

カルシア改質土による炭素固定の基礎検討と CO₂排出量の試算

田中 裕一¹・田村 勇一郎²・山崎 彩花²

¹正会員 五洋建設（株）土木部門 環境事業部
（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）

E-mail: yuichi.tanaka@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 五洋建設（株）土木部門 環境事業部
（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）

カルシア改質土は、浚渫土と製鋼スラグを混合した材料であり、埋立材、干潟・浅場の造成材、深堀跡の埋戻材等として使用されている。製鋼スラグは鉄鋼製造工程における副産物であるため、カルシア改質土も CO₂ 排出量が少ない材料であるが、さらに脱炭素化を進める方法として、カルシア改質土の製鋼スラグに CO₂ を固定したり、炭素含有物を混合し炭素を固定する方法が考えられる。

そこで、配合試験を行い、CO₂ を固定した製鋼スラグを使用したカルシア改質土について CaCO₃ 含有率 6～8 % では強度が増加すること、炭酸カルシウムやバイオ炭を混合したカルシア改質土では強度が増加することを確認した。また、材料の CO₂ 排出量の試算を行い、CO₂ 固定スラグを使用したカルシア改質土やバイオ炭を混合したカルシア改質土ではカーボンネガティブとなることを確認した。

Key Words : converter steelmaking slag, steel slag-dredged soil mixture, Calcia improved soil, low carbon materials, CO₂ fixation, CO₂ emissions

1. はじめに

カルシア改質土は、浚渫土とカルシア改質材（転炉系製鋼スラグの成分と粒径を調整した材料）を混合した材料であり、強度発現、水中投入時の濁り発生抑制等の特徴がある（図-1）。「カルシア改質土技術マニュアル」¹⁾や「カルシア改質土工法積算マニュアル」²⁾が発行されており、埋立材、干潟・浅場の造成材、護岸の腹付材、深堀跡の埋戻材、潜堤材等として広く使用されている（図

-2）。また、これまでのカルシア改質土の累計施工量は、約200万m³となっている。

一方、近年ではカーボンニュートラル社会実現に向けて、港湾工事においても脱炭素化の取り組みが求められている⁴⁾。港湾工事では、材料の製造等から排出されるCO₂が最も多いため⁵⁾、脱炭素化を進める上で、低炭素型材料を使用することが重要となる。

カルシア改質土は、鉄鋼製造工程における副産物である製鋼スラグを使用することから、材料のCO₂排出量は

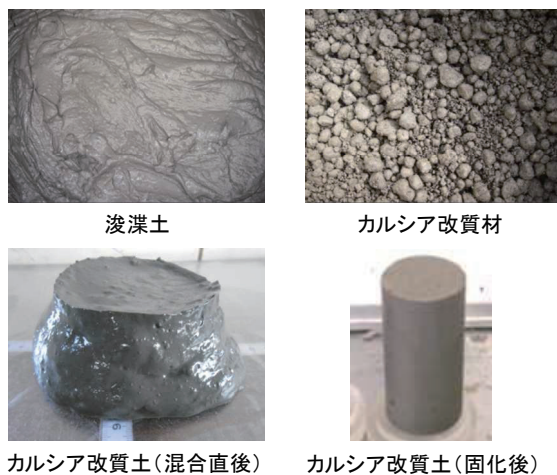


図-1 浚渫土・カルシア改質材とカルシア改質土

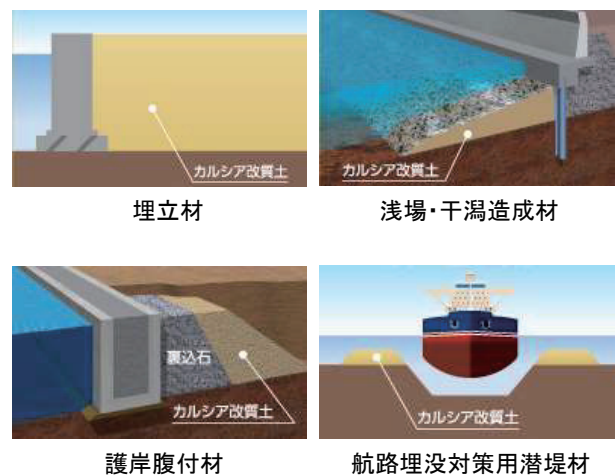


図-2 カルシア改質土の主な適用場所³⁾

セメント等と比較して小さい⁶⁾。このため、カルシア改質土を活用することは有効であると考えられる。

また、製鋼スラグにCO₂を供給することにより、CaCO₃として炭素を固定できることが報告されている⁷⁾。このようなCO₂を固定した製鋼スラグを使用してカルシア改質土を作成して海域で利用すれば、CO₂をCaCO₃として、カルシア改質土の固化体中で貯留することが可能である。

コンクリートでは、炭酸カルシウムやバイオ炭を混合することによりカーボンネガティブ化を目指す取り組みが行われており、カルシア改質土についても同様に炭酸カルシウムやバイオ炭の添加により、炭素を固定することも考えられる。

そこで、製鋼スラグ（以下、カルシア改質材についても製鋼スラグと記載する）にCO₂を固定したスラグを使用したカルシア改質土と炭素含有材料を添加したカルシア改質土について発現強度を確認するとともに、材料のCO₂排出量の試算を行った。

2. 実験材料と方法

(1) 製鋼スラグのCO₂固定とCO₂固定カルシア改質土

実験に使用した製鋼スラグと浚渫土の材料特性を表-1に示す。粒径2mm以下の製鋼スラグを温度25℃、湿度80%に設定したインキュベーターに入れ、所定のCO₂濃度で養生することによりCO₂を固定した作成した。また、炭酸塩含有量試験（海野ほか、2014.⁷⁾に記載の方法に準拠によりCaCO₃含有率を測定した。

含水比を1.5wLに調整した浚渫土に、CO₂を固定した製鋼スラグを20vol%の比率で混合し、CO₂固定カルシア改質土を作成した。CO₂固定カルシア改質土の供試体（Φ50mm×H100mm）について、7日、28日、91日養生後に一軸圧縮試験（JIS A 1216）を実施した。

また、EDS搭載走査型電子顕微鏡（SEM-EDS 日立ハイテク SU5000）により、CO₂処理前後の製鋼スラグとカルシア改質土について分析を行った。

表-1 製鋼スラグおよび浚渫土の性状

区分	項目	単位	数値	備考
製鋼スラグ	表乾密度	g/cm ³	2.90	JIS A 1109 JIS A 1110
	Ca含有率	%	32.4	蛍光X線分析
	f-CaO	%	8.4	エチレングリコール抽出分析法
	pH	—	12.6	JGS 0211
浚渫土	土粒子密度 ρ _s	g/cm ³	2.624	JIS A 1202
	含水比 w	%	98.0	JIS A 1203
	細粒分含有率	%	91.8	JIS A 1204
	液性限界 w _L	%	65.3	JIS A 1205
	強熱減量	%	7.5	JIS A 1226

(2) カルシア改質土への炭素材料の添加

粒径5mm以下の製鋼スラグを20vol%の比率で浚渫土と混合しカルシア改質土に対し、炭酸カルシウムとバイオ炭（市販のもみ殻くん炭）を外割りで添加し、炭酸カルシウム混合カルシア改質土とバイオ炭混合カルシア改質土を作成した。供試体（Φ50mm×H100mm）を作成し、7日および28日後に一軸圧縮試験を行った。

なお、バイオ炭は、燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物であり、白炭、黒炭、竹炭、粉炭、オガ炭、もみ殻くん炭等がある。木材は生長過程で大気中のCO₂を固定していることから、バイオ炭を農地土壌へ施用することで、難分解性の炭素を土壌に貯留する活動がJ-クレジット制度の対象として認められている。

(3) CO₂排出量の試算

カルシア改質土やCO₂固定カルシア改質土、バイオ炭混合カルシア改質土について、各材料のCO₂排出原単位と改質土の配合条件をもとに、改質土の材料としてのCO₂排出量を計算した。

また、比較としてセメント改良土のCO₂排出量を計算した。カルシア改質土と同等の強度が得られると配合として、中川ほかの報告⁶⁾と同様に高炉セメントB種を100kg/m³添加した条件を設定し、CO₂排出原単位は458.1kg-CO₂/t⁸⁾を使用した。

製鋼スラグのCO₂排出原単位として、2.6kg-CO₂/t⁹⁾を用いた。製鋼スラグへのCO₂の固定について、20tの製鋼スラグに対してブロワによりCO₂ガスを供給するものとして、ブロワの出力（15kw）×運転時間（3h）×東京電力の排出係数（0.457kg-CO₂/kWh¹⁰⁾としてCO₂排出量を計算した。ブロワに供給するCO₂ガスについて、プラント等の排気ガスを使用することを想定したため、供給するCO₂ガスを生産するためのCO₂排出量は加えないものとした。

バイオ炭によるCO₂の固定量は、コンクリートに対するバイオ炭混合における計算事例¹¹⁾に従い、(1)式、(2)式により算出した。

$$\text{バイオ炭によるCO}_2\text{固定量} = A - B \quad (1)$$

A: バイオ炭のCO₂貯留量

B: 原料収集・製造時のCO₂排出量

バイオ炭のCO₂貯留量

$$= \text{炭素含有率} \times 100 \text{ 年後の炭素残存率} \times 44/12 \quad (2)$$

バイオ炭の炭素含有率と100年後の炭素残存率はバイオ炭の種類によって異なるが、実験にもみ殻くん炭を使用したことから、もみ殻・稲わら由来の値、炭素含有率49%と炭素残存率65%を使用した¹²⁾。

原料収集・製造時の CO₂ 排出量が不明であったため、農家におけるバイオ炭の農地施用の報告例¹³⁾と山本ほかの報告¹¹⁾を参考として原料収集・製造時の CO₂ 排出量は、バイオ炭の CO₂ 貯留量の 10 %とした。

3. 実験結果

(1) 製鋼スラグの CO₂ 固定と CO₂ 固定カルシア改質土

実際の施工では、最大粒径 25 mm 程度の製鋼スラグを使用することが多いが、粒径が大きい材料が含まれると炭酸塩含有量試験の際、測定値のバラつきが大きくなるため、実験では粒径 2 mm 以下のものを使用した。

CO₂ 濃度 20 % の条件で製鋼スラグ 3 時間処理し CO₂ の固定量を変化させた製鋼スラグを作成した。CO₂ 処理時間と製鋼スラグの CaCO₃ 含有率を図-3 に示す。時間の経過とともに、初期に CaCO₃ 含有率は急激に増加し、処理 30 分後に 15.7 % に達し、その後の増加はゆるやかになった。

こうして作成した CO₂ 固定製鋼スラグを使用し、混合率 20 vol% の条件でカルシア改質土を作成したカルシア改質土の CaCO₃ 含有率と一軸圧縮強さの試験結果を図-4 に示す。

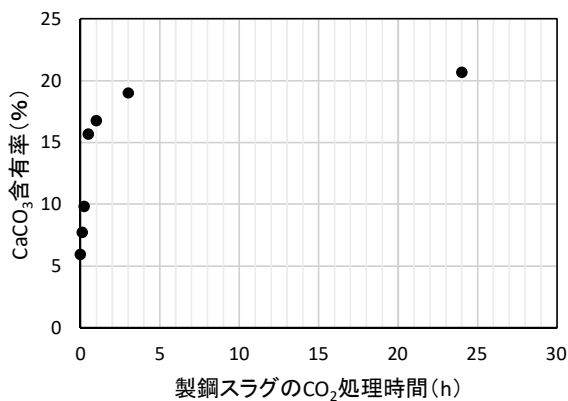


図-3 製鋼スラグの CO₂ 処理時間と CaCO₃ 含有率

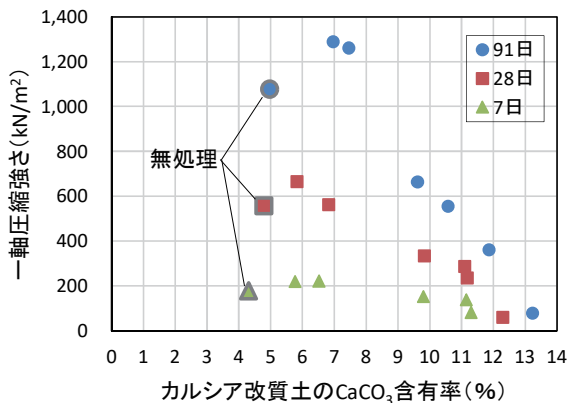


図-4 カルシア改質土の CaCO₃ 含有率と一軸圧縮強さ

なお、CO₂ を固定した製鋼スラグを用いてカルシア改質土を作成すると、土粒子で希釈されるため、カルシア改質土の CaCO₃ 含有率は低くなる。例えば、CaCO₃ 含有率 15.7 % の製鋼スラグ (図-3 の 30 分処理に相当) を 20 vol% の配合でカルシア改質土を作成すると、計算上のカルシア改質土の CaCO₃ 含有率は 7.8 % となる。

カルシア改質土中の CaCO₃ 含有率が 6~8 % の付近では、無処理の場合と比較して一軸圧縮強さが増加し、材令 28 日の強度は無処理の場合の 1.2 倍の強度となった。さらに CaCO₃ 含有率が大きくなると、強度は低下する傾向が見られた。

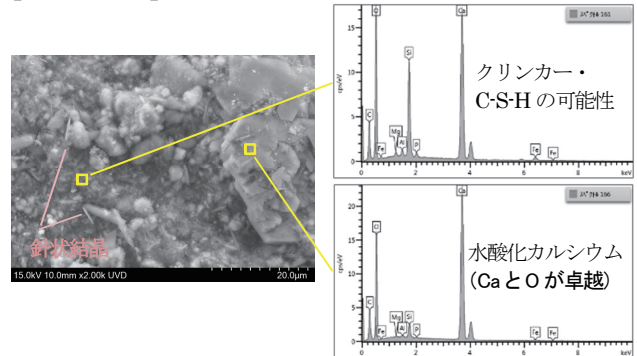
カルシア改質土は水和物の生成より強度を発現する¹⁾。カルシア改質土の CaCO₃ 含有率が 6~8 % を超えて大きくなると一軸圧縮強さが低下した原因として、水和反応に必要なカルシウムが、CaCO₃ 形成に使用され、不足したことが考えられる。

未処理の製鋼スラグと CO₂ 処理 (CO₂ 濃度 20 %, 処理時間 23 分) 後の製鋼スラグ表面の状況を図-5 に示す。未処理の製鋼スラグでは、水酸化カルシウムや Ca や Si が卓越した微細な針状結晶が見られるのに対し、CO₂ 処理後の製鋼スラグでは、水酸化カルシウムや針状結晶は少なく、CaCO₃ と考えられる物質が形成された。CaCO₃ は (3) 式の反応により生成されたものと考えられる。



未処理の製鋼スラグを使用したカルシア改質土と CO₂ 処理後の製鋼スラグを使用したカルシア改質土の表面の状況を図-6 に示す。カルシウムアルミネート系水和物等が認められたが、違いは明確とならなかった。

【未処理スラグ】



【CO₂ 処理スラグ】

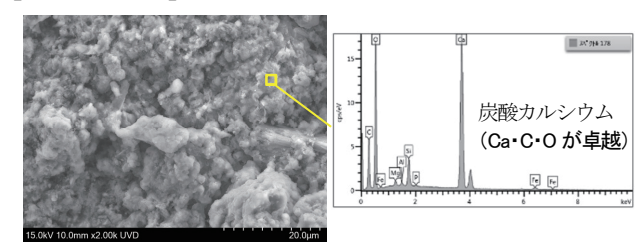


図-5 製鋼スラグ表面の状況

【未処理製鋼スラグ使用】

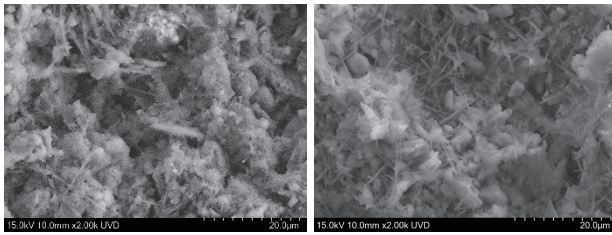
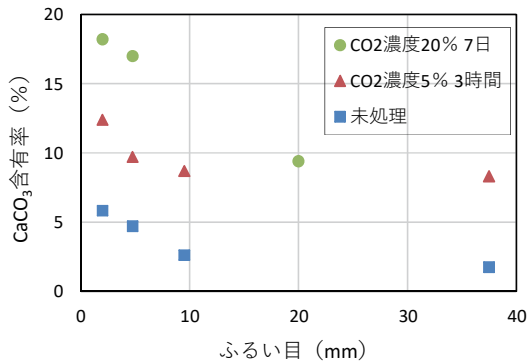
【CO₂処理製鋼スラグ使用】

図-6 カルシア改質土表面の状況

図-7 CO₂処理時間と製鋼スラグのCaCO₃含有率

最大粒径の異なる製鋼スラグについて、CaCO₃含有率を測定した結果を図-7に示す。CaCO₃含有率はCO₂濃度と処理時間によって変化するが、無処理の場合、CO₂濃度5%で3時間の条件で処理した場合、CO₂濃度20%で4日処理した場合とも、製鋼スラグの粒径が小さい程CaCO₃含有率は高くなった。

実際の施工で最大粒径25mm程度の製鋼スラグを使用する場合のCaCO₃含有率は、CO₂濃度20%・7日処理・ふるい目20mmの9.4%やCO₂濃度5%・3時間処理・ふるい目37.5mmの8.4%に近い値になると考えられる。

(2) カルシア改質土への炭素材料の添加

製鋼スラグを20 vol%となるように配合したカルシア改質土に対して、炭素含有材料として炭酸カルシウム、もみがらくん炭、もみ殻をそれぞれ50 kg/m³添加・混合した場合の一軸圧縮強さを図-8に示す。

カルシア改質土に炭酸カルシウムともみがらくん炭を添加したケースでは、一軸圧縮強さが大きく増加し、材令28日では、無処理の製鋼スラグを使用した場合の強度167.5 kN/m²と比較して3倍程度の値となった。一方、もみ殻を添加したケースでは、強度は2割程低下した。

炭素含有材料の添加量を25 kg/m³、50 kg/m³、75 kg/m³、100 kg/m³として配合試験をした結果を図-9に、フロー試験(NEXCO試験方法 試験法 313)の結果を図-10に示す。もみがらくん炭ともみ殻添加のケースでは、添加量の増加とともにフロー値が大きく低下したため、添加量の上限を100 kg/m³としたが、炭酸カルシウムは添加量をフローの低下が小さいため、添加量を増やし200 kg/m³の条件を設定した。

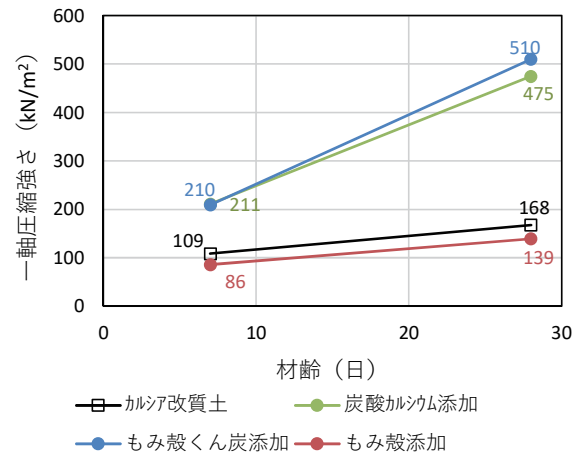
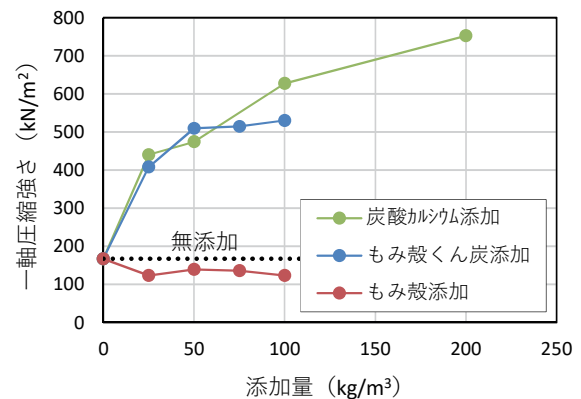
図-8 カルシア改質土と各材料50 kg/m³添加時の一軸圧縮強さ

図-9 炭素含有物添加量と改質土の一軸圧縮強さ

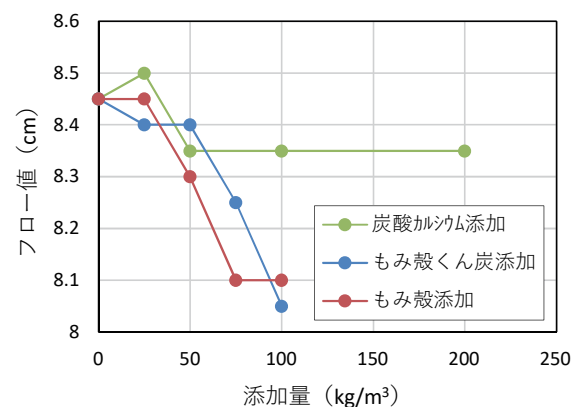
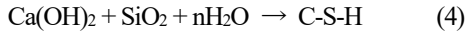


図-10 炭素含有物添加量と改質土のフロー値

もみがらくん炭では、50 kg/m³までは一軸圧縮強さが大きく増加したが、それ以上の添加量では強度は微増となった。これに対し、炭酸カルシウムでは200 kg/m³となっても強度の増加は続いた。

炭酸カルシウム添加による強度増加の原因として、コンクリートのCO₂処理やCO₂固定カルシア改質土と同様の水和物の形成による緻密化が考えられる¹⁴⁾。

カルシア改質土の強度発現は(4)式の水和反応に関わり、カルシウム分とともにシリカ溶出量が影響する^{15) 16)}。



もみ殻くん炭の添加による強度増加の原因は未確認であるが、もみ殻くん炭のSi含有量が19 % (蛍光X線分析の結果) と高いことから、この一部が溶出し、強度増加に寄与したことが考えられる。

一方、もみ殻を添加した場合、25 kg/m³～100 kg/m³の添加量で無添加の場合と比較して2 割程度低下した。カルシア改質土では、浚渫土の有機物含有量が強度に影響し、強熱減量が10 %を超えると強度発現が小さくなる傾向がある¹⁾。

浚渫土のセメント固化処理土では、有機物、特に腐植酸(フミン酸)が固化を阻害する要因になるが、カルシア改質土も同様に腐食酸が固化の阻害要因になり、有機物含有量の指標の一つである強熱減量が、固化の阻害を評価する上での重要なパラメータになると考えられる¹⁷⁾。

もみ殻の添加量が最も少ない25 kg/m³添加の場合を例にすると、水分が9.3 %¹⁸⁾の条件では1m³あたりの乾燥重量は22.7 kgとなる。このもみ殻の灰分を17.2 %¹⁸⁾とすると、強熱減量試験での減少分は22.7 kg×(1-0.172)=18.8 kgとなる。これが浚渫土に加わったとして、カルシア改質土1 m³中の土分(582 kg)に対する比率を求めると18.8 kg/582 kg=3.2 %となる。浚渫土の強熱減量の7.5 %にもみ殻の3.2 %を加えると10.7 %となり、前述の強熱減量10 %を超過することになる。このように、もみ殻添加による強度低下の要因としては、有機物含有率の増加が考えられる。

(3) CO₂排出量の試算

各改質土のCO₂排出量の試算結果を表-2と図-11に示す。浚渫土にセメント(高炉B種)を100 kg/m³添加して作成したセメント改良土のCO₂排出量は45.8 kg-CO₂/m³となる。

製鋼スラグ混合率20 vol%としたカルシア改質土中の製鋼スラグは0.2 m³であり、これに表-1の表乾密度と製鋼スラグのCO₂排出原単位をかけるとカルシア改質土のCO₂排出量は1.5 kg-CO₂/m³となった。

CO₂固定カルシア改質土のCaCO₃含有率は、実際の施工を想定し、製鋼スラグのCO₂固定量が過大評価とならないように、図-7の最大粒径37.5mm、CO₂濃度5 %・3時間処理のCaCO₃含有率8.4 %を用いた。この値は、未処理の製鋼スラグのCaCO₃含有率2 %程度を含んでいるが、転炉から排出された段階ではCaCO₃含有率は0 %であり、その後大気中のCO₂と反応してCaCO₃が形成されたと考えられることから、CO₂処理後の製鋼スラグのCaCO₃含有率の測定値をCO₂固定量として使用した。

CO₂固定カルシア改質土のCO₂排出量は、CO₂固定の

ために製鋼スラグの排出原単位がやや大きくなるもの、CaCO₃として固定されるCO₂が多いためマイナスとなり、-19.4 kg-CO₂/m³となった。

バイオ炭混合カルシア改質土のバイオ炭の添加量は、混合時の施工性を考慮し、フロー値の低下が少ない配合として、もみ殻くん炭の添加量50 kg/m³の場合のCO₂排出量を計算した。バイオ炭混合カルシア改質土のCO₂排出量の計算の結果、バイオ炭によるCO₂貯留量が多いため大きくマイナスとなり、-51.0 kg-CO₂/m³となった。

表-2 材料のCO₂排出量

項目	単位	数値	計算式
セメント改良土			
a セメントのCO ₂ 排出原単位(高炉B種)	kg-CO ₂ /t	458.1	
b セメント添加量	kg/m ³	100	
c セメント改良土のCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /m ³	45.8	a×b
カルシア改質土			
d 製鋼スラグのCO ₂ 排出原単位	kg-CO ₂ /t	2.6	
e 製鋼スラグ混合率	vol%	20	
f 製鋼スラグ混合量	kg/m ³	580	
g 改質土のCO ₂ 貯留量	kg-CO ₂ /m ³	1.5	d×f
CO₂固定カルシア改質土			
h CO ₂ 固定スラグのCO ₂ 排出原単位	kg-CO ₂ /t	3.0	
i CO ₂ 固定スラグのCaCO ₃ 含有率	%	8.3	
j CO ₂ 固定スラグのCO ₂ 含有率	%	4.4	i×44/100
k 改質土のCO ₂ 含有量	kg-CO ₂ /m ³	21.2	f×j
l 改質土のCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /m ³	-19.4	f×h-k
バイオ炭混合カルシア改質土			
m バイオ炭の炭素含有率(もみ殻くん炭)	%	49	
n 100年後の残存率(もみ殻くん炭)	%	65	
o バイオ炭のCO ₂ 貯留量	kg-CO ₂ /kg	1.17	m×n×44/12
p バイオ炭製造時のCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /kg	0.117	o×0.1
q バイオ炭のCO ₂ 固定量	kg-CO ₂ /kg	1.05	o-p
r 改質土へのバイオ炭添加量	kg/m ³	50	
s 改質土のCO ₂ 固定量	kg-CO ₂ /m ³	52.6	q×r
t 改質土のCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /m ³	-51.0	g-s

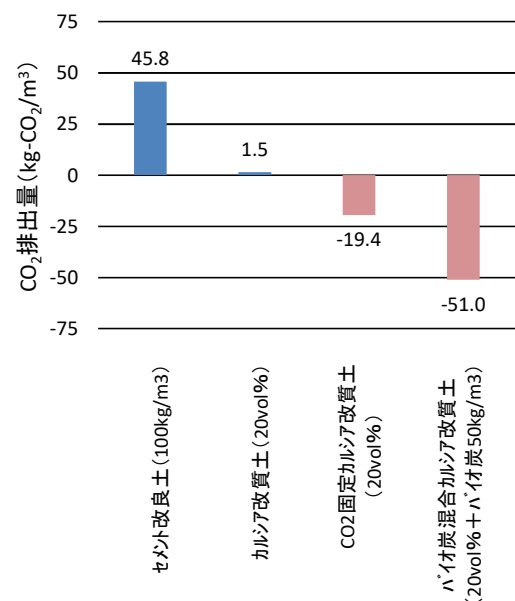


図-11 材料のCO₂排出量の比較

カルシア改質土の CO_2 排出量は、セメント改良土の 3 % 程度であり、もともと小さい値であるが、 CO_2 固定カルシア改質土やバイオ炭混合カルシア改質土とすることにより、 CO_2 排出量はマイナスとなり、計算上カーボンネガティブな材料となった。

また、カルシア改質土の 1 年間の施工数量を 30 万 m^3 とし、この全てを CO_2 固定カルシア改質土とした場合は $-19.4 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3 \times 300,000 \text{ m}^3 = 5,820 \text{ t-CO}_2$ が、バイオ炭混合カルシア改質土（バイオ炭添加量 50 kg/m^3 ）とした場合は $-51.0 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3 \times 300,000 \text{ m}^3 = 15,300 \text{ t-CO}_2$ の CO_2 が固定できる計算となった。

4. まとめ

CO_2 固定スラグを使用したカルシア改質土では、 CaCO_3 含有率 6~8 % に強度のピークがあり、それ以上の含有率では強度は低下した。また、炭酸カルシウムやバイオ炭を混合したカルシア改質土では強度が増加することを確認した。

CO_2 固定スラグを使用したカルシア改質土の強度増加の原因として水和物形成による緻密化等が考えられるが、メカニズムの解明は今後の課題である。一方、 CO_2 固定スラグの使用による強度低下の原因としては、 CaCO_3 形成による強度増加に寄与する水和物量の減少が考えられる。

CO_2 固定スラグや炭素含有材料を添加したカルシア改質土は、強度が必要な埋立材では CO_2 固定量が少ない製鋼スラグを使用し、強度に対する要求が小さい深堀跡の埋戻しでは CO_2 固定量が多い製鋼スラグを使用する等、用途に応じて CO_2 固定量を調整して利用することが可能である。

改質土の CO_2 排出量の試算の結果、 CO_2 固定カルシア改質土や炭素添加カルシア改質土は、 CO_2 排出量がマイナスとなり、カーボンネガティブな材料として使用できる可能性が示された。

今回の実験では、もみ殻くん炭を使用した。炭素含有率と 100 年後の炭素残存率が高いバイオ炭を使用することにより、カルシア改質土での CO_2 固定量を増やすことが可能である。例えば、オガ炭は炭素含有率 77 %、100 年後の炭素残存率 89 % であり、この値を使用すると、 CO_2 排出量は $-111.6 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ となり、もみ殻くん炭の 2 倍程度となる。

なお、バイオ炭の 100 年後の炭素残存率は、投入後 100 年間に分解・排出される有機炭素量を差し引いた値であるが、カルシア改質土中はアルカリ条件であり細菌数が少なく¹⁹⁾、微生物活動が抑制されるため、炭素残存率が高くなる可能性も考えられる。

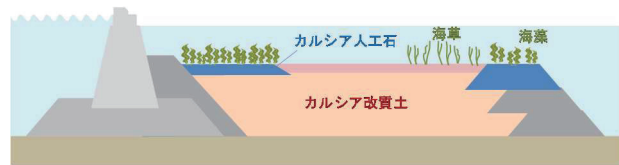


図-12 浅場造成による炭素固定とブルーカーボン生態系形成イメージ

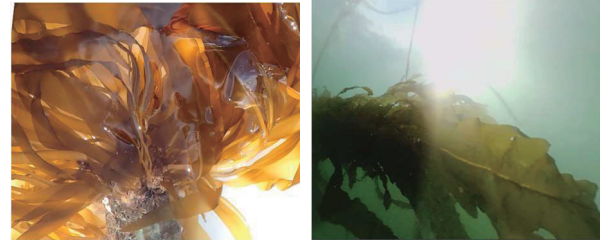


写真-1 人工石での海藻生育例

CO_2 固定カルシア改質土やバイオ炭混合カルシア改質土を海域で利用した場合、地中や海底等に回収した CO_2 を貯留する CCS よりも簡易的に、陸上のコンクリート等よりも大量かつ安定的に CO_2 を長期間貯留できる可能性がある。

また、 CO_2 固定カルシア改質土やバイオ炭混合カルシア改質土を用いて浅場を造成した場合、周辺や上部へ人工石を配置して海藻の生育基盤とし、あるいは覆砂をして海草の生育基盤を形成すること等により、ブルーカーボン生態系の形成し、さらに CO_2 を固定することも考えられる²⁰⁾ (図-12, 写真-1)。

REFERENCES

- 1) (一財) 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル，2017. [Coastal Development Institute of Technology : Technical manual for the use of steel slag-dredged soil mixture in ports, airports, coasts etc. , 2017.]
- 2) カルシア改質土研究会：カルシア改質土工法積算マニュアル（第2版 Ver.2.0），2021. [Calcia Improved Soil Association : Estimation manual for steel slag-dredged soil mixture(2nd edition Ver.2.0), 2021.]
- 3) カルシア改質土研究会：研究会ホームページ カルシア改質土の用途
[Calcia Improved Soil Association: Uses of calcia improved soil]
<https://calcia.jp/about/use.html>
- 4) 国土交通省港湾局産業港湾課：「港湾脱炭素化推進計画」作成マニュアル，54 p., 2023.
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001597599.pdf>
- 5) 辰巳大介・坂田憲治・川端雄一郎・中村董：工事発注段階の情報に基づく港湾工事における二酸化炭素排出量の全国推計，国土技術政策総合研究所資料，No. 1249，2023. [Tatsumi, D. Sakata, K. Kawabata, Y. and Nakamura, S.: Nationwide Estimation of the Amount of CO_2 Emissions from Port Construction Works Based on the Information Available at the Procurement Stage,

TECHNICAL NOTE of National Institute for Land and Infrastructure Management, No.1249, 2023.]

- 6) 中川雅夫, 田中裕一: カルシア改質土による地球温暖化対策への展望 -カルシア落下混合船と浅場・藻場造成への取り組み-, 建設機械施工, vol.73, No.11, pp.63-68, 2021. [Nakagawa, M. and Tanaka, Y.: Prospects for global warming countermeasures using steel slag-dredged soil mixture, *journal of JCMA*, vol.73, No.11, pp.63-68, 2021.]
- 7) 海野円, 小峯秀雄, 村上哲, 瀬戸井健一: 低炭素社会形成のための鉄鋼スラグの二酸化炭素固定化量の定量評価と二酸化炭素固定化メカニズムの推察, 地盤工学ジャーナル, vol.9, No.4, pp.469-478, 2014. [Umino, M. Komine, H. Murakami, S. and Setoi, K.: Carbon Dioxide Fixation Properties and Mechanism of Steel Slag in the Use for Formation of Low-carbon Society, *Japanese Geotechnical Journal*, vol.9, No.4, pp.469-478, 2014.]
- 8) 一般社団法人セメント協会: セメントの LCI データの概要, pp.8, 2023. [Japan Cement Association: Summary of LCI Data for Cement, pp.8, 2023.]
- 9) 中村董, 川端雄一郎, 辰巳大介: 港湾構造物の建設時における CO₂ 排出量算定に関する基礎的検討, 港空研資料, No.1399, pp.29, 2022. [Nakamura, S. Kawabata, Y. and Tatsumi, D.: Fundamental Study on the calculation of CO₂ emissions from construction of port structures, *Technical Note of the Port and Airport Research Institute*, No.1399, 2022.]
- 10) 環境省・経済産業省: 電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)ーR4 年度実績ー, 2023.
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r06_coefficient_rev2.pdf
- 11) 山本伸也, 幸田圭司, 清水和昭, 田中博一, 久保昌史: 環境配慮型コンクリート「SUSMICS-C」の開発ーバイオ炭を混和して炭素を貯留ー, 清水建設研究報告, 第101号, pp.15-24, 2023. [Yamamoto, S. Yukita, K. Shimizu, K. Tanaka, H. and Kubo, M.: Eco-Friendly Concrete [SUSMICS-C] -Mixing with Biochar to Store Carbon-, *Technical research report of Shimizu Construction Co., Ltd.*, Vol.101, pp.15-24, 2023.]
- 12) 農林水産省 農産局 農業環境対策課: バイオ炭をめぐる事情, 2024. <https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/attach/pdf/biochar-1.pdf>
- 13) 一般社団法人 日本クルベジ協会: Jークレジット制度モニタリング報告書バイオ炭の農地施用によるCO₂削減事業, 2022. https://japancredit.go.jp/pdf/certification/P00114_r1_1.pdf
- 14) 野口貴文: 世界のセメント・コンクリート業界の脱炭素動向, 廃棄物資源循環学会誌, vol.34, No.6, pp.381-390, 2023. [Noguchi, T.: Global cement and concrete industry Decarbonization trends, *Material Cycles and Waste Management Research*, vol.34, No.6, pp.381-390, 2023.]
- 15) 赤司有三, 山越陽介, 勝見武: カルシア改質土の強度発現予測のためのカルシウムとシリカの溶出試験法の提案, 地盤工学ジャーナル, vol.17, No.2, pp.171-180, 2022. [Akashi, Y. Yamagoshi, Y. and Katsumi, T.: Test method of calcium and silica eluted from material of steel slag-dredged soil mixtures for predicting strength development, *Japanese Geotechnical Journal*, vol.17, No.2, pp.171-180, 2022.]
- 16) 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, Vol.24, pp.327-332, 2008. [Kiso, E. Tsujii, M. Ito, K. Nakagawa, M. Gomyo, M. and Nagatome, T.: Method of dredged soil improvement by mixing with converter steel-making slag, *Proceedings of civil engineering in the ocean*, Vol.24, pp.327-332, 2008.]
- 17) 渡部要一・金子崇: 製鋼スラグ混合土の発現強度に及ぼす腐植物質の影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集, No.57, pp.89-94, 2017. [Watabe, Y. and Kaneko, T.: Influence of humic substances on strength development of dredged soil-steel slag mixture. *Technical Report of Japanese Geotechnical Society Hokkaido Branch*, No.57, pp.89-94, 2017.]
- 18) 釜田陽介, 横田修, 阿部剛士, 倉田雅人, 森田崇聖: もみ殻の水蒸気ガス化によるバイオシリカ材料の製造及びその吸着特性評価, 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会, C8-5-P, 2022. [Kamata, Y. Yokota, O. Abe, T. Kurata, M. Morita, T.: Preparation of bio-silica material by steam gasification of rice husk and evaluation of its adsorption characteristics, *33rd Proceedings of the Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management*, 2022.] https://www.jst-age.jst.go.jp/article/jsmcwm/33/0/33_257/_pdf/-char/ja
- 19) 田中裕一, 林正宏, 本田秀樹, 赤司有三, 斗沢照夫: カルシア改質土の化学性と植物・微生物への影響, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, VI-958, pp.1915-1916, 2018. [Tamura, Y. Hayashi, H. Honda, H. Akashi, Y. and Tozawa, T.: Chemical properties of calcia-improved soil and effects on plants and microorganisms, *Proceedings of the 73th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, VI-958, pp.1915-1916, 2018.]
- 20) 田村勇一朗, 山崎彩花, 田中裕一: 低炭素型カルシア人工石の開発とCO₂削減効果の検討, 土木学会論文集(海洋開発), vol.80, No.18, 投稿中, 2024. [Tamura, Y. Yamazaki, A. and Tanaka, Y.: Development of low-carbon calcia artificial stone and examination of its CO₂ reduction effect, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.80, No.18, submitted, 2024.]

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

Basic study of carbon fixation using steel slag-dredged soil mixture and trial calculation of CO₂ emissions

Yuichi TANAKA, Yuuichirou TAMURA and Ayaka YAMAZAKI

Calcia improved soil is a material that is a mixture of dredged soil and steelmaking slag, and is used as a reclamation material, a construction material for shallow areas, etc. Since steelmaking slag is a by-product, the CO₂ emissions of calcia improved soil are low. As a method for further decarbonization, it is possible to use calcia improved soil in which CO₂ is fixed in steelmaking slag or calcia improved soil in which carbon-containing substances are mixed.

As a result of mixing tests, the strength of calcia improved soil using steelmaking slag that fixed CO₂ increased when the CaCO₃ content was 6 to 8%, and the strength increased with calcia improved soil that mixed calcium carbonate and biochar. In addition, CO₂ emissions were negative for calcia improved soil using CO₂-fixing slag and calcia improved soil mixed with biochar.