

カルシア改質浚渫土を用いた汚濁低減のための 潜堤施工手法の検証～発濁特性の把握～

泉水 めぐみ¹・竹山 佳奈²・峯松 麻成³・西田 浩太⁴
・江口 信也²・田中 裕一²・野口 孝俊⁵

¹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)
E-mail: megumi.sensui@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東洋建設(株) 土木技術部 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町 1-105)

⁴正会員 東亜建設工業(株) エンジニアリング事業部 (〒163-1031 東京都新宿区西新宿 3-7-1)

⁵正会員 国土交通省関東地方整備局 (〒231-8436 横浜市中区北仲通 5-57)

浚渫土と製鋼スラグを有効活用したカルシア改質浚渫土の定量的な汚濁発生量と汚濁拡散・沈降特性を明らかにすることを目的とし、室内および現地(関東地方整備局京浜港ドック)において、土質性状および投入方式による発濁特性を試験した。土質性状は改質土の流動性(スランプ)に着目した。投入方式は水面での土運船直接投入と水中でのグラブ降下投入を想定した。室内試験では好適スランプ範囲内(スランプ値 1-7 cm)の場合と、グラブ降下投入の場合に汚濁が抑制された。現地試験では室内での試験結果をもとに潜堤築造時の発濁状況を試験した。その結果、室内試験と同様、好適スランプ範囲内の場合と、グラブ降下投入の場合に汚濁が抑制された。以上より実施工においてもカルシア改質浚渫土の汚濁はスランプ値と投入方法により抑制可能であると考えられた。

Key Words : *steelmaking slag, dredged soil, suspended solid, soil improvement, slump test*

1. はじめに

航路や港湾における維持浚渫では、大量の浚渫土が発生するが、近年処分場の確保が課題となっている。そこで浚渫土に粒度調整および成分管理した転炉系製鋼スラグをカルシア改質材(以下、改質材とする)として添加したカルシア改質浚渫土(以下、改質土とする)が、浅場や干潟造成など海域において活用されている。改質土は、即時的な吸水効果と経時的な水和反応による強度の増進効果や、粘性の増大にともなう濁りの発生(以下、発濁特性とする)抑制効果が見込め、これまでグラブ投入、直接投入(底開式土運船投入)、法肩流下およびトレミー打設等などによる施工が多くなされている¹⁾。発濁特性に関しては、改質による視覚的な抑制効果や異なる養生時間の改質土の発濁状況、改質土投入後の水質等が報告されているが^{1) 2) 3)}、土質性状および施工方法による定量的な知見は少ない。

以上を踏まえ、海域施工時の改質土性状と投入方式による、改質土の定量的な汚濁発生量と汚濁拡散の特性について明らかにするための試験を、室内および現地レベル(以下、室内試験および現地試験とする)において実

施した。室内試験では、改質土の流動性に着目し、土質性状と発濁について検証した。現地試験では室内試験で条件を絞った改質土を用い、関東地方整備局京浜港ドック(神奈川県横浜市神奈川区)において、実施工を模擬した潜堤築造時の、投入方法による平面的かつ鉛直的な発濁特性について把握した。また築造後の潜堤の強度特性⁵⁾も試験した。本論文では汚濁発生量と汚濁拡散・沈降特性について述べる。

なお本論文は、国土交通省関東地方整備局との共同研究(海洋・港湾技術の早期実用化に向けた実証実験)の成果として報告するものである。

2. 試験材料

浚渫土は東京湾内の土砂を使用した。原泥の液性限界(w_L)は53%、細粒分含有率は74%であった。これを含水比1.5 w_L まで加水調整した。加水調整は、室内試験では人工海水(塩分3%)を、現地試験ではドック周辺の海水(塩分3%)を用いた。

改質材はJFEスチール東日本製鉄所千葉地区の製鋼ス

表-1 試験材料

項目	改質材	浚渫土	
土粒子密度	ρ_s (g/cm ³)	2.69	2.709
湿潤密度	ρ_w (g/cm ³)	-	1.66
含水比	%	3.7	55
礫 (2 mm 以上)	%	67.00	0.23
砂 (75 μm~2 mm)	%	27.44	26.10
シルト (5 μm~75 μm)	%	5.56	73.67
粘土 (5 μm未満)	%	-	-
最大粒径	mm	37.5	4.75
液性限界	w _L (%)	-	53
塑性限界	w _P (%)	-	30.3
塑性指数	I _P	-	22.7
絶対乾密度	g/cm ³	2.95	1.055
表乾密度	g/cm ³	3.08	-
吸水率	%	4.6	-

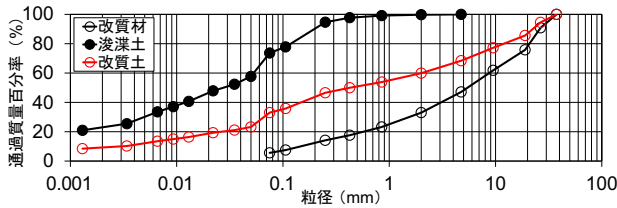


図-1 粒径加積曲線

ラグ (最大粒径 37.5 mm) を使用した。

改質材と浚渫土は、いずれの試験においても同一のものを使用した。改質材、浚渫土の試験材料について表-1に示す。

改質土は、浚渫土に改質材を混合後、一定時間養生した。なお、浚渫土と改質材の容積比は、事前配合の結果から、改質土の発現強度がもっとも大きかった 7:3 とした¹⁾、改質土の計算上の粒度を浚渫土、改質材とあわせ図-1に示す。

3. 室内試験

(1) 方法

a) 小型水槽への投入試験

改質土投入時の土質性状と発濁状況について明らかにするため、図-2に示す試験をした。透明な 24 L の小型水槽を使用し、改質土を海水に投入した。なお、改質土は固化の過程において温度の影響を受けることが知られているが¹⁾、現地の試験期間中の平均気温は例年 10~15°C であるため、養生温度は 20°C と 10°C に設定した。

改質土の土質性状は、流動性や強度等について、各土質試験 (スランプ、テーブルフロー、シリンダーフロー、コーン) をもとに明らかにした。

発濁状況は、水槽に人工海水 15 L を入れ、1 kg の改質土を 0.5 kg ずつ 2 回に分け水面から投入後、濁度計 (TB-31, TOADKK 社製) を用い、濁度 (NTU) を測定し、最大値を記録することで明らかにした。濁度は b) 大型水槽への投入試験から求めた検量線より SS に換算した。

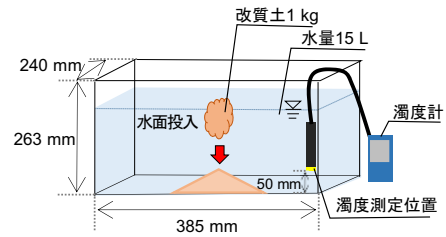


図-2 小型水槽への投入試験模式図

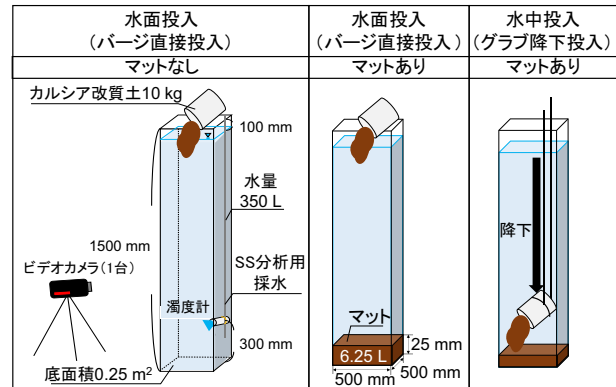


図-3 大型水槽への投入試験模式図

b) 大型水槽への投入試験

土質性状と施工方法の違いによる汚濁発生量と SS 沈降特性を明らかにするため、図-3に示す大型水槽への改質土投入試験をした。透明な 400 L のアクリル製大型水槽を用い、浚渫土および改質土 10 kg を、350 L の海水に水面投入 (バージ直接投入を模擬) または水中投入 (グラフ降下投入を模擬) した。その後濁度測定、採水による SS 分析、ビデオ画像による画像解析から、汚濁発生量と SS を算出した。

濁度 (FTU/NTU) は大型水槽底層に設置した濁度計 (ACLW-CMP, JFE アドバンテック社製/TB-31, TOADKK 社製) を用い、3 秒間隔で約 24 時間測定した。

SS 分析のため投入から 5 分後、1, 6, 24 時間後に濁度計先端付近で採水をした。濁度-SS 検量線から濁度を SS に換算した。

ビデオ画像解析では、水槽に投入した改質土に対して濁りとして浮遊した土粒子量である汚濁発生量 (g/m³) を以下の手順により解析した。大型水槽の投入から 1 時間、また 6 時間後、24 時間後に 10 分間撮影した画像 (静止画) を RGB 値に変換し、RGB 値-SS の相関図を作成した。RGB 値-SS の回帰曲線を用い、投入から 1 分後 (最も発濁している状態) の画像をもとに、RGB 値から水槽内の SS の鉛直的な分布状況を推定した。SS は奥行方向には一様に分布しているものとし、分析結果を累積した。水槽内の SS の濃度分布の累積に対し、投入した土砂量を乗算し水量で除すことで、汚濁発生量を求めた。

また実施工における投入時の底質からの巻き上がりも考慮し、水槽底面に土砂を敷設した条件 (以下、マッ

トありとする)も設定した。

(2) 結果

a) 小型水槽への投入試験

小型水槽を用いた試験の、スランプ値とSSの関係を図-4に示す。スランプ値とSSを比較すると、1-7 cmの範囲でSS値が100 mg/L以下となった。1 cm未満あるいは7 cmを超えるスランプ値では、SS値が9~272 mg/Lの幅広い値をとった。以上の結果より、スランプ値と発濁量には養生温度に関わらずスランプ値1-7 cmにおいてSSが低減することが明らかとなった。

同時に実施した他の試験と比較し、スランプ値と発濁特性に関する関係性があることが認められた。そこでスランプを指標として、1-7 cmを好適スランプ範囲内(または範囲内)、1 cm未満を好適スランプ範囲未満(または範囲未満)、7 cmを超える値を好適スランプ範囲超(または範囲超)と定義した。なお、好適スランプ範囲未満および範囲超の場合に投入時のSS値が幅広い値となった要因について、範囲未満の改質土は固化が進行した場合、投入時の試料攪乱の影響から水中で細粒化するが、強度が小さい場合、攪乱によって細粒化しないことが考えられた。範囲超では、改質土が水中で分散する場合と、塊状で落下し水中で分散しない場合があることが考えられた。なお本試験での改質土のコーン貫入抵抗は範囲超では96 kN/m²、範囲内では128 kN/m²、範囲未満では690 kN/m²であった。

次に、養生時間とスランプ値の関係の結果を図-5に示す。養生温度が20℃の場合、好適スランプ範囲内は養生時間15~30時間、範囲未満のスランプ値は養生時間43~50時間で得られた。一方養生温度が10℃の場合、図-5の近似曲線の式から、20℃と比較し流動性の低下に養生時間が必要となった。

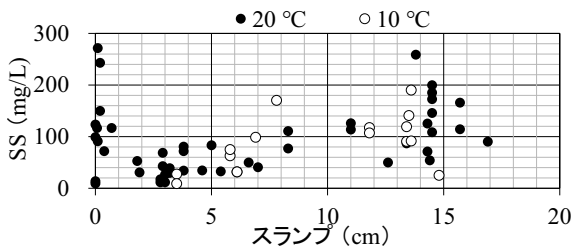


図-4 スランプ値とSSの関係

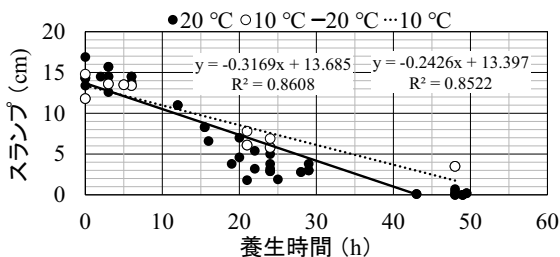


図-5 養生時間とスランプ値の関係

b) 大型水槽への投入試験

大型水槽を用いた試験のケースを表-2に示す。改質土は20℃で好適スランプ範囲未満および範囲内のものを作製した。

まず表-2(a)の水面投入のマットなしの場合のスランプ値と発濁状況を比較した。スランプ値を測定していないケースでは、図-5のスランプと養生時間の関係式よりスランプ値を求めた。なお、SSは投入から5時間以内にほぼ沈降したため、投入から5時間以内のSS平均値と経時的なSS沈降状況を求めた。

浚渫土および好適スランプ範囲内、範囲未満の改質土と、発濁状況の関係について図-6に示す。どちらの改質土も、浚渫土と比較し汚濁発生量とSS平均値が抑制された。改質材混合による改質土の、汚濁発生にかかわる75µm以下の細粒分の計算上の希釈効果は、図-1の浚渫土と改質土の粒径加積曲線から40%程度と予測される。しかしながら、改質土の低減率は、汚濁発生量では96%、SS平均値では80%であり、計算上の希釈効果を上回った。これは固化による細粒分の固定によるものと考えられる。また、好適スランプ範囲内では、固化の影響が大きい範囲未満よりもSS平均値が低減した。

沈降状況について図-7に示す。浚渫土は投入直後のSS

表-2 試験ケース

(a) 浚渫土および改質土のケース

試料内容	養生温度	養生時間	投入方法	底面マット	改質土スランプ範囲*	スランプ値
浚渫土	20℃	48 h	バージ	なし	好適スランプ範囲未満 好適スランプ範囲内	1 cm未満
改質土						1-7 cm

※推定含む

(b) 現地試験条件を考慮した場合

試料内容	養生温度	養生時間	投入方法	底面マット	改質土スランプ範囲*	スランプ値
改質土	20℃	48 h	グラブ	あり	好適スランプ範囲未満 好適スランプ範囲内 好適スランプ範囲内	1 cm未満
			グラブ			1-7 cm
			バージ			1-7 cm

※推定含む

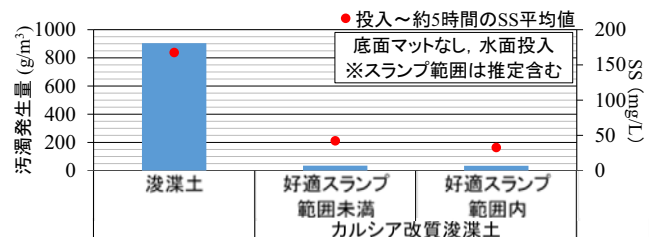


図-6 汚濁発生量とSS平均

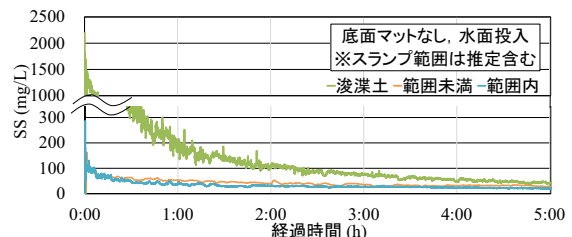


図-7 SS沈降特性

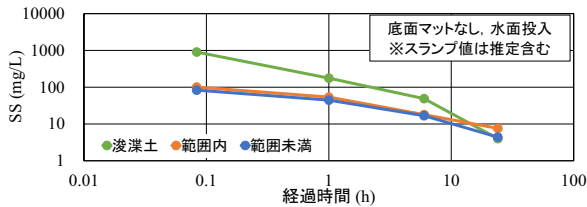


図-8 SS分析結果(採水)

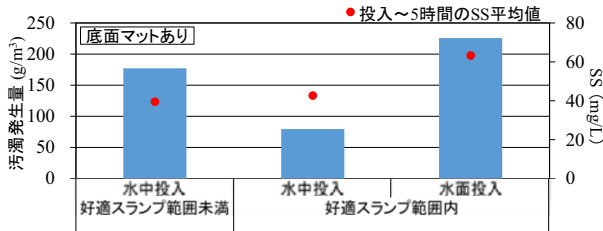


図-9 汚濁発生量とSS平均

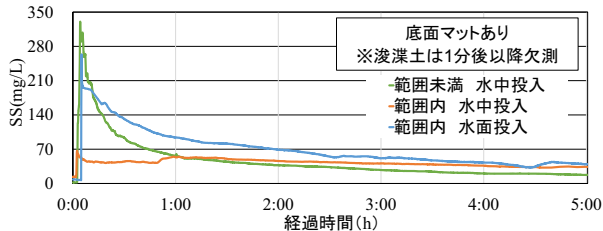


図-10 SS沈降特性

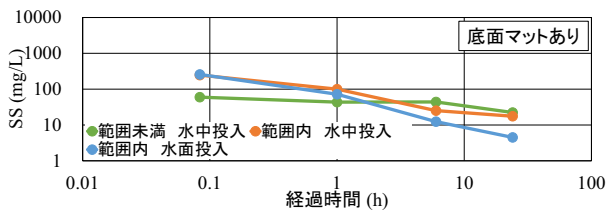


図-11 SS分析結果(採水)

が大きかったのに対し、改質土投入直後のSSは抑制され、浚渫土の10%程度となった。

採水時のSS分析結果を図-8に示す。改質土は浚渫土と比較し投入から6時間までのSSは小さかった。低減率は投入から5分後においては90%、投入から1時間および6時間においては約70%となった。

以上より、改質土は浚渫土から発生する汚濁を低減可能であること、スランプ値の管理により投入時の発濁の抑制されることが確認された。そこで現地試験では、スランプ値を調整した改質土を試験することとした。

次に、表-2(b)の実施工を想定したマットありの条件における、スランプ値を調整した改質土の汚濁発生量とSS沈降状況を確認した。改質土の汚濁発生量とSS平均値を図-9に示す。水中投入では、好適スランプ範囲内の改質土は、範囲未満と比較して汚濁発生量が低減した。投入方法による発濁状況を好適スランプ範囲内で比較する

と、落下距離の大きい水面投入では、水中投入と比較し、汚濁発生量とSS平均値が増加した。

沈降状況について図-10に示す。好適スランプ範囲内の改質土では、範囲未満と比較し、投入後の最大のSSが低減した。

採水時のSS分析結果を図-11に示す。好適スランプ範囲未満では、投入から5分後のSSが、範囲内と比較し小さかった。しかし投入5分後から24時間後までのSSの低減率は、範囲未満では60%、範囲内で90%であった。範囲未満では固化進行による投入時の試料攪乱により、細粒分が増加したためと考えられた。

以上より、改質土の汚濁は、スランプ値の管理と水中投入とすることで、より抑制されることが確認された。

4. 現地試験

(1) 方法

京浜港ドックにおいて、実施工に近い条件での潜堤施工時の発濁特性を、投入位置近傍の発濁状況および汚濁拡散・沈降特性から評価した。好適スランプ範囲内、または範囲外の改質土の発濁特性を比較した。改質土は写真-1の通り改質材と浚渫土をミキシングバケットにより混合し作製した。

投入状況を写真-2に示す。投入方法は図-12の通り、バージ直接投入を想定した水面投入と、グラブバケットを水底まで降下・開放する投入を想定した水中投入とした。



写真-1 改質土作製状況



写真-2 改質土投入状況

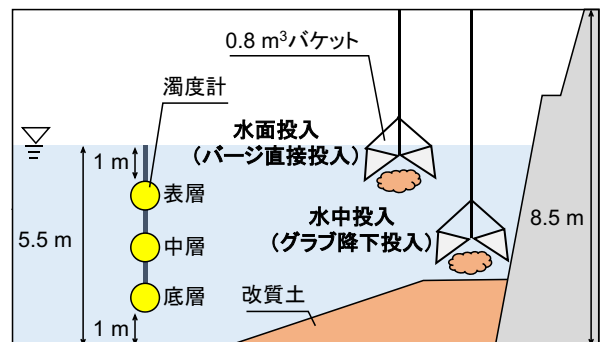


図-12 投入方法模式図

表-3 現地試験ケース

ケースNo	養生時間	投入方法	改質スランプ範囲	改質スランプ値
1	48 h	グラブ	好適スランプ範囲未満	1 cm未満
2	24 h	グラブ	好適スランプ範囲内	1-7 cm
3		バージ	好適スランプ範囲内	1-7 cm

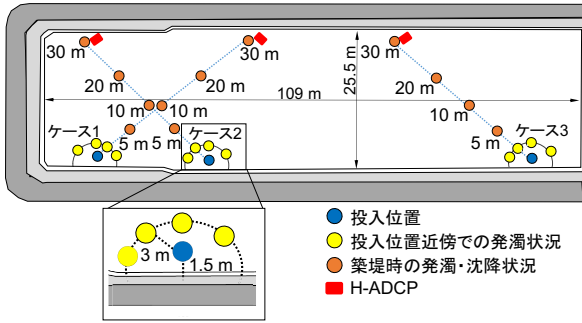


図-13 投入・濁度計設置位置

試験ケースは水中投入で範囲未満をケース 1、範囲内をケース 2、水面投入で範囲内をケース 3 とした。ケースを表-3 に示す。なお濁度は全て SS に換算した。

a) 投入位置近傍での発濁状況

投入位置近傍での発濁状況は、投入から 30 分までの SS 平均値から評価した。改質土を 0.8 m³ のグラブを用い 2 回に分けて約 2 m³ 投入した。濁度計は図-13 に示す通り、改質土投入位置から 3 m に、同心円上 4 か所、3 水深に設置した。測定は 3 秒間隔で 1 時間おこなった。

b) 汚濁拡散・沈降特性

汚濁拡散・沈降特性は、築堤時に発生する汚濁の距離減衰から評価した。改質土約 28 m³ を 0.8 m³ のグラブで連続投入した。濁度計は図-13 に示す通り、改質土投入位置から 5 m, 10 m, 20 m, 30 m 地点の 3 水深に設置した。測定は、投入から 50 分間は 3 秒間隔、それ以降は 5 分間隔で 24 時間おこなった。また、発濁が大きい底層については、多層音響計測計（以下、H-ADCP とする）(HADCP600, Teledyne RD Instruments 社製)を用いた画像解析からも評価した。H-ADCP を図-13 に示す通り投入位置から約 30 m の位置に設置し、改質土投入から約 20

時間、3 秒間隔で汚濁を測定した。試験時に採水した SS 分析データと ABT 値 (H-ADCP の超音波に対する SS の反射強度) からコンタ図を出力した。

(2) 結果

a) 投入位置近傍での発濁状況

投入位置近傍での SS 平均値 (投入から 30 分) を図-14 に示す。好適スランプ範囲内のケース 2 では、範囲未満のケース 1 と比較し、SS 平均値が表層・中層・底層で 1/1.4~1/3 程度に抑制された。

またケース 2 は水中投入であるが、範囲内で水面投入のケース 3 と比較し SS 平均値が中層で 1/5, 底層は 1/2 程度に抑制された。

以上より、好適スランプ範囲内および水中投入では、投入位置近傍での汚濁抑制効果を得られることが確認された。また水面投入の場合、範囲内の改質土は、範囲未満と比較し汚濁が増加する傾向は室内試験の結果と一致した。また水面投入のケース 3 では、水中投入のケース 2 と比較し、底層においてより SS が影響したが、水面から試料を落下させる方法では、着底時に改質土の土粒子が分散しやすいことが原因と予想された。なおケース 1 の投入位置はドック端部であるが、4 か所の SS に大きな差はなかったため、影響はないものと考えられた。

b) 汚濁拡散・沈降特性

図-15, 図-16 に投入から 5 時間の 3 水深における SS 最大値, 平均値を示す。ケース 1, 3 において投入位置近傍 5-10 m の表・中層では、底層と比較し SS 最大値が小さかった。要因として底層での巻き上がりがケース 1 の場合は試料攪乱により、ケース 3 の場合は水面からの落下距離により発生したと考えられる。底層では、範囲未

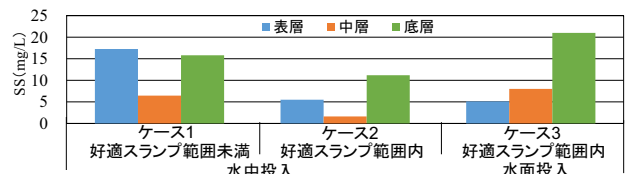


図-14 投入位置近傍での SS 平均

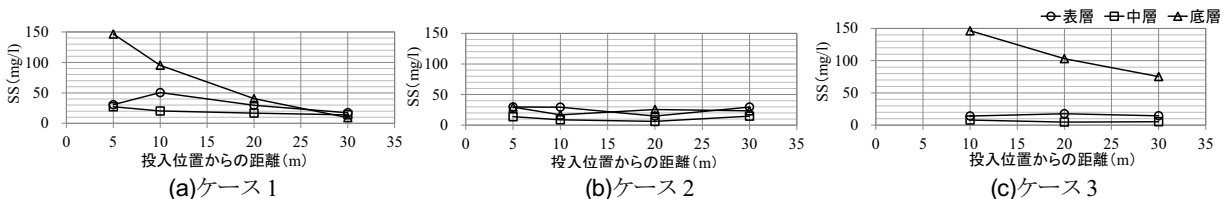


図-15 SS 最大値

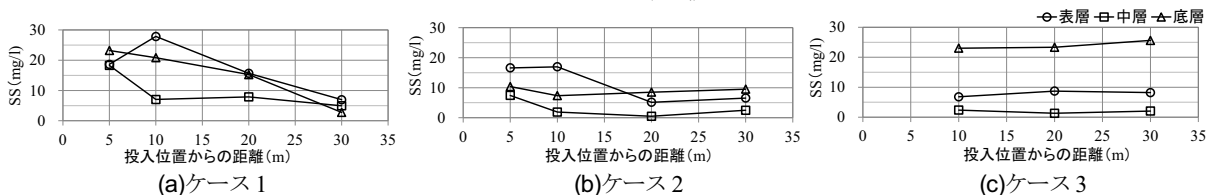


図-16 SS 平均値

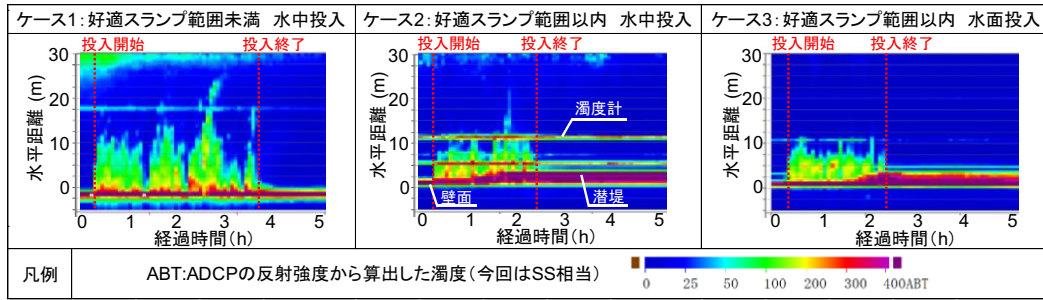


図-17 築堤時の H-ADCP 計測結果 (投入～5 時間)

満のケース 1 で、投入位置近傍の 5-10 m の SS 最大値が 20-30 m の 1.7 倍となった。水面投入のケース 3 では、SS 最大値が水中投入のケース 2 と比較し、20 m で 3 倍、30 m で 8 倍程度となり、広域まで影響した。これは水面投入では改質土が底層で分散し、汚濁が広域まで拡散する傾向があるためと考えられた。なおケース 2 では濁度計が端部に向かって設置されているが、30 m での SS の上昇等はみられなかったため、影響はないと考えられる。

築堤時の H-ADCP 測定結果を図-17 に示す。発濁状況は、水中投入では範囲内のケース 2 が約 10 m 範囲内で汚濁が収束しているのに対し、範囲未満のケース 1 では 20 m 以上の広域まで拡散した。水面投入のケース 3 では汚濁は近傍の 10 m 以内に収束し、濁度計測との結果と異なっており、要因については今後の課題である。なお投入前の 0 m 付近で ABT 値が高くなった原因として、ドック壁面や投入土砂の堆積による影響を受けたと推測された。

5. まとめ

- ①改質土投入時の浮遊物質量の最大値はスランプ値と関係性が認められ、好適スランプ範囲内 (1-7 cm) で SS が減少した。
- ②範囲内かつグラブ降下投入の場合、改質土の汚濁発生量および SS は、範囲未満およびバージ直接投入の場合

と比較して抑制された。

- ③現地試験での投入位置近傍 (投入位置から 5-10 m) において、範囲内の SS 平均値は、範囲未満と比較し抑制された。スランプ値および投入方法による発濁特性の傾向は、室内試験での傾向と一致した。
- ④汚濁拡散特性の検証の結果、バージ直接投入ではグラブ降下投入と比較し、汚濁の影響が広域 (投入位置から 20-30 m) まで及んだ。

参考文献

- 1) 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，pp 1, 附 2-10, 2017.
- 2) 和田真郷，鶴ヶ崎和博，赤野博，中川雅夫，辻井正人，木曾英滋：浚渫泥土と転炉系製鋼スラグの攪乱混合土砂を用いた実海域試験施工-バッチ式混合投入施工，海洋開発論文集，第 24 巻，pp. 345-350, 2008.
- 3) 本田秀樹，横手武聡，林正宏，吉武秀樹，御手洗義夫，武田将英，田中洋輔，五十嵐ひろ子：カルシア改質土を用いた直立護岸補強と人工浅場造成，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.71, No. 2, pp. I 814-819, 2008.
- 4) 竹山佳奈，泉水めぐみ，西田浩太，峯松麻成，田中裕一，江口信也，野口孝俊：カルシア改質浚渫土を用いた汚濁低減のための潜堤施工手法の検証～強度・形状特性の把握～土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.75 (投稿中)

(2019.2.7 受付)
(2019.4.24 受理)

VERIFICATION OF SUBMERGED BREAKWATER CONSTRUCTION METHOD TO REDUCE TURBIDITY BE USING IMPROVED DREDGED SOIL BY THE STEELMAKING SLAG-CHARACTERISTICS OF SUSPENDED SOLIDS-

Megumi SENSUI, Kana TAKEYAMA, Manari MINEMATSU, Kota NISHIDA, Shinya EGUCHI, Yuichi TANAKA and Takatoshi NOGUCHI

We investigated quantitative amount and characteristic of distribute of SUSPENDED SOLIDS (SS) from mixture of dredged soil and steelmaking slag in brine with solid state and throwing method in laboratory and field experiments. We focused on fluidity (slump) about the soil and the throwing method imagined barge direct (throwing on face) and grab down (throwing in brine). In laboratory, we examined relation of ideal slump value (1-7 cm) with SS. In field, we examined characteristic of SS amount of the soil produced accordance with result of laboratory in brine every throwing method. From the above, the amount of SS from the soil can be controlled by ideal slump value and throwing method in brine.