

# カルシア改質土の水中投入システムの開発

田中 裕一<sup>1</sup>・板垣 侑理恵<sup>2</sup>・中島 健一<sup>3</sup>・野中 宗一郎<sup>4</sup>

- <sup>1</sup>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)
- <sup>2</sup>正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四駆町 1534-1)
- <sup>3</sup>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)
- <sup>4</sup>正会員 五洋建設(株) 中国支店 (〒730-8542 広島市中区上八丁堀 4-1)

カルシア改質土は、軟弱な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、護岸の腹付材、埋立材、深掘跡の埋戻材等として広く使用されている。

カルシア改質土の海域利用では、グラブを用いて水中に投入する例が多いが、カルシア落下混合船を使用した施工では、トレミー管により水中投入する方法が運搬・投入工程を簡略化可能であり効率的であると考えられる。一方、粘性の高いカルシア改質土を従来のトレミー管を用いて投入した場合、濁りの発生やトレミー管の閉塞が懸念される。そこで、こうした問題に対応可能な新たなトレミー管の開発を行った。実験に結果、開発したトレミー管では、濁りの発生を抑制可能であり、濁度の最大値は従来型のトレミー管と比較して40%程度に、濁りの発生量は10%程度に低下することを確認した。

**Key Words :** dredged soil, steel slag-dredged soil mixture, tremie pipe, drop mixing vessel

## 1. はじめに

カルシア改質土は、軟弱な浚渫土とカルシア改質材(転炉系製鋼スラッグの粒度と成分を調整した材料)を混合した材料であり、強度発現・水中投入時の濁り抑制が可能等の特徴がある(図-1)。

「カルシア改質土技術マニュアル」<sup>1)</sup>や「カルシア改質土工法積算マニュアル」<sup>2)</sup>が発行されており、浚渫土の有効活用を目的として、干潟・浅場の造成材、護岸の腹付材、埋立材、深掘跡の埋戻材、潜堤材等として広く使用されている。

カルシア改質土の施工は、バックホウを使用して浚渫土とカルシア改質材の混合を行い、作成したカルシア改質土を土運船により使用海域に運搬後、グラブ船等を使用して海中に投入する例が多い。このような、バックホウを用いて浚渫土とカルシア改質材を混合する方法は、中小規模の施工に適している。

一方、浚渫土とカルシア改質材を混合する方法として落下混合方式がある。落下混合のイメージを図-2に示すが、浚渫土とカルシア改質材の高さ2m以上×3回の落下混合が進むと、カルシア改質土の強度の変動係数が小さくなり、均質な材料が得られることが報告されている<sup>3)</sup>。

カルシア落下混合船は、この混合方式を活用したものであり、リクレーマ船にカルシア改質材の供給ホッパ、供給コンベアおよび落下混合用コンベア等を搭載し、浚

渫土とカルシア改質材を効率よく混合し、カルシア改質土を大量に製造することができる<sup>4)</sup>(写真-1)。



図-1 浚渫土・カルシア改質材とカルシア改質土

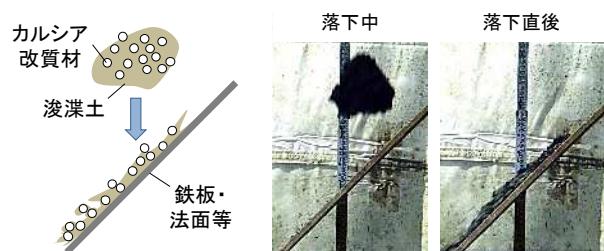


図-2 落下混合方式イメージ図と実験状況

カルシア落下混合船は、大規模な施工に対応可能であり、カルシア改質土を土運船内に排出し、土運船を用いてカルシア改質土を運搬した後、グラブ船により水中投入する施工が行われている（図-3）。

一方、カルシア落下混合船を用いた施工では、ブームコンベアからの落下時に3回目の落下混合が終了することから、トレミー管を使用してカルシア改質土を直接水中に投入することにより、土運船での運搬工程、グラブ船での投入工程を省いた効率的かつCO<sub>2</sub>排出量の少ない施工が可能になると考えられる<sup>5)</sup>（図-4）。

しかし、カルシア改質土の水中投入に従来のトレミー管を使用した場合、カルシア改質土の材料分離や発現強度の低下、トレミー管の閉塞等の可能性があることから、カルシア改質土の水中投入に適したトレミー管の開発を行った。



写真-1 カルシア落下混合船

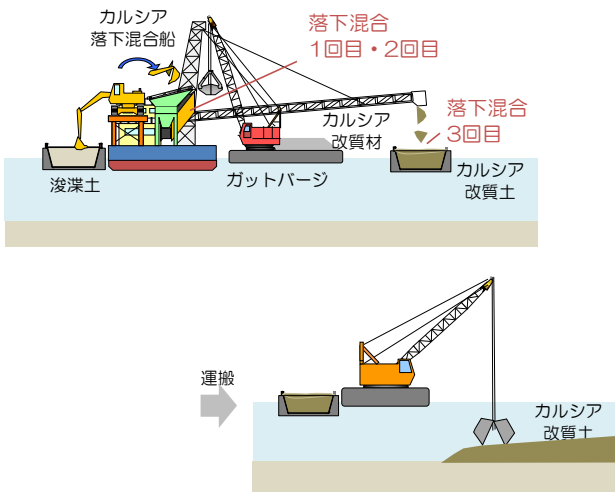


図-3 カルシア落下混合船-グラブ投入施工模式図

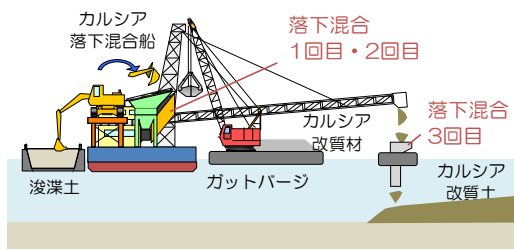


図-4 カルシア落下混合船-トレミー投入施工模式図

## 2. 実験方法

### (1) トレミー管の形状検討

土砂等の水中投入時の汚濁対策として、トレミー管が広く使用されている。しかし、トレミー管に粘性の高いカルシア改質土を投入した場合、トレミー管内をスムーズに落下せず、トレミー管内の水面が上下動を伴いながらカルシア改質土が落下する脈動<sup>6)</sup>が生じることが予想される。この過程で汚濁が発生し、トレミー管の先端からの濁水が放出される可能性がある（図-5）。また、脈動の過程で材料分離が生じ、投入後のカルシア改質土の強度が低下すること、トレミー管内を落下中に次のカルシア改質土が供給されることによるトレミー管の閉塞等も懸念される。

そこで、トレミー管側面の鉛直方向に海水の流入・流出が可能なスリットを入れ、スリット部からの海水の排出と流入により脈動の発生を抑え、濁りの発生を抑制したトレミー管を考案した（図-6）。側面に配置したスリットからトレミー管外に濁りが広がる可能性があるが、カルシア改質土自体が濁りの発生が少ない材料であることから、脈動の抑制によりトレミー管内の濁りが小さくなり、トレミー管から放出さえる汚濁が抑えられると考えられる。

そこで、水槽実験を行い、スリット付トレミー管の効果の確認を行った。水槽実験の条件は、海域での投入を想定してフルードの相似則をもとに設定した（表-1）。

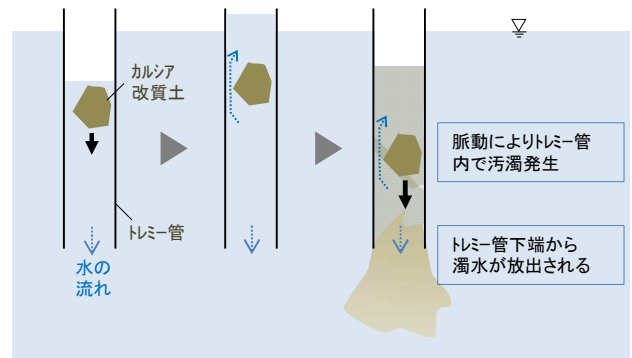


図-5 従来型トレミー管での投入模式図

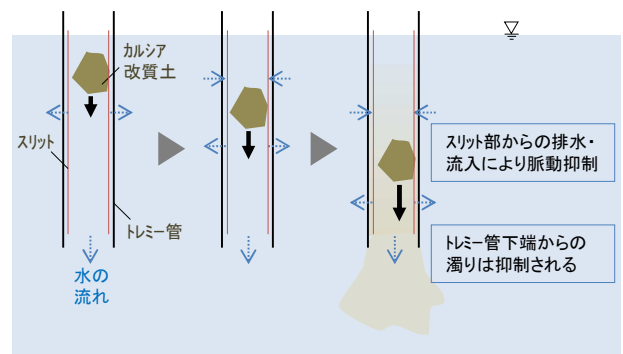


図-6 スリット付トレミー管での投入模式図

表-1 実験条件

区分	項目	単位	縮率	施工 想定値	模型値
トレミー管	内径	m	1/28.5	2.3	0.08
	水中長	m	1/28.5	20	0.70
深さ	水深	m	1/28.5	40	1.40
	トレミー管先端 -水底の距離	m	1/28.5	20	0.70
流量	投入量	m <sup>3</sup> /8h	1/28.5 <sup>2.5</sup>	4000	0.922
		m <sup>3</sup> /h	1/28.5 <sup>2.5</sup>	500	0.115

表-2 浚渫土とカルシア改質材の材料特性

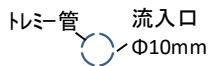
項目	単位	浚渫土	カルシア改質材
土粒子密度 $\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	2.695	—
表乾密度	g/cm <sup>3</sup>	—	3.17
自然含水比 $w_n$	%	88.5	—
液性限界 $w_L$	%	74.5	—
細粒分含有率 $F_c$	%	96.7	3.0

表-3 実験ケース

No.	区分	浚渫土 含水比	カルシア改質材 混合率	フロー値	トレミー管
1	浚渫土	1.5wL	0%	11.5cm	従来型
2					スリット付
3	カルシア 改質土	2.0wL	3%	10.8cm	従来型
4					スリット付

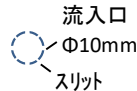
【従来型トレミー管】

上面図

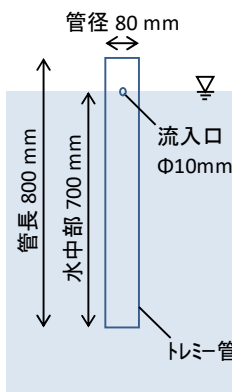


【スリット付トレミー管】

上面図



側面図



側面図

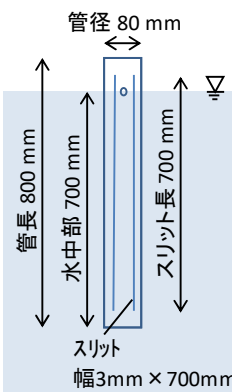


図-7 トレミー管模式図

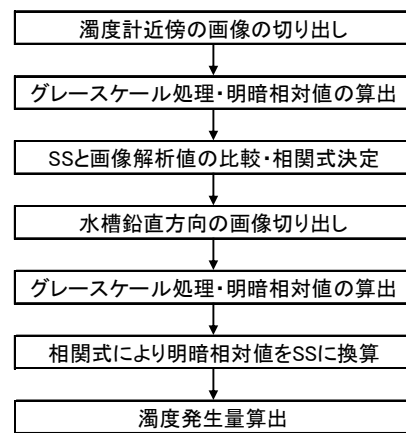


図-8 画像解析フロー

カルシア改質土の流動性を示す指標であるフロー値  $F$  (NEXCO 試験法 試験法 313) は、浚渫土の含水比やカルシア改質材の混合率によって変わるが、カルシア改質土技術マニュアル<sup>1)</sup>に管理値として  $90 \text{ mm} \leq F \leq 110 \text{ mm}$  が示されている。過去に報告されているトレミー管での水中投入実験と同様に<sup>7)</sup>、実際のカルシア改質土に近い値に設定した。

アクリル水槽 (500 mm×500 mm×H1500 mm) に水深 1400 mm となるように水道水を満たした。トレミー管は  $\Phi 80 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$  の透明塩ビパイプを水中部の長さが 700 mm となるように水槽の中央に設置した。従来型トレミー管は上部の水面付近に水の流入口 ( $\Phi 10 \text{ mm} \times 4$  箇所) を、スリット付トレミー管は同様の水の流入口に加え、幅 3 mm 長さ 700 mm の切れ込みを周方向に均等に 4 本、両端から 50 mm 離れた位置に配置した (図-7)。

浚渫土とカルシア改質材の性状を表-2 に、実験ケースを表-3 に示す。カルシア改質土は濁りの発生量が少ないことが予想されたため、浚渫土のみの実験ケースを設定した。また、カルシア改質土のフロー値が浚渫土と同等となる条件とするため、カルシア改質材は粒径 5mm 以下のものを使用し、混合率は 3 vol% に設定した。

従来型のトレミー管とスリット付トレミー管に対する浚渫土とカルシア改質土の投入には、スクイズポンプを使用し、各ケース 22 L/min×30 sec の条件でトレミー管に供給した。

底面から 100 mm の下層と底層から 700 mm の中層のトレミー管とアクリル水槽の中間にポータブル濁度計 (東亜ディーケーケー TB-31) を設置し、濁度の測定を行った。濁度は別途測定した SS との相関を求めるとともに、投入時の画像をグレースケール変換した後、明暗の相対値を (1) 式より求め、SS との相関式をもとに水槽全体の濁り発生量の計算を行った (図-8)。

$$\text{明暗の相対値} = \frac{(\text{バックグラウンド} \text{ 平均値} - \text{グレースケール平均値})}{\text{バックグラウンド} \text{ 平均値}} \quad (1)$$

## (2) ホツパ形状の検討

カルシア落下混合船のブームコンベア上での落下混合回数は 2 回であり、ブームコンベア先端からトレミー管までの間に 3 回目の落下混合を実施する必要がある。3 回目の落下混合は、ブームコンベアの下方 2 m 程度の位置に傾斜板を吊り下げてカルシア改質土を衝突させる方

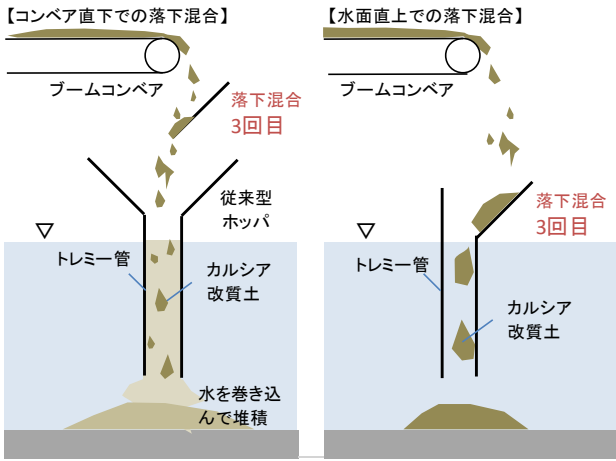


図-9 カルシア改質土の落下位置模式図

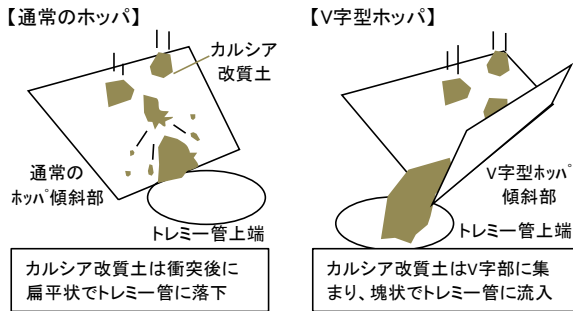


図-10 ホッパ模式図

法やトレミー管直上のホッパの傾斜部に衝突させる方法が考えられる。

しかし、カルシア改質土が直接水面に大きな速度で落下した場合、カルシア改質土がバラバラの状態でも水面に落下した場合等では、濁りが発生しやすく、カルシア改質土が水面に落下した後、海底面に到着するまでの過程で水を巻き込み、発現強度が低下することが懸念される。そこで、直接海面への落下を避けるとともに、水面への落下速度を小さくするために、水面付近に配置したホッパの傾斜面にカルシア改質土を落下させて3回目の落下混合を行うものとした(図-9)。

また、単にホッパの傾斜面に落下した場合、図-2のようにカルシア改質土が平たく表面積が大きい状態でトレミー管内に落下し、細粒分の分離による汚濁の発生や沈降・堆積過程での水を巻き込みによる強度低下が予想される。これを避けるために、傾斜面をV字型としてカルシア改質土を塊状でトレミー管に排出する形状を考案した(図-10)。そして、水槽実験ではこれを模擬し、スクイズポンプにより供給する材料はV字型のホッパを経てトレミー管に供給するようにした。

### 3. 実験結果

従来型トレミー管とスリット付トレミー管への浚渫土

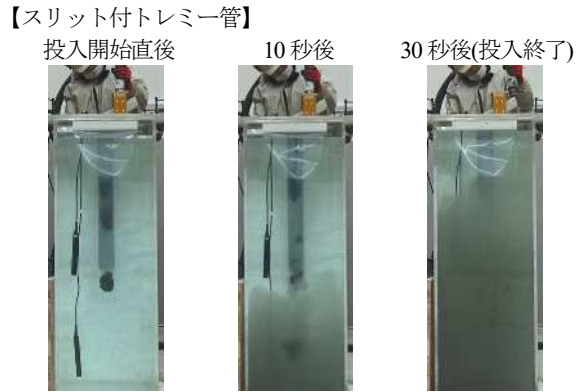
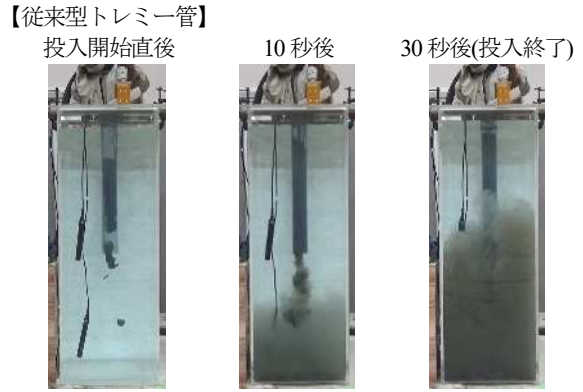


図-11 浚渫土の水槽への投入と濁りの発生状況

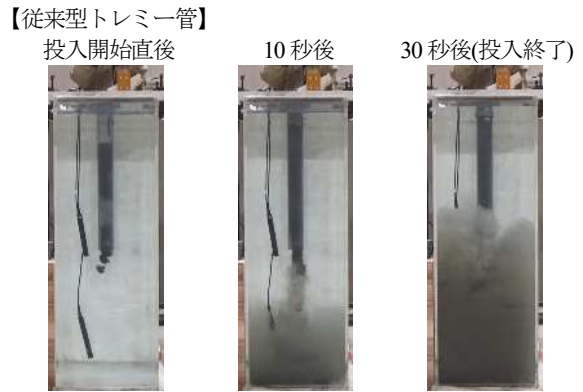


図-12 カルシア改質土の水槽への投入と濁りの発生状況

とカルシア改質土時の濁りの発生状況を図-11、図-12に、中層・下層での濁度の経時変化を図-13、図-14に示す。また、濁度の最大値と水中落下速度(動画をもとにしたトレミー管下端部での測定値)を表-4、図-15に示す。

従来型のトレミー管では、浚渫土・カルシア改質土ともにトレミー管内で材料が上下しながら降下し、この過程で濁りが生じ、トレミー管の先端から汚濁が広がる現象が見られた。これに対し、スリット付トレミー管ではトレミー管内での脈動は認められず、濁りは抑制された。

下層の濁度を比較すると、浚渫土の場合スリット付トレミー管の濁度の最大値は従来型トレミー管の39%となった。カルシア改質土も同様にスリット付トレミー管の濁度の最大値は従来型の36%であった。

一方、浚渫土とカルシア改質土の濁度の最大値を比較すると、従来型の下層では  $323/207=0.95$ 、スリット付の下層では  $112/307=0.90$  となり、10%程度に低下に留まった。これまでの知見では、浚渫土と比較してカルシア改質土の濁りの発生量は3割程度であることから、今回の実験ではカルシア改質材の添加量を減らし、浚渫土とカルシア改質土のフローを同等の値にしたことが影響した可能性が考えられる。

図-11のスリット付トレミー管の30秒後の投入完了時では、従来型より濁りが上方に広がり、図-13、図-14の投入完了時付近の中層の濁度は、スリット付トレミー管の方が従来型よりも大きくなった。トレミー管先端の水中落下速度を比較すると、材料が脈動しながらトレミー管内を降下する従来型と比べて、スリット付トレミー管

では速度が大きく、材料着底時の巻き上がりが大きくなった結果、濁りが上部まで拡散したと考えられる。

図-12において、浚渫土の従来型トレミー管投入30秒後、スリット付トレミー管投入30秒後、カルシア改質土の従来型トレミー管投入30秒後では濁りの発生がトレミー管を中心として左右が非対称となったが、この原因は明確でない。

濁度計を設置した中層と下層の濁りの状況が水槽全体を反映していない可能性があるため、撮影した動画をもとに、濁りの発生状況の画像解析を行い水槽全体の濁りの発生量を求めた。

明暗の相対値とSSの相関について、カルシア改質土をスリット付トレミー管に投入した際の下層の測定結果を例として図-16に示す。グレースケースは、明暗の程度を256段階で表現し、完全な白色を255、完全な黒色を0としたものであり、値が小さい程暗いことを示す。(1)式において黒色に近い程(濁度が大きい程)明暗の相対値は大きくなる。図-16において明暗の相対値とSSの相関が認められ、図-17に示すように濁度計の測定値を換算したSSと画像解析のSSの計算値が同等であったことから、本手法による濁りの発生量は推定可能であると判断した。

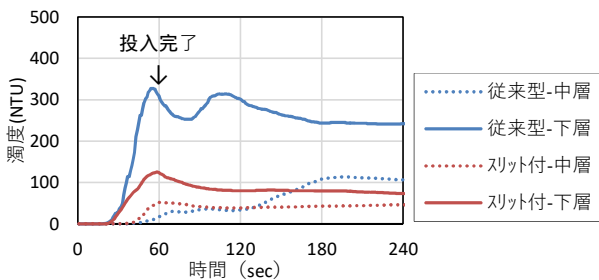


図-13 浚渫土投入時の濁度の変化

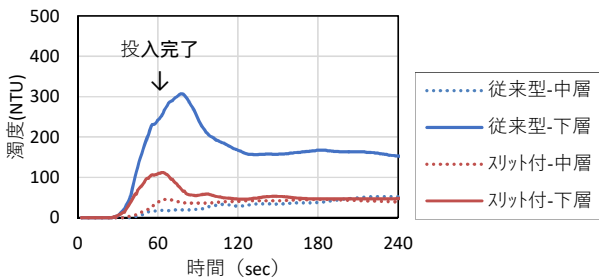


図-14 カルシア改質土投入時の濁度の変化

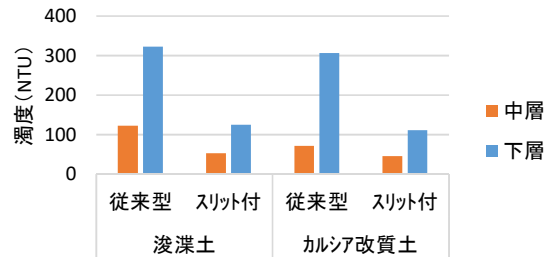


図-15 材料・投入方法別の濁度最大値

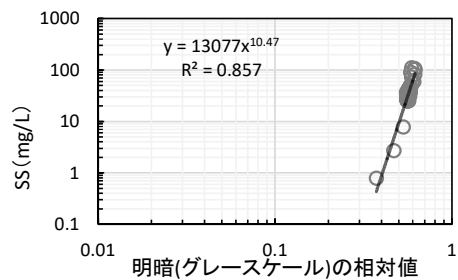


図-16 明暗の相対値-SSの相関 (改質土 スリット付トレミー 下層)

表-4 濁度とトレミー管先端部での水中落下速度

設定条件		下層		中層		水中落下速度 (cm/s)
投入材料	トレミー管	濁度最大値 (NTU)	従来型比 (%)	濁度最大値 (NTU)	従来型比 (%)	
浚渫土	従来型	323	100	123	100	31.0
	スリット付	125	39	53	43	57.1
カルシア改質土	従来型	307	100	72	100	32.0
	スリット付	112	36	46	64	53.3

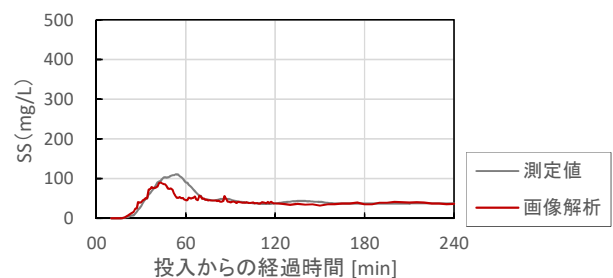


図-17 SS測定値と画像解析結果 (改質土 スリット付トレミー 下層)

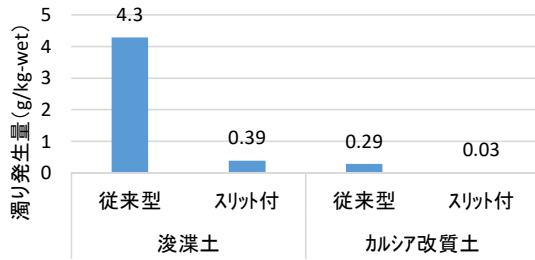


図-18 材料・投入方法別の濁り発生量

図-17 において、画像解析の結果では測定値のピークを再現できていないが、濁度計の設置位置がアクリル水槽面から 250 mm 離れた場所にあったことも影響している可能性がある。

画像解析より求めた濁りの発生量を図-18 に示す。スリット付トレミー管と従来型トレミー管の濁り発生量を比較すると、浚渫土は  $0.39/4.3=0.09$ 、カルシア改質土は  $0.03/0.29=0.10$  となった。スリット付トレミー管では、従来型トレミー管と比較して濁り発生量は 90%程度抑制される結果となり、濁度最大値の下層と同様の結果であった。

一方、浚渫土とカルシア改質土を比較すると、従来型トレミー管では  $0.29/4.3=0.07$ 、スリット付トレミー管では  $0.03/0.39=0.08$  となり、浚渫土とカルシア改質土の濁り発生量が技術マニュアルに記載の 3 割程度と<sup>1)</sup>比較して、さらに小さな値となった。

この原因は明らかではないが、カルシア改質土の水中投入時の汚濁発生量を、同様の水槽実験において求めた結果として浚渫土 2.16 g/kg-wet、カルシア改質土 0.60 g/kg-wet が報告されており<sup>1)</sup>、今回の従来型トレミー管の結果はこれに近い値であった。

#### 4. まとめ

カルシア落下混合船に適用可能な、粘性の高い材料に適用可能なトレミー管の開発に取り組み、水槽実験を行った。水槽実験の結果、浚渫土やカルシア改質土の水中投入において、スリット付トミレー管の使用により、汚濁の低減が可能であった。従来型のトレミー管と比較してスリット付トミレー管の濁度の最大値は 40%程度、濁りの発生量は 10%程度であった。

一方、高含水比の浚渫土や高含水比の浚渫土からカルシア改質土を作成した場合にスリット付トレミー管が同様の効果を期待することができるかどうかは未確認であり、今後の検討が必要である。

今回の実験により、スリット付トレミー管による水中投入システムの汚濁抑制効果が確認できたことから、カルシア落下混合船用の装置を作成し、実際の施工に適用



写真-5 水中投入用ホッパーとトレミー管

している(写真-5)。

しかし、スリット付トレミー管は従来型のトレミー管と比較して水中落下速度が大きいいため、カルシア改質土着底時の汚濁の巻き上がりが大きくなることが予想される。このため、今後、施工時の濁度の計測や汚濁の発生原単位の測定を行う予定である。

#### REFERENCES

- 1) (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. [Coastal Development Institute of Technology : *Technical manual for the use of steel slag-dredged soil mixture in ports, airports, coasts etc.*, 2017.]
- 2) 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. [Calcilia Improving Soil Study Group : *Estimation manual for steel slag-dredged soil mixture(2nd edition Ver.2.0)*, 2021.]
- 3) 山越陽介・赤司有三・菅野浩樹・田中裕一・松本歩・渋谷貴司：落下混合方式によるカルシア改質土の埋立，土木学会第69回年次学術講演会，VI-312，pp.623-624，2014. [Yamagoshi, Y. Akashi, Y. Kanno, H. Tanaka, Y. Matsumoto, A and Shibuya, T.: Reclamation of steel slag-dredged soil mixture by drop mixing method, *proceedings of the 69th annual conference of the japan society of civil engineers*, VI-312, pp.623-624, 2021.]
- 4) 田中裕一：カルシア落下混合船「オーシャン 3 号」ーカルシア改質土の大規模・高品質な施工が可能ー，marine voice 21, vol.315, pp.16-19, 2021. [Tanaka, Y.: Calcilia drop mixing vessel "Ocean 3", *marine voice 21*, vol.315, pp.16-19, 2021.]
- 5) 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ー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. [Nakagawa, M. Tanaka, Y.: Prospects for global warming countermeasures using steel slag-dredged soil mixture, *journal of JCMA*, vol.73, No.11, pp.63-68, 2021.]
- 6) 五明美智男：二重式鉛直管を用いた土砂投入時における管内水循環機構について，海岸工学論文集 vol.47, pp. 981-985, 2000.[Gomyo, M.: Water circulation mechanism using double-tremie pipes during sediment dumping, *journal of coastal engineering*, vol.47, pp.981-985, 2000.]
- 7) 平野辰昇・重松孝昌・金澤剛：鉛直管を用いて水域に投入される濁水塊の流動予測手法の開発，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.66, No.1, pp.751-755, 2010. [Tatsunori, H. Takaaki, S and Tsuyoshi, K.: Development of a Numerical Model for Predicting Flow Induced by Sediment Dumped into a Vertical Pipe, *J.JSCE, Ser.B2, Coastal*

engineering, Vol.66, No.1, pp.751-755, 2010.]

- 8) 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.[Tanaka, T. Nakashima, K. and Nonaka, S.: Mixing characteristics of calcia drop mixing vessel,

*proceedings of the 76th annual conference of the japan society of civil engineers*, VI-65, 2021.]

**(Received February 9, 2023)**

**(Accepted May 11, 2023)**

## DEVELOPMENT OF A NEW DUMPING SYSTEM FOR STEEL SLAG-DREDGED SOIL MIXTURE

Yuichi TANAKA, Yurie ITAGAKI, Kenichi NAKASHIMA and Souichirou NONAKA

Steel slag-dredged soil mixture is widely used as a construction material for tidal flats and shallow areas, as a reclamation material, and as a refilling material for subaqueous borrow pits.

Grabs are often used when dumping steel slag-dredged soil mixture into the sea. However, in construction using a calcia drop-mixing vessel, it is considered efficient to use a tremie pipe, which can reduce the transportation and dumping of calcia-improved soil, into the sea. On the other hand, when steel slag-dredged soil mixture is dumped into the sea using a tremie pipe, turbidity may occur and the tremie pipe may be clogged.

Therefore, we developed an underwater dumping system for steel slag-dredged soil mixture, which consists of a tremie pipe with slits on the side and a hopper with a V-shaped drop part for the steel slag-dredged soil mixture. Through experiments, it was confirmed that the newly developed tremie pipe can reduce turbidity and increase strength by dropping and mixing the steel slag-dredged soil mixture. The maximum turbidity of the tremie pipe with slits was reduced to about 40%, and the amount of turbidity generated was reduced to about 10% compared to the normal tremie pipe.