

土砂処分場護岸における濁水流出対策としての 岩ズリ層の適用性と実用化

志村 浩美¹・佐々 真志²・北原 政宏³・清山 貴俊³・村上 和男⁴

¹正会員 (一財) 港湾空港総合技術センター調査部
(〒100-0013 東京都千代田区霞が関 3 丁目 3 番 1 号尚友会館 3 階) E-mail: hshimura@scopenet.or.jp

²正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1) E-mail: sassa@p.mpat.go.jp (Corresponding Author)

³国土交通省九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所 (〒801-0804 北九州市門司区西海岸 1-4-40)

⁴フェロー会員 (一社) 水底質浄化技術協会 (〒104-0042 東京都中央区入船 3-10-9)

新門司(Ⅱ期)土砂処分場護岸の床掘置換部は岩ズリ(粒径 0~300 mm, 透水係数 $2\sim3\times10^{-1}$ cm/sec) を使用した計画であり, 土砂処分場内の浚渫土が透水係数の高い岩ズリを透過して海域へ流出することが懸念された. とくに, 土砂処分場に岩ズリを用いた場合の泥水流出の可能性に関する既存の知見がなかったため, 護岸背面の置換材と腹付ズリ及び埋立土の境界に防砂シートが敷設される計画であった. 本研究では, 岩ズリ層が浚渫土の濁りの粒子を留めて海水は排水する濾過効果や岩ズリ層内で浚渫土が目詰まりすることにより濁水流出を遮断する効果があるのか, 岩ズリへの一連の泥水透過実験を行い検証した. 得られた知見により, シート不要の新断面の実用化を実現し, その後 2022 年から 2023 年にかけた現地水質観測により, 本土砂処分場護岸における濁水流出対策として岩ズリ層による提案断面の有効性を実証した.

Key Words : dredged soil, muddy water, rock debris, seepage test, sediment disposal site

1. はじめに

新門司(Ⅱ期)土砂処分場における護岸(図-1)の床掘置換部は岩ズリを使用した計画であり, 埋立てに用いる浚渫土砂が岩ズリを透過して濁水が海域へ流出することが懸念され, 防砂シートの敷設が必要とされた. 一方, 臨海部の吸い出し抑止に関する技術基準¹⁾が2022年度に改訂・施行され, 吸い出し抑止対策工としての岩ズリ等を含むフィルター材の有効性が明記された.

しかしながら, 浚渫土に対する岩ズリの目詰まり機能や濾過機能の有効性は, まだ明らかになっていないことから, 本研究では, 上記土砂処分場護岸を対象として当該効果について, 室内実験および現地水質観測の両面から詳しく検証することを目的としている.

当該土砂処分場護岸における現地のグラブ式浚渫の

揚土方法は, リクレーマ船による直接海面投入(想定含水比100~150 %程度)及びポンプ式浚渫船による排砂管からの海面投入(想定含水比300~700 %程度)である. 浚渫土は, これらの投入方法により拡散し含水比は変化しつつ・沈降し海底に堆積する. 一方, 置換材(岩ズリ 0~300 mm)はトレミー船により海中投入される.

2. 実験対象材料

(1) 岩ズリ(0~300 mm)(床掘置換材)

岩ズリは, 北九州市太刀浦(図-2)で採石されたもので, 細粒分がほぼなく, 粒径100 mm以下の砂, 礫, 石(各粒径区分は図-2参照)が90 %を占めている(図-3). 後述の「含水比設定実験」には, 粒径 0~20 mm (以下, U20 mm), 「泥水透過実験」用には, 粒径 0~100 mm (以下, U100 mm)に調整した岩ズリ試料を用いた(図-4). 本研究の全体フローを図-5に示す.

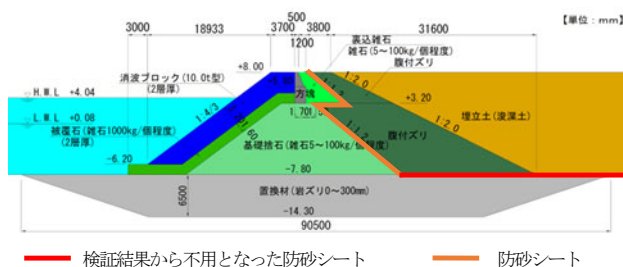


図-1 本研究の岩ズリの目詰まり・濾過機能の検証結果に基づく実用化断面



図-2 土砂処分場護岸に用いた岩ズリ(採取場)

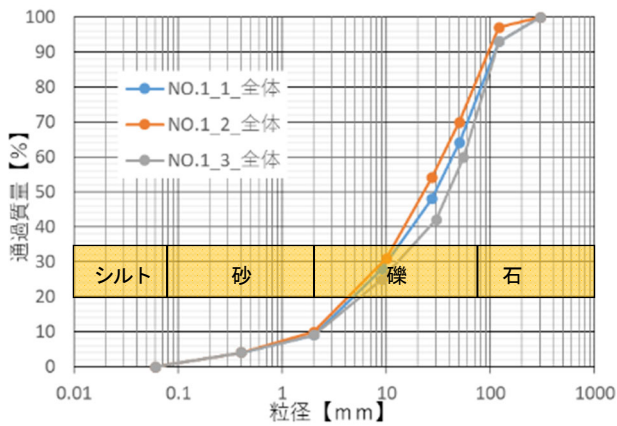


図-3 岩ブリの粒度分布(0~300mm)



図-4 粒度調整後の岩ブリ(左側 0~20mm, 右側 0~100mm)

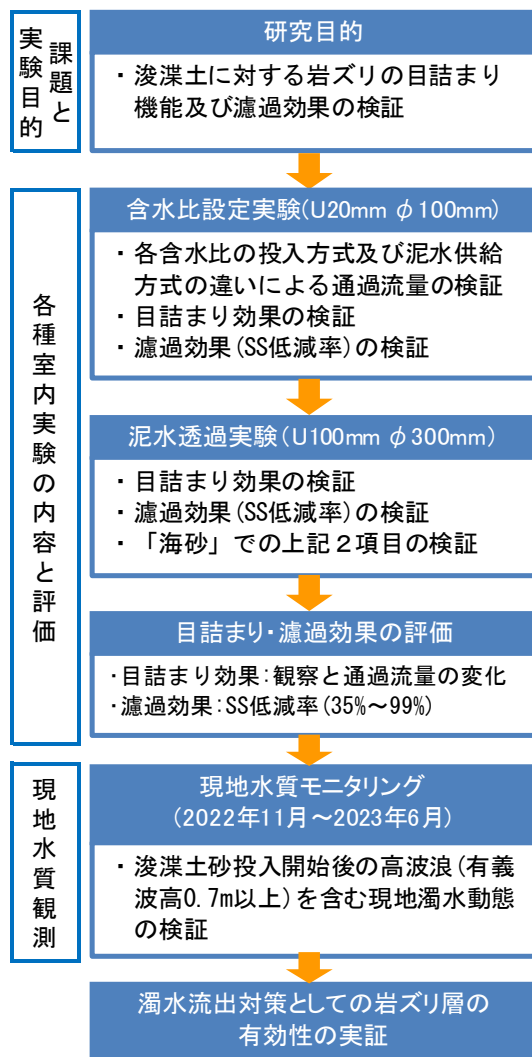


図-5 本研究の全体の流れ

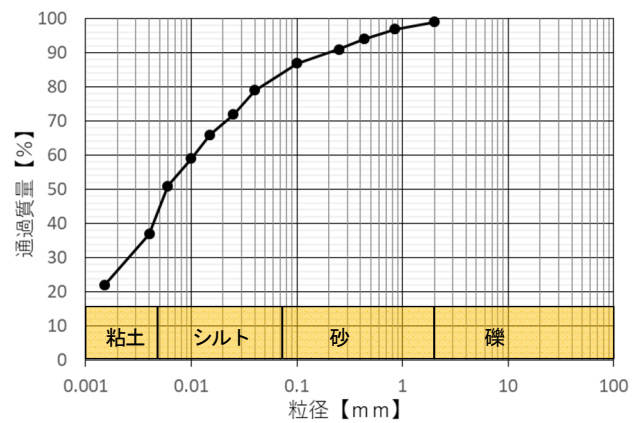


図-6 現地浚渫土砂の粒度分布

表-1 浚渫土砂の物理的特性

土層	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙比	液性限界 WL (%)	塑性限界 WP (%)	塑性指数
Ac	1.33~ 1.66	0.54~ 1.06	1.48~ 3.9	79.2~ 110.2	36.1~ 44.9	43.1~ 65.3

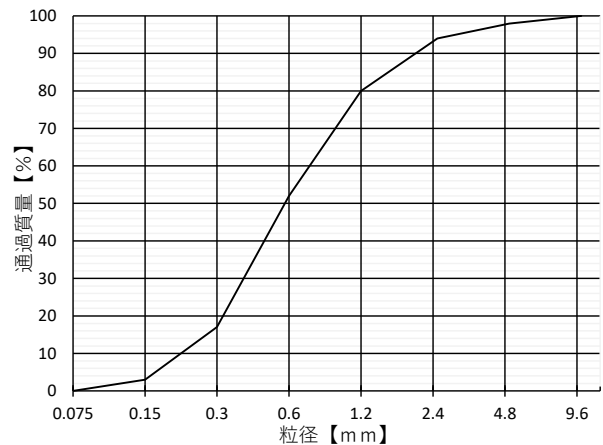


図-7 海砂の粒度分布

(2) 浚渫土砂

実験に使用した浚渫土砂は、現地土砂処分場に埋め立てられる浚渫土砂であり、同試料の調達には、グラブ式浚渫された土砂を空気圧送し、陸上ポンドへ揚土・仮置きされたものを再度掘削しフレコンバックに袋詰めしたものを使用した。

a) 浚渫土砂の粒度分布

現地浚渫土砂の粒度分布を図-6に示す。同図の通り、粘土40%、シルト45%の細粒分が85%を占めており、砂分15%の細粒土である。

b) 浚渫土砂の物理的特性

泥水は浚渫土砂に人工海水を加水することで作成した。当該浚渫土砂の物理的特性を表-1に示す。

(3) 海砂

当該地域では、従来、置換工に用いられる資材として海砂(図-7)が使用されている。本研究では、岩ブリ

と共に、海砂の機能も合わせて検証した。

3. 目詰まり・濾過効果の検証実験

本研究では、図-8 に示す実験装置を用いて、2種類の実験を行った。まず「含水比設定実験」では、図-9 に示すように、含水比を大きく変化させて岩ズリへの泥水の浸透特性と SS 濃度ならびに岩ズリ内部の浚渫土の混入状況を把握した。SS 濃度の測定は、150mg/l までは、積分球濁度計（日本精密光学(株)製 SP-PT-205）及び図-10 に示す濁度—SS 濃度の校正関係を用いて行い、当該濃度以上では、濾過法（乾燥重量法）で測定した。次に岩ズリの粒径範囲を変化させて濾過機能等を検証する「泥水透過実験」を実施した。

(1) 含水比設定実験

現地での揚土方法は、リクレーマ船による直接海面投入（想定含水比 100～150 %程度）及びポンプ式浚渫船による排砂管からの海面投入（想定含水比 300～700 %程度）であり、土砂処分場内での投入直後から拡散・沈降し泥水状態の含水比は変化することが想定された。この泥水の含水比によって岩ズリへの泥水の浸透状況（通過流量や SS）がどのように変化するかについて含水比設定実験を実施し、目詰まり効果と濾過効果について検証した。前者では、含水比 $W = 500 \% \sim 2000 \%$ の泥水 6 ケースを作成し、岩ズリを充填した透明円筒管（ $\phi 100 \text{ mm}$, H500 mm）へ泥水を「一方向式」で透過させる実験を行った（図-8 左側）。

a) 岩ズリ投入方法（水中・空中落下）による比較実験

図-1 を参照し、護岸断面の背面腹付け部に「空中部」、床掘置換部に「水中部」があることから、岩ズリ投入方法の違いによって、岩ズリの性状にどのような変化が現れるのかについて検証することを目的として、岩ズリ (U20 mm) の水中落下と空中落下の 2 ケースにおいて、 $W=1000 \%$ の泥水を使用した含水比設定実験を実施した。泥水の供給はフレッシュな泥水を連続して供給する一方向式とした。どちらも泥水投入開始から 30 分程度で目詰まりが生じたが、水中落下の方がやや早く目詰まる結果となったものの有意な違いはなかった、上記と（図-11）。間隙率は、空中落下 35 %，水中落下 37 %であり同様にとくに差異は認められなかったことから、以下に示す泥水透過実験では、水中落下に統一した。

b) 泥水供給方式の検証実験

後述する泥水透過実験に使用する $\phi 300 \text{ mm}$ 円筒管（図-8 右側）実験模型は、含水比設定実験より大型化し「一方向式」の泥水供給方法では安定的な泥水供給は困難であることから、泥水を供給→回収→供給を繰り返

す「循環式」の通過流量の把握実験を事前に行った。具体的には、 $\phi 100 \text{ mm}$ の円筒管を用いた含水比 $W=1000 \%$ の泥水透過予備実験を行い、一方向式では約 90 分後、循環式では約 170 分後に目詰まり状態となったことから（図-12）、以下の泥水透過実験では循環式を採用することとした。

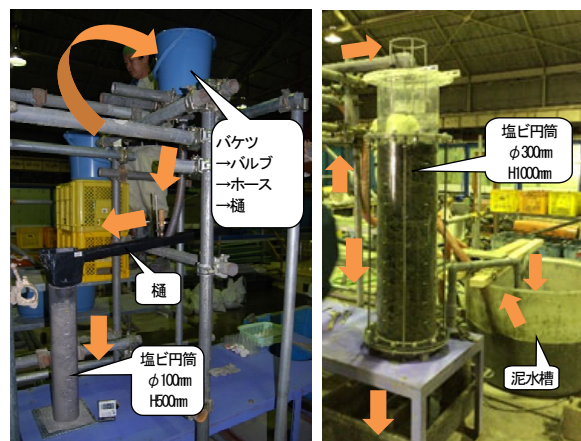


図-8 (左側) 含水比設定実験装置 (右側) 泥水透過実験装置 (矢印は泥水の経路)

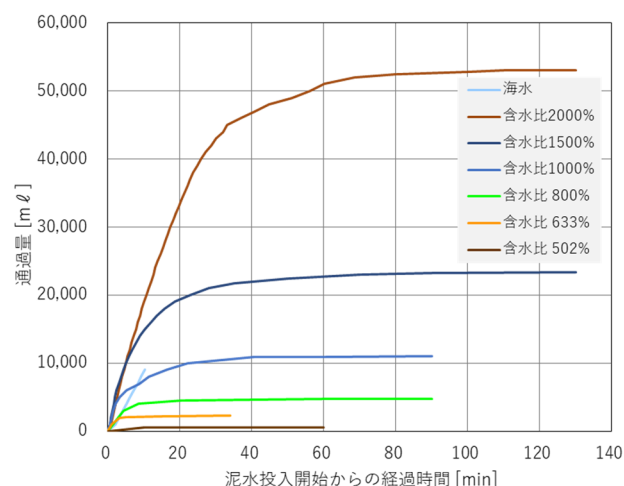


図-9 岩ズリの泥水通過流量の経時変化

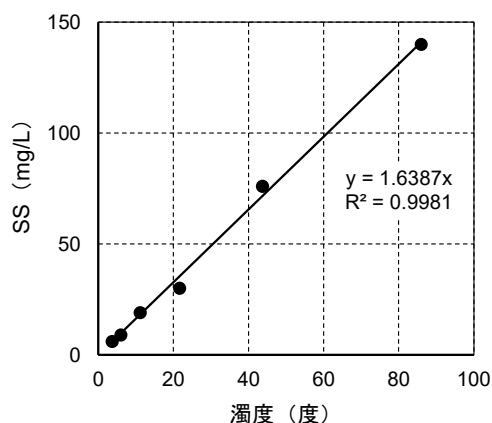


図-10 濁度—SS濃度の校正関係

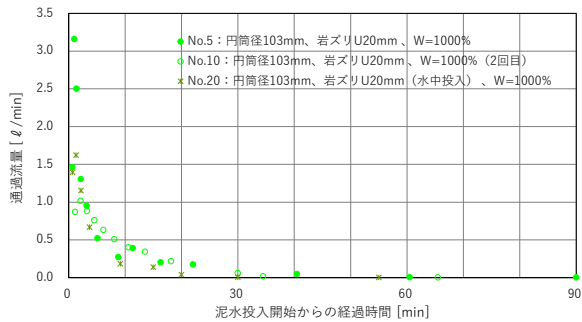


図-11 岩ズリ投入方法の違いによる通過流量の経時変化

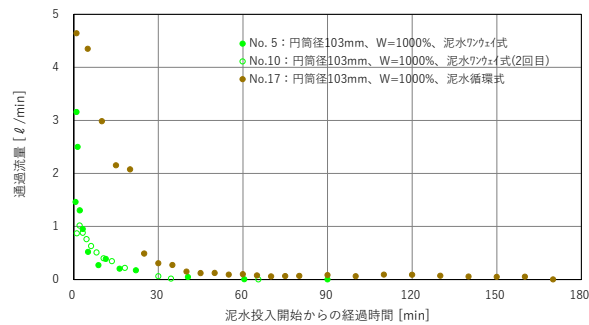


図-12 泥水供給方法の違いによる通過流量の経時変化



図-13 岩ズリ水中落下状況

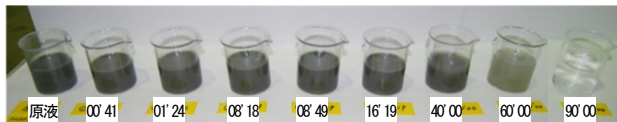


図-14 含水比 1000%泥水の経時変化 (分秒)

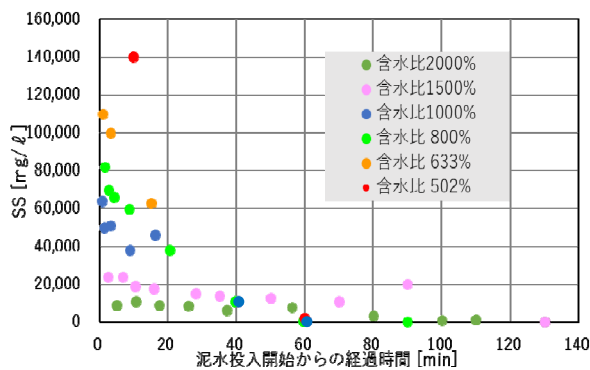


図-15 SS濃度の経時変化 (分秒)



図-16 岩ズリへの浚渫土混入状況

(2) 泥水透過実験

現地実施の岩ズリ使用状態に近い広い粒径範囲の実験を念頭に、粒度分布の約 90 %を占める U100 mm の岩ズリを使用し、アクリル円筒管の仕様を $\phi 300$ mm, H1000mmに拡大した。この際、含水比 $W=1000\%$ の泥水を使用し、岩ズリ層への泥水透過状況について検証した。

本実験では、実験模型よりサイズの大きいアクリル円筒管内に人工海水を満たし、岩ズリを水中落下しトレミー船による施工状況を模式化した(図-13)。その後、実験模型を気中に引き上げ実験架台に設置した。泥水は予め泥水槽に貯留し、常に攪拌用水中ポンプで攪拌したものを水中ポンプで汲み上げ、模型上部より注入した。岩ズリ内を通過した泥水は、(図-8 右側)に示すように下部のバケットに回収し再び泥水槽へ送り再利用した。

a) 水中落下した岩ズリの間隙率

岩ズリ層内の浚渫土混入状況の定量的評価に資するため、泥水透過実験に先立ち、水中投入した岩ズリの間隙率を測定した。含水比設定実験 ($\phi 100$ mm 円筒管) では水中落下した岩ズリの間隙率は 33~38 %, 泥水透過実験 ($\phi 300$ mm 円筒管) でも同様の間隙率 33~37 % であり、円筒管の大きさの違いによる間隙率に有意な差が無いことを把握した。

4. 実験結果及び分析

(1) 含水比設定実験

a) 通過流量及びSS濃度による検証

単位時間当たりの通過流量は、各含水比で経過時間と共に顕著に減少した(図-9)。この際、比較のため、海水の通過流量も合わせて示している。投入開始直後の時間当たりの当該通過流量は、含水比 800%までの時間当たりの泥水通過流量よりも大きい一方、含水比 1000%以上の時間当たりの泥水通過流量よりも小さいことがわかる。これは、含水比 1000%以上では、泥水が実質的に高密度流体としてふるまうことに対応していると考えられる。又、図-14,15に示す通り、SS濃度は経過時間と共に大きく低減し、含水比 $W=1000\%$ の原液 SS 濃度 64,700 mg/l は、60分後には 640 mg/l と 100分 1 となり、岩ズリ層に濾過効果があることが明らかとなった(表-2)。

b) 土粒子混入状況の検証

含水比 $W=500\%$, 1000% , 2000% の透過実験では透過後の供試体(岩ズリ)を5層に分割し、各層における浚渫土の混入状態を評価した。その結果、泥水の透過過程において岩ズリ層の間隙体積に対し 8~20 %程度の浚渫土が留まった場合、幅広い含水比に対して目詰まり効果が現れることが分かった(図-16)。

(2) 泥水透過実験

a) 岩ズリ粒径範囲の影響の比較検証実験

アクリル円筒管に充填する岩ズリの粒径範囲を U100 mmと U20 mmとした2ケースについて、泥水 W=1000%の泥水透過実験を実施した結果、図-17 に示す通り、通過流量はどちらも、投入後 130~150 分程度まで時間と共に顕著に低減し、その後緩やかな低下傾向が認められた。一方、U100 mm の W=500 %においても通過流量は大幅に低減した (図-17)。

b) 海砂を用いた実験

従来、床掘置換材として用いられてきた海砂について合せて泥水透過実験を行った。φ300 mm の円筒を用いて海砂を水中落下した後に W=1000 %の泥水を循環式で供給し実験を行った結果、泥水は、実質的に海砂に浸透せず、泥水供給当初からほぼ目詰まり状態が発生した (図-18)。

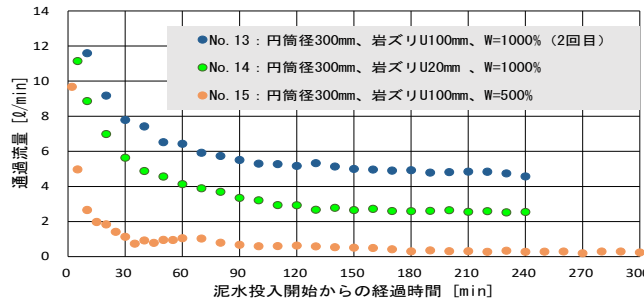


図-17 循環式泥水供給による通過流量の経時変化

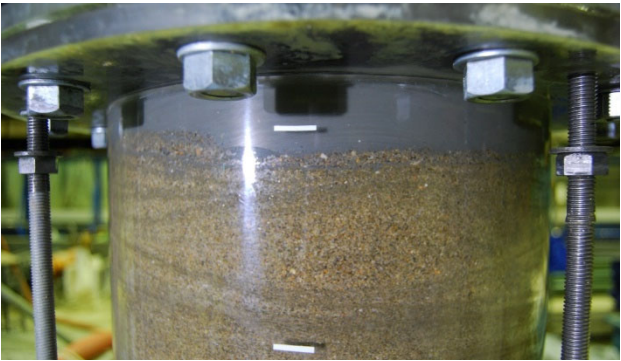


図-18 海砂と泥水の境界状態

表-2 各実験条件及び結果の一覧

実験 種別	NO	円筒管 タイプ (mm)	岩ズリ粒径 (mm)	泥水含水比 (%)	目詰まり・濾過効果の検証	
					目詰まり	濾過 (SS低減率)
含水比設定実験	1	φ100×L500	0~20	500①	有	98.70 %
	2	↑	↑	500②	有	100.00 %
	3	↑	↑	600	有	100.00 %
	4	↑	↑	800	有	99.90 %
	5	↑	↑	1000①	有	99.00 %
	6	↑	↑	1000②	有	99.70 %
	7	↑	↑	1000③	有	99.90 %
	8	↑	↑	1000④	有	99.50 %
	9	↑	↑	1500	有	99.60 %
	10	↑	↑	2000①	有	99.30 %
	11	↑	↑	2000②	有	99.20 %
泥水透過実験	12	φ300×L1000	0~100	1000	有(少)	32.50 %
	13	↑	↑	1000	有(少)	35.70 %
	14	↑	0~20	1000	有(少)	37.20 %
	15	↑	0~100	500	有	96.30 %
	16	↑	海砂	1000	有	100.00 %

5. 目詰まり・濾過効果の評価

(1) 目詰まりの状態定義と効果

目詰まりは、一般には細かい粒子が空隙に詰まることを意味しているが²⁴⁾、本研究では、これに伴い実質止水状態となった状況を目詰まり状態と定義している。すなわち、泥水状の浚渫土を円筒管内の岩ズリ層内に通過させた際に、円筒管下部からの排水が完全に止水した又は点滴状態の落下となった状態を表している。

本定義に基づき、目詰まりの判定は、透明アクリル円筒管からの目視観察と通過流量の変化によって評価した。

含水比設定実験における 11 ケースの全てで止水状態が発生した (表-2)。泥水透過実験においては、5 ケース中含水比 W=500 %及び海砂の 2 ケースにおいてのみ止水状態が発生した。これは、使用した円筒管が φ100 mmから φ300 mmへ大型化した際に、岩ズリの粒径範囲が U20 から U100 へと広がったことと泥水供給を短時間かつ大量に供給する必要性から、その対策として水中ポンプによる泥水供給と回収泥水の再利用を行ったことにより、泥水中の粒径の比較的大きな粒子が先行して岩ズリ層中に留まり、より小さい粒子を含む泥水を回収供給する状態になったことが要因として考えられる。このことは、含水比 W=1000 %より含水比 W=500 %のケースで単位体積当たりの浚渫土粒子量が多く、止水状態の発生も顕著であったことから推察される (図-17)。なお、現地施工は、「含水比設定実験」で行った「一方向式」と同様の条件といえる。

(2) 濾過効果

本研究における濾過効果とは、泥水状の浚渫土を円筒管内の岩ズリ層内に通過させた際に、円筒管下部からの回収水にて SS が有意に低減していること、具体的には、約 35 %~99 %程度 SS が低減したことを表している。これは、浚渫土粒子が時間経過とともに岩ズリ層の空隙内に留まる過程で、濾過効果が発現することと対応する。実際、含水比設定実験の W=500~2000 %で SS 濃度は 100 分 1 以下に低減しており、高い濾過効果が発現しているといえる (図-15、表-2)。

6. 現地水質モニタリング

上記の実験知見に基づき、浚渫土と岩ズリ層の間の防砂シートを不要とする新たな護岸断面 (図-1) を実用化し、当該断面施工後の浚渫土砂投入過程・期間中に現地水質モニタリングを図-19 に示すかたちで 2022 年から 2023 年にかけて実施した。現地での採水方法は、各水質モニタリング地点の表層 (海面下 0.5m) 及び下層

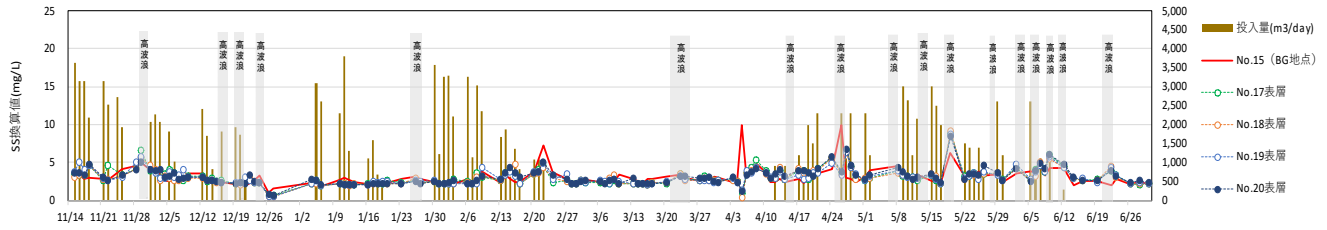


図-20 浚渫土砂投入開始後の2022年11月から2023年6月にかけて実施した代表的な現地水質モニタリング結果

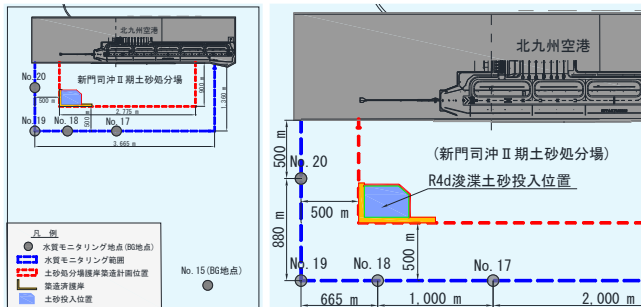


図-19 提案断面の実用化後に実施した現地水質モニタリング位置関係図

(海底面上 1.0m) から原則として、週 4 回の頻度で日中に採取した後、濁度計にて散乱光濁度を計測し、SS 濃度と濁度の相関係数 ($y=1.6387x$, $R^2=0.9981$) から SS 濃度 (換算値) を算出した。この際、当該期間中の土砂投入回数は 76 回、土砂投入量は全体で約 14 万 m^3 、1 日当たりの平均投入量は約 1,800 m^3 /日であった。

浚渫土砂投入開始後の2022年11月から2023年6月にかけて実施した代表的な現地水質モニタリング結果を図-20に示す。本図と図-19の比較分析に基づき、高波浪 (有義波高0.7m以上) を含む現地濁水動態を検証した。現地濁度は一般に波高と共に増加するが、本観測結果は、土砂投入位置回り・近傍の SS 濃度が土砂投入場所から約4km 離れた比較対象地点 (BG) の SS 濃度と高波浪の有無の関わらず有意な差が無いことを示しており、濁水流出対策としての岩ズリ層の有効性が明らかとなった。

7. 結論

新門司沖土砂処分場 (Ⅱ期) の建設において、従来の防砂シート敷設に依らない、より経済的かつ効果的な濁水流出対策を念頭に、岩ズリ層の適用性について、一連の現地浚渫土砂の泥水透過・濾過・目詰まり実験を実施し、詳しく検証した。その結果、当該岩ズリ層は、幅広い含水比の泥水 (浚渫土) に対して十分な濾過・目詰まり効果を有することが明らかとなった。本検証結果から、護岸断面構造を見直し、防砂シート不要の経済的かつ効果的な護岸断面を提案し当新断面の実施工により、工費削減および工程短縮が実現された。さらに、浚渫土砂投入開始後の 2022 年から 2023 年にかけた現地水質モニタ

リングにより、当土砂処分場護岸における濁水流出対策としての岩ズリ層による防砂シート不要の新断面の有効性を実証した。従って、同様の土砂処分場護岸の構造形式における、防砂シートに依らない経済的かつ効果的な岩ズリ層活用断面の今後の普及・展開が期待される。

なお、本研究の検証結果に基づき、基礎捨石背面の防砂シートについても不要では無いかとの検討も行ったが、対象の腹付ズリは干満の影響や捨石層を透過する波浪等の影響を受けやすい構造であると判断し、従来断面としている。又、地域により入手できる岩ズリと埋立する浚渫土の特性は異なることから、適用の際は、これらについて適切に考慮することが必要であるといえる。

謝辞：本研究は、新門司沖土砂処分場 (Ⅱ期) 施工検討会 (国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所主催) の助言を受けて実施したものである。ここに記して感謝の意を表します。

REFERENCES

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、pp.289-290、令和 4 年 4 月施行。2022. [THE PORTS & HABOURS ASSOCIATION OF JAPAN: TECHNICAL STANDARDS AND COMMENTARIES FOR PORT AND HARBOUR FACILITIES IN JAPAN, pp. 289-290, 2022.]
- 2) 工代健太・佐々真志・梁順普・高田康平・鈴木高二朗：地盤及び水理外力の特性を考慮した吸い出し・空洞形成・陥没機構とフィルター材による抑止法の研究、港湾空港技術研究所報告、第 59 巻、第 3 号、pp.1-20、2020. [REPORT OF THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE, Vol. 59, No. 3, pp. 1-20, 2020.]
- 3) Kudai, K., Sassa, S., Yang, S. and Takada, K.: Influence of soil and hydraulic conditions on the processes of internal erosion, cavity formation and collapse behind coastal structures, Coastal Engineering, Vol. 170, 104013. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104013>, 2021.
- 4) U.S. Army Corps of Engineers: Engineering and Design: Coastal Engineering Manual - Part VI. U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington, DC, 2011.
- 5) Nehorai, R., I. M. Lensky, L. Hochman, I. Gertman, S. Brenner, A. Muskin, and N. G. Lensky: Satellite observation of turbidity in the Dead Sea, Journal of Geophysical Research-Oceans, Vol. 118, 3146-3160, doi:10.1002/jgrc.20204, 2013.

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

APPLICABILITY AND EFFECTIVENESS OF ROCK DEBRIS LAYER TO PREVENT MUDDY WATER OUTFLOW AT WATERFRONT SEDIMENT DISPOSAL SITES

Hiroshi SHIMURA, Shinji SASSA, Masahiro KITAHARA,
Takatoshi KIYOYAMA, and Kazuo MURAKAMI

Rock debris (particle size: 0-300mm, permeability coefficient: $2-3 \times 10^{-1}$ cm/sec) was planned to be used for the seafloor replacement part of the Shinmoji (Phase II) sediment disposal site. There was a concern that the dredge soil in its turbid state would permeate into the rock debris layer, allowing the flow-out of muddy water into the sea, requiring the placement of a sand prevention sheet. Here, we conducted a series of experiments on the seepage of the turbid dredge soil into the rock debris layer to examine whether the rock debris has filtering and clogging effects to effectively deter the muddy water outflow. The results proved both effects, leading to a new cross section without such sheets in the field. The new cross section was adopted in practice and subsequently field observations were performed on the SS (suspended solids) concentrations from 2022 to 2023. The results confirmed the effectiveness of the rock debris layer to prevent muddy water outflow at the water sediment disposal site.