

二酸化炭素吸収型カルシウム改質土を活用した
港湾工事における二酸化炭素排出量削減効果の
評価方法に関するガイドライン（案）

Ver. 1

神戸港湾空港技術調査事務所

港湾空港技術研究所

カルシウム改質土研究会

はじめに

建設業における建設現場での温室効果ガス（以下、「GHG」という）排出量（建設材料や建設関連貨物等のサプライチェーンを含む）は日本全体の概ね 1 割強を占め¹⁾、カーボンニュートラルの達成に向けて、工事における GHG 排出量の削減は急務である。港湾分野では、国土交通省港湾局が 2021 年 12 月に「港湾工事における二酸化炭素排出量削減に向けた検討 WG」を設置し、港湾工事における二酸化炭素（以下、「CO₂」という）排出量の算定方法の整備や削減に向けた取組みの方向性の検討等が行われている。また、国土交通省港湾局では、脱炭素化に配慮した港湾機能の高度化や水素・アンモニア等の受入環境の整備等を図るカーボンニュートラルポートの形成を推進しており、港湾工事の脱炭素化もその取組みとして位置づけられている^{2,3)}。

直轄港湾工事の年間 CO₂ 排出量のうち 73%が材料の製造に由来しており⁴⁾、港湾工事の脱炭素化に向けて、CO₂ 吸収型材料や低炭素型材料を積極的に活用していくことは極めて重要である。CO₂ 吸収型材料のひとつとして、CO₂ 吸収型カルシア改質土は、港湾工事で発生する建設副産物である浚渫土を用いるとともに、正味としてマイナスの CO₂ 排出量を達成するものである（詳細は第 2 章を参照）。CO₂ 排出量削減に加え、副産物利用の観点においてサーキュラーエコノミーの形成にも資する材料であり、港湾工事での有効な活用効果を期待することができる。

本ガイドラインは、CO₂ を吸収したカルシア改質材を浚渫土に混合した CO₂ 吸収型カルシア改質土を対象とし、CO₂ 吸収型カルシア改質土における CO₂ 吸収量の測定方法や CO₂ 排出原単位の算定方法、また、その活用による港湾工事全体としての CO₂ 排出量削減効果の算定に関する基本的考え方を示すものである。

内容

第1章	ガイドラインの概要	1
第2章	CO ₂ 吸収型カルシア改質土の定義	2
2.1	CO ₂ 吸収型カルシア改質土の定義	2
2.2	カルシア改質材によるCO ₂ 吸収/固定メカニズム	3
第3章	カルシア改質材のCO ₂ 吸収量の評価方法	4
3.1	カルシア改質材のCO ₂ 吸収量の評価の基本的考え方	4
3.2	分析用試料の前処理	4
3.3	熱重量測定による評価方法	4
3.4	無機炭素量分析による評価方法	6
第4章	CO ₂ 吸収型カルシア改質土のCO ₂ 排出原単位の算定方法	8
第5章	CO ₂ 吸収型カルシア改質土の活用による港湾工事のCO ₂ 排出量削減効果の算定方法	11
	参考文献	13
付録a	CO ₂ 吸収型カルシア改質土の活用による港湾工事におけるCO ₂ 排出量削減効果の評価例	14
付録b	CO ₂ 吸収型カルシア改質土の全CO ₂ 貯留量のモニタリング	19
付録c	施工中のカルシア改質材のCO ₂ 吸収量の品質管理	21

第1章 ガイドラインの概要

「二酸化炭素吸収型カルシア改質土を活用した港湾工事における二酸化炭素排出量削減効果の評価方法に関するガイドライン」(以下、「本ガイドライン」という)は、港湾の施設の整備において、従来材料の代替としてCO₂吸収型カルシア改質土を活用した場合のCO₂排出量削減効果の評価する際の基本的な考え方を示すものである。

CO₂吸収型カルシア改質土の活用にあたっては、その活用によるCO₂排出量削減効果を適切に評価することが重要である。適切な評価結果に基づき、活用の事前検討や事後評価を行うことは、活用の促進や港湾工事におけるCO₂排出量の効率的な削減に繋がる。CO₂吸収型カルシア改質土はCO₂排出原単位が正味としてマイナスとなる材料であるが(詳細は第2章を参照)、CO₂吸収型カルシア改質土の活用にあたっては従来材料と異なる施工を行う場合がある。このため、材料間の原単位の比較のみではCO₂排出量削減効果を適切に評価できず、施工由来のCO₂排出量も考慮した工事全体としてのCO₂排出量削減効果を評価することが重要である。

本ガイドラインでは、CO₂吸収型カルシア改質土を対象とし、CO₂吸収型カルシア改質土におけるCO₂吸収量の測定方法やCO₂排出原単位の算定方法、またその活用による港湾工事全体としてのCO₂排出量削減効果の算定に関する基本的考え方を示すものである。

第2章 CO₂吸収型カルシア改質土の定義

CO₂吸収型カルシア改質土は、CO₂を吸収したカルシア改質材を浚渫土に混合することで、浚渫土の物理的・化学的性状を改質するとともに、正味としてマイナスのCO₂排出量を達成する材料とする。

2.1 CO₂吸収型カルシア改質土の定義

カルシア改質土は、浚渫土とカルシア改質材、必要に応じて強度増進材を混合した材料であり、浅場や干潟等の造成材料や埋立柱材として用いられる。強度増進材とは、浚渫土とカルシア改質材のみを混合する場合と比べてカルシア改質土の強度を増進することを目的として添加するもので、一般に高炉スラグ微粉末が用いられる。以上の原材料のうち、浚渫土は港湾の浚渫工事で発生する建設副産物である。カルシア改質材と高炉スラグ微粉末は、ともに鉄鋼製造工程で生成する副産物であり、カルシア改質材は、製鋼工程で生成する転炉系製鋼スラグに、成分管理と粒度調整を施したものである。また、高炉スラグ微粉末は、製鉄工程で生成する高炉スラグに、乾燥や微粉碎処理等を施したものである。

カルシア改質土の原材料のうち、カルシア改質材や高炉スラグ微粉末については、各1tの製造（スラグ生成後の加工作業）にあたり2.6~3.0 kg-CO₂/tや24.1~52.7 kg-CO₂/tのCO₂が排出される（詳細は第4章を参照）。なお、スラグ生成過程におけるCO₂排出は鉄の製造を主目的としたものであるため、そのCO₂排出量は一般に全て鉄に分配され、副産物であるスラグには分配されない（JIS Q 13315-2）。浚渫土については、浚渫土発生後からカルシア改質土として施工されるまでに、基本的に加工作業を要さないため、その製造によるCO₂排出量はゼロである。なお、浚渫土の発生過程（浚渫工事）におけるCO₂排出は、航路維持等を主目的としたものであるため、建設副産物である浚渫土には分配されない。以上の各原材料のCO₂排出量を、混合割合に応じて足し合わせることで、カルシア改質土の原材料由来のCO₂排出量が算出される（図2.1の青字部分）。

以上の原材料のうち、カルシア改質材には酸化カルシウム等が含まれており、その炭酸化によりCO₂を吸収し（詳細は2.2を参照）、化学的に安定な炭酸カルシウムとなりCO₂を固定することができる。カルシア改質材へのCO₂吸収方法は、高濃度のCO₂ガス環境にカルシア改質材を保管することでカルシア改質材にCO₂を吸収・固定する方法、大気（CO₂濃度約400 ppm）にカルシア改質材を暴露することで大気から直接CO₂を吸収・固定する方法、に大別することができる。これらの方法によって、カルシア改質材に吸収・固定させたCO₂量はCO₂ガスまたは大気中からのCO₂除去量とみなすことができる。このようにCO₂を吸収・固定させたカルシア改質材をカルシア改質土に用いることで、そのCO₂吸収量が差し引かれ（図2.1の赤字部分）、カルシア改質土のCO₂排出量を削減することができる。なお、カルシア改質材へのCO₂吸収・固定（炭酸化）処理に要するCO₂排出量もカルシア改質材のCO₂排出量として含めなければならない。

本ガイドラインでは、CO₂排出量を削減したカルシア改質土のうち、CO₂排出量が正味としてマイナスとなるカルシア改質土を、CO₂吸収型カルシア改質土と定義する。



図 2.1 カルシア改質土の CO₂排出量のイメージ

注 1 浚渫土には有機炭素が多く含まれ、浚渫土の有効活用を通じて有機炭素を安定的に封じ込められる可能性があり⁵⁾、このような炭素(CO₂)貯留効果が近年着目されつつある。浚渫土をカルシア改質土として有効活用する場合にも、浚渫土の固化により有機炭素を安定的に封じ込めることが期待できる。現時点ではカルシア改質土による有機炭素貯留効果は評価に含めていないが、今後の研究で知見が蓄積されれば、これらの効果も計上することができる。

注 2 強度増進材である高炉スラグ微粉末は水和によってカルシウムシリケート水和物などの生成物を生成する。このような水和生成物は、カルシア改質材と同様、炭酸化により CO₂ を吸収する性質を有するものの、その CO₂ 吸収ポテンシャルはカルシア改質材と比べて低い。現状では精度の高い予測はできないため、本ガイドラインでは高炉スラグ微粉末の CO₂ 吸収量は考慮しないものとする。

2.2 カルシア改質材による CO₂ 吸収/固定メカニズム

カルシア改質材である転炉系製鋼スラグは、酸化カルシウム等を多く含む。このため、カルシア改質材に水を供給することでカルシウムが水和し、その水和物が CO₂ と反応することで炭酸カルシウム（以下、「CaCO₃」という）が生成される。つまり、CO₂ はカルシウムから生成された水和物の炭酸化によって吸収され、CaCO₃ として固定される。カルシウムは、遊離石灰（以下、「f-CaO」という）やカルシウムシリケート系化合物等の様々な形態でカルシア改質材に含まれる。一例として f-CaO の水和反応と炭酸化反応を式(2.1)および式(2.2)に示す。



なお、水和を介さずに CO₂ とカルシア改質材を気固反応として直接反応させることも可能であるが、その反応には多大なエネルギーを必要とし、反応温度 300°C 以下での炭酸化は無視できるほど小さい⁶⁾。

第3章 カルシア改質材のCO₂吸収量の評価方法

カルシア改質材のCO₂吸収量の評価にあたっては、適切な測定方法を用いるものとする。

3.1 カルシア改質材のCO₂吸収量の評価の基本的考え方

2.2 で示す通り、カルシア改質材の炭酸化により吸収されたCO₂は一般的にCaCO₃として固定される。このため、カルシア改質材に含まれるCaCO₃量またはそのうちの無機炭素量を測定し、CO₂量に換算することでCO₂吸収量を評価する。

代表的な評価方法として以下の2つが挙げられ、これらの詳細は3.3 および3.4 で後述する通りである。なお、他の評価方法であっても、妥当性が適切に検証されていれば、それを用いても良い。

- 熱重量測定によりカルシア改質材に含まれるCaCO₃量を測定し、CO₂量に換算する方法(3.3).
- 無機炭素量分析によりカルシア改質材に含まれる無機炭素量を測定し、CO₂量に換算する方法(3.4).

3.2 分析用試料の前処理

熱重量測定(3.3)および無機炭素量分析に(3.4)用いるカルシア改質材は、乾燥炉を用いて105°Cで十分に乾燥させた後、粉碎調製を行い、分析用試料とする。粉碎調製は窒素ガスなどの不活性ガス環境下で行い、粉碎調製中のカルシア改質材の炭酸化を防ぐ必要がある。また、粉碎調製においては、150μmのふるいを全量通過させるように粉碎するのが一般的である。ただし、カルシア改質材の粒子によっては金属鉄などが含まれ、全量を150μm以下の試料とするのが難しい場合がある。このような場合、前処理条件の緩和（例えばふるい目の大型化）が炭素分析の方法や結果に影響しないことを確認できれば、その前処理条件を適用してもよい。なお、カルシア改質材の無機炭素量分析において、300μm以下の試料であれば、150μm以下の試料と同等の炭素量が測定されることが確認されているが、今後様々なカルシア改質材に対する検証が必要である。また、300μm以上の粒子がある場合には試料分取時の誤差が大きくなるだけでなく、大型の粒子が分析での加熱中に爆裂することで分析結果に影響する。したがって、ふるい目の寸法を緩和したとしても、可能な限り150μm以下に粉碎することが望ましい。

前処理後の分析用試料は、真空引きしたデシケーター内や不活性ガスを充填したデシケーター内などに保管し、保管中の炭酸化を防ぐ必要がある。

3.3 熱重量測定による評価方法

熱重量測定(TG)は、試料を一定の速度で加熱または冷却、あるいは一定の温度で保持した際の試料の重量変化を測定する手法である。この重量変化により、試料の含有成分の定量や熱分解機構の解析等を行うことができる。

CaCO₃は600~900°C付近で式(3.1)に示すように熱分解(脱炭酸)し、CO₂を放出する。



このため、カルシア改質材を一定の速度で加熱し、600~900℃付近での質量減量を測定することで、含有するCaCO₃量を推定できる。測定は窒素ガスなどの不活性ガス環境下で行い、測定中のカルシア改質材の酸化や炭酸化を防ぐ必要がある。

図3.1にカルシア改質材の熱重量測定の結果の例を示す。図3.1(a)は通常のカルシア改質材、(b)は炭酸化が進んだカルシア改質材の結果を示している。図3.1(a)では、600~700℃付近でのCaCO₃の脱炭酸による明らかな質量減少に加え、350~400℃付近でのCa(OH)₂の熱分解(脱水)による明らかな質量減少が確認できる。一方で、(b)では炭酸化によりCa(OH)₂が消費されているため、Ca(OH)₂の脱水による質量減少は見られない。また、(a)と(b)の両方において、CaCO₃やCa(OH)₂の熱分解の温度帯以外でも継続的な質量減少が見受けられるが、これは主にカルシア改質材に含まれる水和物等による結合水の脱水によるものである。結合水は3.2に示す前処理の105℃乾燥では全て除去することができず、高温に至るまで継続的に脱水する。このため、CaCO₃量を推定する際、600~900℃付近での質量減量の一部には結合水も含まれている点に注意が必要である。結合水の存在によってCaCO₃量を過大に評価しないよう、CaCO₃の熱分解による質量減量(ML_{CC} [%])は、図3.1に示すように接線法で評価するのがよい。接線法では、質量減少の始点と終点から接線を引き、始点温度と終点温度の中間点での差を読み取る。

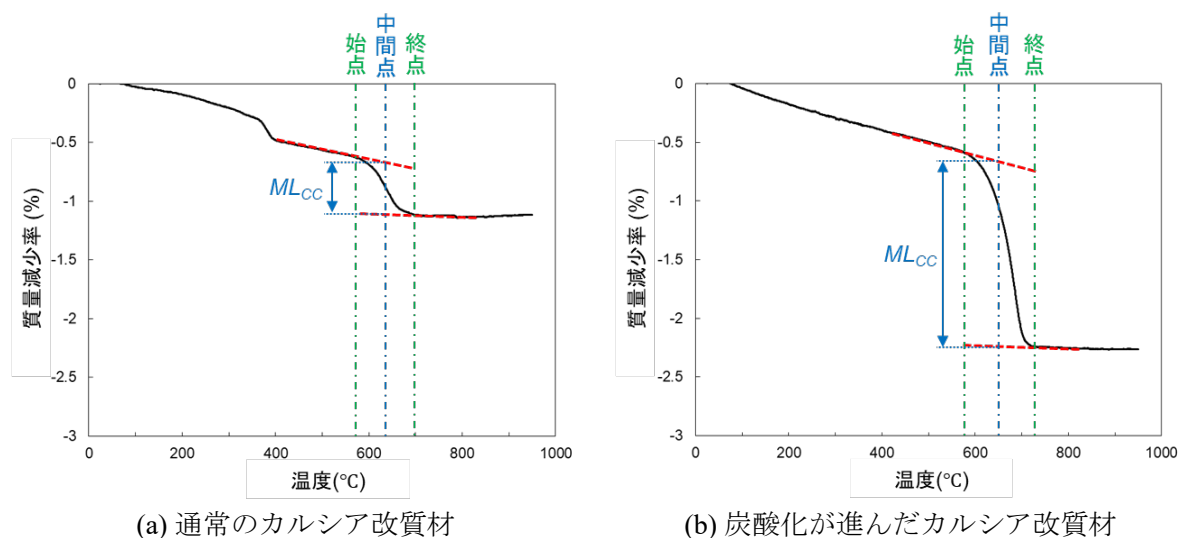


図3.1 カルシア改質材(製鋼スラグ)の熱重量測定の結果

カルシア改質材のCO₂吸収量(C_s [kg-CO₂/t])は、熱重量測定におけるCaCO₃の熱分解による質量減量(ML_{CC} [%])から、式(3.2)により評価する。これは、式(3.3)によりCaCO₃量(CC_s [kg-CO₂/t])が算出され、式(3.4)によりCO₂量(C_s [kg-CO₂/t])に換算されることによるものである。なお、3.2の分析用試料の前処理において乾燥処理が行われているため、 C_s は、絶乾状態のカルシア改質材あたりのCO₂吸収量である点に注意する必要がある。

$$C_s = \frac{ML_{CC}}{100} \times 1000 \quad (3.2)$$

$$CC_s = \frac{ML_{CC}}{100} \times \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CO_2}} \times 1000 \quad (3.3)$$

$$C_s = CC_s \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaCO_3}} \quad (3.4)$$

ここで、

M_{CaCO_3} : CaCO₃の分子量(=100)

M_{CO_2} : CO₂の分子量(=44)

である。

3.4 無機炭素量分析による評価方法

炭素量分析は、試料を燃焼し、発生したCO₂を検出および測定する手法である。分析には元素分析計や炭素分析装置等を用いる。炭素量分析において、窒素ガスやアルゴンガスなどの不活性ガス環境下で分析を行うことで、全炭素（無機炭酸塩＋元素炭素＋有機炭素）のうち無機炭酸塩のみを熱分解させ、無機炭素量を測定することができる⁷⁾。これにより、カルシア改質材に含まれるCaCO₃中の無機炭素量を定量できる。

カルシア改質材のCO₂吸収量(C_s [kg-CO₂/t])は、炭素量分析における無機炭素量の測定結果(IC_S [%])から、式(3.5)により評価する。なお、3.2の分析用試料の前処理において乾燥処理が行われているため、 C_s は、絶乾状態のカルシア改質材あたりのCO₂吸収量である点に注意する必要がある。

$$C_s = \frac{IC_S}{100} \times \frac{M_{CO_2}}{M_C} \times 1000 \quad (3.5)$$

ここで、

M_{CO_2} : CO₂の分子量(=44)

M_C : Cの原子量(=12)

である。

ドイツ規格協会のDIN19539では、それぞれの形態の炭素の熱分解挙動を利用し、有機炭素、残留酸化性炭素、無機炭素を分別定量する方法が規定されており、これに基づき無機炭素量を定量することも可能である。酸素環境下で分析を行い、150℃から400±20℃の範囲で定量される炭素量を有機炭素、400±20℃から600±20℃の範囲で定量される炭素量を残留酸化性炭素、600±20℃から900±20℃の範囲で定量される炭素量を無機炭素として定量する(図3.2(a))。また、代替法として、1回の分析において酸化性キャリアガスと非酸化性キャリアガスを切り替える方法も規定されている(図3.2(b))。この場合、酸素環境下で400℃までにおいて有機炭素量を定量し、不活性ガスに切り替えるとともに900℃まで昇温することで無機炭素を定量し、900℃に維持したままで酸素環境下に戻すことで残留酸化性炭素を定量する。

なお、DIN19539が示すように、無機炭素の分解温度はおおよそ900℃までとされているが、燃焼—赤外線吸収法による炭素分析計を用いる場合には、測定温度の設定に注意する必要がある。カルシア改質材である製鋼スラグには硫黄が含まれる場合があり、燃焼—赤外線吸収法による炭素分析計では、800℃を上回る温度帯において炭素の定量結果が硫黄に干渉される可能性がある⁷⁾。硫黄の干渉の影響を排除するため、硫黄が含まれる材料の場合には800℃とすることが既往の研究で示されている⁷⁾。製鋼スラグの熱重量—質量分析の結果の一例(図3.3)では、炭酸塩の脱炭酸に起因するCO₂由来のシグナル($m/z=44$)は800℃以下でのみ確認されていることから、カルシア改質材に含まれる無機炭素は主に800℃で検出できることが確認されている。

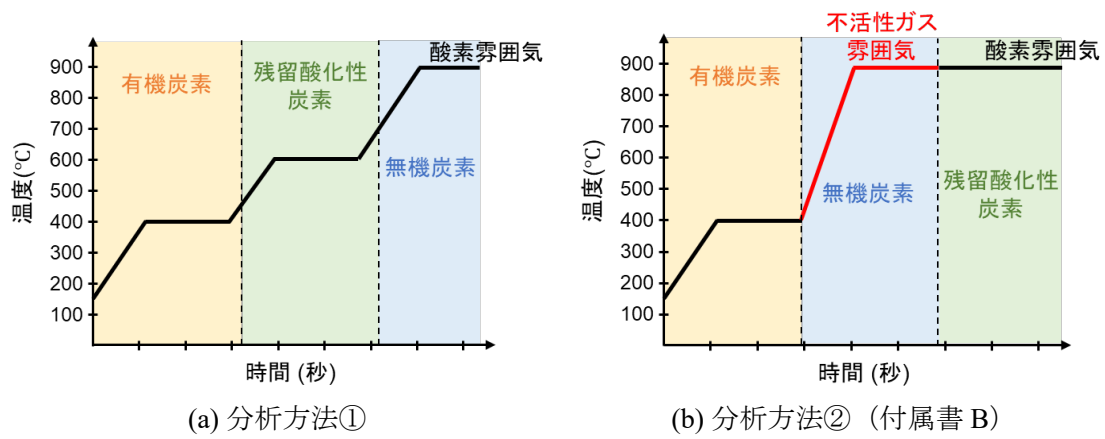


図 3.2 DIN19539 における温度依存性を利用した分別定量方法

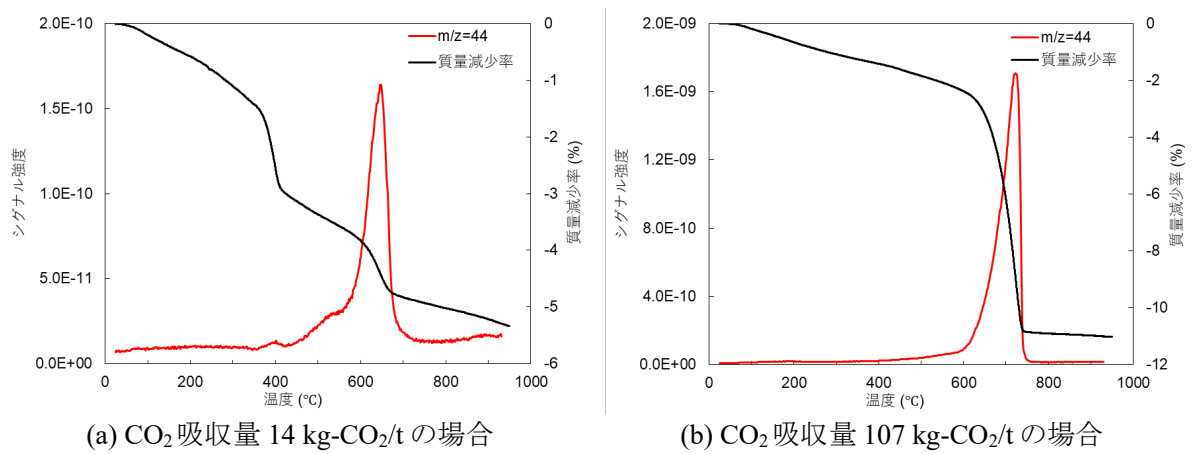


図 3.3 製鋼スラグの熱重量-質量分析の結果

注 3 本章が対象とする「カルシア改質材」ではなく、「カルシア改質土」を分析試料とする場合には、浚渫土中の有機炭素が含まれる。一部の有機炭素は不活性ガス環境においても分解し、CO₂を放出する場合があります。カルシア改質土としての無機炭素量を評価する上では注意を要する。

第4章 CO₂吸収型カルシア改質土のCO₂排出原単位の算定方法

CO₂吸収型カルシア改質土のCO₂排出原単位は、各原材料のCO₂排出原単位と使用量に基づき適切に算定する。

CO₂排出原単位とは活動量1単位あたりのCO₂排出量を意味し、ここではカルシア改質土1m³の製造に由来するCO₂排出量のことを指す。これを評価し、CO₂吸収型カルシア改質土に代替される従来材料（石材や砂利、通常のカルシア改質土等）のCO₂排出原単位と比較することで、材料そのものとしてのCO₂排出量削減効果を把握することができる。

CO₂吸収型改質土のCO₂排出原単位(I_{cal} [kg-CO₂/m³])は、式(4.1)により算出する。なお、このCO₂排出原単位では原材料の製造に由来するCO₂排出量のみを考慮し、カルシア改質土の混合作業等によるCO₂排出量は、施工由来のCO₂排出量として第5章の港湾工事全体のCO₂排出量に含まれる(注4)。

$$I_{cal} = I_d \times M_d + (I_s - C_{sc}) \times M_s + I_g \times M_g \quad (4.1)$$

ここで、

I_d : 浚渫土のCO₂排出原単位[kg-CO₂/t]

M_d : カルシア改質土1m³に含まれる浚渫土量[t/m³]

I_s : カルシア改質材のCO₂排出原単位[kg-CO₂/t]

C_{sc} : カルシア改質材のCO₂吸収量[kg-CO₂/t]

M_s : カルシア改質土1m³に含まれるカルシア改質材量 [t/m³]

I_g : 強度増進材のCO₂排出原単位[kg-CO₂/t]

M_g : カルシア改質土1m³に含まれる強度増進材量 [t/m³]

である。

浚渫土について、その製造によるCO₂排出量はゼロであるため（詳細は2.1を参照）、CO₂排出原単位(I_d)は0[kg-CO₂/t]とする。

カルシア改質材である製鋼スラグについて、スラグ生成後の加工作業等によりCO₂が排出される（詳細は2.1を参照）。製鋼スラグのCO₂排出原単位(I_s)はスラグの製造工程によって異なるため、それぞれの製鋼スラグ製造者からデータを入手することが望ましいが、現状としてデータがほとんど公表されていない。したがって、現時点では、表4.1に示すような文献値を用いてもよい。なお、カルシア改質材へのCO₂吸収・固定（炭酸化）処理に要するCO₂排出量もカルシア改質材のCO₂排出量として含めなければならない。また、カルシア改質材のCO₂吸収量(C_{sc})には、第3章で示す方法で測定したCO₂吸収量(C_s)を、式(4.2)により表乾状態の製鋼スラグにおけるCO₂吸収量に換算した値を用いる。

$$C_{sc} = C_s \times \frac{100}{100 + A_w} \quad (4.2)$$

ここで、

A_w : CO₂吸収・固定させた製鋼スラグの吸水率[%]

である。

強度増進材について、一般には高炉スラグ微粉末が用いられる。高炉スラグ微粉末では、水砕スラグの粉碎等の加工作業等でCO₂が排出される（詳細は2.1を参照）。高炉スラグ微粉末も

製鋼スラグと同様、高炉スラグ微粉末の製造工程によって異なるため、本来はそれぞれの高炉スラグ微粉末製造者からデータを入手することが望ましいが、現状としてデータがほとんど公表されていない。したがって、高炉スラグ微粉末の CO₂ 排出原単位(I_g)には表 4.1 に示す文献値を用いることができる。

表 4.1 に示す通り、製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末の CO₂ 排出原単位は算定条件によって異なる。したがって、CO₂ 吸収型カルシア改質土の CO₂ 排出原単位の算定にあたっては、元文献等の算定条件等を考慮して適切な数値を設定するのがよい。また、表 4.1 の文献値を採用するにあたっては、CO₂ 吸収型カルシア改質土の CO₂ 排出原単位を過小に算定しないよう (CO₂ 排出原単位が過大にマイナスとならないよう)、各材料の CO₂ 排出原単位のうち最新値または最大値を選択するのがよい。

表 4.1 製鋼スラグと高炉スラグ微粉末の CO₂ 排出原単位の文献値

	備考	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	参考文献
製鋼スラグ	転炉スラグ	2.60※	8)
	転炉スラグ	2.96	10)
高炉スラグ微粉末	—	40.36	8)
	スラグ微粉末 4000	20.9	9)
	スラグ微粉末 6000	52.7	
	—	24.1	11)
	—	39.6	12)
	—	40.21	13)

※文献値の単位(t-c/t)を(kg-CO₂/t)に換算

注 4 本章における CO₂ 吸収型カルシア改質土の CO₂ 排出原単位の考慮範囲 (システム境界) は、図 4.1 に示す通りである。カルシア改質土に代替される石材や砂利等の CO₂ 排出原単位の一般的な考慮範囲は図 4.2 に示す通りであり、これと整合するものと考えることができる。ただし、カルシア改質土あるいは従来材料の運搬距離が大きい場合等には、各原材料の運搬に由来する CO₂ 排出量を考慮するのが望ましい。

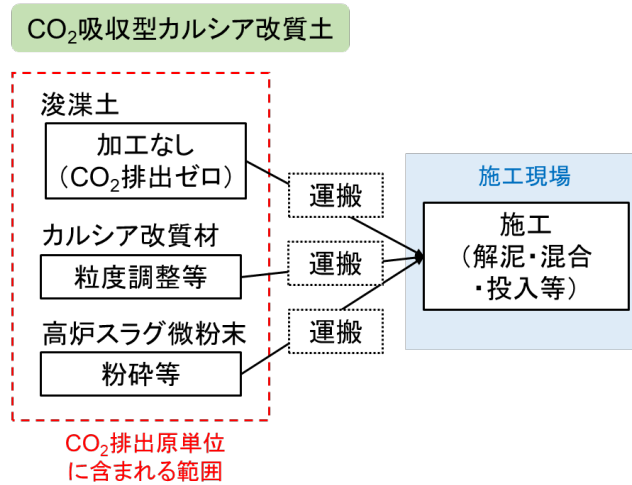


図 4.1 CO₂吸収型カルシア改質土の CO₂排出原単位の評価範囲

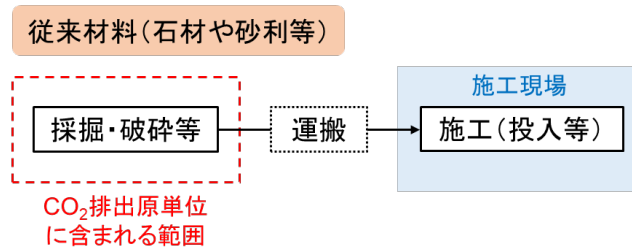


図 4.2 従来材料の CO₂排出原単位の評価範囲

第5章 CO₂吸収型カルシア改質土の活用による港湾工事のCO₂排出量削減効果の算定方法

CO₂吸収型カルシア改質土を活用した港湾工事のCO₂排出量削減効果は、各種ガイドライン等を参照し、適切に算定する。

CO₂吸収型カルシア改質土を活用した港湾工事のCO₂排出量削減効果の評価にあたっては、従来材料を用いる場合とCO₂吸収型カルシア改質土を用いる場合のCO₂排出量の差分を削減量（図5.1中の青字）とし、また、その削減量が当該施設の港湾工事全体のCO₂排出量に与える削減効果を表すCO₂排出量削減率（図5.1中の赤字）を把握する。これらのCO₂排出量削減量や削減率を算定するためには、第4章のCO₂吸収型カルシア改質土の製造に由来するCO₂排出量（CO₂排出原単位）に加え、当該工事で用いられるその他の材料の製造に由来するCO₂排出量や、施工時の機械の稼働に由来するCO₂排出量等を算定しなければならない。算定にあたっては「港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン」の設計段階編（試行工事用）¹⁴、発注段階編¹⁵および施工段階編（試行工事用）¹⁶などを参照することができる。

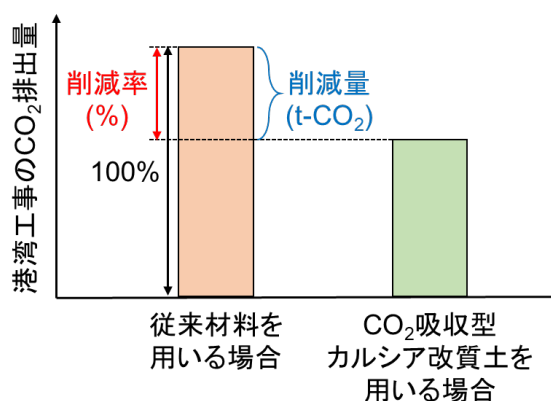


図 5.1 CO₂吸収型カルシア改質土の活用による港湾工事のCO₂排出量削減効果

CO₂吸収型カルシア改質土を活用した港湾工事のCO₂排出量削減量や削減率の算定手順を図5.2に示す。まず、図5.2中の①に示す通り、CO₂吸収型カルシア改質土の各種特性および従来材料を設定する。CO₂吸収型カルシア改質土の各種特性とは、カルシア改質材のCO₂吸収量やカルシア改質土の配合等、第4章に示すカルシア改質土のCO₂排出原単位を算定する上で必要な情報を指し、現場条件や実績等に基づき適切に設定する。また、従来材料とは、類似工事において一般的に用いられている材料であり、現場条件や実績等に基づき適切に設定する。

そして、図5.2中の②に示す通り、CO₂吸収型カルシア改質土および従来材料のCO₂排出原単位を設定する。CO₂吸収型カルシア改質土については、式(4.1)に基づきCO₂排出原単位を算定する。従来材料については、文献値等に基づきCO₂排出原単位を設定する。

次に、図5.2中の③に示す通り、従来材料を用いる場合とCO₂吸収型カルシア改質土を用いる場合の当該工事のCO₂排出量をそれぞれ算定する。工事のCO₂排出量は、「港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン」¹⁴⁻¹⁶に基づき算定する。「港湾工事における二酸化炭素排出

量算定ガイドライン」は、CO₂排出量を算定する場面は計画・設計・工事発注・工事実施と様々であるとともに、場面毎に算定に必要なデータの取得の容易性等が異なることを鑑み、設計段階編（試行工事用）¹⁴⁾、発注段階編¹⁵⁾および施工段階編（試行工事用）¹⁶⁾の3種類が発行されている。このうち、該当するものを参照し、CO₂排出量を算定する。

最後に、図 5.2 中の④に示す通り、CO₂吸収型カルシア改質土の活用による港湾工事のCO₂排出量削減量や削減率を算定する。CO₂排出量削減量(RA [t-CO₂])と削減率(RR [%])は式(5.1)と式(5.2)により表される。RA、E_nおよびE_cの単位は適切に設定する。

$$RA = E_n - E_c \quad (5.1)$$

$$RR = \frac{RA}{E_n} \times 100 \quad (5.2)$$

ここで、

E_n: 従来材料を用いる場合の当該工事のCO₂排出量 [t-CO₂]

E_c: CO₂吸収型カルシア改質土を用いる場合の当該工事のCO₂排出量[t-CO₂]

である。

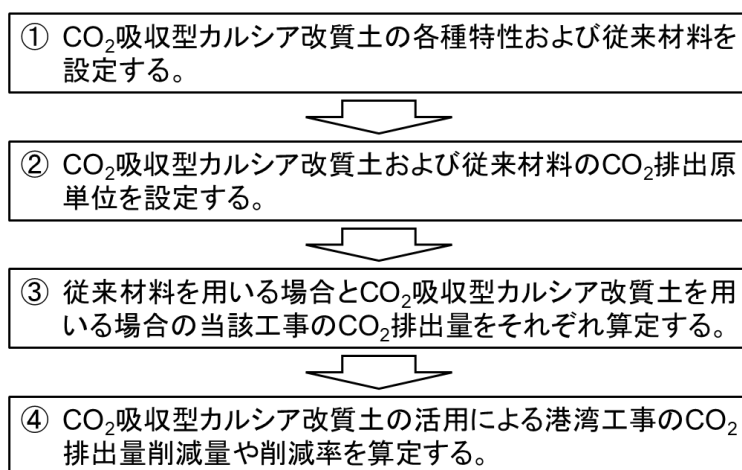


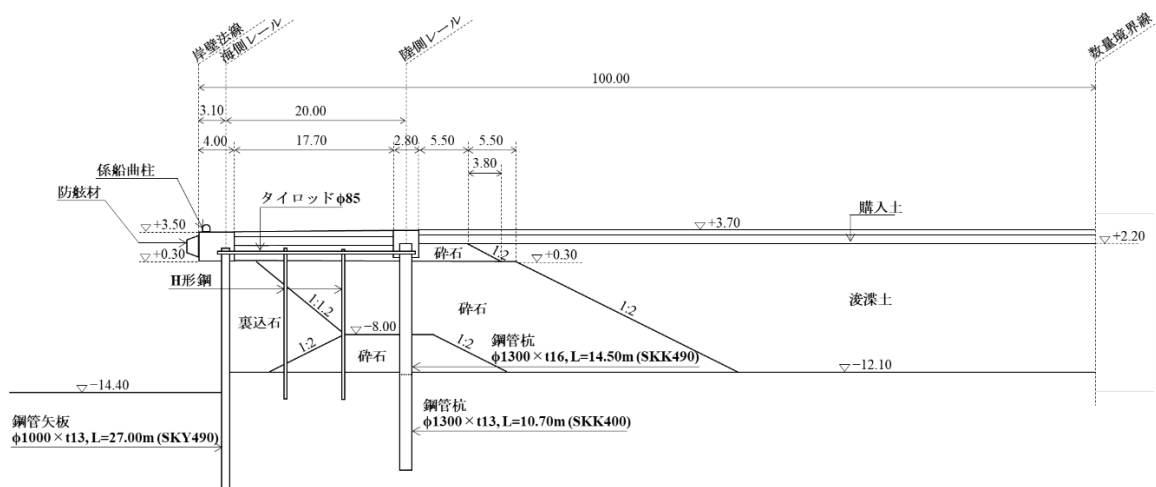
図 5.2 CO₂吸収型カルシア改質土の活用による港湾工事のCO₂排出量削減効果の算定手順

参考文献

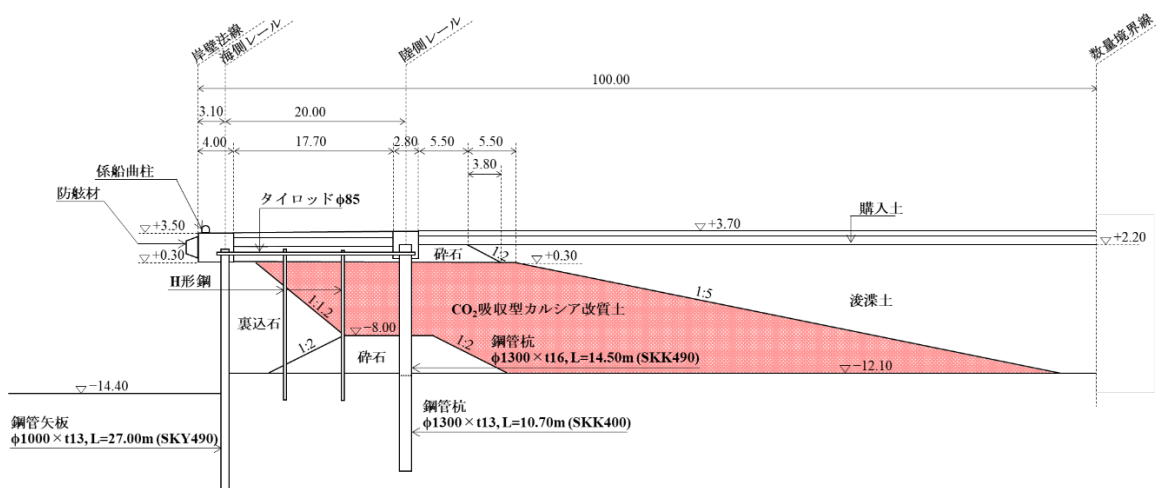
- 1) 社会資本整備審議会・交通政策審議会技術分科会第29回技術部会：資料4（国土交通省のインフラ分野におけるカーボンニュートラルに向けた取組），2022。（<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001493862.pdf>）
- 2) カーボンニュートラルポート（CNP）の形成に向けた検討会：カーボンニュートラル（CNP）の形成に向けた施策の方向性，2021。（<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001448303.pdf>）
- 3) 国土交通省 港湾局 産業港湾課：「港湾脱炭素化推進計画」作成マニュアル，2023。（<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001767698.pdf>）
- 4) 辰巳大介，坂田憲治，川端雄一郎，中村堇：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.
- 5) 杉村佳寿，岡田知也，内藤了二，桑江朝比呂，中川康之：港湾における気候変動対策の新たな可能性の提案～浚渫土砂の有効活用による炭素貯留とブルーカーボン生態系の創出の有効性～，国土技術政策総合研究所資料，No.1251，2023.
- 6) Christopher DiGiovanni, Ousmane A. Hisseine, Adedapo Noah Awolayo. Carbon dioxide sequestration through steel slag carbonation: Review of mechanisms, process parameters, and cleaner upcycling pathways, *Journal of CO2 Utilization*, vol.81, 102736, 2024.
- 7) 梶井章弘，児玉省吾，高橋晴香，丸山一平：全炭素分析計によるセメント系材料のCO₂固定量評価方法に関する検討，第77回セメント技術大会講演要旨，pp.282-283，2023.
- 8) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005.
- 9) 長尾之彦：高炉スラグ微粉末によるコンクリートのCO₂削減効果について，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.62-65，2010.
- 10) 前川直紀，林友弥，鈴木武，菅野甚活：港湾施設整備に起因する二酸化炭素排出量推計の事例分析，国土技術政策総合研究所資料，No.651，2011.
- 11) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その2），コンクリート技術シリーズ，No.62，2004.
- 12) 日本コンクリート工学会サステナビリティ委員会：コンクリートサステナビリティフォーラム報告書（2017年度改訂），2018.
- 13) 日本コンクリート工学会セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会：セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書，2024.
- 14) 港湾工事における二酸化炭素排出量削減に向けた検討WG：港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン（設計段階編（試行工事用）），2024.
- 15) 港湾工事における二酸化炭素排出量削減に向けた検討WG：港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン（発注段階編），2022.
- 16) 港湾工事における二酸化炭素排出量削減に向けた検討WG：港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン（施工段階編（試行工事用）），2023.

付録 a CO₂ 吸収型カルシア改質土の活用による港湾工事における CO₂ 排出量削減効果の評価例

ここでは、図 a.1 に示す岸壁 A の裏埋材の一部に CO₂ 吸収型カルシア改質土を活用することを想定し、本ガイドラインの第 4 章および第 5 章に示す方法により CO₂ 排出量削減効果を試算した事例を示す a-1)、注 a-1。図 a.1(a) は裏埋材が従来材料の場合、図 a.1(b) は裏埋材に CO₂ 吸収型カルシア改質土を用いる場合の断面を示す。本事例では、通常のカルシア改質材（以下、カルシア改質材 n という）を用いる場合と、人工的な炭酸化処理を施したカルシア改質材（以下、カルシア改質材 c という）を用いる場合の 2 パターンについて、従来材料を代替することによる CO₂ 排出量削減効果を試算する。



(a) 裏埋材が従来材料の場合



(b) 裏埋材が CO₂ 吸収型カルシア改質土の場合

図 a.1 対象施設

注 a-1 本付録における CO₂ 排出量の算定に際しては、引用元論文 a-1 で用いられた材料の CO₂ 排出原単位を最新値に更新している。そのため、本付録の CO₂ 排出量の算定結果は、一部において引用元論文の値と異なる場合がある。

a.1 CO₂吸収型カルシア改質土の各種特性および従来材料の設定（図 5.2, ①）

まず、CO₂吸収型カルシア改質土の各種特性として、カルシア改質材のCO₂吸収量やカルシア改質土の配合を設定する。

カルシア改質材のCO₂吸収量は第3章に示す方法により測定する。本検討では無機炭素量分析(3.4)を適用し、測定結果(IC_s)は表 a.1 に示す通り、カルシア改質材 n で 0.27%，カルシア改質材 c で 1.50%であった。カルシア改質材 n では人工的な炭酸化処理を施していないが、製造後のヤード等における大気との接触によりCO₂が吸収されている。これを式(3.5)により絶乾状態におけるCO₂吸収量(C_s)に換算すると、カルシア改質材 n で 9.7 kg-CO₂/t，カルシア改質材 c で 55.1 kg-CO₂/t である。また、式(4.2)により表乾状態におけるCO₂吸収量(C_{sc})に換算すると、カルシア改質材 n で 9.4 kg-CO₂/t，カルシア改質材 c で 51.6 kg-CO₂/t である。

表 a.1 カルシア改質材のCO₂吸収量の評価結果

	無機炭素量分析 の結果 IC _s	吸水率 A _w	CO ₂ 吸収量 (絶乾状態) C _s	CO ₂ 吸収量 (表乾状態) C _{sc}
カルシア改質材 n	0.27 %	3.16 %	9.7 kg-CO ₂ /t	9.4 kg-CO ₂ /t
カルシア改質材 c	1.50 %	6.65 %	55.1 kg-CO ₂ /t	51.6 kg-CO ₂ /t

カルシア改質土の配合については、岸壁 A における必要強度を満足することが確認された配合（表 a.2）を設定する。なお、本配合はあくまでも一例であり、ここでは室内実験で得られた強度から設定している。

表 a.2 CO₂吸収型カルシア改質土の配合

	浚渫土 含水比 (%)	製鋼スラグ 容積混合率 (%)	高炉スラグ微粉末 容積混合率 (%)	(kg/m ³)		
				製鋼 スラグ	浚渫土	高炉スラグ 微粉末
カルシア 改質材 n	246.3	30	0	943	849	0
カルシア 改質材 c			10	865	728	289

また、本事例においてCO₂吸収型カルシア改質土に代替される従来材料としては、現場条件や類似工事での実績を踏まえ、砕石を想定する。

a.2 CO₂吸収型カルシア改質土および従来材料のCO₂排出原単位の算定（図 5.2, ②）

CO₂吸収型カルシア改質土については、式(4.1)に基づきCO₂排出原単位を算定する。ここでは、製鋼スラグのCO₂排出原単位として 2.96 kg-CO₂/t，高炉スラグ微粉末のCO₂排出原単位として 40.21 kg-CO₂/t を用いる（表 4.1 のうち最新値）。カルシア改質材 n の場合には、下記の計算により -6.1 kg-CO₂/m³ である。

$$\begin{aligned}
 I_{cal} &= I_d \times M_d + (I_s - C_{sc}) \times M_s + I_g \times M_g \\
 &= 0 \times 0.849 + (2.96 - 9.4) \times 0.943 + 40.21 \times 0 = -6.1
 \end{aligned}$$

カルシア改質材 c の場合には、下記の計算により $-30.5 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ である。

$$I_{cal} = I_d \times M_d + (I_s - C_{sc}) \times M_s + I_g \times M_g$$

$$= 0 \times 0.728 + (2.96 - 51.6) \times 0.865 + 40.21 \times 0.289 = -30.5$$

また、従来材料の砕石について、「港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン（発注段階編）」¹⁵⁾によると、 CO_2 排出原単位は $8.02 \text{ kg-CO}_2/\text{t}$ である。これに対し、単位体積質量を約 $26 \text{ kN}/\text{m}^3$ 、また堆積時の空隙率を約 40% とすると、裏埋材として活用する場合の 1 m^3 あたりの CO_2 排出原単位はおよそ $12.8 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ である。

a.3 従来材料を用いる場合と CO_2 吸収型カルシア改質土を用いる場合の当該工事の CO_2 排出量の算定（図 5.2, ③）

従来材料を用いる場合と CO_2 吸収型カルシア改質土を用いる場合の当該工事の CO_2 排出量をそれぞれ算定する。

ここでは、工事発注段階での算定を想定し、「港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン（発注段階編）」¹⁵⁾に基づき、岸壁 A の延長 1 m あたりの CO_2 排出量を算定する。岸壁 A において、裏埋材に CO_2 吸収型カルシア改質土を用いる場合と従来材料の砕石を用いる場合の工種毎の数量はそれぞれ表 a.3 に示す通りである。工種毎の数量と発注段階編のガイドラインの方法に基づき、岸壁 A の延長 1 m あたりの CO_2 排出量を算定した結果は図 a.2~a.4 に示す通りであり、 CO_2 吸収型カルシア改質土（カルシア改質材 n）の場合で $53.7 \text{ t-CO}_2/\text{m}$ 、 CO_2 吸収型カルシア改質土（カルシア改質材 c）の場合で $34.5 \text{ t-CO}_2/\text{m}$ 、従来材料の砕石の場合で $59.2 \text{ t-CO}_2/\text{m}$ である。

表 a.3 工種毎の数量 (m)

工種	CO_2 吸収型カルシア改質土の場合	従来材料（砕石の場合）の場合
本体工	鋼管矢板: 0.801 本	
	控え鋼管杭: 0.401 本	
	腹起し: 2.0 m	
	タイロッド: 0.401 本	
上部工	上部コンクリート（前面矢板）: 12.88 m^3	
	均しコンクリート: 0.79 m^2	
	上部コンクリート（控え工）: 8.40 m^3	
	均しコンクリート: 2.47 m^2	
裏込・裏埋工	裏込石: 107.3 m^3	
	購入土: 102.5 m^3	
	カルシア改質土: 605.5 m^3 砕石: 112.8 m^3 浚渫土砂: 544.8 m^3	砕石: 487.7 m^3 浚渫土砂: 775.4 m^3
舗装工	コンクリート舗装: 16.00 m^2	
	アスファルト舗装: 77.20 m^2	
付属工	防舷材: 0.050 基	
	係船曲柱: 0.033 基	
	車止め: 1.0 m	
	電気防食工陽極: 0.801 基	

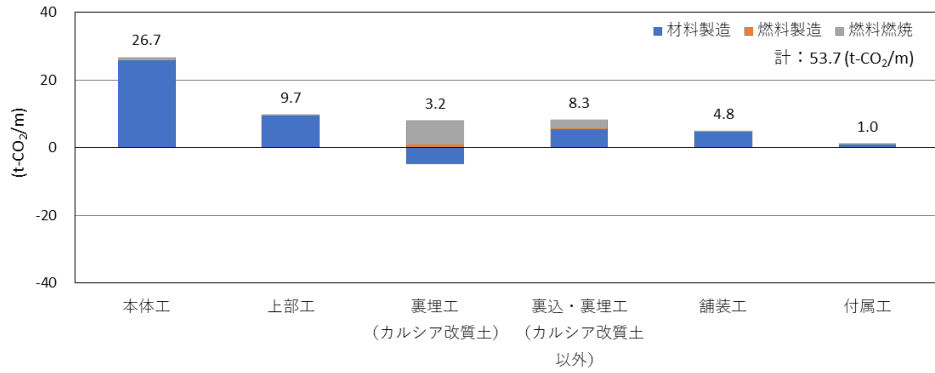


図 a.2 岸壁延長 1m あたりの CO₂ 排出量
(裏埋材が CO₂ 吸収型カルシア改質土 (カルシア改質材 n) の場合)

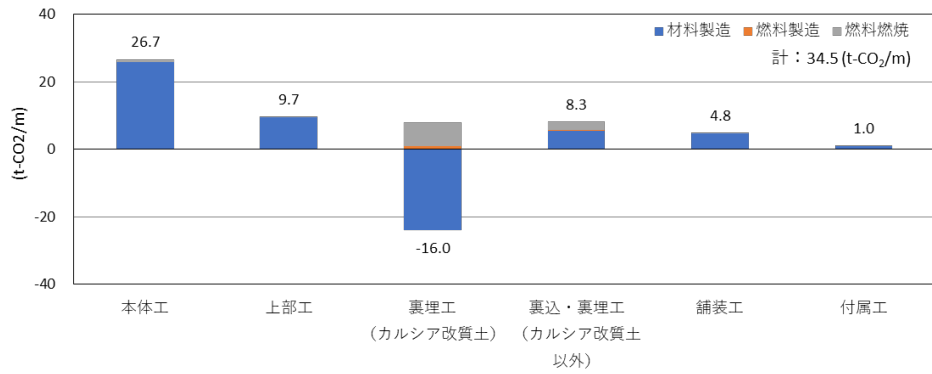


図 a.3 岸壁延長 1m あたりの CO₂ 排出量
(裏埋材が CO₂ 吸収型カルシア改質土 (カルシア改質材 c) の場合)

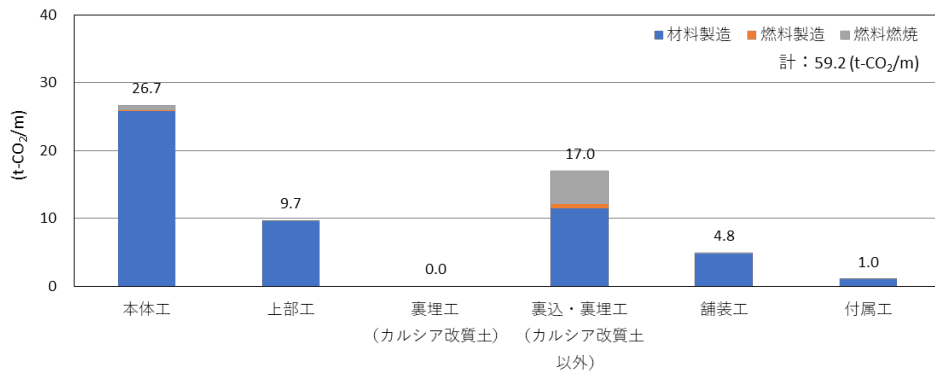


図 a.4 岸壁延長 1m あたりの CO₂ 排出量
(裏埋材が砕石の場合)

a. 4 CO₂吸収型カルシア改質土の活用による港湾工事のCO₂排出量削減量および削減率の算定 (図 5. 2, ④)

CO₂ 吸収型カルシア改質土および従来材料 (碎石) を用いる場合の港湾工事の CO₂ 排出量の算定結果に基づき, CO₂ 吸収型カルシア改質土の活用による港湾工事の CO₂ 排出量削減量および削減率を算定する.

カルシア改質材 n の場合, CO₂ 排出量削減量(RA)は, 式(5.1)に基づき以下の通り 5.5 t-CO₂/m となる.

$$RA = E_n - E_c = 59.2 - 53.7 = 5.5$$

また, CO₂排出量削減率(RR)は, 式(5.2)に基づき以下の通り 9.3%となる.

$$RR = \frac{RA}{E_n} \times 100 = \frac{5.5}{59.2} \times 100 = 9.3$$

カルシア改質材 c の場合, CO₂ 排出量削減量(RA)は, 式(5.1)に基づき以下の通り 24.6 t-CO₂/m となる.

$$RA = E_n - E_c = 59.2 - 34.5 = 24.7$$

また, CO₂排出量削減率(RR)は, 式(5.2)に基づき以下の通り 41.7%となる.

$$RR = \frac{RA}{E_n} \times 100 = \frac{24.7}{59.2} \times 100 = 41.7$$

参考文献

- a-1) Sumire Nakamura, Yuichiro Kawabata, Mana Yamashita, Chika Kawanaka, Akari Yamasaki. Mechanical feasibility and carbon reduction potential of improved dredged soil containing pre-carbonated steelmaking slag: A case study of backfill application in a port mooring facility. Case studies in Construction Materials 2025; 23; e05623.

付録 b CO₂ 吸収型カルシア改質土の全 CO₂ 貯留量のモニタリング

b.1 CO₂ 吸収型カルシア改質土の全 CO₂ 貯留量のモニタリングの概要

CO₂ 吸収型カルシア改質土に含まれるカルシア改質材は、施工後も大気中の CO₂ を吸収する可能性がある。また、図 2.1 中の注 1 で示した浚渫土の有機炭素貯留量についても、施工後に変化する可能性がある。以上を踏まえ、CO₂ 吸収型カルシア改質土においては、カルシア改質材により吸収される CO₂（無機炭素）と浚渫土中の有機炭素の両方を含む、全 CO₂ 貯留量の変化をモニタリングすることが望ましい。

仮に、図 b.1 に示すように施工後 X 年間に渡りカルシア改質材が大気中の CO₂ を吸収するとともに、浚渫土中の有機炭素が分解し、大気中に放出されたとする。ただし、図 b.1 はあくまで仮定であり、必ずしもカルシア改質材が CO₂ を吸収するわけではなく、また浚渫土中の有機炭素が分解するわけではない。ここで、初期（0 年）と X 年後の全炭素量を把握できれば、無機炭素量と有機炭素量の両方を考慮した全 CO₂ 貯留量の変化、つまり、CO₂ 吸収型カルシア改質土と大気中の CO₂ のやり取りを把握することができる。このため、CO₂ 吸収型カルシア改質土のモニタリングにおいては、施工時の初期に全炭素量（有機炭素量+無機炭素量+残留酸化性炭素）を測定するとともに、全炭素量の時系列変化を測定することが望ましい。

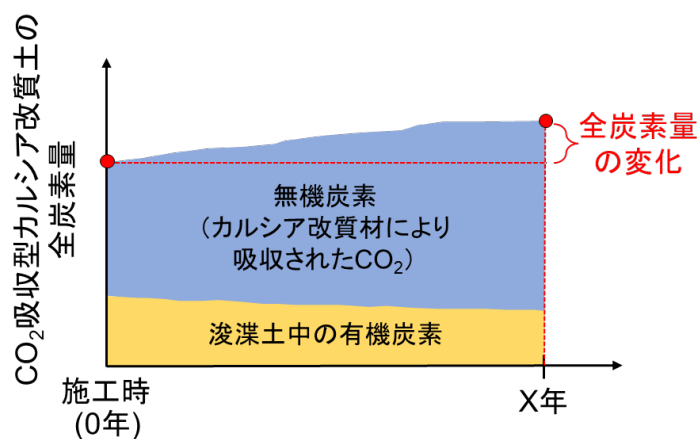


図 b.1 全炭素量の変化（仮定）

b.2 全 CO₂ 貯留量の評価方法

CO₂ 吸収型カルシア改質土の全 CO₂ 貯留量は、炭素量分析により全炭素量を測定し、CO₂ 量に換算することで評価する。

炭素量分析は、3.4 に示す手法であり、酸素環境下で分析を行うことで、無機炭酸塩や有機炭素等の全炭素量を測定することができる。CO₂ 吸収型カルシア改質土の全 CO₂ 貯留量

(C_{cal} [kg-CO₂/t])は、炭素量分析における全炭素量の測定結果(TC_{cal} [%])から、式(b.1)により評価する。

$$C_{cal} = \frac{TC_{cal}}{100} \times \frac{M_{CO_2}}{M_C} \times 1000 \quad (\text{b.1})$$

ここで、

M_{CO_2} : CO₂の分子量(=44)

M_C : Cの原子量(=12)

である。

ただし、現状では有機炭素と無機炭素が複合する条件での全炭素量の測定方法や各形態の炭素への分離法などは研究途上である。この点は今後の研究課題であるため、最新の分析方法などを専門家に確認しながら進めることが推奨される。

付録 c 施工中のカルシア改質材の CO₂ 吸収量の品質管理

CO₂ 吸収型カルシア改質土の活用による CO₂ 排出量削減効果の事後評価にあたっては、施工現場においてカルシア改質材を採取し、その CO₂ 吸収量を測定する必要がある。一方で、現時点において、現場での試料のばらつきを考慮した採取方法は確立されていない。このため、本ガイドラインを試行的に活用する場合、可能な限り多くの回数・採取量で採取し、CO₂ 吸収量を測定することが望ましい。

採取したカルシア改質材は、ただちに密封し、大気と触れないように保管する。測定時には、適切な方法で縮分し、第 3 章に示す方法において CO₂ 吸収量を評価する。