

配合の異なる製鋼スラグ混合土の耐久性評価を目的とした室内海水曝露試験

Experimental study on mixture of clay and converter steel-making slag under seawater exposure

大槇 望未¹⁾, 畠 俊郎²⁾, 栗津 進吾³⁾

1) Nozomi OMAKI, 博士課程前期, 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)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は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, スラグの配合が異なる供試体を室内で人工海水に曝露する海水曝露試験を 24 週間行い, 一軸圧縮試験や Ca^{2+} 溶出/ Mg^{2+} 吸着量などを測定した. 30°C で曝露した結果, 試験期間内では製鋼スラグ混合土の劣化は認められず, また, 海水曝露による劣化部は 40~60% 程度の範囲でカルシウムが損失しており, それ以降は深さ方向に劣化が進行する可能性があることを示唆する結果が得られた.

キーワード: 浚渫土, 製鋼スラグ, 海水曝露試験

(IGC: D-02, D-06, D-10)

1. はじめに

現在, 我が国では年間およそ 3500 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, CO_2 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が期待されている. 以前は道路用路盤材やセメント用材料としての利用が中心であったが, 社会情勢の変化から近年では適用範囲が拡大されている²⁾.

その一例として, 港湾で行われる浚渫工事によって発生する浚渫土と鉄鋼スラグの一種である製鋼スラグを混合した製鋼スラグ混合土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天然石砂が使用されてきた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⁾. 製鋼スラグ混合土はその代替材として研究が進められてきた. 一方, 港湾整備事業では喫水より水深が浅くなると航行に支障が生じるため一定の水深を保つ維持管理や, 最近の船舶の大型化にともなう岸壁の延伸・泊地の拡張整備によって大量の浚渫土砂が発生するが, 高含水比で施工性が低いため, その処理方法が課題となっている⁵⁾. 製鋼スラグ混合土を従来の地盤材料の代替として利用できる範囲が拡大すると, 利用方法や処分が課題となっている材料を再利用するという点で環境問題解決への第一歩となるであろう. そのためには未知な点が多い製鋼スラグ混合土に関する知見の収集が不可欠である.

製鋼スラグ混合土の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. 1 つはスラグ中の CaO が土中の間隙水と水和反応を起こして $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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⁶⁾. 2 つ目はポズラン反応である. ポズラン反応とは, スラグの水和反応により生成された $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と浚渫土中の SiO_2 (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⁷⁾. さらに, 浚渫土より溶出するシリカのうち珪藻由来シリカが多い場合は鉱物由来シリカより早く強度を発現するため⁸⁾, 同様のスラグを使用しても浚渫土の化学特性によって強度発現特性が異なることなどが分かっている. 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 段階に分けられると報告されている⁹⁾.

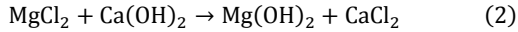
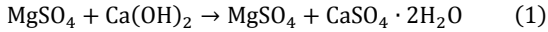
以上のように, 固化メカニズムや強度発現特性に焦点を当てた研究は数多くなされているが, 海水環境下における劣化特性や強度発現特性に関する知見は十分でない.

以前, 筆者らは製鋼スラグ混合土の室内での海水曝露試験を行い, 海水環境下における長期耐久性に関する基礎的知見を得た¹⁰⁾. 浚渫土による劣化特性の違いや応力増進傾向をセメント改良土と比較したが, その際に対象とした製鋼スラグ混合土の配合は最大粒径が $850\ \mu\text{m}$ となるよう粒度調整したものであり, また固化材添加率は混合土全体に対する体積比で 10% 程度と実現場で採用されている配合 (体積比で 30~40%) と比較してかなり貧配合なものであった.

本研究では, より実現場で用いられる配合に近い条件で製鋼スラグ混合土供試体を作製し, 室内における海水曝露試験を通じて, 海水環境下における強度発現特性や劣化機構について検討することを目的としている. 本文では, 筆者らの既往研究¹⁰⁾より得られた結果と本試験の結果の比較等を通じて新たに得られた知見を報告する.

2. セメント改良土の劣化機構

セメント改良土を海水に曝露した際の劣化機構の模式図を図-1に示す¹¹⁾。セメント改良土の劣化要因は海水に含まれる $MgCl_2$ や $MgSO_4$ といったマグネシウム塩であり、これらが改良土内の $Ca(OH)_2$ と以下の式(1), (2)の化学反応を起こすことでカルシウム分の溶出が引き起こされて力学的劣化に至る。



また、石灰処理土を海水に浸漬させた際に海水との接触面に生じる白色析出物が緻密な構造によってカルシウムの溶出を抑制し、劣化が進行しなかった例も報告されている¹²⁾。この析出物は主にマグネシウムと酸素で構成されているため、 $Mg(OH)_2$ が主成分だと推測される。また、改良土中のカルシウム分が海水中の炭酸イオンと反応することで得られる $CaCO_3$ も含まれている。これはセメント硬化体を人工海水に浸漬した実験よりカルサイトの結晶構造を持つことも明らかとなっている¹³⁾。

これらを踏まえ、本研究では、力学的試験から得られる強度発現特性とカルシウム・マグネシウムに着目した化学的試験から得られる内部状態の変化にどのような相関があるかを検討し、製鋼スラグ混合土の長期耐久性についての知見を深めることを目的とする。

3. 試験方法

3.1 供試体の作製

本研究では、徳山港で採取した浚渫土を用いて供試体を作製した。浚渫土の物理特性を表-1に、蛍光X線分析(以下XRF分析)より得られた元素組成を表-2に示す。試験では2mmのふるいで裏漉しし、貝殻などを取り除いた試料を用いた。固化材として使用した転炉系製鋼スラグの物理特性を表-3に、元素組成を表-4に示す。図-2は浚渫土とスラグの粒度分布を表している。表-5は比較対象とする以前筆者らが行った試験(ケースa, bおよびc)と今回新たに行った試験(ケースA)の条件である。

以下に供試体作製の詳細を記す。浚渫土の含水比を液性限界の1.5倍に調整し、所定量のスラグを投入してハンドミキサーで5分間攪拌した。その後、試料をプラスチックモールド($\phi=35\text{ mm}$, $H=80\text{ mm}$)に3層に分けて充填し、各層25回タッピングすることで気泡を取り除いた。供試体は室温20°Cの部屋で28日間気中養生した。スラグの添加率は、スラグと浚渫土の混合物の全体積に対して体積比で30%になるよう以下の式(3)で添加した。

$$M = \left\{ \frac{R}{100} \times \left(\frac{m_s}{\rho_s} + m_w \right) \right\} / \left\{ \left(1 - \frac{R}{100} \right) \times \rho_{\text{slag}} \right\} \quad (3)$$

なお、Mは添加したスラグの質量(g)、Rはスラグの添加率(%), m_s は浚渫土中の土粒子の質量(g), m_w は浚渫土

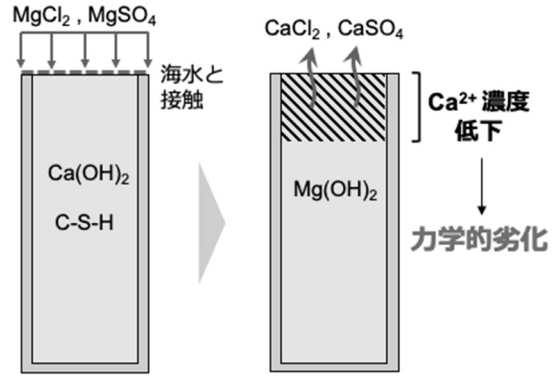


図-1 海水曝露したセメント改良土の劣化機構¹¹⁾

表-1 浚渫土の物理特性

	ρ_s (g/cm^3)	WL (%)	WP (%)	I_p	分類
徳山港	2.63	112.6	37.0	75.6	CH

表-2 浚渫土の元素組成

元素名		割合 (%)
ケイ素	Si	45.2
アルミニウム	Al	17.2
鉄	Fe	13.2
塩素	Cl	9.5
カリウム	K	6.4
カルシウム	Ca	5.4
その他		3.2

表-3 製鋼スラグの物理特性

表乾密度 (g/cm^3)	3.18
絶乾密度 (g/cm^3)	3.05
吸水率 (%)	4.16
遊離石灰含有率 (%)	6.02

表-4 固化材の元素組成

元素名		割合 (%)
カルシウム	Ca	59.5
鉄	Fe	30.7
ケイ素	Si	6.4
マンガン	Mn	2.2
その他		1.2

中の間隙水の質量(g)、 ρ_s は土粒子密度(g/cm^3)、 ρ_{slag} はスラグの表乾密度(g/cm^3)を表す。

3.2 海水曝露試験¹⁴⁾

上記の要領で作製した供試体に対して人工海水を用い

て室内で曝露した。以下にその手順を記す。モールドから脱型した供試体の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のみ海水と接するように施した。150 ml の人工海水を満たしたプラスチックカラム (φ=50 mm, H=160 mm) に供試体を浸漬させ、海水の蒸発を抑制するためラップフィルムを開口部に被せた。海水曝露試験の模式図を図-3 に示す。本試験では、反応を促進させる目的で実海域より高い温度である 30℃ に保った恒温槽内で 0~24 週間曝露した。曝露期間中は 2 週間ごとに海水を交換・採取し、4 週間ごとに供試体に対してその後の試験を実施した。採取した海水はディスマックフィルターで濾過したものを 200 倍に希釈し、原子吸光度計 (フレーム法) を用いてカルシウム/マグネシウムイオン濃度の測定を行った。

3.3 一軸圧縮試験

0~24 週間の曝露期間中、4 週間ごとに 3 本の供試体に対して一軸圧縮試験を行った。載荷速度は 1 %/min. である。曝露後の供試体は曝露面から深さ方向に向けて劣化してゆき、図-4 のように変色した劣化部が確認できる。本来、一軸圧縮試験は一様な要素に対して行うものであるが、スラグの粒子が大きく表面を平滑に削り取ることが難しいため、劣化部を削り取らずに試験を行い、最大圧縮応力によって材料特性を評価した。

3.4 XRF によるカルシウムの定量測定

一軸圧縮試験後の破壊した供試体を海水曝露によって軟化した劣化部と健全部に分け、検量線を用いてカルシウム量の測定を行った。なお、劣化部とは圧縮後に潰れて健全部に覆いかぶさるようになった部分と定義する (図-5 参照)。健全部については供試体内部の中心からサンプリングした。測定試料は、圧縮後の各部分を 105℃ の乾燥炉で完全に乾燥させた後に乳鉢で粉体にし、75 μm のふるいを通過した粉末試料 1 g をルースパウダー法によって作製した。装置にはエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 (EDX-700HS2: 島津製作所) を用いた。定量測定にあたり、ブランク (アルミ試料)、塩化カルシウム 1000 mg、塩化カルシウム 500 mg とホウ酸 500 mg の混合試料の 3 点で X 線強度とカルシウム量 (Ca g/1 g) の検量線を引き、決定係数が 0.891 と十分に有効であることを確認した。測定したカルシウム量より、以下の式(4)で劣化部におけるカルシウム損失量 $R_{loss}(\%)$ を求めた。

$$R_{loss} = \left\{ 1 - \frac{(\text{劣化部の Ca 量})}{(\text{健全部の Ca 量})} \right\} \times 100 \quad (4)$$

4. 試験結果

4.1 最大圧縮応力

一軸圧縮試験によって得られた最大圧縮応力と時間の

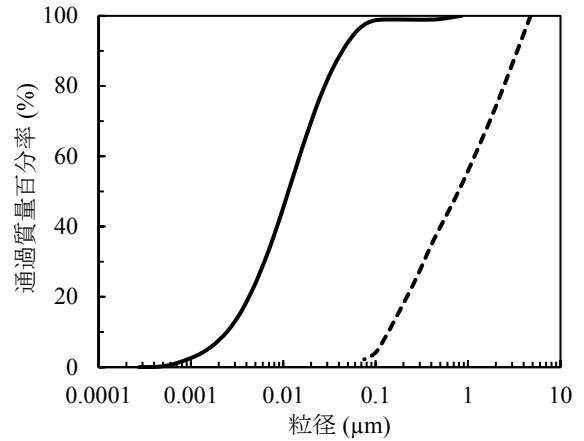


図-2 粒径加積曲線 (実線: 浚渫土, 点線: スラグ)

表-5 試験条件

ケース	A	a	b	c
採泥場所	徳山港	大崎 1	大崎 2	福山港
添加率	30 vol.%	10 vol.%		
最大粒径	4.75 mm	850 μm		
曝露時間	4~12 週 (4 週ごとに測定)	4, 12 週		

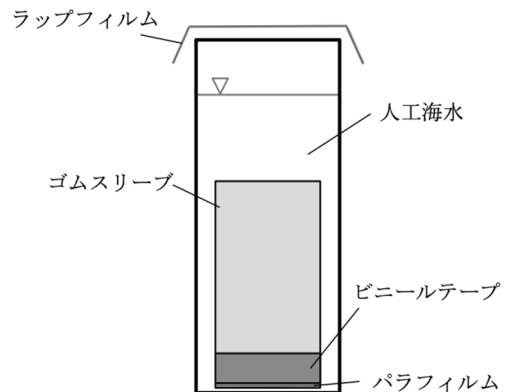


図-3 海水曝露試験の模式図



図-4 曝露後の供試体



図-5 圧縮後の供試体

関係を図-6 に示す。なお、測定結果は3本の平均値とした。4週間ごとに計7回一軸圧縮試験を実施したが、24週間にわたって順調に応力が増進し続けていることが確認できる。曝露後8週から12週にかけて応力の増加が緩やかになったが、その後400 kPa程度増加した。16週から20週の間も応力はほぼ変わらなかったが、24週では再び350 kPa程度増加した。本試験では約半年間、恒温槽で実海域より高い温度条件で反応を促進しながら海水曝露を行ったが、最大圧縮応力に関しては試験期間内では明らかな強度低下を確認できず、24週以降も応力が増進すると推察される。

図-7 は曝露前、4週曝露後、12週曝露後の最大圧縮応力を、表-6 は最大圧縮応力の増加率をケース a~c と比較した結果である。本試験ではスラグの粒径を比較対象より大きくし、添加率を3倍にした。ケース A の曝露前の結果を12週曝露期間を通して極端に応力が小さいケース c を除いたケース a, b と比較すると2倍前後高い最大圧縮応力となっている。曝露期間中における応力増加率は、スラグ添加率の低いケース a~c の範囲内に収まっており、海水環境下での応力増加率はスラグの配合の違いに依らないことを示唆している。また、範囲内ではあるがケース A は比較的高い増加率を示している。これはスラグ添加率の増加にともなってカルシウムの供給も増加し、カルシウム溶出が抑えられたためだと考えられる。ただし、スラグは潜在水硬性を有しており、海水環境下ではマグネシウム塩の浸透による劣化と並行して水中養生による強度発現が進行している。本研究では純水との比較試験を行っていないため、劣化と水硬性が混在した結果であることに留意する必要がある。先行研究には、潜在水硬性が高炉水砕スラグの物理特性に及ぼす影響を三軸圧縮試験によって検討した例がある¹⁵⁾。水道水および海水で0日~1年養生した結果、粘着力および内部摩擦角ともに日数の経過につれて増大し、それらは海水養生の方が高い結果が得られている。これについての原因は明らかとなっていないが、海水中のイオンとの反応で生成した水和物により間隙比が水道水養生よりも低くなっているためだと推察している。これにより、スラグは海水中でも劣化が進行しにくいことが示された。ケース A はケース a~c と比較してスラグの占める体積が非常に大きく、強度としては劣化が認められなかったのだと考えられる。また、ケース b では強度が低下しているため、スラグ混合土の劣化はスラグ粒子ではなくスラリー部分による影響が大きい可能性が高い。ケース A はスラグ添加率が高くスラリー部分は比較的少ないが、スラリー部分の劣化が混合土自体に与える影響は無視できず、今後は純水養生との比較試験や様々な粒径で試験を行い、劣化についての議論を深める必要がある。

4.2 カルシウム溶出量/マグネシウム吸着量

曝露期間中に供試体から人工海水に溶出したカルシウムイオンと人工海水から供試体に吸着したマグネシウム

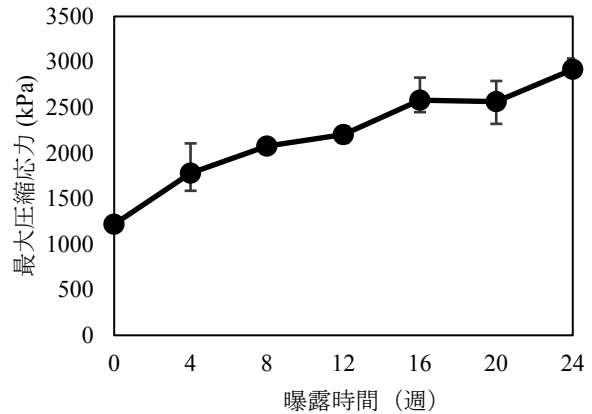


図-6 最大圧縮応力と曝露時間の関係

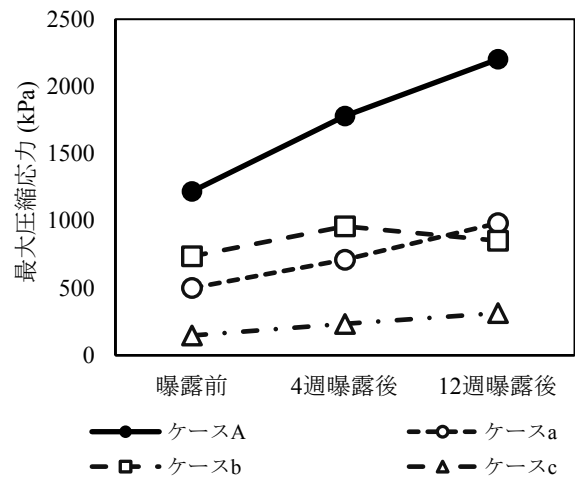


図-7 最大圧縮応力の比較

表-6 最大圧縮応力の増加率

ケース	(4週)/(曝露前)	(12週)/(曝露前)	(12週)/(4週)
A	1.46	1.81	1.24
a	1.42	1.96	1.38
b	1.30	1.16	0.89
c	1.58	2.13	1.35

イオンの時間変化を図-8 に示す。ここでは、浸漬水に含まれる各イオン濃度から使用した人工海水に含まれるイオン濃度を差し引くことで2週間あたりに供試体から溶出、供試体に吸着した濃度を求め、その総量を mol 換算している。なお、人工海水中のカルシウムイオン濃度は155 ppm、マグネシウムイオン濃度は324 ppmであった。また、正領域でカルシウムイオン溶出量を、負領域でマグネシウム吸着量を表している。カルシウムイオンに関して、曝露4週までとそれ以降で挙動が変化し、4週以降はほぼ一定の量が溶出している。一方、マグネシウムイオンは2週以降ほとんど変化しておらず、供試体にマグネシウムが吸着していないことが分かる。また、マグ

ネシウム吸着量がカルシウム溶出量と比較して過多であるのは、マグネシウム塩が供試体内に侵入することによって形成され、外部に溶出するカルシウム塩の他にスラグ中のカルシウム成分が溶出しているのではないかと考えられる。しかし、溶出量が吸着量を5倍程度上回っていることから別の要因が存在する可能性がある。

図-9に曝露12週までの各イオン総量の時間変化をケースa~cと比較した結果を示している。カルシウムイオンに関して、ケースAはスラグ添加量比其他ケースと比較して多いため最もカルシウム溶出量が高いと予想していたが、曝露4週まではケースa~cと同程度の溶出量であったにも関わらず4週以降ほぼカルシウムの溶出が見られなかったため、12週には最も溶出量が抑えられる結果となり、最終的には他ケースの半分程度にとどまった。マグネシウムイオンについては曝露期間を通してケースAが最も低く、他ケースの1/10~1/5程度を維持している。筆者らはケースa~cの曝露試験によって曝露4週まではマグネシウムイオン吸着量がカルシウムイオン溶出量を上回り、曝露12週では逆の結果を示すことから、海水中のマグネシウムイオンが供試体内でMg(OH)₂を形成し、カルシウム塩が溶出するまでには時間差がある可能性を指摘したが、本試験の配合ではそれに合致しなかった。今後はマグネシウムイオン吸着量が抑えられた原因に加え、粒径や添加率によるイオン溶出/吸収挙動の違いについて詳しく検討する必要がある。

4.3 劣化部/健全部におけるカルシウム量

表-7にXRF分析で定量した健全部/劣化部のカルシウム量と劣化部におけるカルシウム損失率を示す。なお、カルシウム量は採取したサンプル1g当りのカルシウム量(g)を示している。曝露8週を除き、曝露期間に関わらず劣化部は健全部に対して40%~60%程度カルシウム分が減少していることが分かる。この結果より、海水との接触面からカルシウム分がCaCl₂やCaSO₄といったカルシウム塩となって溶出するが、40%~60%程度カルシウム分が溶出するとそれ以上はカルシウム分が溶出せず、さらに深部にマグネシウム塩が浸透してカルシウム分の低い範囲が増大し、接触面から深さ方向にかけて同様に劣化する可能性が示唆された。また、図-6では強度劣化は確認されなかったが、先行研究と同様にカルシウム分が溶出しているため、水和反応と同時に劣化も進行していることが示された。しかし、先述した通り水和反応と劣化反応が混在しているのでどちらの反応が優位かは読み取れず、それを切り離した試験が必要である。これは供試体の骨格構造や曝露条件によって変化すると考えられるので、スラグ粒径や温度条件を変更するなどして検討する余地があると考えている。本来であればコーン貫入試験や針貫入試験で劣化深さを測定すべきであるが、スラグ粒子が貫入を阻害して正確に測定ができなかったため、今後は粒径の小さなスラグを混合した供試体を対象にコーン貫入試験を実施することなどを考えている。

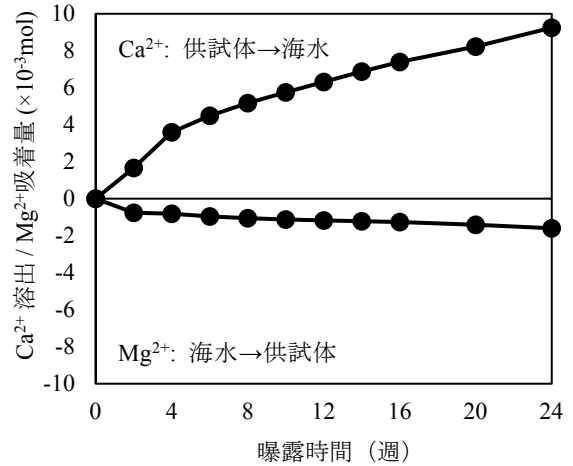


図-8 Ca²⁺溶出/Mg²⁺吸着量と時間の関係

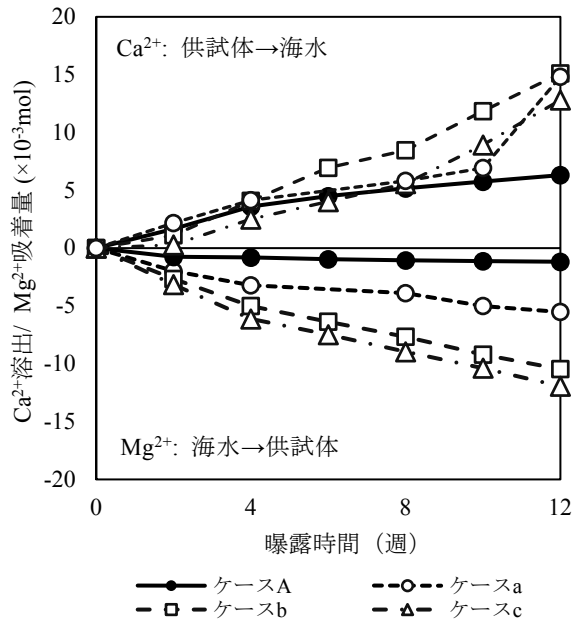


図-9 各ケースのCa²⁺溶出 / Mg²⁺吸着量の挙動

表-7 健全部/劣化部におけるカルシウム量

	健全部 (g)	劣化部 (g)	Ca 損失率 (%)
4 週	0.262	0.153	41.6
8 週	0.285	0.231	18.9
12 週	0.283	0.151	46.6
16 週	0.253	0.150	40.7
20 週	0.276	0.126	54.3
24 週	0.300	0.132	56.0

5. 結論

本研究では、実現場で適用されるものに近い配合で製鋼スラグ混合土供試体を作製し、恒温槽において反応を促進しながら海水曝露試験を行い、異なる配合の試験結

果と比較した。一軸圧縮試験やカルシウム・マグネシウムの分析によって得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 曝露期間中において、最大圧縮応力の増加率はスラグの添加率に依らず、一定の範囲に収まる可能性が高い。
- (2) カルシウム分が減少した劣化部は確認されたものの、劣化していない健全部の最大圧縮応力は増加し続け、供試体全体としての力学的劣化は認められなかった。
- (3) 最大粒径を 850 μm から 4.75mm に大きくし添加率を 3 倍に増やすと、最大圧縮応力が増加すると同時に、カルシウム溶出量が 1/2、マグネシウム吸着量が 1/5 ~ 1/10 程度に抑えられた。
- (4) 劣化部におけるカルシウムの損失率は 40%~60%程度であり、それ以上海水が浸透するとカルシウムは溶出せず深さ方向に劣化が促進する可能性がある。

以上のことが今回行った試験によって明らかとなったが、完全な対照試験の条件とはなっていないため、最大粒径や添加率、曝露温度など様々な条件で追加の試験を行い、知見を集積することは必須である。また、本試験で明らかとなった課題であるマグネシウムイオン吸着量がカルシウムイオン溶出量より抑えられる原因、粒径・添加率の違いによるイオン溶出/吸収挙動などを明らかにしていく必要がある。また、本研究では劣化範囲が曝露面から深度方向に徐々に拡大することが目視によって確認できたが、その定量には至っていないため、劣化深度と健全部の強度の増加傾向の違いなどの検討を考えている。今後は力学的試験だけでなく X 線を用いた化学分析などによって製鋼スラグ混合土の海水環境下での劣化挙動を明らかにし、さらなる製鋼スラグ混合土の適用範囲拡大を目指したい。

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 Dong Van Phong 氏に実験のサポートをして頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：環境資材 鉄鋼スラグ，<https://www.slg.jp/pdf/FS-183.pdf>，13 版，2022，(参照 2023.5.18)。
- 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) 江頭和彦，岩瀧清治，佐藤孝夫，片桐雅明，寺師昌明，吉福司：浚渫土埋立地を利用した新北九州空港の建設に関する課題とその対策，土木学会論文集 No.707/VI-55，pp.21-36，2002。
- 6) 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。
- 7) 田澤栄一：コンクリート工学改訂新版，朝倉書店，2015。
- 8) 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。
- 9) Arlyne Aristo Cikmit, 土田孝, 姜庚吾, 嘉数浩靖, 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。
- 10) 大槓望未，畠俊郎，栗津進吾：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，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.40, No.1, pp.57-64, 2022。
- 11) 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 (地圏工学)，Vol.69, No.4, pp.469-479, 2013。
- 12) 原弘行，末次大輔，松田博，亀井健史：海水曝露した石灰処理土の表面に生成される白色析出物とその劣化抑制効果，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol.73, No.2, pp.224-232, 2017。
- 13) 直町聡子，加藤佳孝：海水中の多種イオンを考慮したセメント硬化体の塩化物イオンの浸透性状，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.77, No.3, pp.78-91, 2021。
- 14) 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。
- 15) 松田博，来山尚義，高宮晃一，村上剛敏，中野恭夫：高炉水砕スラグの地盤改良材としての適用生に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.764, III-67, pp.85-99, 2004。

(2023 年 6 月 19 日 受付)