

堺泉北港における産業関連副産物の 実証試験について

杉田 徹¹・宇野 健司¹

¹近畿地方整備局 港湾空港部 海洋環境・技術課 (〒650-0024神戸市中央区海岸通29番地)

2010年度に大阪湾内の堺泉北港堺2区北泊地において、潜堤の腹付材に産業関連副産物である製鋼スラグを活用して実証試験を実施した。約10年にわたるモニタリング結果から、出来形変位では概ね、当初の形状を維持できており、強度についてもコーン指数の値が腹付材の最奥部において表面付近より高い値であることが確認された。安全性の確認では、腹付材の間隙水のpHが高くなる時期がみられたものの、周辺海域へのアルカリ溶出による影響はみられず、腹付材が生物に影響を及ぼしている可能性は低いと考えられた。また、製鋼スラグによるリン等の吸着効果が確認されるとともに、アルカリ成分溶出試験により、海底泥からのカルシウムイオンは溶出していないことが示され、その結果、海水中のpHにほとんど影響がないことが判明した。

キーワード 浚渫土砂、製鋼スラグ、潜堤、リン吸着効果

1. はじめに

産業副産物である製鋼スラグは、海域における環境修復である干潟、浅場、覆砂等の造成材として技術開発・利用等が進められているところである。

一方、大阪湾には、海域環境悪化の原因の一つとされている海底窪地が21箇所存在している。また、今後の港湾整備に伴い発生する浚渫土砂は土砂処分場の残余容量が逼迫していることもあり、海底地形修復などの環境改善施策への有効活用が求められている。

このため、海底地形修復や浅場造成等に必要となる潜堤構造物や基礎地盤への浚渫土砂・産業副産物の有効性を確認するため、2010年度に大阪湾内の堺泉北港堺2区北泊地において、潜堤構造物の腹付材に製鋼スラグと浚渫土砂の混合材を活用した実証試験を行った。

本稿では、2010年度から2020年度に実施したモニタリング調査結果を整理し、腹付材の強度等の安定性及び水質等の環境面の安全性の評価について報告する。

2. 堺2区北泊地の現況及び環境条件

堺2区北泊地は大阪湾奥部の堺泉北港（国際拠点港湾）の北部に位置し、周囲を埋立地に囲まれ、高度成長期に発生した浚渫窪地により、夏季を中心に貧酸素水塊が発生しやすい閉鎖性が高い海域である。北泊地には連続的な水質データを取得・常時モニタリングしている水

質定点自動観測装置が設置してあり、図-3に示すように夏季の底層DOが極めて低い状態である。また、背後には流域面積が1,070km²に及ぶ一級河川の大和川が存在するため、淡水の影響を受けやすく、特に表層で塩分が低い状態である。

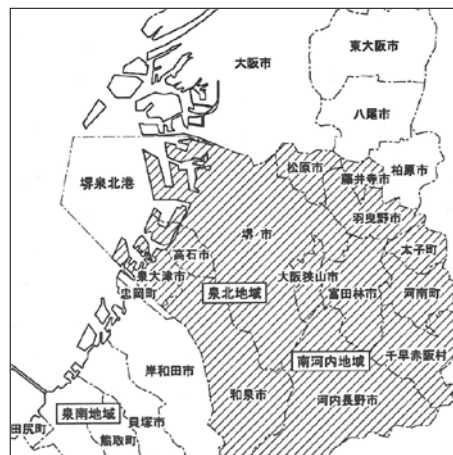


図-1 堺泉北港の位置

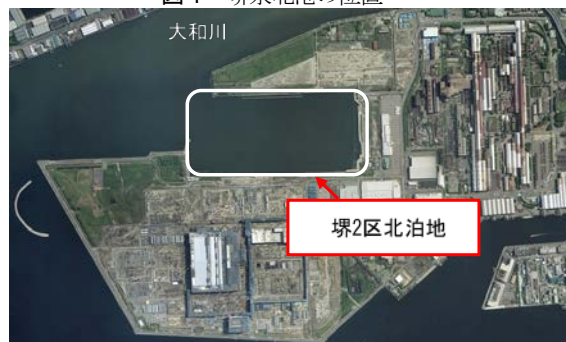


図-2 堺泉北港堺2区北泊地の位置

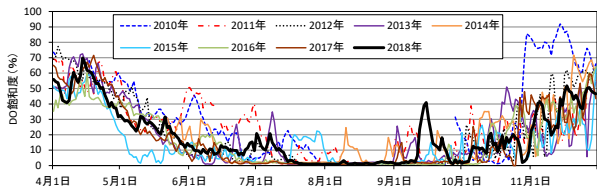


図-3 大阪湾定地点自動観測による底層DOの経年変化

3. 実証試験の概要

(1) 使用材料

浚渫土砂は大阪港夢洲地区の浚渫工事から発生する土砂をスラグは市販の製鋼スラグ (JIS A5015) を用いて、混合率20%で浚渫土砂と製鋼スラグを混合した。

なお、2010年度の現地実証試験前に実施した製鋼スラグと浚渫土砂の事前配合試験 (室内) により、コーン指数及び一軸圧縮強さのいずれにおいても、製鋼スラグ混合率の増加に応じて値が大きくなることが示された。

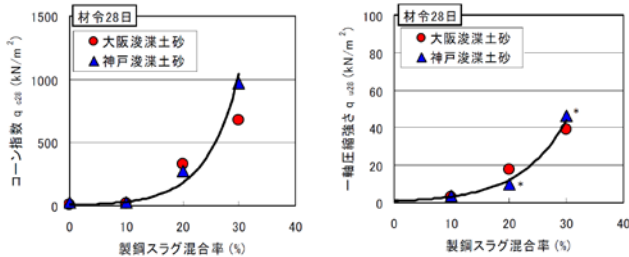


図-4 配合試験の結果 (左: コーン指数, 右: 一軸圧縮強さ)

(2) 試験形状

今回試験を行う腹付材の形状は、将来計画の浅場造成を想定し、その土留堤となる潜堤の一部に浚渫土砂と製鋼スラグの混合材を使用した。

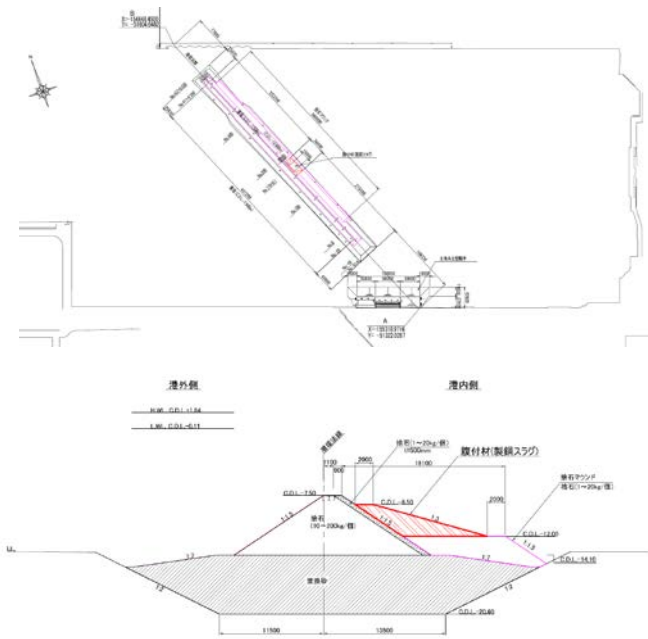


図-5 潜堤の平面図 (上) 及び断面図 (下)

(3) 実証試験の施工

2010年12月26日～27日に実証試験を行うための潜堤及び腹付材の施工を実施した。

施工は、大阪港主航路横で浚渫土砂400m³を採取して土運船で現地へ運搬し (2010年12月26日), 翌日にガット船で運搬してきた製鋼スラグ100m³を土運船内に投入して、起重機船上のバックホウ (2台) により混合・攪拌を2時間以上行った。混合・攪拌を行ったスラグ混合材は、砂撒船に設置したトレミーにより濁りに十分注意しながら所定の水深に投入した。



図-6 製鋼スラグと浚渫土砂の混合材投入状況

(4) 実証試験のモニタリング項目

実証試験では、安定性については、腹付工の出来形変位、腹付材の強度等を確認し、環境面の安全性については、水質調査、底質分析試験、底生生物調査、アルカリ成分溶出試験等を確認した。モニタリング調査は、潜堤施工後の2010年度から2020年度の11年間にわたって実施した。詳細な調査地点・時期・項目・頻度等については、表-1及び表-2を参照することができる。

なお、表-2に示すとおり、強度等確認は年度によって実施項目・実施方法が異なっている。

表-1 (1) 実証試験の実施状況 (安定性)

安定性		
	腹付工の出来型変位測定	腹付材の強度等確認
年度	2010年度 (施工時) : 6点 (土運船内)	2010年度 (施工時)
	2010年度 (施工28日後)	2010年度 (施工28日後)
年度	2016年度 : 5測線	: 1点
	2016年度 : 6測線	: 3点
年度		2020年度
		: 腹付材の表面、中央部、最奥部 (捨石との境界付近)
	水深、形状確認	コーン指数、含水比、 湿潤密度、乾燥密度
2010	冬	冬
2016	秋	秋
2020	秋	秋

表-1 (2) 実証試験の実施状況 (安全性)

安全性				
年度	水質調査①			水質調査②
	水質計		採水	水質計
	No. 150*	No. 170*	No. 150*	No. 2, 3
	上層及び下層	マウンド底面上10cm 間隙水深さ5cm、 間隙水深さ10cm	上層及び下層	上層及び下層
	水温、塩分、DO、pH	pH	COD、T-N、 T-P、PO ₄ -P	pH
2010	冬		冬	—
2011	春夏秋冬	春夏秋冬	春夏秋冬	春夏秋冬
2012	春夏秋冬	春夏秋冬	春夏秋冬	春夏秋冬
2013	春夏秋冬	春夏秋冬	春夏秋冬	春夏秋冬
2014	春夏秋冬	春夏秋冬	春夏秋冬	春夏秋冬
2015	—	—	—	—
2016	春夏秋冬	春夏秋冬	—	春夏秋冬
2017	春夏秋冬	春夏秋冬	—	春夏秋冬
2018	春夏秋冬	春夏秋冬	—	春夏秋冬
2019	春夏秋冬	春夏秋冬	—	春夏秋冬
2020	夏秋冬	夏秋冬	夏秋冬	夏秋冬

安全性			
年度	底質分析試験	底生生物調査	
	潜水土による採泥	潜水土による目視観察	
	No. 170*	1測線 潜堤近傍の対照区 (No. 150)	1測線 潜堤腹付材の法面 (No. 170)
	表層泥	—	—
	付着動植物、カニ類、魚類等		
2010	冬	—	—
2011	冬	—	春夏秋冬
2012	冬	—	春夏秋冬
2013	冬	—	春夏秋冬
2014	冬	—	春夏秋冬
2015	—	—	—
2016	—	春・秋	春・秋
2017	—	春・秋	春・秋
2018	—	春・秋	春・秋
2019	—	春・秋	春・秋
2020	冬	夏秋冬	夏秋冬

※水質調査①、②及び底質分析試験のNo. 150は潜堤腹付材の法尻部、No. 170は潜堤腹付材の中央部

表-2 強度等確認の実施状況

項目	試験方法	2010年度				2016年度	2020年度
		原料	スラグ	土運船 より採取	施工 28日後	3地点	No.170
土粒子の密度	JIS A 1202	○	—	—	—	—	—
粗骨材の密度・吸収率	JIS A 1109(JIS A 1110)	—	○	—	—	—	—
コーン指数	JGS 1431	—	—	○	—	—	—
	JIS A 1228	—	—	—	○	○	○
含水比	JIS A 1203	○	○	○	○	○	○
粒度試験	JIS A 1204	○	○	—	—	—	○
フロー試験	JIS A 1150	—	—	○	—	—	—
	JIS R 5201	—	—	—	—	—	○
液性限界・塑性限界	JIS A 1205	○	—	—	—	—	○
湿潤密度	JIS A 1225(JGS 0191)	○	—	○	○	○	○
乾燥密度	含水比及び湿潤密度より算定	—	—	—	○	○	○
単位容積試験	JIS A 1104	—	○	—	—	—	—
コーン指数より換算		—	—	—	○	—	—
一軸圧縮強度	JIS A 1216	—	—	—	—	—	○

調査地点No.150は、潜堤腹付材の法尻部で製鋼スラグによる影響等を確認するため、No.170は潜堤腹付材中央部の対照区としている。No.2,3は周辺海域の状況を確認するため設定しており、No.2は腹付工施工位置から600mの地点、No.3はNo.2から2,000mの地点である。

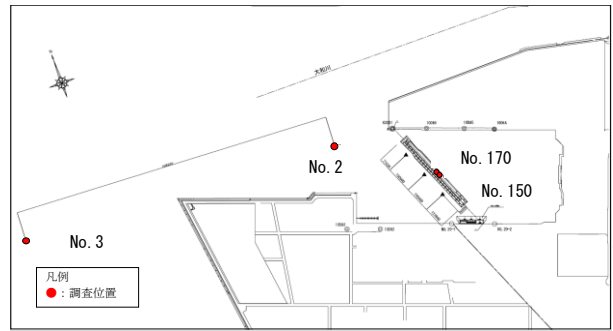


図-7 水質及び底質の調査地点図

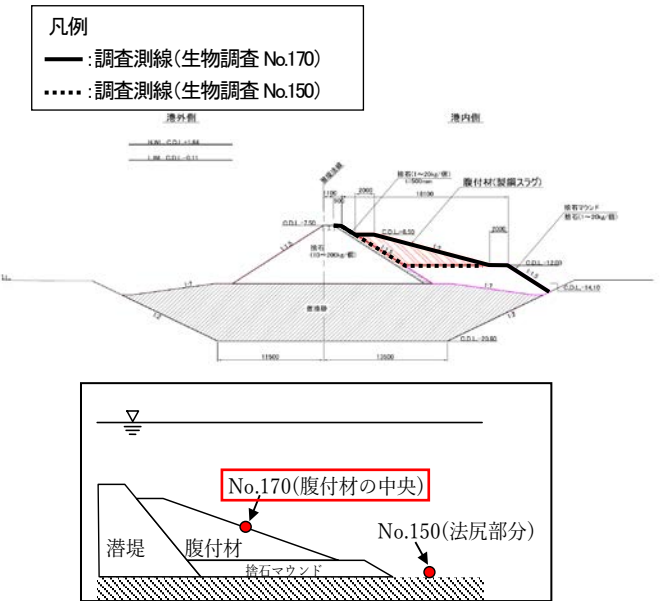


図-8 底生生物の調査測線

4. 実証試験のモニタリング結果

(1) 安定性の確認

a) 腹付工の出来形変位

腹付工の出来型変位測定結果より、中央付近の測線であるNo.170の法尻付近 (⑥) では1.0m以上の地盤高の上昇が、腹付工の南側測線であるNo.152の法尻付近 (④, ⑤) では1.0m以上の地盤高の低下がみられた。ただし、製鋼スラグを使用した腹付材 (側線①~④) では10年以上経過しても概ね出来形の形状を維持できていた。

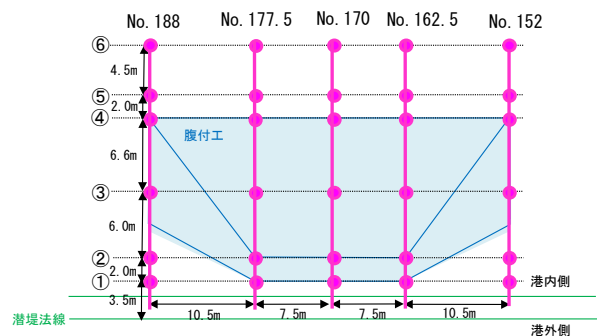


図-9 測線及び調査地点

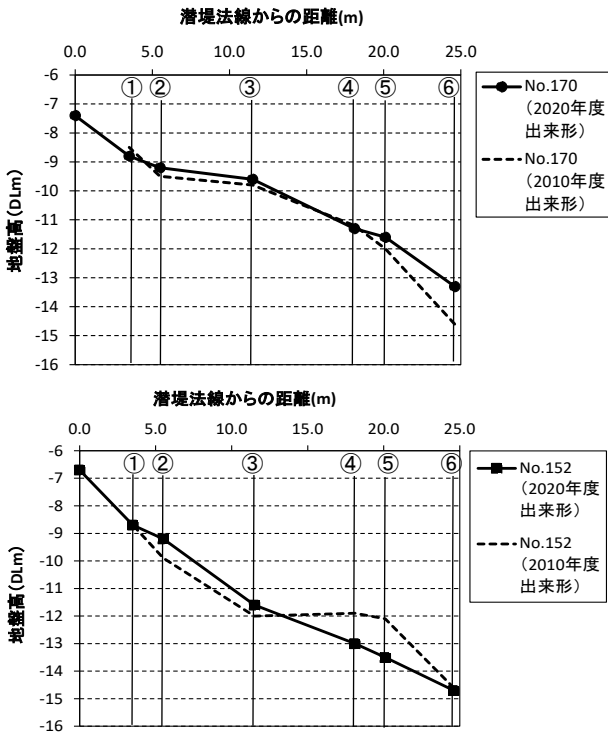


図-10 出来形との比較 (上: No. 170, 下: No. 152)

b) 腹付材の強度等確認

2020年度のコーン指数及び一軸圧縮強度の結果は、層ごとの差が大きく、最奥部がもっとも大きくなっていた。コーン指数の2010年度は腹付工を施工した箇所から採取した3検体の平均値、2016年度は潜堤腹付材中央部 (No.170) から採取 (15cm程度) した3検体の平均値、2020年度は潜堤腹付材中央部 (No.170) から採取したコア (60cm程度) を表面、中央部、最奥部に3等分した3検体である。

2020年度 (表面) のコーン指数は2016年度の87kN/m²より低く、45kN/m²となっていた。中央部や最奥部では表面より大きな値となっていることから、表面では海水と触れることで吸水による強度が低下したり、浮泥の堆積等によりコーン指数が低下していると考えられる。中央部では表面より含水比がやや大きい、シルト・粘土分がやや少ないことや、表面と比較して浮泥の堆積による影響が少ないと考えられることから、表面より強度が上昇しやすいと考えられる。一方で、中央部のコーン指数は最奥部の約半分の値であることから、表面と比較して海水の影響は小さいものの、吸水により強度が低下していると考えられる。

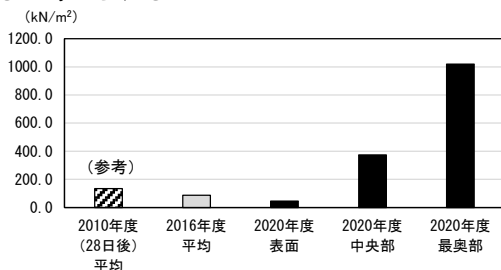


図-11 コーン指数の経年変化

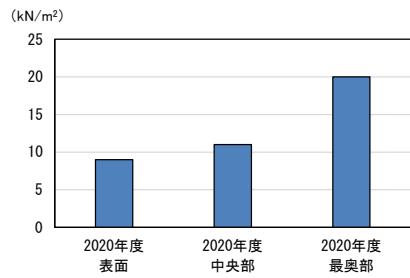


図-12 一軸圧縮強度の調査結果 (2020年度: No. 170)

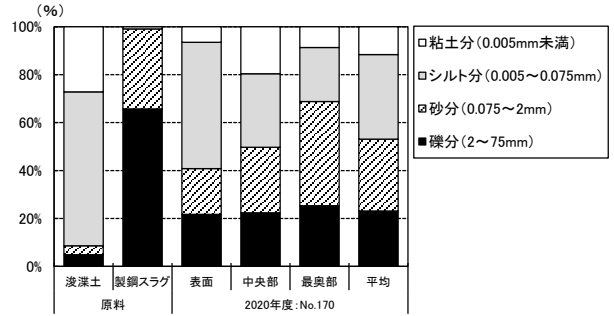


図-13 原料と腹付材 (2020年度: No. 170) の粒度組成の比較

(2) 安全性の確認

a) 水質

水質の安全性を確認するため、海水中の水素イオン濃度 (pH) を評価指標として検討した。図-14に海水中及びスラグ混合材の間隙水中の施工後から毎年pHの経年変化を示す。潜堤腹付材中央部 (No.170) の間隙水のpHは施工1ヶ月後から高い値で推移していた。これは、製鋼スラグの主な化学成分が石灰、二酸化ケイ素、酸化鉄等であり、石灰によりpHが上昇する性質を有しているためと考えられる。しかし、潜堤腹付材中央部 (No.170) 直上10cmのpHは低い値であり、かつ腹付材法尻部 (No.150) や周辺海域 (No.2,3) の下層と同程度であり、アルカリ溶出による影響は見られないと考えられる。また、各自治体が毎月測定している周辺海域の公共用水域測定結果においても、環境基準値 (7.8 以上8.3以下) を超える場合が確認されており、腹付材直上の値が環境基準値を超えていたとしても腹付材法尻部 (No.150) や周辺海域 (No.2,3) と同程度である。

以上のことから、本試験による周辺海域のpHの影響の程度は小さいと考えられる。

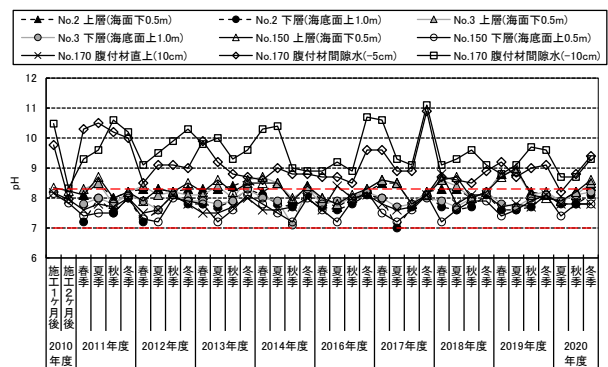


図-14 水質 (pH) の経年変化

b) 底質

原料（浚渫土砂，製鋼スラグ）及び潜堤腹付材中央部（No.170）で採取した底質分析の結果，2014年度までの調査においては，一般的な水底土砂の環境基準である以下のいずれについても基準値を満足していた。

- ・海洋汚染防止法基準値に関する分析
- ・廃棄物の処理及び清掃に関する法律に規定する油分を含む産業廃棄物に係る判定基準に関する分析
- ・底質の暫定除去基準に関する分析
- ・ダイオキシン類による水底の底質の汚染に係る環境基準に関する分析
- ・廃棄物の処理及び清掃に関する法律に規定する金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準に関する分析

基準値が定められていない土のpH試験については，施工2ヶ月後に高い値（11.3）を示したものの，それ以降は10以下で推移していた。2020年度の腹付材の値が若干上昇しているが，施工後より低い値を示しており，土のpHが安定してきていると考えられる。

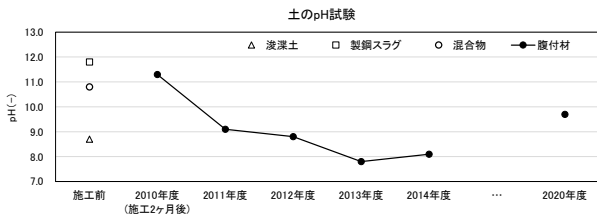


図-15 土のpH試験結果の経年変化

c) 底生生物

底生生物調査は潜堤腹付材中央部（No.170）及び腹付材法尻部（No.150）を対象として四季において実施した。その結果，四季のうち，春季を中心として生物が生息していることが確認された。また，出現種や被度をみても潜堤腹付材中央部（No.170）と腹付材法尻部（No.150）では生物の種類に大きな違いはなく，スラグ混合材が生物に影響を及ぼしている可能性は低いと考えられる。

表-3 底生生物の出現種一覧

No.	門	綱	目	科	種名	No. 170	No. 150
1	刺胞動物門	ヒトロ虫綱	-	-	ヒトロ虫綱	◎	◎
2		花虫綱	イキソチヤク目	-	イキソチヤク目	◎	◎
3	軟体動物門	腹足綱	裸貝目	カミカワリ科	カミカワリ	◎	◎
4			真後鰓目	キセワガイ科	キセワガイ科	◎	
5				アマラシ科	アマラシ	◎	
6	環形動物門	コカイ綱	ケリムシ目	カンザシコカイ科	カンザシコカイ科	◎	◎
7	節足動物門	軟甲綱	十脚目	Inachoididae	イカクモカニ	◎	◎
8	棘皮動物門	ヒトゲ綱	アカトゲ目	イトマキヒトゲ科	イトマキヒトゲ	◎	◎
9				マヒトゲ科	マヒトゲ	◎	◎
10		ウニ綱	フンブク目	ヒラフンブク科	オカメフンブク	◎	
11	原索動物門	ウツギ綱	マメボヤ目	ユレイボヤ科	ユレイボヤ	◎	◎
12			マホヤ目	シロホヤ科	シロホヤ	◎	◎
13	脊椎動物門	硬骨魚綱	スズキ目	スズキ科	スズキ*	◎	
15				マツ科	マツ*	◎	
16				ハゼ科	ハゼ科	◎	
17			カレイ目	カレイ科	カレイ科	◎	
18	不明	-	-	-	泥集	◎	◎
出現種類数合計						16	11

注) 1. ユレイボヤの生息場所には，カタユレイボヤが混在することがあるが，ユレイボヤと示す。
 2. 泥集は，ヨコエビ類あるいは多毛類の生息巣を示す。
 3. 種名に*をつけたものは，遊泳性の魚類を示す。
 4. 測線 No.170 は 2011 年度春季以降の 24 回調査の結果を，No.15 は 2014 年度春季以降の 12 回調査の結果を示す。



ウミフクロウ (撮影：2017年5月)

マヒトゲ (撮影：2011年6月)

図-16 主な出現種の写真

5. 製鋼スラグによるリン等の吸着効果

製鋼スラグはCa²⁺の供給によるアルカリ性のため，リンを不溶化して吸着する性質を持つことが知られている¹⁾。一般的に窒素・リン等の栄養塩類は富栄養化による環境悪化の要因の一つと考えられている²⁾。水質調査の結果より，潜堤腹付材中央部（No.170）の間隙水のPO₄-P（リン酸態リン）及び硫化物は，腹付材法尻部（No.150）と比較して低い値を示していた（図-17及び図-18参照）。本実証試験においても，スラグ混合材がPO₄-P及び硫化物の低下に寄与したと考えられる。

6. アルカリ成分溶出実験

(1) 実験概要

潜堤腹付材中央部（No.170）の腹付材と腹付材法尻部（No.150）の海底泥を，内径10cmのアクリルパイプを用いてそれぞれ採取（共に25cm長）し，図-19に示すようなアルカリ成分溶出実験を行った。

(2) 実験結果

a) 水質分析結果

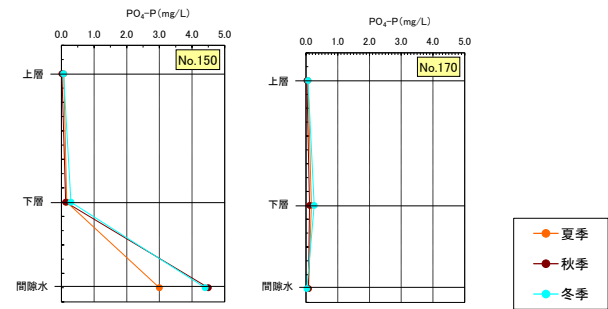


図-17 PO₄-Pの鉛直分布

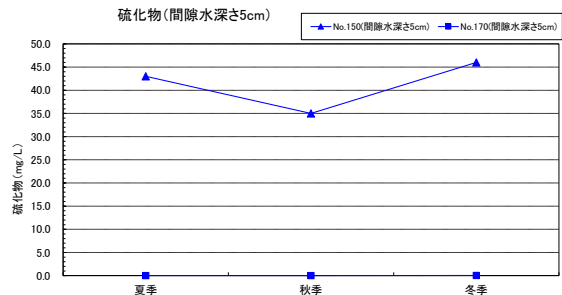


図-18 硫化物の季節変化

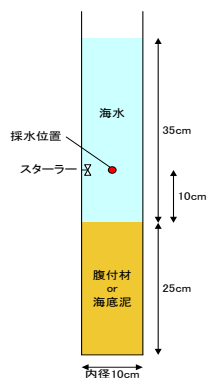


図-19 実験イメージ

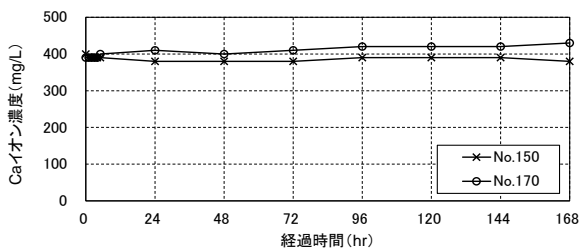


図-20 実験期間中のカルシウムイオン濃度の経時変化

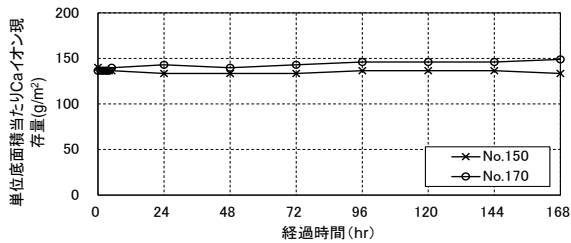


図-21 直上水中の単位底面積当たりのカルシウムイオン現存量の経時変化

カルシウムイオン濃度は、海底泥を用いたケース (No.150) ではわずかな減少傾向を示し、実験開始時の400mg/Lが168時間後には380mg/Lとなっていた。一方、腹付材を用いたケース (No.170) では1日後以降に、徐々に増加する傾向を示し、実験開始時の390mg/Lが168時間後には430mg/Lとなっていた。

b) カルシウムイオンの溶出速度

各ケースにおける直上水中のカルシウムイオンの現存量を算定し、単位底面積当たりの現存量に換算すると、図-21に示すとおりとなる。カルシウムイオンの現存量の算定にあたっては、採水による系外への移動分を補正した。

直上水中のカルシウムイオンの単位底面積当たりの現存量の増減傾向を直線近似し、単位面積当たりの腹付材及び海底泥からのカルシウムイオン溶出速度を算出した。その結果、海底泥 (No.150) からのカルシウムイオン溶出速度は-11.65mg/m²/hrとなり、海底泥からカルシウムイオンが溶出していないことが示された。一方、腹付材 (No.170) からの溶出速度は、69.48mg/m²/hrと算定された。また、溶出したカルシウムイオンが実海域にどの程度拡散したか岩井の拡散式を用いて予測した結果、その

濃度は0.01mg/L未満であった。室内実験から得られたカルシウムイオン濃度とpHの関係式からpHを推定すると0.000035程度であり、海水中のpHにほとんど影響がないことが判明した。

7. まとめ

潜堤の腹付材に産業関連副産物である製鋼スラグを活用して、2010年度から実証試験を実施し、以下のとおり、長期的な安定性及び環境面の安全性を確認した。

- 出来形変位は、スラグを使用した腹付工では10年以上経過しても概ね出来形の形状を維持していた。
- 腹付材の強度は、コーン指数や一軸圧縮強度の結果から表面よりも最奥部の方が大きな値を示した。
- 腹付材の間隙水のpHは高い値で推移しているものの、腹付材直上のpHは近傍や周辺海域の下層と同程度であり、アルカリ溶出による影響は見られなかった。
- 潜堤腹付材中央部の底質は環境基準値を満足していた。また、基準値が定められていない土のpH試験については、施工2ヶ月後に高い値 (11.3) を示したものの、それ以降は10以下で推移していた。
- 潜堤腹付材中央部及び腹付材法尻部における底生生物の被度及び出現種に大きな違いはなく、腹付材が生物に影響を及ぼしている可能性は低いと考えられた。

潜堤腹付材中央部 (No.170) の間隙水のPO₄-P及び硫化物は、腹付材法尻部 (No.150) と比較して低い値を示していた。これは、腹付材のスラグ混合材の吸着効果によりPO₄-P及び硫化物の低下に寄与したと考えられた。また、アルカリ成分溶出試験により、海底泥からカルシウムイオンは溶出していないことが示され、その結果、海水中のpHにほとんど影響がないことが判明した。

これらの実証試験の結果を踏まえて、今後は、製鋼スラグ及び浚渫土砂の混合材を用いた海域での有効利用を推進していく。

また、堺2区北泊地潜堤における実証試験の評価等ととりまとめて、全国に展開できるように、製鋼スラグの有効活用に向けた技術資料を作成した。技術資料では、製鋼スラグの位置付けについて、マニュアル、ガイドライン等での記載状況等を整理するとともに、海域における活用事例集についても掲載しているため、各海域で製鋼スラグを活用する際に参照されたい。

参考文献

- 1) 社団法人日本鉄鋼連盟 (2008) : 「転炉系製鋼スラグ海域利用の手引き」 p.13
- 2) 藤原建紀 : 内湾の貧栄養化—窒素・リン負荷量削減が海域のCOD, 栄養塩レベルにおよぼす影響—, 沿岸海洋研究第52巻第1号, pp.11-27, 2014