

カルシア改質土施工時のCO₂排出量の試算と 低減方法の検討

田中 裕一¹・浜谷 伸介²・野中 宗一郎²・中川 雅夫³

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)

³ 正会員 五洋建設(株) 土木部門 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

カルシア改質土は、浚渫土とカルシア改質材を混合した材料であり、干潟・浅場の造成材、埋立柱、深掘跡の埋戻材、護岸の裏込材等として広く使用されている。また、カルシア改質材は鉄製造過程の副産物のため、セメント固化処理土と比較してカルシア改質土のCO₂排出量は小さい特徴がある。一方で、カーボンニュートラル社会を目指す上で、カルシア改質土の施工時のCO₂排出量を低減することも重要となる。

そこで、カルシア改質土の施工条件を想定し、CO₂排出量を試算した結果、カルシアバケットの使用によりバックホウ混合時のCO₂排出量は40%程度抑制された。また、カルシア落下混合船を使用しカルシア改質土をトレミー投入することより、施工時全体のCO₂排出量をバックホウ混合-グラブ投入と比較して30%以上CO₂排出量を削減することが可能であった。

Key Words : dredged soil, steel slag-dredged soil mixture, CO₂ emission, drop mixing vessel

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粒度と成分を調整した材料)を混合した材料である¹⁾。強度発現、濁りの発生抑制等の特徴があり、干潟・浅場の造成材、埋立柱、深掘跡の埋戻材、護岸の裏込材等として幅広く使用されている(図-1)。

カルシア改質土の施工方法としては、バックホウにより浚渫土とカルシア改質材を土運船内で混合した後、グラブにより海域に投入する方法が広く用いられている。

一方、カルシア改質土のバックホウ混合時に複層のスケルトン構造のバケット(以下、カルシアバケットと記載)を使用し混合効率を上げた事例²⁾や、管中混合方式や落下混合方式により大規模施工を実施した事例³⁾が報告されている。

カルシア改質材は、鉄製造過程の副産物であり製造時のCO₂排出量が小さいため、セメント固化処理土と比較してカルシア改質土の材料由来のCO₂排出量が小さいことが報告されている⁴⁾。そして、カーボンニュートラル社会の実現を目指す上で、カルシア改質土を施工する際のCO₂排出量を低減することも重要となる。

そこで、浚渫・混合・運搬・投入過程のCO₂排出量の算

定による評価が有効であると考え、複数の施工方法を想定し、施工時のCO₂排出量と削減効果の試算を行った。

2. 検討内容

(1) バックホウ混合時のCO₂排出量

カルシアバケットは、バケットの底面、中間部および

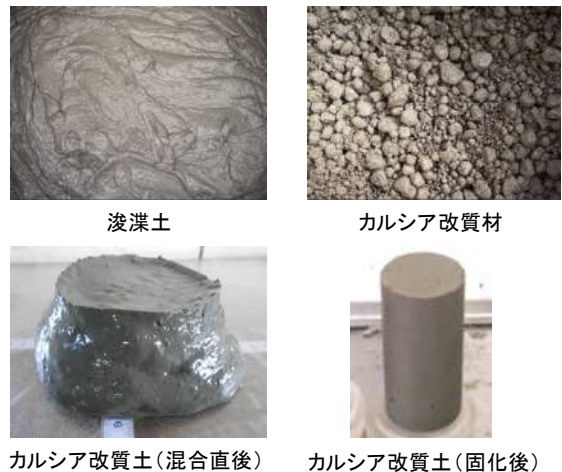


図-1 浚渫土・カルシア改質材とカルシア改質土

上縁部が格子構造となっており、上縁部から底面に向けて格子間隔が狭くなっている。これまでに、0.8 m³、1.9 m³、3.1 m³の3種類が使用されている(写真-1)。

カルシアバケットでは、通常のバケット同様の掬い上げ・落下時の混合に加え、スケルトン構造通過時の混合効果が期待できる(写真-2、図-2)。このため、土運船内の浚渫土にカルシア改質材を添加してバックホウ混合を行う場合、カルシアバケットでは通常のバケットよりも混合時間の短縮が可能である²⁾。



写真-1 カルシアバケット
(左上: 0.8 m³, 右上: 1.9 m³, 下: 3.1 m³)



写真-2 カルシアバケットの使用状況

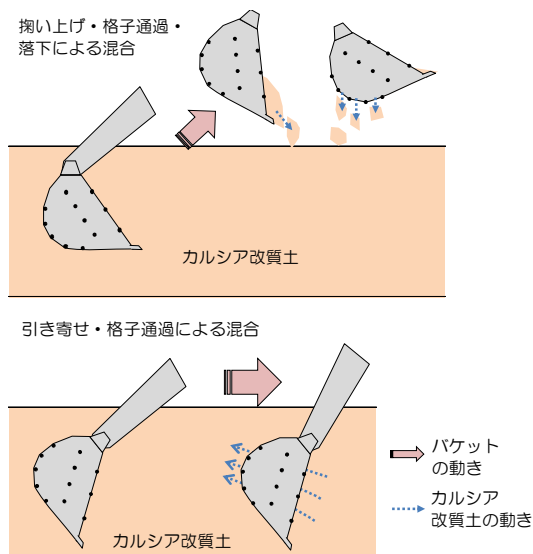


図-2 カルシアバケット混合模式図

カルシアバケットによる実績が増えたことから、施工条件や混合時間の整理を行った。また、「カルシア改質土工法積算マニュアル」⁵⁾(以後、「積算マニュアル」と略)に記載の標準的なバックホウ規格と土運船の組合せをもとに、標準バケットとカルシアバケットのCO₂排出量の比較を行った。

(2) 施工全体のCO₂排出量

「積算マニュアル」には、混合工としてバックホウ混合と落下混合の2つが記載されている。落下混合は、リクレーマー船のベルトコンベアの乗継部等での落下時に材料を混合する方式である。通常の落下混合での施工では、リクレーマー船を艀装し、ブームコンベアでの揚土後にさらに1回、合計3回の落下混合が必要である。

これに対し、リクレーマー船を改造したカルシア落下混合船(以下、落下混合船と略)では、ブームコンベアからの排出後に3回の落下混合が完了し、より効率的な施工が可能である(写真-3)⁶⁾。また、落下混合船での施工の場合、ブームコンベアの先端の下に配置した土運船にカルシア改質土を打設して運搬後にグラブ投入する方法と、ブームコンベアの落下先にトレミー管を配置して直接投入する方法を選択することができる。

そこで、カルシア改質土による浅場造成を想定し、①バックホウ混合-グラブ投入(標準バケット使用)、②バックホウ混合-グラブ投入(カルシアバケット使用)、③落下混合船-グラブ投入、④落下混合船-トレミー投入の4ケースについてCO₂排出量の比較を行った。各ケースの施工イメージを図-3に示す。なお、岸壁に貯蔵したカルシア改質材を①②はバックホウで土運船に投入し、③④はガットバージで落下混合船に運搬供給するものとした。

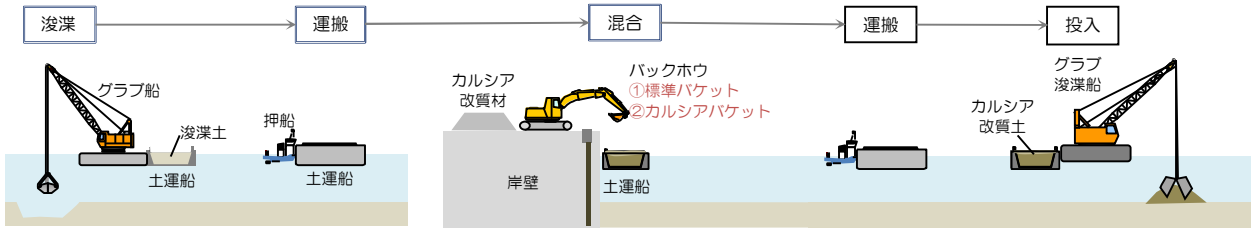
CO₂排出量の計算に必要な燃料使用量は、「建設機械等損料表」⁷⁾に記載の値を使用した。記載の無い落下混合船は、これまでの施工実績をもとに算出した。

燃料のCO₂排出原単位は、排出原単位データベース⁸⁾の軽油 2.585 kg-CO₂/L、A重油 2.710 kg-CO₂/Lを使用した。なお、カルシア改質材運搬時とカルシア改質材製造段階のCO₂排出量は、各ケースの条件が同じため計算から除外した。

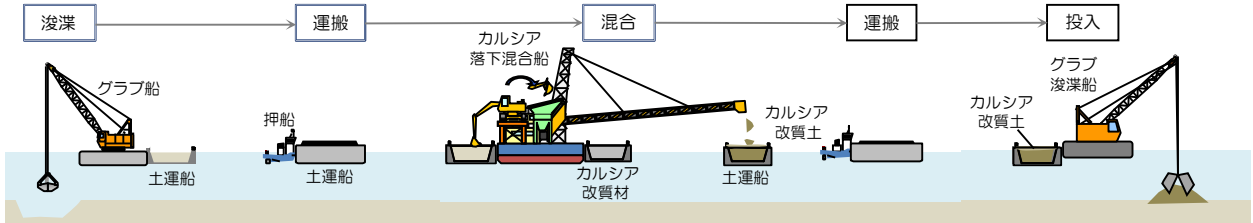


写真-3 カルシア落下混合船

①② バックホウ混合-グラブ投入



③ 落下混合船-グラブ投入



④ 落下混合船-トレミー投入

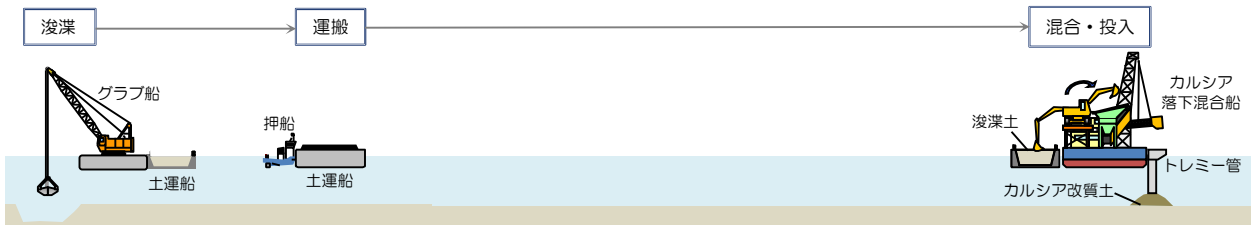


図-3 施工方法模式図

表-1 カルシアバケットの施工事例

区分	内容	項目	単位	事例1	事例2	事例3-1	事例3-2	事例4-1	事例4-2	事例5-1	事例5-2	事例6-1	事例6-2
材料の性状	浚渫土	含水比	%	162.0	82.2	112.4	83.1	115.9	71.5	114.9	88.0	114.4	87.1
		液性限界	%	111.3	63.2	65.6		70.0		71.2		71.2	
		細粒分含有率	%	99.3	84.8	88.8		91.6		84.1		84.1	
	カルシア改質土	カルシア改質材混合率	%	40	20	20		20		20		20	
		シリンダーフロー	mm	83	86	86	86	130	86	82	82	139	85
施工状況	土運船	規格	m ³	1300	1100	600		600		600		1100	
		カルシア改質土積載量	m ³	730	645	380		340		360		635	
	バックホウ	通常バケット容量	m ³	-	3.5	3.5		1.9		1.9		3.5	
		カルシアバケット容量	m ³	3.1	3.1	3.1		1.9		1.9		1.9	
		バケット総容量	m ³	3.1	6.6	6.6		3.8		3.8		5.4	
		混合時間	分	100	70	40	50	40	50	40	50	60	70
		混合能力	m ³ /h	438	553	570	456	510	408	540	432	635	544

3. 検討結果

(1) バックホウ混合時のCO₂排出量

カルシアバケットの混合時間の測定事例を表-1に示す。事例1以外は、標準バケットとカルシアバケットを1台ずつ使用しているが、これもカルシアバケット使用として扱った。表中の混合時間は、混合時の一定の経過時間ごとに6~8ヶ所の湿潤密度を測定し、バラつきが小さくなった時間である。

バケット総容量と混合能力の関係について、「積算マニュアル」⁵⁾記載の標準バケットのデータ(複数台のバケットでの施工を含む)と表-1のカルシアバケットの

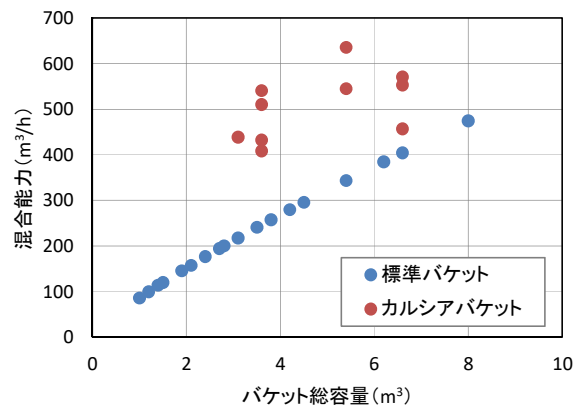


図-4 バケット山積総容量と混合能力

データを合わせて図-4に示す。同容量の混合能力を比較すると、カルシアバケツは標準バケツの1.1~2.1倍であり、平均で1.67倍であった。

次に、標準的なバックホウ規格と土運船の組合せの中から、650 m³積土運船と1.9 m³のバックホウ2台を使用してカルシア改質土を混合する場合を想定した。カルシア改質土は、密度が大きい製鋼スラグを浚渫土に混合するため湿潤密度が大きく、土運船に満載にすることはできない。ここでは、表-1の各事例の土運船規格に対するカルシア改質土積載量の比率を算出し、その平均値である59%を用いて、650 m³×59%=384 m³をカルシア改質土の混合量とした。

標準バケツとカルシアバケツの混合能力、混合時間、CO₂排出量の比較を表-2に示す。1.9 m³のバックホウ×2台使用時のバケツ総容量は3.8 m³であり、図-4より標準バケツの混合能力は256 m³/hとなる。カルシアバケツは標準バケツの1.67倍の混合能力があるとすると、256 m³/h×1.67=429 m³/hとなる。

これをもとに384 m³のカルシア改質土の混合時間を計算すると、標準バケツは384 m³÷256 m³/h=90分となる。これに対し、カルシアバケツの混合時間は384 m³÷429 m³/h=54分となった。

次に1.9 m³のバックホウの燃料使用量 34 L/h⁸⁾と混合時間等をもとに式(1)から、土運船1隻あたりのバックホウ混合時のCO₂排出量を計算した。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量(kg-CO}_2\text{)} = \text{燃料使用量(L/h)} \times \text{混合時間(h)} \times \text{使用台数} \times \text{軽油の排出量原単位(kg-CO}_2\text{/L)} \quad (1)$$

標準バケツの262 kg-CO₂に対し、カルシアバケツでは157 kg-CO₂となり、混合作業時のCO₂排出量は40%減少した。

(2) 施工全体のCO₂排出量

カルシア改質土100,000 m³により浅場造成工事を想定し、「積算マニュアル」に従い、浚渫・混合・運搬・投入の各工種に対して、1時間あたりの施工能力や1日の運転時間、1日あたりの施工能力と稼働日数を計算した(表

表-2 標準バケツとカルシアバケツの比較

区分	項目	単位	標準バケツ	カルシアバケツ
土運船	土運船規格	m ³	650	
	積載カルシア改質土量	m ³		384
バックホウ	通常バケツ容量	m ³	1.9×2	1.9
	カルシアバケツ容量	m ³	-	1.9
	バケツ総容量	m ³	3.8	3.8
	混合能力	m ³ /h	257	429
	混合時間	分	90	54
	混合時CO ₂ 排出量	kg-CO ₂	262	157
	標準バケツに対するCO ₂ 排出量の比率	%	100	60

-3)。なお、④落下混合船-トレミー投入では、投入材料の堆積状況に応じて投入位置を変更する必要があるが、施工実績をもとにこれを加味して条件を設定した。

①バックホウ混合-グラブ投入(標準バケツ使用)と②バックホウ混合-グラブ投入(カルシアバケツ使用)では、1台の土運船に対して2台のバックホウを使用し、これを2セット配置して作業するものとした。

③落下混合船-グラブ投入と④落下混合船-トレミー投入は、混合能力が大きいため、バックホウ混合よりも大型の浚渫船(カルシア改質材混合率20 vol%のみ)と大型の土運船を使用した。また、岸壁への接岸が不要となるため、土運船の移動距離が短い設定とした。

カルシア改質材混合率20 vol%の各ケースを例として1日あたりのCO₂排出量を表-4~表-7に示す。なお、各機材のCO₂排出量は式(2)により求めた。

$$\text{各機材のCO}_2 \text{ 排出量(kg-CO}_2\text{/日)} = \text{燃料使用量(L/日)} \times \text{運転時間(h/日)} \times \text{燃料の排出量原単位(kg-CO}_2\text{/L)} \quad (2)$$

各機材のCO₂排出量の合計が各ケースの1日あたりのCO₂排出量となる。これに稼働日数を掛けたものをCO₂排出量とした。

表-3 施工条件

項目	単位	設定値				
		①	②	③	④	
カルシア改質材混合率	vol%	20, 30				
施工能力(20vol%)	浚渫工	m ³ /h ³	224	224	359	359
	混合工	m ³ /h	230	274	454	454
	投入工	m ³ /h	224	224	-	430
施工能力(30vol%)	浚渫工	m ³ /h ³	224	224	224	224
	混合工	m ³ /h	202	240	302	302
	投入工	m ³ /h	224	224	-	334
土運船移動距離	浚渫-混合	km	2.6	2.6	1.5	2.1
	混合-投入	km	1.7	1.7	0.6	-
	投入-浚渫	km	2.1	2.1	-	-

表-4 ①バックホウ混合-グラブ投入(標準バケツ)使用機材

区分	機材名	燃料種類	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /日
浚渫	グラブ浚渫船(普)スバッド式(鋼9.0m ³ 級)	A重油	2,106
	揚錨船 鋼D10t吊	A重油	201
混合	バックホウ1.9m ³	軽油	552
	バックホウ1.9m ³	軽油	552
	バックホウ1.9m ³	軽油	552
	バックホウ1.9m ³	軽油	552
	バックホウ0.8m ³	軽油	273
	引船 鋼D1000PS型	A重油	618
運搬	土運船 押船650m ³ 積	-	-
	土運船 押船650m ³ 積	-	-
	土運船 押船650m ³ 積	-	-
	土運船 押船650m ³ 積	-	-
	押船 鋼D1300PS型 4h	A重油	1,607
	押船 鋼D1300PS型 2h	A重油	802
投入	グラブ浚渫船(普)スバッド式(鋼9m ³ 級)	A重油	2,948
	揚錨船 鋼D10t吊	A重油	201
合計			11,766

表-5 ②バックホウ混合-グラブ投入 (カルシアバケット) 使用機材

区分	機械名	燃料種類	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /日
浚渫	グラブ浚渫船(普)スパッド式(鋼9.0m ³ 級)	A重油	2,106
	揚錨船 鋼D10t吊	A重油	201
混合	バックホウ1.9m ³	軽油	552
	バックホウ1.9m ³ (カルシアバケット)	軽油	552
	バックホウ1.9m ³	軽油	552
	バックホウ1.9m ³ (カルシアバケット)	軽油	552
	バックホウ0.8m ³	軽油	273
運搬	引船 鋼D1000PS型	A重油	618
	土運船 押船650m ³ 積	-	-
	土運船 押船650m ³ 積	-	-
	土運船 押船650m ³ 積	-	-
	土運船 押船650m ³ 積	-	-
	押船 鋼D1300PS型 4h	A重油	1,607
	押船 鋼D1300PS型 4h	A重油	1,607
投入	グラブ浚渫船(普)スパッド式(鋼9m ³ 級)	A重油	3,369
	揚錨船 鋼D10t吊	A重油	201
合計			12,991

表-6 ③落下混合船-グラブ投入使用機材

区分	機械名	燃料種類	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /日
浚渫	グラブ浚渫船(普)スパッド式(鋼23.0m ³ 級)	A重油	6,385
	揚錨船 鋼D15t吊	A重油	238
混合	落下混合船	軽油	5,160
	揚錨船 鋼D15t吊	A重油	477
	ガットバージ グラブ3m ³ 、1000m ³ 積	A重油	1,220
	ガットバージ グラブ3m ³ 、1000m ³ 積	A重油	1,220
	引船 鋼D1000PS型	A重油	618
	バックホウ1.9m ³	軽油	552
	ダンプトラック10t積	軽油	196
運搬	ブルドーザ10t	軽油	196
	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
投入	グラブ浚渫船(普)スパッド式(鋼23m ³ 級)	A重油	7,295
	揚錨船 鋼D15t吊	A重油	238
合計			26,267

CO₂ 排出量の試算結果を表-8 に、CO₂ 排出量と稼働日数についてカルシア改質材混合率 20 vol%の結果を図-5 に、カルシア改質材混合率30vol%の結果を図-6に示す。

カルシア改質材混合率 20 vol%の稼働日数は、①バックホウ混合-グラブ投入と比較して、②のカルシアバケット使用時に 16 %、落下混合船を使用した③④では 58~60 %の短縮となった。CO₂ 排出量は、①バックホウ混合-グラブ投入と比較してカルシアバケットを使用した②では 7 %減少した。③落下混合船-グラブ投入では 6 %のCO₂ 排出量の抑制に留まったが、④落下混合船-トレミー投入ではCO₂ 排出量が 34 %減少した。

②のカルシアバケット使用では、土運船のサイクル数が増え、押船等の運転時間が増えるため、1日あたりのCO₂ 排出量は①と比較して増加するが、稼働日数が減るため、合計のCO₂ 排出量は減る結果となった。

カルシア改質材混合率 30 vol%のCO₂ 排出量も傾向は同じであるが、カルシア改質材の供給が制約となり稼働日数が増えるため、CO₂ 排出量の削減効果は低下した。

表-7 ④落下混合船-トレミー投入使用機材

区分	機械名	燃料種類	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /日
浚渫	グラブ浚渫船(普)スパッド式(鋼23.0m ³ 級)	A重油	6,385
	揚錨船 鋼D15t吊	A重油	238
混合・投入	落下混合船	軽油	5,160
	トレミー管	-	-
	引船 鋼D1000PS型	A重油	618
	揚錨船 鋼D15t吊	A重油	477
	ガットバージ グラブ3m ³ 、1000m ³ 積	A重油	1,220
	ガットバージ グラブ3m ³ 、1000m ³ 積	A重油	1,220
	引船 鋼D1000PS型	A重油	618
	バックホウ1.9m ³	軽油	552
	ダンプトラック10t積	軽油	196
	ブルドーザ10t	軽油	196
運搬	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
	土運船 押船1300m ³ 積	-	-
	押船 鋼D2000PS型 4h	A重油	2,472
合計			19,351

表-8 CO₂ 排出量試算結果

項目	単位	①バックホウ混合-グラブ投入 (標準バケット)	②バックホウ混合-グラブ投入 (カルシアバケット)	③落下混合船-グラブ投入	④落下混合船-トレミー投入
カルシア改質材20vol%混合					
1日当りCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /日	11,766	12,991	26,267	19,351
稼働日数	日	108	91	45	43
①に対する比率	%	100	84	42	40
CO ₂ 排出量	t-CO ₂	1268.4	1175.7	1192.5	834.0
①に対する比率	%	100	93	94	66
カルシア改質材30vol%混合					
1日当りCO ₂ 排出量	kg-CO ₂ /日	10,924	12,151	20,367	14,218
稼働日数	日	141	118	74	74
①に対する比率	%	100	84	52	52
CO ₂ 排出量	t-CO ₂	1535.9	1435.1	1503.1	1049.3
①に対する比率	%	100	93	98	68

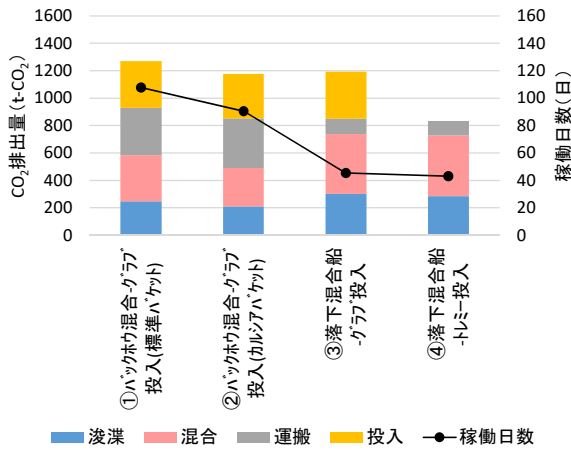


図-5 CO₂排出量と稼働日数 (20vol%混合)

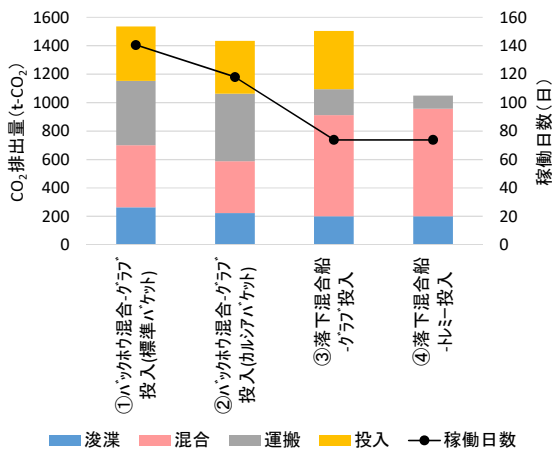


図-6 CO₂排出量と稼働日数 (30vol%混合)

4. まとめ

(1) バックホウ混合時の CO₂ 排出量

カルシア改質土の混合にカルシアバケットを使用することにより、混合能力は標準バケットの1.67倍となった。混合時間が短くなるため、今回の試算では土運船1隻の混合あたり CO₂ 排出量は40%削減された。

(2) 施工全体の CO₂ 排出量

カルシアバケットは混合時の CO₂ 排出量抑制に有効であるが、施工全体で見た場合、浚渫・運搬・投入での CO₂ 排出量が多いため、標準的な①バックホウ混合-グラブ投入に対して、カルシアバケットを使用した②では、施工全体の CO₂ 排出量の7%の抑制であった。

落下混合船を使用した場合、グラブ投入の③の CO₂ 排出量の抑制効果は小さいが、トレミー投入の④では、30%以上 CO₂ 排出量が減少した。

今回の結果は試算であり、施工条件により CO₂ 排出量と削減効果は異なることになる。しかし、複数の施工方法を想定し、施工時の CO₂ 排出量を算出して施工方法の選定に活用することが、今後重要になると考えられる。

参考文献

- (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.
- 野中宗一郎，泉総，浜谷信介：カルシア改質土バックホウ混合専用バケットを用いた混合作業の効率化について，土木学会第76回年次学術講演会，VI-66，2021.
- 田中裕一，高将真，今村正，渋谷貴志，山越陽介，赤司有三，北野吉幸，菅野浩樹：カルシア改質土による海面埋立，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，vol.70，No.2，I_888-I_893，2014.
- 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.
- 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.
<http://calcia.jp/publication/index.html>
- 田中裕一，中島健一，野中宗一郎：カルシア落下混合船の混合特性，土木学会第76回年次学術講演会，VI-65，2021.
- (一社) 日本建設機械施工協会：令和3年度版 建設機械等損料表，2021.
- 環境省：グリーン・バリューチェーンプラットフォーム 算定時の参考資料
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate_tool.html

(Received February 3, 2022)

(Accepted May 9, 2022)

ESTIMATE OF CO₂ EMISSIONS DURING CONSTRUCTION OF STEEL SLAG-DREDGED SOIL MIXTURE AND EXAMINATION OF REDUCTION METHOD

Yuichi TANAKA, Shinsuke HAMATANI, Souichirou NONAKA
and Masao NAKAGAWA

Steel slag-dredged soil mixture is a material used for landfill and shallow field construction. As a result of calculating the CO₂ emissions during the construction of the steel slag-dredged soil mixture, the CO₂ emissions during backhoe mixing were reduced by about 40% by using the Calcia bucket.

In addition, CO₂ emissions during construction were reduced by 30% or more compared to backhoe mixing by using a drop mixing vessel and putting it into water through a tremie pipe.