

海水環境下における製鋼スラグ混合土の長期耐久性に関する研究

Evaluation of Long-term Durability of the Mixture of Clay and Converter Steel-making Slag in the Seawater Condition

大槇 望未¹⁾, 畠 俊郎²⁾, 栗津 進吾³⁾

1) Nozomi OMAKI, 修士課程, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, m223450@hiroshima-u.ac.jp

2) Toshiro HATA, 教授, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, thata@hiroshima-u.ac.jp

3) Shingo AWAZU, JFE スチール株式会社 スチール研究所, s-awazu@jfe-steel.co.jp

近年では浚渫土を有効利用するために製鋼スラグ混合土が港湾工事などで利用されており, 強度発現特性などに焦点を当てた研究が数多くなされているが, 海水環境下での長期耐久性に関する知見は不十分である. 本研究では, 3種類の浚渫土を用いて作製した製鋼スラグ混合土およびセメント改良土供試体を人工海水に曝露させ, 一軸圧縮試験やイオン分析を通じて製鋼スラグ混合土の海水環境下での劣化特性などの比較を行った. その結果, 製鋼スラグ混合土とセメント改良土では海水環境下での劣化特性が異なる可能性があることや, 劣化特性と浚渫土の組成の間には関係があることなどが明らかとなった.

キーワード: 浚渫土, 製鋼スラグ, セメント, 劣化 (IGC: D-02, D-06, D-10)

1. はじめに

現在, 我が国では年間およそ 3800 万トンの鉄鋼スラグが発生している¹⁾. この鉄鋼スラグは鉄鋼製品の製造過程において生成される副産物であり, 省エネルギー, CO₂削減を可能にする「地球にやさしい土木資材」としてさらなる利用拡大が期待されている. 鉄鋼スラグは, 高炉で鉄鉱石を熔融・還元する際に発生する高炉スラグと, 鉄を精錬する製鋼段階で発生する製鋼スラグに大別できる. さらに, 高炉スラグは熔融状態のスラグを冷却する方法によって徐冷スラグと水砕スラグに, 製鋼スラグは転炉から生成する転炉系スラグと, 電気炉で生成される電気炉系スラグに分けられる. これら 4 種のスラグは特性が異なるため使用用途も様々である. 以前は道路用路盤材やセメント用材料が中心であったが, 社会情勢の変化から近年は適用範囲が拡大されている²⁾.

その一例として, 港湾工事に用いる地盤材料としての用途が挙げられる. 従来, 埋立工事や覆砂・干潟造成工事では施工材料として山砂・海砂などの天然材料が使用されてきた³⁾. しかし, 1998年に広島県が海砂採取禁止措置を施行したことに始まり, 他沿岸県でも相次いで瀬戸内海での海砂採取が禁止・規制された⁴⁾. その代替材として研究が進められてきた地盤材料が製鋼スラグと浚渫土の混合土(以下: 製鋼スラグ混合土)である.

一方, 海域において, 波浪や船舶の航行により巻き上げられた底泥が潮流で移動し, 航路や泊地の埋没を引き起こす現象が見られる⁵⁾. 喫水より浅くなると航行に支障が生じるため, 必要な水深を確保できるよう浚渫工事を行う必要があるが, 発生した浚渫土は高含水比でシルト・粘土分を多く含むため施工性が低く, 一般的には埋

立処分される⁶⁾. しかし, 土砂処分場の不足が問題となっており, 浚渫土の有効利用が求められている.

以上の①天然材料の使用制限, ②浚渫土の埋立処分場の不足, という海域で見られる 2 点の問題に対し, 製鋼スラグ混合土を港湾工事で使用することは資源再利用の点から非常に有効である.

鉄鋼スラグは主に CaO, SiO₂ (シリカ), Fe₂O₃, MgO で構成されており, 遊離石灰 (f-CaO) が残っているという特徴がある¹⁾. 通常, スラグ中の石灰は金属元素が酸化物の形で取り込まれているが, 製鋼スラグは精錬時間が短く石灰含有量が高いため未溶解のまま石灰の一部が残ることがあり, それを遊離石灰という. これによって普通ポルトランドセメントと類似した化学組成を持ち³⁾, 浚渫土と反応して強度を発現する. また, 製鋼スラグ混合土の強度発現特性は養生時間によって, 強度発現準備期, 前期強度発現期, 後期強度発現期の 3 段階に分けられる⁷⁾. 固化メカニズムに関しては主に 2 つの要因があるとされている⁸⁾. 1 つはスラグ中の CaO が土中の水と水和反応を起こして Ca(OH)₂ を生成する際の発熱により水分が蒸発する消化吸水反応である⁹⁾. 2 つ目はポゾラン反応である. ポゾラン反応とは, スラグの水和反応により生成された Ca(OH)₂ と浚渫土中のシリカが化合し, 固化に寄与するカルシウムシリケート系水和物 (C-S-H) を生成する反応である¹⁰⁾. さらに, 珪藻由来シリカは鉱物由来シリカより早く強度を発現するため¹¹⁾, 同様のスラグを使用しても浚渫土の化学特性により強度発現特性が異なる.

以上のように, 固化メカニズムや強度発現特性に焦点を当てた研究は数多くなされているが, 製鋼スラグ混合土の海水環境下における劣化特性(長期安定性)に関す

る知見は十分でない。セメント改良土の場合、海水に曝露すると、海水中の $MgCl_2$ や $MgSO_4$ が改良土内の $Ca(OH)_2$ と反応して $Mg(OH)_2$ を析出し、 $CaCl_2$ や $CaSO_4$ が溶出することで力学的劣化に至ることが知られている（図-1）¹²⁾。製鋼スラグはセメントと類似した特性を有するので、セメント改良土と同様の機構で劣化すると推測される。しかし、海水に曝露した製鋼スラグ混合土に対して強度試験や浸漬水のイオン分析を行い、海水環境下での劣化特性や長期耐久性を検討した事例は報告されていない。

本研究では、製鋼スラグ混合土を海水に曝露した際の強度発現特性や劣化機構について検討する。そのため、3種類の浚渫土で作製した製鋼スラグ混合土と比較対象として選定したセメント改良土に対して一軸圧縮試験や浸漬水のイオン分析を行った。

2. 使用材料

本研究では、広島県竹原市沖に位置する大崎上島周辺の2ヶ所と福山港で採取した計3種類の浚渫土を用いた。浚渫土の物理特性を表-1に、XRF解析より得られた元素組成を表-2に示す。大崎上島で採取した物性の異なる浚渫土を区別するため、高液性シルトに分類される浚渫土を大崎1、高液性粘土に分類される浚渫土を大崎2とする。なお、試験では2mmのふるいで裏漉しして貝殻などを取り除いた試料を使用した。

固化材には、普通ポルトランドセメントと転炉系製鋼スラグを用いた。スラグの物理的性質を表-3に示す。試験で用いたスラグは遊離石灰 f-CaO の含有率が6.02%であり、最大粒径を850 μm に調整したものをを用いた。製鋼スラグ混合土の添加率は体積比で管理されることが多いが、本研究では添加率の計算を簡略化するため質量比で添加しており、体積比で添加する場合より添加量が少なくなるため、反応性を高める観点からふるい分けにより粒径の小さいスラグのみを用いることとした。図-2に浚渫土と製鋼スラグの粒度分布を示す。

3. 試験方法

3.1 供試体の作製

本研究で作製した供試体の配合を表-4に示す。本研究では、各浚渫土にセメント、スラグをそれぞれ8%、30%（質量比）添加して供試体を作製した。本試験ではスラグを質量比で添加したが、体積比では10%程度に、また、セメント添加率は100 kg/m³に相当する。なお、セメント、スラグともに湿潤状態の浚渫土に対して所定量添加している。

供試体の作製では、浚渫土の含水比が液性限界の1.5倍になるよう塩分濃度3.5%の人工海水を用いて調整し、所

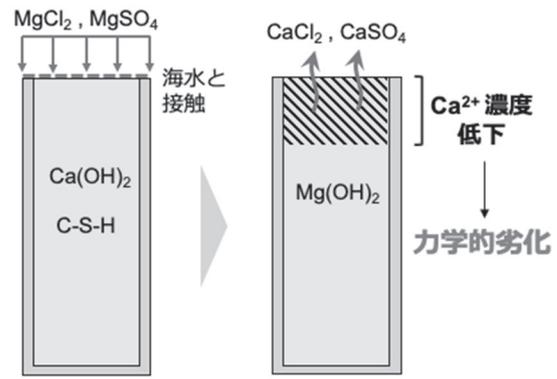


図-1 海水曝露したセメント改良土の劣化機構¹²⁾

表-1 浚渫土の物理特性

	ρ_s (g/cm ³)	WL (%)	WP (%)	Ip
大崎1	2.59	52.9	31.7	21.1
大崎2	2.50	98.2	36.7	61.5
福山港	2.60	128.7	36.9	91.8

表-2 浚渫土の元素組成（単位：%）

	大崎1	大崎2	福山港
Si	47.3	42.1	55.3
Al	15.2	12.8	8.4
Ca	13.0	10.3	4.1
Fe	9.6	12.6	20.3
K	6.6	5.4	7.6
Cl	6.1	13.9	0.0
Others	2.1	2.9	4.5

表-3 製鋼スラグの物理的性質

表乾密度 (g/cm ³)	3.18
絶乾密度 (g/cm ³)	3.05
吸水率 (%)	4.16
粒径	850 μm 以下
遊離石灰 (%)	6.02

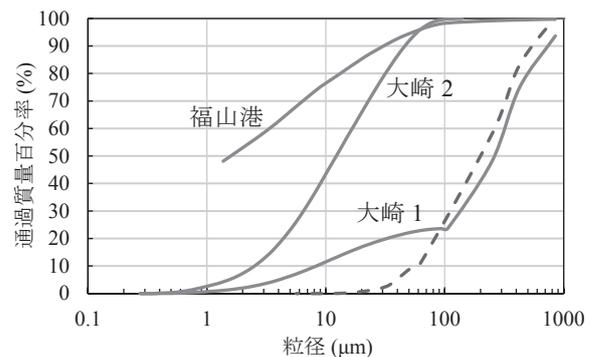


図-2 粒径加積曲線（実線：浚渫土、点線：スラグ）

定量の浚渫土と固化材をハンドミキサーで5分間程度混合した。混合後はプラスチックモールド($\phi=35\text{ mm}$, $H=80\text{ mm}$)に3層に分けて投入し、各層25回タッピングすることで気泡を除きながら充填した。作製後の供試体は室温 20°C の室内で28日間気中養生を行い、その後の試験に用いることとした。養生後、全供試体本数の3分の1に対して一軸圧縮試験を行い、供試体のばらつきも含めた海水曝露前の一軸圧縮強度を測定した。载荷速度は $1\%/\text{min}$.で行い、得られた応力-ひずみ曲線から変形係数 E_{50} を求めた。海水浸漬後の供試体は接触面から深さ方向に向けて順次軟化しているが、本研究では応力-ひずみ関係に劣化特性が表れるかの評価も兼ねて劣化部分を取り除くことなく、曝露後の試験体をそのまま用いて一軸圧縮試験を行うこととした。

3.2 海水曝露試験¹³⁾

28日間気中養生した脱型後の供試体側面をゴムスリーブ、底面をパラフィルムで覆い、ビニールテープで固定して上面からのみ海水による劣化が進行するようにした。その後、150 mlの人工海水をプラスチックカラム($\phi=50\text{ mm}$, $H=160\text{ mm}$)に満たし、供試体を浸漬させることで曝露試験を行った。なお、カラムの上面はラップで覆い蒸発を抑制することとし、 30°C の恒温槽内で28日間および90日間曝露させることとした。曝露期間中は1~2週間ごとに海水を交換・採取し、所定の分析を行った。海水曝露試験の模式図は図-3に示す通りである。所定の期間曝露させた後、曝露前と同様の手順・条件で一軸圧縮試験を実施する。なお、ゴムスリーブを取り外す際に劣化した供試体が乱れる可能性を考慮し、今回はゴムスリーブを取り外さずに装着したままです試験を行うこととした。ゴムスリーブによる影響を検討するため、28日養生後の供試体を対象にゴムスリーブの有無による強度差を比較した結果、供試体ごとのバラつきの範囲内に収まることを確認している。

先述した通り、製鋼スラグ混合土はセメント改良土と同様の機構で劣化すると推測されるため、供試体から海水に溶出したカルシウムイオン量と、海水から供試体に浸入したマグネシウムイオン量を測定し、曝露後の最大圧縮応力との相関を検討した。採取した浸漬水は $0.2\ \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターで濾過して懸濁物を除去し、ポータブル測定器(製造元:ハンナインスツルメンツ)を用いてカルシウムイオンとマグネシウムイオンの濃度を測定した。なお、測定時の検液は装置の測定範囲にあわせて蒸留水で10倍に希釈したものをを用いた。

4. 試験結果と考察

4.1 最大圧縮応力

一軸圧縮試験によって得られた海水曝露前、28日曝露後、90日曝露後の最大圧縮応力の結果を図-4に、曝露前

表-4 供試体の配合

ケース	浚渫土	固化材	添加量 (質量比)
1	大崎 1	セメント	8%
2	大崎 2		
3	福山港		
4	大崎 1	スラグ	30%
5	大崎 2		
6	福山港		

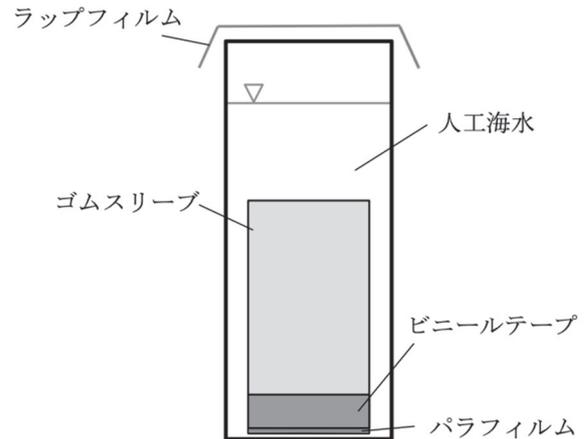


図-3 海水曝露試験の模式図

後の最大圧縮応力増加率を表-5にそれぞれ示す。

セメント改良土、製鋼スラグ混合土ともに浚渫土(採取場所)によって海水曝露期間中の応力増進および劣化特性が異なる傾向が認められた。また、全ケースで28日曝露後までは応力が増進しているが、セメント改良土および製鋼スラグ混合土の一部について90日曝露後に最大圧縮応力が低下する傾向が認められた。今回試験を行ったセメント8%、スラグ30%の配合において、製鋼スラグ混合土は90日曝露しても曝露前と比較して応力増進および維持の傾向が強く、セメント改良土は一部の例外はあるものの海水曝露によって長期的に劣化が進行する可能性があることが明らかとなった。

以下、地点ごとに考察することとする。

高液性粘土である大崎2を用いたケース2,5はセメント改良土、製鋼スラグ混合土ともに28日曝露後から90日曝露後にかけて最大圧縮応力が低下する傾向が認められた。ケース2,5は曝露前、最も高強度であったが、曝露後の応力の伸びは最も小さい。特にケース2は、90日曝露後に約1/2まで最大圧縮応力が低下した。ケース5は大きく低下はしていないものの、製鋼スラグ混合土のなかでは唯一低下が認められる結果となった。

高液性シルトに分類される大崎1を用いたケース1,4は曝露前の強度が大崎2(ケース2,5)と比較して低いが、曝露期間中に最も応力が増進している。

この原因としては、XRF解析より得られた元素組成が示す通り、大崎2と比較して若干ではあるがケイ素、ア

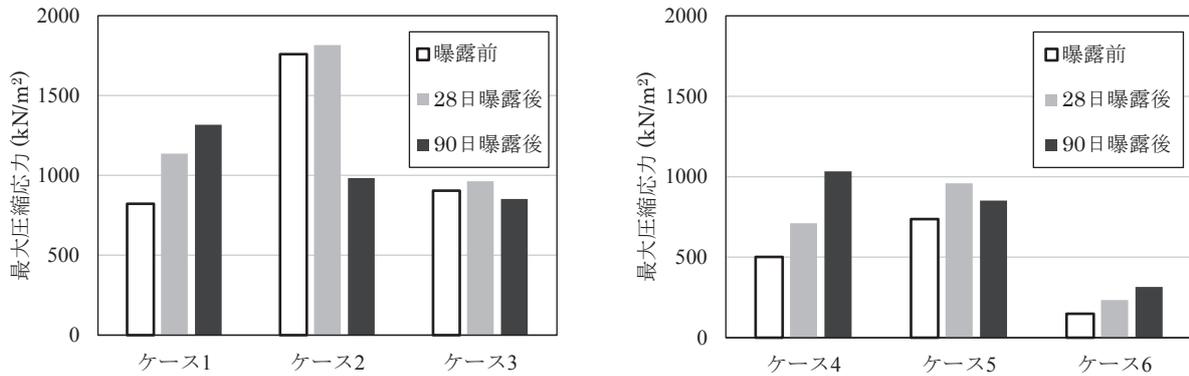


図-4 一軸圧縮試験の結果 (左：セメント改良土，右：製鋼スラグ混合土)

ルミニウム、カルシウムの含有率が高いことが可能性の一つとして挙げられる。ケース 3 については 28 日曝露後、わずかに応力増進が認められ、90 日曝露後も同程度となった。ケース 6 は曝露前に極めて低強度であったが、曝露期間中はケース 4 と同様、順調に応力が増加している。

以上の結果より、浚渫土の元素組成と海水環境下での強度増進には関わりがあることが明らかとなった。

また、曝露前に高強度を発現していた浚渫土は、その後の応力増加が緩慢になり、海水環境下で劣化が進行しやすい危険性があることが示唆された。この原因としては、浚渫土が含有している非結晶シリカの種類と関連があると推測される。既往研究より、珪藻由来のシリカを多く含む浚渫土は、火山ガラス由来のシリカを多く含むものより強度発現が早いことが分かっている¹⁴⁾。今回は大崎 2 の強度発現が最も早かったことから、大崎 2 が含有するシリカは珪藻由来シリカの割合が高く、そのためシリカが早期に消費され、長期耐久性に優れなかったと考えられる。

また、曝露前に対する 28 日曝露後の応力増加率が小さいケースは 90 日曝露後には最大圧縮応力が低下する傾向が示された。本試験では、表-5 に示した(28 日)/(曝露前)の値がセメント改良土では 1.07 以下、製鋼スラグ混合土では 1.30 以下で曝露 90 日後の劣化が確認できる。したがって、28 日気中養生後および 28 日海水曝露後の最大圧縮応力を求めることで、海水環境下での耐久性をある程度予測できる可能性が期待できることが明らかとなった。しかし、今回は浚渫土のサンプルが 3 種類のみであることに加え、セメントとスラグの添加率が大きく異なるため、今後は異なる地点で採取した浚渫土を用い、セメント添加率を増やすなど様々な配合で同様の試験を行い、曝露前に対する 28 日曝露後の応力増加率と長期耐久性に相関があるか、また、浚渫土の元素組成と強度の相関関係なども確認する必要がある。

4.2 応力—ひずみ曲線

各ケースの応力—ひずみ曲線を図-5 に、そこから求められる変形係数 E_{50} と曝露時間の関係を図-6 にそれぞれ

表-5 曝露前後の最大圧縮応力増加率

ケース	(28 日) / (曝露前)	(90 日) / (曝露前)	(90 日) / (28 日)
1	1.38	1.60	1.16
2	1.03	0.61	0.54
3	1.07	0.94	0.88
4	1.42	1.96	1.45
5	1.30	1.40	0.89
6	1.58	2.13	1.35

示す。なお、図-5 に示す応力—ひずみ曲線は、最大圧縮応力が平均値に最も近い供試体の挙動を各ケースの代表としている。

ほとんどのケースにおいて、曝露期間が長くなるにつれて破壊ひずみが大きくなり、供試体が劣化（表面部が軟化）していることが確認できた。ただし、ケース 1 は 28 日曝露後より 90 日曝露後の方が破壊ひずみが小さく、全体の傾向とは異なっている。最も増加率が高いケース 1, 4 は他の試験ケースと比較して曝露後の破壊ひずみが小さいことから、破壊ひずみ（軟化部分の量）と劣化の間には関連性が期待できる結果となった。同様に、90 日曝露後の最大圧縮応力が曝露前より低下していたケース 2, 3 は 5%程度と大きなひずみが発生し、曝露面から軟化していることが推測できる。また、セメント改良土は曝露前後で挙動が大きく変化しているのに対し、製鋼スラグ混合土はいずれのケースも破壊ひずみは 2%程度に抑えられている。

変形係数について、セメント改良土は E_{50} が曝露期間中に大きく低下し、製鋼スラグ混合土と同程度まで低下する傾向にあることが明らかとなった。一方の製鋼スラグ混合土は曝露期間が増加した場合でも大きく変動することはなく、ほぼ同じ値を維持する傾向が認められた。今回試験を行った配合において、一軸圧縮試験で得られた結果と同様にセメント改良土は海水環境下において劣化しやすく、逆に製鋼スラグ混合土は長期的に効果が期待できる可能性があることが E_{50} から確認できた。

本試験では、海水接触面から深さ方向にかけて劣化が進行した均質でない状態の供試体を対象とし、さらに供試体が乱れないよう側面をゴムスリーブで覆った状態で

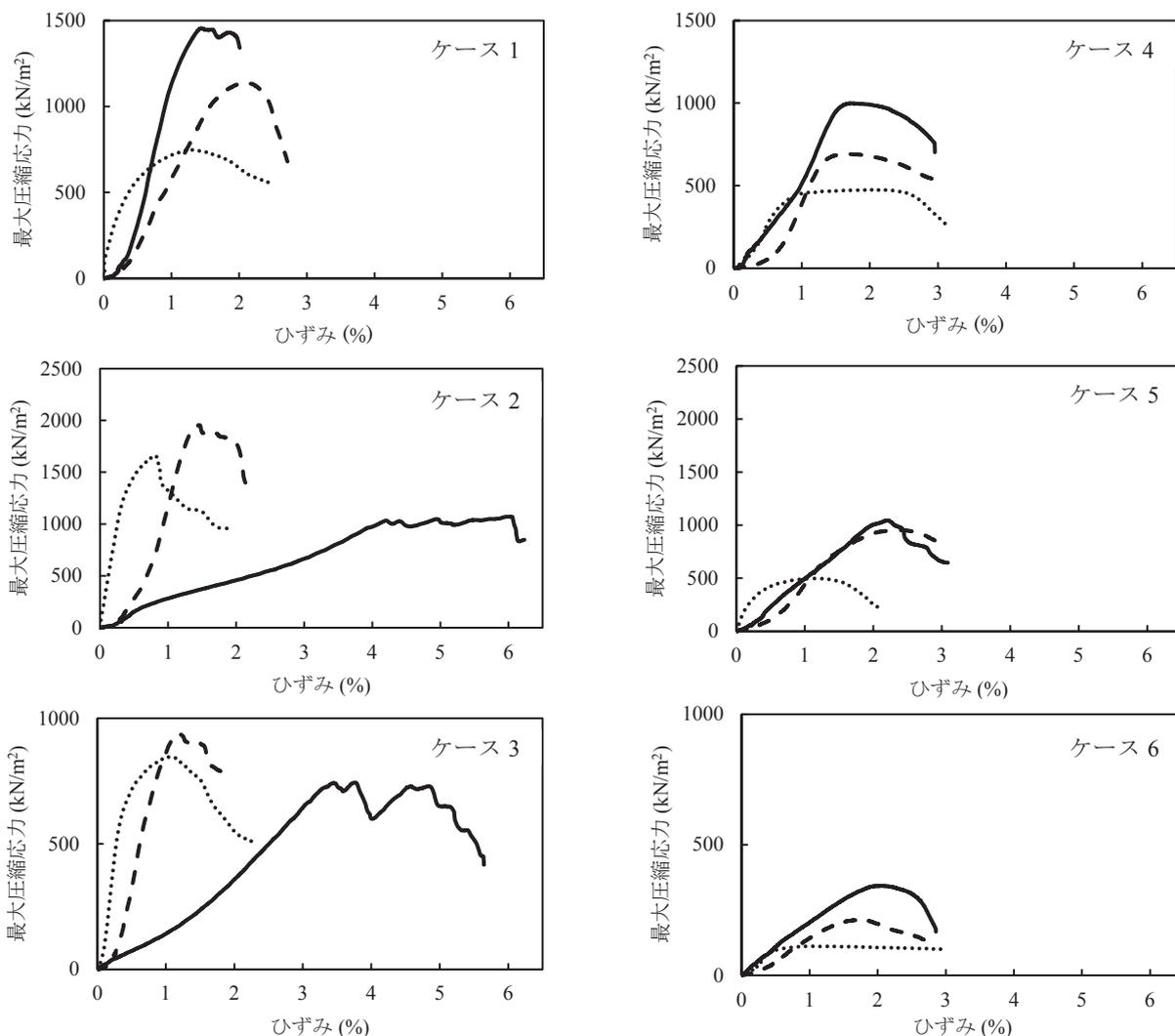


図-5 各試験ケースの応力-ひずみ曲線 (点線：曝露前，破線：28日曝露後，実線：90日曝露後)

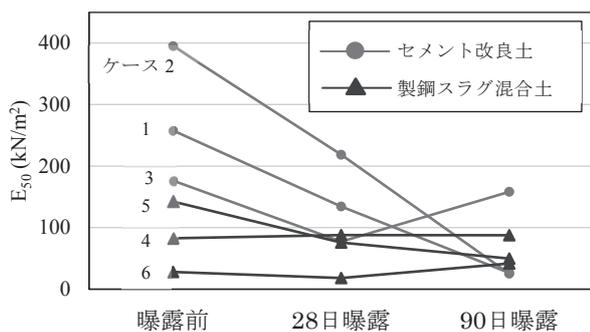


図-6 曝露時間と E₅₀ の関係

一軸圧縮試験を行って応力-ひずみ関係を求めている。この試験方法を用いることで、一軸圧縮試験から得られる最大圧縮応力と応力-ひずみ曲線より、劣化特性に関する情報を同時に得ることができる可能性が示された。従来はコーン貫入試験による劣化深さ測定と、コーン貫入試験後に劣化部を除去して一軸圧縮試験を行うなど分けて試験を行っていたが、本試験で用いた手法で劣化特性および供試体強度の把握が可能になると、試験の簡略化が期待される。しかし、供試体ごとにバラつきが生じ

やすいのも事実であるため、どの程度の数の供試体に対して試験を行えば信頼性の高い知見を得られるかなど、試験方法自体の信頼性評価に関する追加試験を行う必要があると考えている。

4.3 カルシウム/マグネシウムイオン分析

28日間および90日間供試体を浸漬していた人工海水のイオン分析結果を図-7, 8に示す。供試体から海水に溶出したカルシウムイオン量と供試体が海水から吸収したマグネシウムイオン量については、浸漬水に含まれる各イオン濃度から使用した人工海水のカルシウム・マグネシウムイオン濃度を差し引くことで算出し、それを mol 単位に換算する形で求めた。

既往研究では、カルシウムとマグネシウムのイオン交換によって力学的劣化に至るとされており¹²⁾、特にカルシウムの溶出が劣化の進行に大きく関係しているとされている。セメント改良土であるケース 1~3 を比較すると、ケース 2 のカルシウム溶出量が最も大きい。これはケース 2 の応力増進が抑えられた要因の一つであると考えられる。セメント改良土において、カルシウムイオン

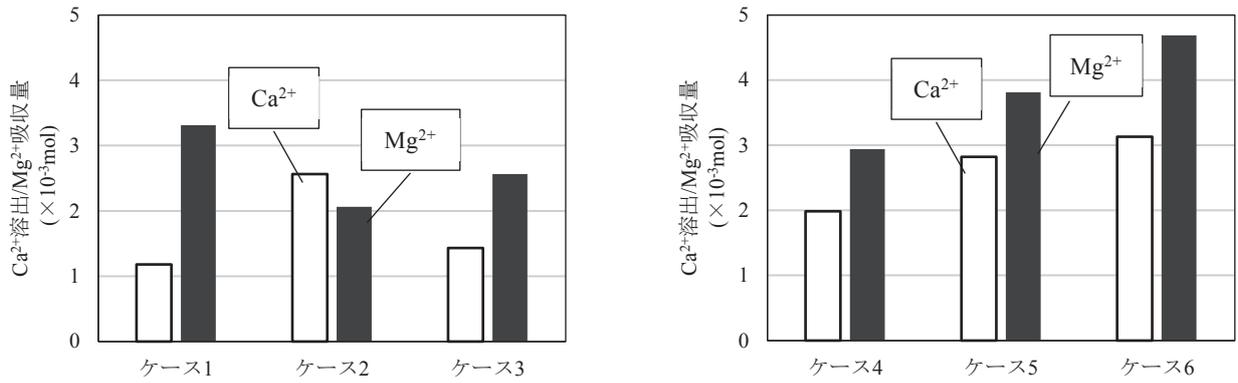


図-7 28日曝露後のイオン分析結果

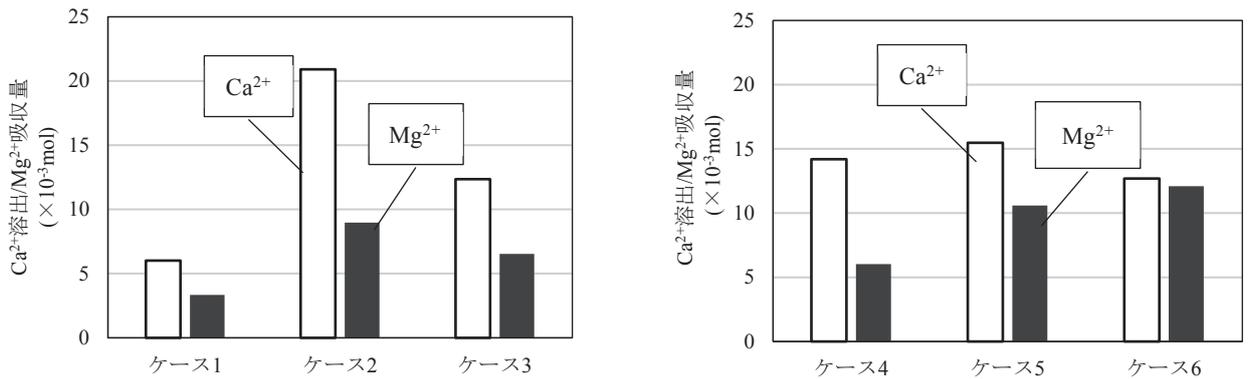


図-8 90日曝露後のイオン分析結果

溶出量は一軸圧縮試験より得られた応力増加率と同様の傾向を示しているが、マグネシウムイオン吸収量との整合性が認められない結果となった。製鋼スラグ混合土では、カルシウムイオン溶出量とマグネシウムイオン吸収量は同様の傾向を示しており、最も劣化の少ないケース4は溶出したカルシウムイオン量および吸収したマグネシウムイオン量ともに少ないことが認められた。

28日曝露後の結果では、ケース2を除いてカルシウムイオン溶出量に対してマグネシウムイオン吸収量が多い。90日曝露後の結果では、セメント改良土は応力増加率が高いケースほどカルシウムイオンの溶出およびマグネシウムイオンの吸収量が少なく、特にカルシウムイオンでその傾向が顕著であることが明らかとなった。製鋼スラグ混合土のカルシウムイオン溶出量はセメント改良土と比較して採泥地によるバラつきが少ない結果となった。また、全てのケースにおいてマグネシウムイオン吸収量に対してカルシウムイオン溶出量が多い傾向があるが、これは28日曝露後とは逆の結果を示すものである。一方で、セメント改良土を365日浸漬した先行研究¹²⁾とは同様の傾向である。

以上の結果より、セメント改良土では28日曝露後のマグネシウムイオン吸収量の結果を除いて応力増加率とイオン溶出/吸収量に関係があることが認められた。

一方、製鋼スラグ混合土では一部のケースについてセメント改良土と同様の傾向が認められたものの、全体として傾向が同一であるとは考えにくい結果となった。し

たがって、製鋼スラグ混合土とセメント改良土では異なる劣化機構を有する可能性があると考えられる。

また、大半のケースで28日曝露後はマグネシウム吸収量がカルシウム溶出量を上回っていたが、90日曝露後は逆に全てのケースにおいてカルシウムイオン溶出量がマグネシウムイオン吸収量を上回る結果となった。このことは、曝露初期は供試体がマグネシウムを吸収する量が多く、長期になると供試体からカルシウムが溶出する特性を示していると推測される。初期には海水中のマグネシウムイオンが供試体に浸入し、何らかの結晶鉱物を生成させた後にカルシウム分が溶出するまでには時間差がある可能性があると考えている。

しかし、今回の配合ではセメントとスラグの添加率が大きく異なることや、析出した結晶鉱物が未確認であること、また養生温度が30℃で一定であることなど考慮すべき点が多いことから、今後は固化材そのものに含まれる可溶性成分の比較や養生条件なども考慮した試験によって現象をより詳細に把握する必要があると考えている。

4.4 最大圧縮応力増加率とイオン溶出/吸収量の関係

一軸圧縮試験より得られた最大圧縮応力増加率とイオン分析により得られたカルシウムイオン溶出/マグネシウムイオン吸収量の関係について、28日曝露後を図-9に、90日曝露後を図-10にそれぞれ示す。

当初はイオン溶出/吸収量が少ないほど増加率（28日/曝露前）が高く、海水曝露による劣化が少ない結果にな

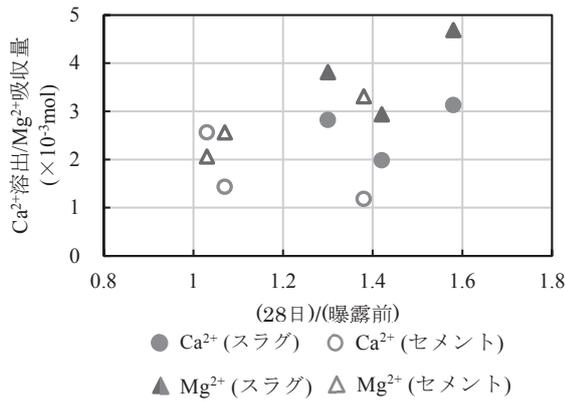


図-9 強度増加率とイオン量の関係 (28日曝露後)

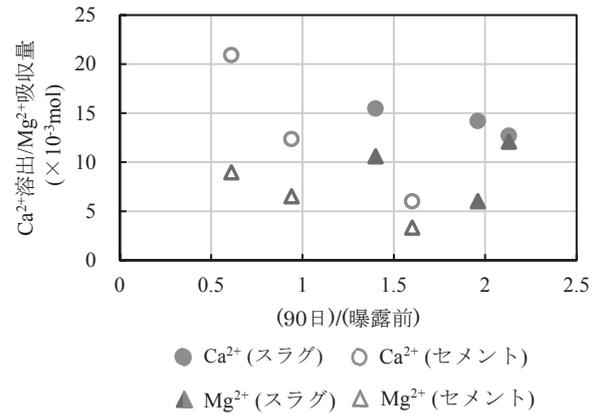


図-10 強度増加率とイオン量の関係 (90日曝露後)

ると予測していた。しかし、28日曝露後の結果では、カルシウムイオンの相関係数（以下R）は0.28と弱い正の相関にとどまった。マグネシウムイオンについてはR=0.86とその傾向が顕著であった。また、スラグ混合土のカルシウム/マグネシウムイオンの決定係数（以下R²）はそれぞれ0.11, 0.33であるのに対し、セメント改良土は0.51, 0.95であり、スラグ混合土はバラつきが大きい傾向にある。

90日曝露後の結果では、応力増加率とカルシウムイオン溶出量の間には負の相関(R=-0.48)が確認された。また、スラグ混合土はカルシウム/マグネシウムイオンそれぞれR²=0.91, 0.00であり、セメント改良土はR²=0.94, 0.99である。28日曝露後と同様にセメント改良土の方がバラつきが小さいことから、セメント改良土と製鋼スラグ混合土では異なる劣化機構を有している可能性がある。

以上の結果より、海水曝露による劣化が進行するのはイオン溶出/吸収量と応力増加率の間に強い相関関係が表れてからだと考えられる。今回の養生条件では90日曝露後で28日曝露後よりも強い相関が表れたが、一軸圧縮試験でも応力低下が確認されたのは90日曝露後だったことから試験結果とも合致する。

また、今回の配合において、製鋼スラグ混合土はセメント改良土と比較してイオン交換による影響を受けにくい可能性が示唆された。この原因としては、セメント改良土と比較して製鋼スラグ混合土は添加量が多いため長期にわたってC-S-Hが生成されることなどが考えられ、今後は異なる配合でも同様の試験を行うなどしてデータを拡充し、劣化抑制のメカニズムを明らかにしていく必要がある。

5. 結論

本研究では、製鋼スラグ混合土の海水環境下での長期耐久性をセメント改良土と比較するため、3種類の浚渫土を用いて作製した供試体を海水に曝露させ、一軸圧縮試験やイオン溶出/吸収量の測定を行った。以下に本試験

より得られた知見をまとめる。

- (1) 浚渫土によって海水環境下での応力増進傾向および劣化特性は異なる。
- (2) 一軸圧縮試験より得られる応力-ひずみ曲線より、劣化具合をある程度推測することができる。
- (3) 海水中のマグネシウムイオンが供試体に侵入してから供試体内のカルシウムイオンが溶出するまでに時間差がある可能性がある。
- (4) 今回の試験条件では、製鋼スラグ混合土の方が応力増進が大きく、また、固化材によって異なる劣化機構を有していると考えられる。

以上より、製鋼スラグ混合土は海水環境下における長期耐久性が十分に期待できることが示された。製鋼スラグ混合土の海水環境下における強度発現挙動や劣化特性は未解明な点が多いため、本研究で得られた知見が港湾域における製鋼スラグ混合土の利用促進に寄与できることを期待している。

一方、本試験で用いた浚渫土は3種類、配合は2種類のみであることからさらなる知見の集積は必須であり、今後は異なる物性、元素組成の浚渫土を用いた追試により強度発現・劣化抑制メカニズムについての理解を深める必要がある。

具体的には、カルシウムイオン溶出量とマグネシウムイオン吸収量が時間経過とともに逆転する原因、セメント改良土と製鋼スラグ混合土で形成される結晶鉱物の違い、さらには製鋼スラグ混合土が海水で劣化する際のイオン溶出/吸収量と応力の相関が弱い要因などについて取り組むことが必須と考えられ、これら追加の試験実施を通じてSDGsの達成に向けた取り組みの一つである製鋼スラグ混合土の利用促進に貢献していきたい。

謝辞

本研究の実施にあたり、広島大学大学院先進理工系科学研究科社会基盤環境工学プログラムのJoyce Nakayengaさんから結果の解釈などを、広島大学防災・減災研究センター特任教授の土田孝先生から貴重な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鐵鋼スラグ協会: 環境資材 鉄鋼スラグ, <https://www.slg.jp/publication/slag.html>, 11 版, 2019, (参照 2022.4.30) .
- 2) 堀井和弘, 堤直人, 北野吉幸, 加藤敏朗: 製鋼スラグ処理と資源化技術, 新日鉄技報第 394 号, pp.125-131, 2012.
- 3) 山越陽介, 赤司有三, 北野吉幸, 木曾英滋, 小杉知佳, 三木理: カルシア改質土の基本特性, 新日鉄住金技報第 399 号, pp.51-58, 2014.
- 4) 武岡英隆, 速水裕一, 兼田淳史: 瀬戸内海における環境の長期変動, 沿岸海洋研究, 第 43 巻, 第 1 号, pp.45-50, 2005.
- 5) 安部太紀, 土田孝, 熊谷隆宏, 菊原紀子: 波浪作用下における粘性土地盤の不安定化と含水比の変化, 公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集 地盤と建設, Vol.29, No.1, 2011.
- 6) 木曾英滋, 辻井正人, 伊藤公夫, 中川雅夫, 五明美智男, 永留健: 転炉系製鋼スラグの混合による浚渫土の固化改良技術, 海洋開発論文集, 第 24 号, 2008.
- 7) Arlyne Aristo Cikmit, 土田孝, 姜庚吾, 嘉數浩靖, 本田秀樹: 製鋼スラグを用いて固化処理した浚渫海成粘土の強度発現特性, 公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集 地盤と建設, Vol.35, No.1, pp.93-100, 2017.
- 8) 赤司有三, 山越陽介, 小門武, 戸田賀奈子, 勝見武: カルシア改質土の強度発現における浚渫土砂と転炉系製鋼スラグの相互影響の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.16, No.3, pp.179-190, 2020.
- 9) 小嶋利司: 石灰と土質安定処理, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan 14, pp.255-260, 2007.
- 10) 田澤栄一: コンクリート工学改訂新版, 朝倉書店, 2015.
- 11) Yuka Kakihara, Yoshiaki Kikuchi, Shohei Noda, Takamune Yamaguchi, Risa Tomimatsu, Kosuke Nakayama, Tomotaka Yoshikawa: Effect of amorphous silica content in clay on mechanical properties of the mixture of clay and converter steelmaking slag, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 8th Japan-China Geotechnical Symposium, pp.1-6, 2020.
- 12) 原弘行, 末次大輔, 林重徳, 松田博: 海水に曝露したセメント処理土の劣化機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集 C(地盤工学), Vol.69, No.4, pp.469-479, 2013.
- 13) 生駒聖, 畠俊郎, 八木光晴, 千手智晴: MICP を利用したセメント改良土の劣化抑制技術の粘性土に対する適用性評価, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.76, No.2, I_618- I_623, 2020.

(2022 年 6 月 13 日 受付)