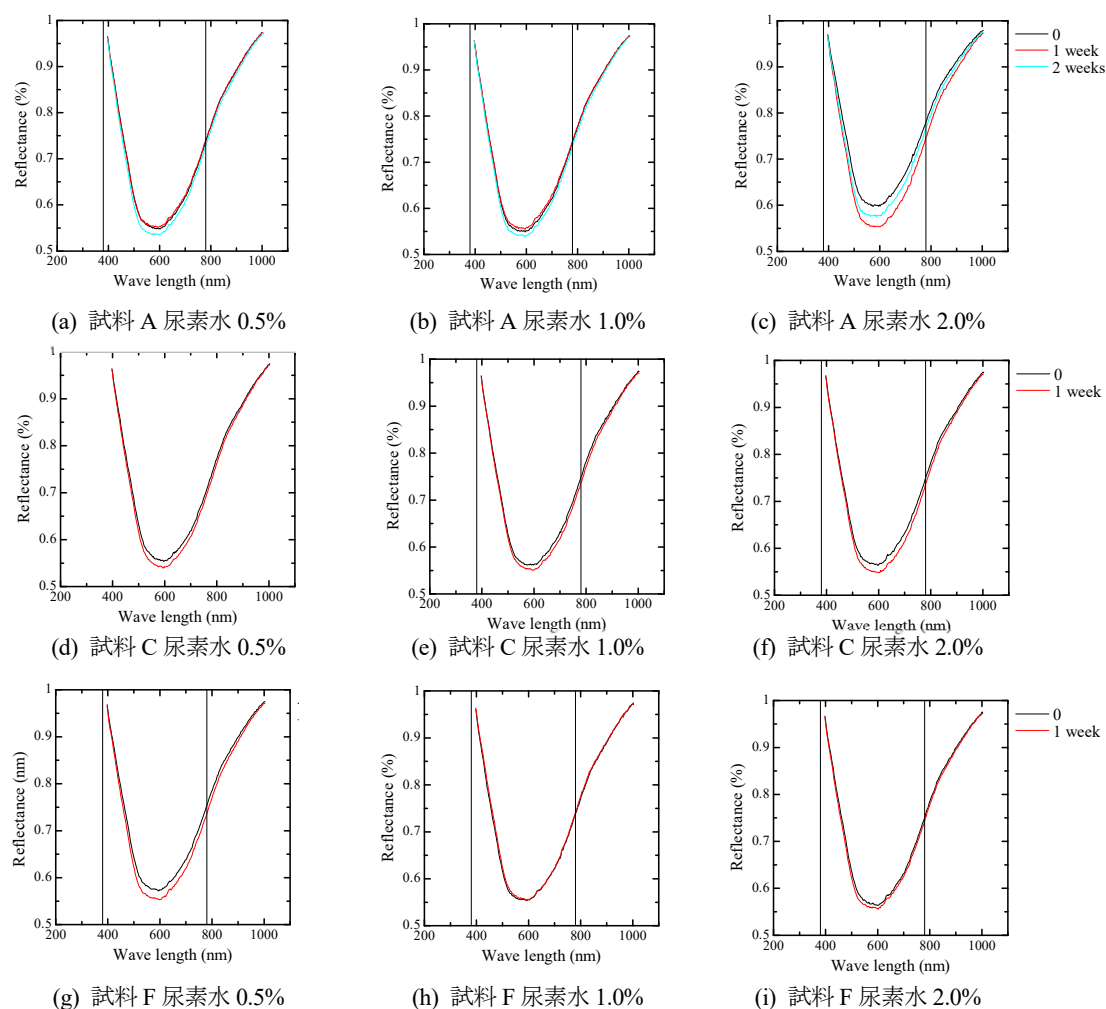


図-16 尿素溶解水スラグ混合土養生中のスペクトル反射特性変化

5. まとめ

本研究では、バイオセメンテーション技術を鉄鋼スラグ混合土の固化に適用することを目的として、尿素を加えた強度試験を実施した。養生環境や微生物活性化指標の計測方法など、いくつか問題があったため、明確な傾向を見出すことができなかったが、養生後の試料の色合いや持った時の感触は尿素添加の有無によって明らかに異なることは確認でき、強度には表れなかったが材料としての変質が伺えた。既往の研究で製鋼スラグ混合による改良効果は地盤材料内のアロフェンの存在によって異なることが分かっており⁶⁾、その強度発現傾向に違いが現れるとしている。鉄鋼スラグによる固化が顕著になる場合には、土粒子間の粘着力を増加させるため、地盤材料の破壊基準である見かけの粘着力の増大となって現れる。しかしながら、この時には土粒子同士の摩擦を表す内部摩擦角の変化はない。一方、鉄鋼スラグによる細粒分凝集による粒度改善効果は、内部摩擦角を増大させることになるが、摩擦角の変化を一軸圧縮強度から推察することは困難である。本研究での尿素添加による一軸圧縮試験での応力～ひずみ関係は、ピーク強度は小さいながらより靱性的

な挙動を示しており、粒度改善効果として発揮されたとも考えられる。少なくとも尿素添加による微生物作用に変化があったことで、鉄鋼スラグの改良効果にも変化があったことが認められる。今後は、栄養塩の変更も視野に入れ、さらなる試験結果の蓄積で、スラグ混合土の効率的な固化技術を模索することになる。

謝辞

本研究は「公益財団法人 JFE21 世紀財団」の研究助成によって実施されたことをここに記し、謝意を示します。

参考文献

- 1) ゲ・デ・チェウヴルウノフ：地盤改良法，産業図書，pp.52-53, 1968.
- 2) Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K. and Bang, S. S.: Microbiological precipitation of CaCO_3 , *Soil Biology and Biochemistry*, No.31, pp. 1563-1571, 1999.
- 3) 稲垣由紀子，塚本将康，森啓年，中島進，佐々木哲也，川崎了：微生物代謝による液状化対策に関する動的遠心模型実験，地盤工学ジャーナル，6 巻，2 号，pp. 157-167, 2011.
- 4) 富永祐貴，大田雄斗：炭酸カルシウム法による土壌固化技術の制御に向けたウレアーゼ活性測定方法の検討，近畿大学卒業研究，2022.
- 5) V. S. Whiffin : Microbial CaCO_3 precipitation for the production of Biocement, *Doctor thesis of Murdoch Univ.*, 2004.
- 6) 杉村裕二，篠崎晴彦，赤司有三，植松尚大，渋谷啓，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，15 巻，3 号，pp.509-517, 2020.