

カルシア改質土を適用した大規模浅場造成 工事の概要とモニタリング調査報告

中川 雅夫¹・安藤 満²・今村 均³・木曾 英滋⁴・眞鍋 忠司⁵

¹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)
E-mail: masao.nakagawa@mail.penta-ocean.co.jp

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

³非会員 日本海洋コンサルタント(株)技術本部 (〒100-8071 東京都港区芝浦 3-7-9)

⁴正会員 日本製鉄(株)スラグ事業・資源化推進部 (〒100-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1)

⁵非会員 日本製鉄(株)瀬戸内製鉄所(広畑地区)安全環境防災部 (〒671-1188 姫路市広畑区富士町 1 番)

民間浚渫工事で発生する浚渫土を改良したカルシア改質土とスラグ人工石等を用いて、漁業協同組合と民間企業が協働して、沿岸漁業環境改善を目的とした大規模浅場を造成した。造成後、約3年間にわたってモニタリング調査を行い、カルシア改質土で造成した浅場基盤の地盤強度、形状安定性、周辺環境に及ぼす安全性、生物着生効果や当該地域での有用魚介類の漁獲調査等を実施した。その結果、造成した人工浅場は、台風履歴後も崩壊等は生じず安定で耐久性を有すること、カルシア改質土が周辺海域環境に悪影響を及ぼさないこと、ベントス、大型藻類や動物着生効果があること等が確認でき、このような人工浅場の造成によって沿岸漁業環境の改善に寄与できることを実証できた。

Key Words : *calcia improved soil, dredged soil, shallows, marine environment, coastal fishery*

1. はじめに

近年、海域環境保護等の観点から、土砂処分場を建設することが困難になり、軟弱な浚渫土を有効利用できる技術が求められてきた。一方、港湾・空港設備建設や漁場改善のためには、大量の土砂が必要であり、浚渫土の活用が期待されている。

かかる背景のもと、浚渫土に鉄鋼製造工程の副産物である転炉系製鋼スラグを製品化した「カルシア改質材」を混合して、浚渫土の物理・化学性状を改善し、有効利用を可能にする「カルシア改質土」が開発されてきた。カルシア改質土は、浚渫土の強度改善、濁り抑制、浚渫土からの硫化水素やリン酸の発生を抑制することによる底質浄化等の効果を有し¹⁾、干潟・浅場基盤材、浚渫窪地埋戻材等の海域環境修復用途への適用が期待できる。

本稿では、沿岸漁業の再生を望む漁業協同組合と浚渫土の処分に苦慮する民間企業が協働して、民間浚渫土を用いたカルシア改質土を使用して大規模浅場を造成し、その後3年以上にわたって、種々のモニタリング調査を実施した結果について報告する。尚、本研究は「ひょうごエコタウン推進会議の鉄鋼スラグの利用拡大研究会」の活動により、得られた成果である。

2. 浅場造成工事の概要

(1) 工事概要

人工浅場の造成場所は、近年、揖保川からの浮泥が海底に堆積し、沿岸漁業の漁獲高が減少している姫路市網干地区土砂処分場の護岸沖合を選定した。

工事は、表-1に示すように、2015年から3期に分割して実施し、総面積約2haにわたって、水深が7~9mであった海底を水深2.5~3.5mまで嵩上げして浅場化した。浅場造成の概要図を図-1に示すが、浅場基盤をカルシア改質土で造成し、表面を天然石と鉄鋼スラグ水和固化体製人工石²⁾(以下、スラグ人工石)で被覆することにより浅場を造成した(一部に砂被覆部やカルシア露出部あり)。

表-1 浅場造成工事の工事区分と主要数量

工区	その1	その2	その3	合計
施工時期	2015年 7~10月	2017年 5~9月	2018年 6~9月	
整備面積 (m ²)	2,450	12,600	5,390	20,440
浚渫土量 (m ³)	7,200	33,600	24,200	65,000
カルシア改質土(m ³)	10,100	52,600	37,100	99,800
被覆石* (m ³)	4,000	15,900	18,000	37,900

*その1のみ人工石と天然石、その2、その3はすべて人工石

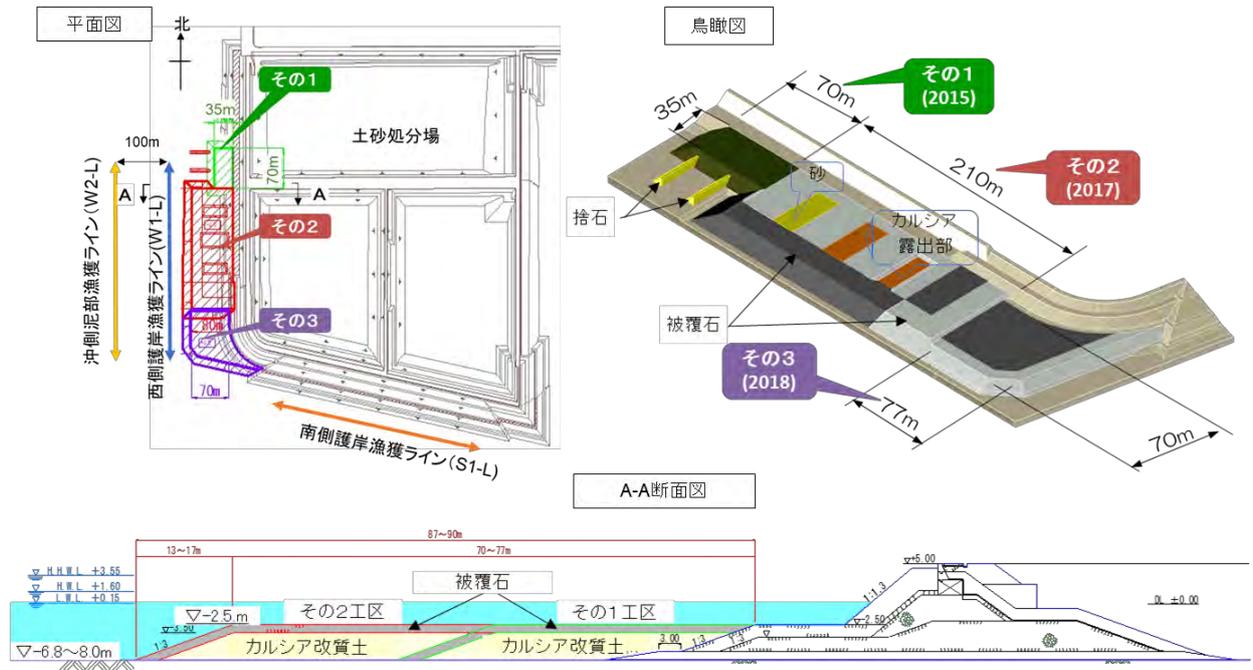


図-1 浅場造成の概要図



図-2 浅場造成工事の施工フローと工事状況

(2) 浅場造成の施工方法

a) 施工フロー

浅場造成工事の施工フローと工事状況を図-2に示す。浚渫は日本製鉄(株)瀬戸内製鉄所(広畑地区)の航路において、7m³のグラブ浚渫船で実施し、浚渫土は650m³積の土運船で製鉄所の夢前岸壁に運搬した。岸壁では浚渫土の入った土運船に、3.5m³バックホウでカルシウム改質材を投入した後に、同じバックホウで浚渫土と改質材を90分間混合してカルシウム改質土を製造した。カルシウム改質土は、同じ土運船によって網干地区の浅場造成場所まで運搬され、5m³グラブを有するクレーン付き台船で、海中の所定場所に投入した。その後、天然石材、スラグ人工石材や砂で表面を被覆した。

b) 浚渫土、カルシウム改質材の性状と配合の設定

工事に適用した浚渫土、カルシウム改質材の平均的な性状を表-2、表-3に示す。浚渫土は各工事でほぼ均質な軟弱粘土であったが、カルシウム改質材は、その2、その3工事では在庫材を使用したため、浚渫土の強度上昇能力の指標である遊離酸化カルシウム量(f-CaO)が初期に比べて減少している傾向がみられた。

改質土の設計基準強度(一軸圧縮強さ)q_{uck}は、浅場の円弧すべりに対する安全性等を考慮して、カルシウム層の

粘着力 c=14kN/m², q_{uck(現場)}=2c=28kN/m²と設定した。カルシウム改質土利用技術マニュアル³⁾より、不良率を25%、変動係数を0.35、現場/室内強度比を0.5とすると、室内設計強度 q_{uck(室内)}は56kN/m², 室内配合強度 q_{ul}≥74 N/m²となる。事前配合試験により、容積比で浚渫土70%と改質材30%を混合すればこれを満足することを確認した。

表-2 浚渫土の性状

項目	単位	その1	その2	その3
土粒子密度	g/cm ³	2.60	2.63	2.65
湿潤密度	g/cm ³	1.22	1.20	1.22
細粒分含有率	%	99	99	98
含水比	%	238	277	250
液性限界	%	139	154	133
塑性限界	%	49	50	45
強熱減量	%	11.2	11.8	12.4

表-3 カルシウム改質材の性状

項目	単位	その1	その2	その3
表乾密度	g/cm ³	2.57	2.77	2.54
中央粒径	mm	5.5	3.5	3.5
遊離石灰(f-CaO)	%	5.7	3.2	2.6

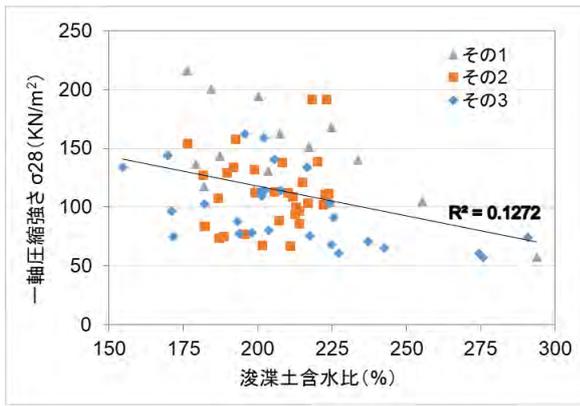


図-3 浚渫土含水比と一軸圧縮強さの関係

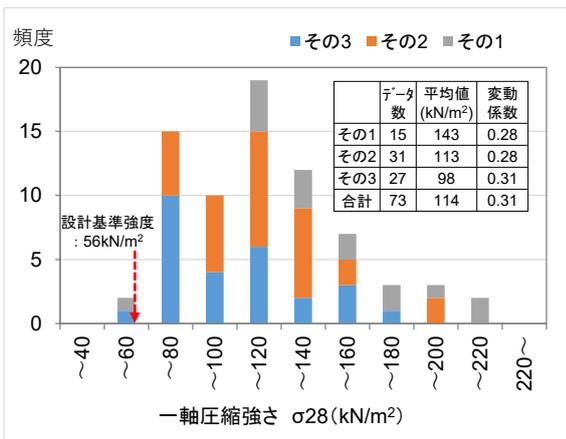


図-4 一軸圧縮強さの頻度分布

c) 工品質管理

現場での品質管理として、土運船内の浚渫土の含水比、湿潤密度測定と、改質材混合後の改質土の湿潤密度測定、28日後の一軸圧縮試験を実施した。改質前後の密度を測定したのは、混合均一性を簡便に検査することが可能なためである。浚渫土含水比と改質土の一軸圧縮強さの関係を図-3、一軸圧縮強さの頻度分布を図-4に示す。

図-3に示すように、浚渫土の含水比が高いほど強度は低下するため³⁾、施工時には浚渫土の含水比が高くないように留意した。図-4より、全工事において一軸圧縮強さが室内設計基準強度 56kN/m²を下回る不良率は2.5%、変動係数は0.3程度で、設計で設定した不良率(25%)、変動係数(0.35)以下であることが確認できた。また、その1工事からその3工事の平均強度が低減しているのは、カルシア改質材の長期在庫によって、f-CaO量が低減している(表-3)ことが原因と考えられた⁴⁾。

3. モニタリング調査の結果

(1) 調査項目と調査要領

モニタリング調査は、浅場造成後 2015 年から 2018 年

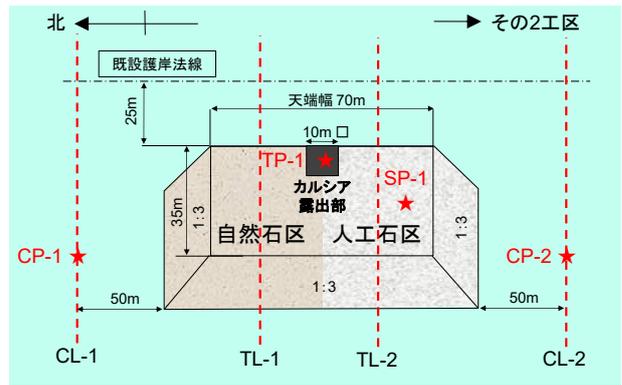


図-5 その1工区調査位置図

に亘り定期的実施してきたが、本稿ではその1工区で実施した調査結果を中心に報告する。その1工区の調査地点や測線を図-5に示し、各調査項目の調査方法、調査時期等は以下に詳述する。

(2) 造成地盤の強度と安定性

a) ボーリング調査による強度確認

図-5のSP-1の位置で造成14か月後にSEP台船を用いてボーリングし、トリプル型サンプラー(硬軟両用マルチコアバックチューブ)を使用して不攪乱のカルシア改質土を採取した。表-4に採取した改質土の一軸圧縮試験結果を示す。一軸圧縮強さの平均値は105kN/m²(現場強度)で、図-4に示したその1工区の土運船内サンプルの平均強度(室内強度)と比較した現場/室内強度比は105/143=0.73で、養生日数の違いはあるが、マニュアルに記載された現場室内強度比0.5を上回っていた。

b) 浅場マウンド形状の安定性

造成した浅場の出来形と形状の長期安定性を確認するために、造成直後と約3年後のその3工事完了後にナローマルチビームを用いて浅場表面の標高を調査した(図-6参照)。両者を比較すると、浅場中央部で0.6m程度の圧密沈下が見られるが、崩壊等の兆候はない。造成後3年の間には、2016年の台風16号(推定有義波高1.5m程度)、2017年台風18号、関西国際空港を襲った2018年台風21号(両者とも推定有義波高2.5m程度)の被災を受けたが、崩壊等は見られなかった。尚、被覆石の重量は既設護岸の設計(有義波高3.5m)に倣い設定した。

表-4 一軸圧縮試験の結果

深度*	一軸圧縮強さ (kN/m ²)		
	上層	中層	下層
0.0~0.85 m	46.0	70.5	77.8
0.90~1.80 m	68.9	116	200
1.80~2.70 m	135	74.5	153
	平均値 :: 105 kN/m ² 変動係数 : 0.48		

*深度はカルシア層表面からの深度を示す

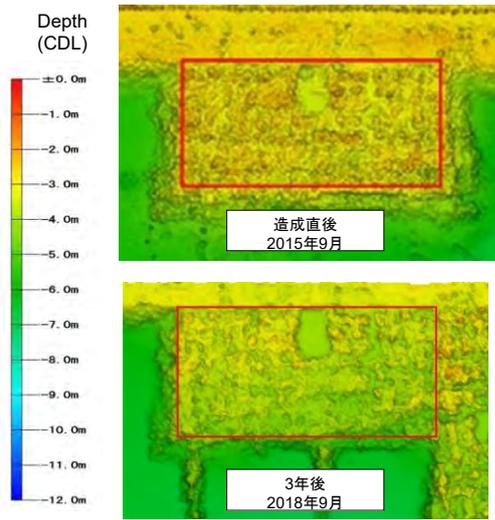


図-6 浅場マウンド表面の標高調査

ここで有義波高の推定値は、気象庁 GPV データ(推算値)から実験区に近いポイントの推算値を引用した。

(3) 底質・水質調査

a) カルシア改質土と直上海水の環境安全性の調査

カルシア改質土からの経時的な有害物質の溶出安全性を調査する目的で、図-5 の TP-1 部から、試料を採取して、利用技術マニュアル³⁾に規定された「水底土砂に係る判定基準」の 34 項目について溶出試験を実施した。試験は、施工後 2, 8, 14 ヶ月後にそれぞれ実施したが、結果はすべて基準値以内であった。また、TP-1 の直上海水を採取して、同時期に「人の健康の保護に関する水質環境基準」の 27 項目に関する水質試験を行ったが、全て基準値以下で、周辺環境に対する安全性を確認できた。

また、カルシア直上部海水の pH は工事中・工事後を通じて 8.4 以下で周辺海水の pH 上昇は生じていない。

b) 水産用水基準に関する調査

水産用水基準の底質調査に規定されている 6 項目 (COD, 硫化物, 全窒素, 全リン, 強熱減量, pH)について、TP-1(カルシア改質土)と CP-1,CP-2(底泥部)で調査した。一例として、図-7 に底質の COD の調査結果を示すが、カルシア露出部の COD は底泥部と比較して著しく低減されている。これはカルシア改質材と混合することで、浚渫土中の硫酸塩還元反応を抑制し、溶存態硫化物を生成しにくくする効果に起因すると考えられる¹⁾。

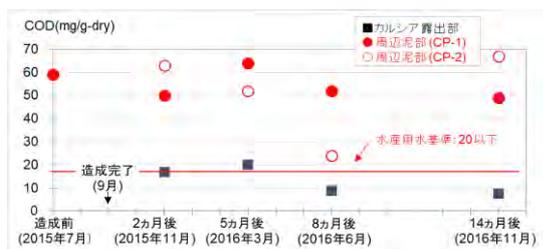


図-7 底質の COD の比較

(4) 生物への影響

a) カルシア改質土に着生する底生生物

改質土の表層部にも生物が着生するかを確認するために、カルシア露出部(10m×10m)の TP-1 部から面積 0.1m²の泥をハンドマッキン採泥器で採取し、1mm メッシュのふるいでふるった残渣をホルマリン (+海水) で固定することで、マクロベントスの種数、個体数と多様性指数を分析した結果を図-8 に示す(造成前の値は CP-1(泥部)での測定結果)。ここで多様性指数は Simpson の指数 (1-λ) を算定した。Simpson の指数は 0~1 の値で表現され、1 に近いほど生物多様性が高いと評価される。造成前の泥部では、シズクガイ、マメガニ、ゴカイ類が優占していた。造成後は一旦底生生物が消滅したが、5 か月以降は着生が増え、ヨコエビ類、二枚貝類、ナマコ等が出現して多様性指数も上昇している。32 ヶ月には種数は 3 倍、個体数は 5 倍、多様性指数も増加している(最大優占種はゴカイ類)。

b) その 1 工区浅場への生物の着生状況

その 1 工区において、浅場造成前後における藻類や魚介類の着生状況を調査するために、浅場造成前と造成後 2, 5, 8, 14, 20, 32 ヶ月後にライン・トランセクト法による潜水目視調査を行った。調査の場所は、図-5 の調査位置図に示す測線 TL-1(自然石区), TL-2(人工石区), CL-1, CL-2 と TL-1 と TL-2 間の既設護岸基礎部(天端 DL-2.5m)について観察した。藻類の潜水調査の一例として、図-9 に TL-1 測線での 20 ヶ月後の観測スケッチと、写真-1 に 20 ヶ月経過後の TL-1, TL-2 での水中画像を示す。



図-8 マクロベントスの種数、個体数、多様性指数

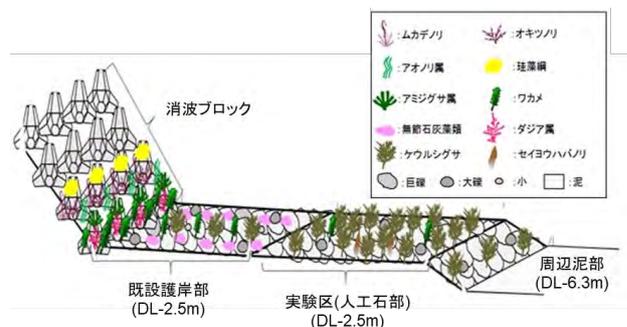


図-9 藻類の繁茂状況 : TL-1(人工石区), 20 ヶ月後

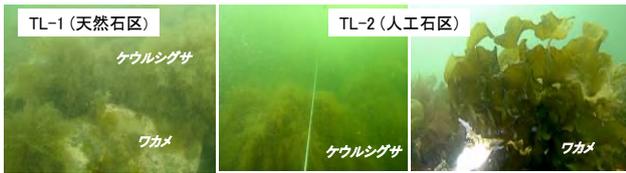


写真-1 藻類の繁茂状況 (20ヶ月経過後)

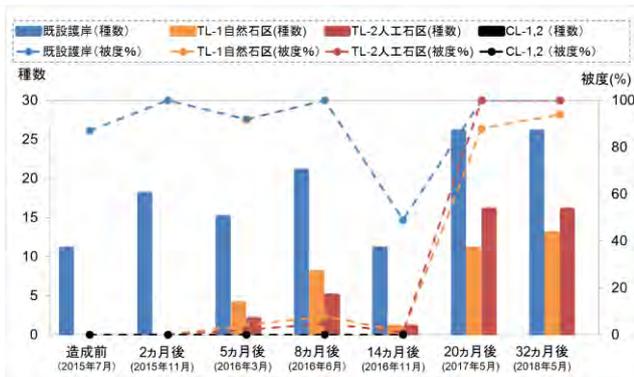


図-10 藻類の種類数と被度

潜水観察から、藻類の種類数と被度の経時変化を整理した結果を図-10に示す。図中の既設護岸区については、図-9に示すように、自然石区、人工石区と同じDL-2.5mのレベルを観察し比較した。CL-1、CL-2の泥部(DL-6.2~7.0m)では、海藻は全く存在しなかった。カルシア改質土と自然石、人工石で嵩上げた部分では、季節性はあるものの、徐々に既設護岸と同様な藻類が着生しはじめ、20ヶ月経過以降ではケウルシグサやワカメが同様の被度で繁茂した。ただし、種数については32ヶ月経過後もホンダワラ類の着生が少ないため、既設護岸部分と同等までには至らなかった。尚、自然石区 TL-1 と人工石区 TL-2 では藻類の着生に大きな違いは見られなかった。

動物についても、CL-1、CL-2の泥部ではハゼ類等のみが観察されたが、浅場造成部では造成後8ヶ月以降では既設護岸部と同等の種(メバル、カサゴ、マナモコ、マガキ、エボヤ等)と個体数の動物の生息が確認された。

(5) 漁獲調査

浅場を造成した土砂処分場の沿岸部では、かご網漁を主体とする漁業操業が行われている。前述したように、水深が深く泥場であった場所に岩礁性の浅場を造成することによって、有用魚介類の餌となる付着動物の増加や、魚介類の増殖を促進する藻類増殖効果を調査してきたが、漁場再生効果を直接確認する目的で、以下の漁獲量調査を実施した。

a) 漁獲記録調査結果

漁獲記録調査は2017年4~10月と2018年度1年を通じて、漁業者に漁獲情報(捕獲場所、魚種、尾数)の記録を依頼し、収集整理することで実施した。

本漁場でのかご網漁は、全長約300mの区間に約15m間隔で20個のかご網を図-1の西側護岸、南側護岸の法尻部に並行して配置して操業しているため、これを1操業単位(unit effort)と定義した。

収集データの内、図-1平面図の西側護岸漁獲ライン(W1-L:実験区)、南側護岸漁獲ライン(S1-1:対照区)のデータのみを取り出し、CPUE(Catch Per Unit Effort:単位努力あたり漁獲量 = (漁獲尾数)/(操業回数))を求めた。

魚種別にCPUEを比較した結果を図-11に示す。魚種総計のCPUEは、浅場造成した実験区で(81.4尾/回)で対照区(52.4尾/回)の1.6倍の漁獲効果があり、浅場造成によって漁獲量は増加している。魚種別にみると、特にナマコが西側で多く捕獲されている。波当たりの強い南側護岸に比べて、西側浅場部はナマコの生育に有利な環境となったためと考えられる。ナマコを除いた遊泳魚のCPUEはほぼ同等で、漁獲種類数も実験区17魚種、対照区15魚種とほぼ同等であった。

b) 試験操業による漁獲調査結果

その1~その3工区浅場造成完了後の2019年5月に、浅場造成後の護岸法尻部漁獲ラインW1-L(実験区)と、浅場造成前の環境を代表している泥場漁獲ラインW2-L(対照区)において、かご網による比較試験操業を実施した(図-1漁獲ライン参照)。かご網漁はa)と同様に300mの区間に20個のかご網(1unit)を実験区と対照区に配置して、各5回操業を行い魚種と漁獲量(尾数)比較した。

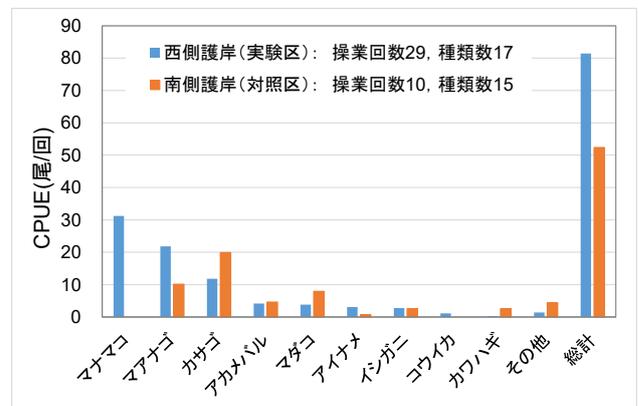


図-11 魚種と漁獲量 (西側護岸と南側護岸のCPUE比較)

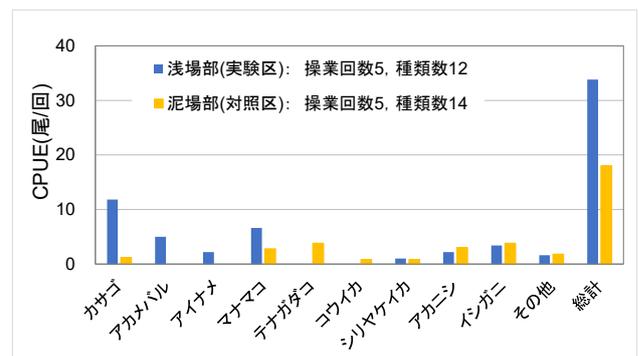


図-12 試験操業結果 (浅場部と泥部のCPUE比較)

図-12 に実験区と対照区の CPUE を示す。魚種は、実験区で12種類、対照区で14種類とほぼ同じであったが、漁獲尾数の総計は実験区が33.8(尾/回)、対照区が18.0(尾/回)と浅場造成エリアが元の泥場に対して1.9倍の漁獲増大効果があった。また魚種別では、実験区ではカサゴ、アカメバル、アイナメ等の岩礁付近に蟄集する魚種が多く漁獲された。

以上より、浅場造成によって、岩礁性の遊泳魚やナマコには好適な漁場環境を提供することができたと考える。ただし、漁獲調査は季節条件や海象条件等に左右されるため、漁獲の増大を浅場造成による効果と断定することは困難であり、今後もデータ収集を継続していきたい。

4. まとめ

カルシア改質土とスラグ人工石等を使用して、沿岸部に大規模浅場を造成し、その後3年以上に亘るモニタリング調査を実施した結果、以下の知見が得られた。

- ①カルシア改質土の現場品質管理のために実施した一軸圧縮試験の結果、その1~3工区を通じて、室内設計基準強度56kN/m²を下回る不良率は2.5%、変動係数は0.35以下で、共に設計値を満足する施工が行えた。
- ②浅場造成後14ヶ月後に現場ボーリングで採取したカルシア改質土供試体の一軸圧縮強さ平均値は105kN/m²で現場設計基準強度28kN/m²を上回っていた。
- ③浅場造成後3年後のナローマルチビームを用いた浅場表面の標高調査の結果、現場は有義波高2.5m程度の台風を2度罹災したが、崩壊等は生じず安定していた。
- ④造成後、経時的にカルシア改質土の溶出試験(水底土砂基準34項目)と直上水の水質試験(人の健康の保護に関する水質環境基準27項目)を実施し、全て基準値以下で周

辺環境に対する安全性を確認できた。

- ⑤カルシア改質土露出部において、マクロベントスの種数、個体数を経時的に調査した結果、32ヶ月後には造成前に比べて種数、個体数、多様性指数とも増加した。
- ⑥藻類着生状況について調査した結果、20ヶ月後には同水深の既設護岸部と同様の藻類がほぼ同等の被度で繁茂したが、種数は既設護岸部の1/2~2/3程度であった。
- ⑦2017~2019年に有用魚種の漁獲量調査を行った結果、浅場造成区近傍で岩礁性の遊泳魚類とナマコの漁獲量が増大していることが確認できた。

以上、カルシア改質土とスラグ人工石で沿岸部に浅場を造成することで、浚渫土を有効利用できるとともに、沿岸漁場環境の改善に寄与できることが実証できた。

謝辞：本プロジェクトの実行にあたって、姫路市漁業協同組合、兵庫県漁業協同組合連合会の皆様には多大なるご協力を賜りましたことをここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 三木理他：転炉系カルシア改質材を用いた浚渫窪地埋め戻し時の海域環境改善予測，海洋理工学会誌 17-1, pp37-48, 2011
- 2) 沿岸技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル(改訂版)，2008
- 3) 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，pp8-1~8-4, pp附2-2, 2017
- 4) 山越陽介他：カルシア改質土の基本特性，新日鐵住金技報 No.399, p51-58, 2014
- 5) 大垣俊一：多様性と類似度，分留学的新指標，Argonauta 15: 10-22, 2008 (<http://www.mus-nh.city.osaka.jp/>)

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

REPORT ON CONSTRUCTION METHOD AND MONITORING SURVEY OF LARGE-SCALE SHALLOWS USING CALCIA IMPROVED SOIL

Masao NAKAGAWA, Mitsuru ANDOH, Hitoshi IMAMURA, Eiji KISO
and Tadashi MANABE

This paper reports on the construction method of large-scale shallows in coastal area using Calcia Improved Soil produced by mixing dredged soil and steelmaking slag products, and on the results of monitoring survey around them for over 3 years after construction. This project was implemented in collaboration with the local fishery cooperative, the orderer of private dredging work and the contractor of this work. The results confirmed that the created artificial shallows were stable without collapse even after the history of the typhoon, that the calcia improved soil did not adversely affect the surrounding marine environment, and that it had an algae and animal settlement effect. It was consequently demonstrated that the creation of such artificial shallows could contribute to the improvement of the coastal fishing ground environment.