

二重式鉛直管による土砂投入時の汚濁拡散・低減機構 に関する現地観測

五明美智男*・飯田 勲**・矢内 栄二***

1. はじめに

土砂を扱う埋立・浚渫・浅場造成等では、自然環境への配慮から工事に伴う周囲への影響を極力小さくすることが要求されており、その方法として、より効果的・効率的に汚濁防止膜を展開する方法や汚濁発生源での負荷を低減する方策などが検討されている。前者については、鶴谷ら (1996) が汚濁防止膜の効果について総合的な現地観測事例を報告している。一方、後者の一例として、著者らは、汚濁防止膜が使用できない錨泊地内において、二重式の鉛直管を用いた土砂投入工事を実施している (奥村ら, 1997: 以下前報とする)。二重式鉛直管を用いた意図としては、①単式の鉛直管に見られるような管継ぎ目からの汚濁流出を防ぐこと、②二重式とした管内部での循環により汚濁貯留を促進し、汚濁発生源から周囲へ流出する汚濁を少しでも小さくしようと試みたこと、③汚濁防止膜を使用せずに、周囲への汚濁拡散低減を図ること、が挙げられる。こうした工法の効果について、相似則の問題から水理実験で定量的に検討することが難しいため、前報では現地観測による検討を試みた。

本論文は、前報の結果および新たに実施した現地観測結果を総合的に解析し、二重式鉛直管の汚濁拡散・低減機構について考察するものである。

2. 工事および現地調査の概要

工事は、川崎港東扇島地区の航路泊地整備によって発生する浚渫土砂を、東扇島防波堤の前面海域に残存する窪地 (水深 20~26 m) に投入し、錨泊地の整備および環境改善を図るものである。図-1 の断面形状に示すように、二重式鉛直管は、主に鉛直方向に伸縮可能な外管・内管、土砂を受け内管内へ落下させる上部のホッパー、鉛直管下部のキャンパスシートより構成されている。土運船により運ばれてきた約 800 m³ の土砂は、13 m³ バケットを備えたグラブ船により約 1 時間で投入される。また、内管と外管の下端にはエア噴出部が 8 カ所設置 (総

空気量 1 m³/min) されており、内管と外管の間で上昇流を発生させ、管内の水の循環を促進できる構造となっている。

現地観測は、1997 年の 2 月 6-8 日 (大潮時) と 8 月 20-22 日 (中潮時) の計 2 回実施した。図-1 には、鉛直管の断面形状に加え、鉛直管内部および近傍での調査項目・位置を、また、表-1 には、各測点における調査内容を示した。

なお、現地観測期間中の投入土砂性状はほぼ一定しており、土粒子比重 2.67、シルト分・粘土分含有率 94%、

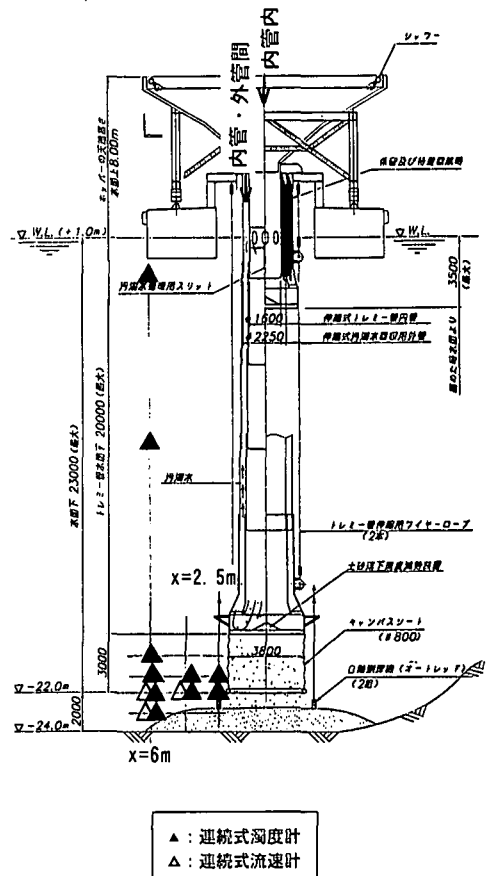


図-1 鉛直管の断面形状と調査項目・位置

* 正会員 水修 東亜建設工業(株) 技術研究所
** 東亜建設工業(株) 横浜支店
*** 正会員 工博 東亜建設工業(株) 土木本部設計部

表-1 各測点における調査内容

測点 (m)	目的	調査項目・方法	調査サイクル	時期	
1	$x^*=0$	汚濁循環効果の確認	投入式濁度計：1 m 毎に測定	1 隻分の土砂投入終了後	2 月
2	$x=1.2\sim 1.4$	汚濁循環効果の確認	採水および SS 測定：海面から 5 m 毎	1 隻分の土砂投入終了後	2 月
			電磁流速計：海面下 13 m	1 隻分の土砂投入中	2 月
3	$x=2.5$	近傍の汚濁拡散状況	連続式濁度計： $z_c^{**}=0\text{ m}, -1\text{ m}$	終日 (8 時間)	8 月
4	$x=4.25$	近傍の汚濁拡散状況	連続式濁度計： $z_c=0\text{ m}, -1\text{ m}$	終日 (8 時間)	8 月
		土砂投入時流況	連続式流速計： $z_c=3\text{ m}$	終日 (8 時間)	8 月
5	$x=6$	近傍の汚濁拡散状況	連続式濁度計：表層 (-2 m)，中層 (-10 m)， $z_c=1\text{ m}, 0\text{ m}, -1\text{ m}, -2\text{ m}$	終日 (8 時間)	2 月
		土砂投入時流況	連続式流速計： $z_c=1\text{ m}, 0\text{ m}$	終日 (8 時間)	2 月
6	$x=6$	近傍の汚濁拡散状況	連続式濁度計： $z_c: 1\text{ m}, 0\text{ m}$	終日 (8 時間)	8 月
		土砂投入時流況	連続式流速計： $z_c=1\text{ m}$	終日 (8 時間)	8 月
7	$x=23$	周辺の汚濁拡散状況	投入式濁度計：0.5 m 毎	土砂投入中 10 分毎	2 月
8	$x=50$	周辺の汚濁拡散状況	投入式濁度計：0.5 m 毎	土砂投入中 10 分毎	8 月

* x ：鉛直管中心から外部へ向かう座標，** z_c ：鉛直管下端からの相対的な深度，下方が+。

自然含水比 70%となっている。また，光学的に得られた濁度は，前報同様，SS に換算し解析に用いた。

3. 土砂の堆積状況

投入された土砂の一部は直下に堆積し，残りは周囲へと拡がる。こうした土砂堆積の進捗に伴い，海底形状は大きく変化し，SS の拡散状況や土砂投入時の流況にも影響を与える。そこで，工事管理用として $x=2.4\text{ m}$ 地点に設置した重錘式の自動測深機記録を用い，土砂投入時の地盤高変化について検討する。

図-2 は，現地盤に対し土砂投入を開始した後の 1 隻毎の堆積厚変化を示したものである。ここで， Δz は 1 隻あたりの投入前後における地盤高の変化（堆積が+）として定義したものである。投入地点のほぼ直下では，1 隻目で 1.5～2.0 m 前後の顕著な堆積を示すものの，2 隻目からは堆積厚が減少する。すなわち，1 隻目である程度円錐状に堆積した後は，土砂は周辺の低い地盤へ流れ出る傾向が強くなる。

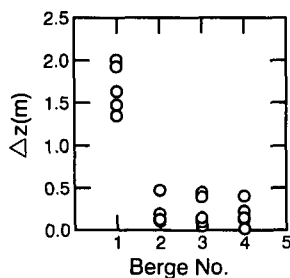


図-2 土砂投入後の堆積厚の変化

4. 土砂投入時の SS 発生状況

前報でも示したように，鉛直管近傍では，土砂投入中に表層，中層で SS が増加するようなことはない。そこで，底層での SS 負荷の発生状況について，詳しく検討する。

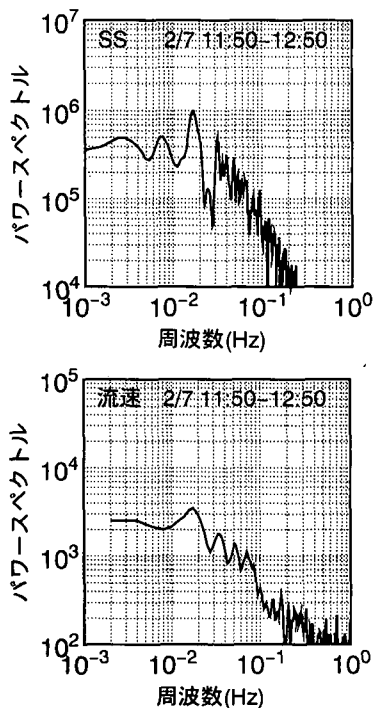


図-3 底層の SS，流速のパワースペクトル

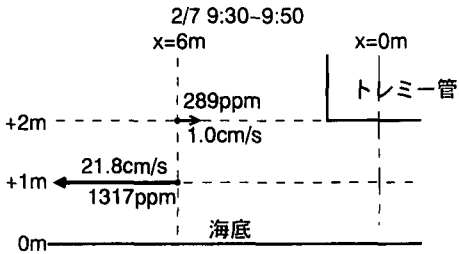


図-4 土砂投入中の底層のSS、流速の分布

底層付近のSSは、1隻あたりの投入完了までの間、バケットによる投入後急激に上昇し、直ちに低下するといった挙動を繰り返す。図-3は、 $x=6\text{m}$ 地点の海底上1mにおけるSSと流速のパワースペクトルを示したものである。動揺しやすい係留系で計測したにもかかわらず、それぞれのピーク周波数は、0.0171, 0.0176 Hzとなり(周期約1分弱)、土砂の投入間隔と一致している。このように、トレー管近傍の底層では、土砂の投入間隔にあわせ周囲へのSS負荷と流れが規則的に発生していることがわかる。

次に、この周囲へのSS負荷と流れの厚さについて検討する。図-4は、 $x=6\text{m}$ 地点の海底上1m, 2mにおけるSS、流速の平均値の典型的な例を示したものである。土砂投入中、海底上1mでは、管中心から周囲へ向かう大きな流れとSSの増大が生じるのに対し、海底上2mではわずかではあるが管中心方向への流れが見られ、SS

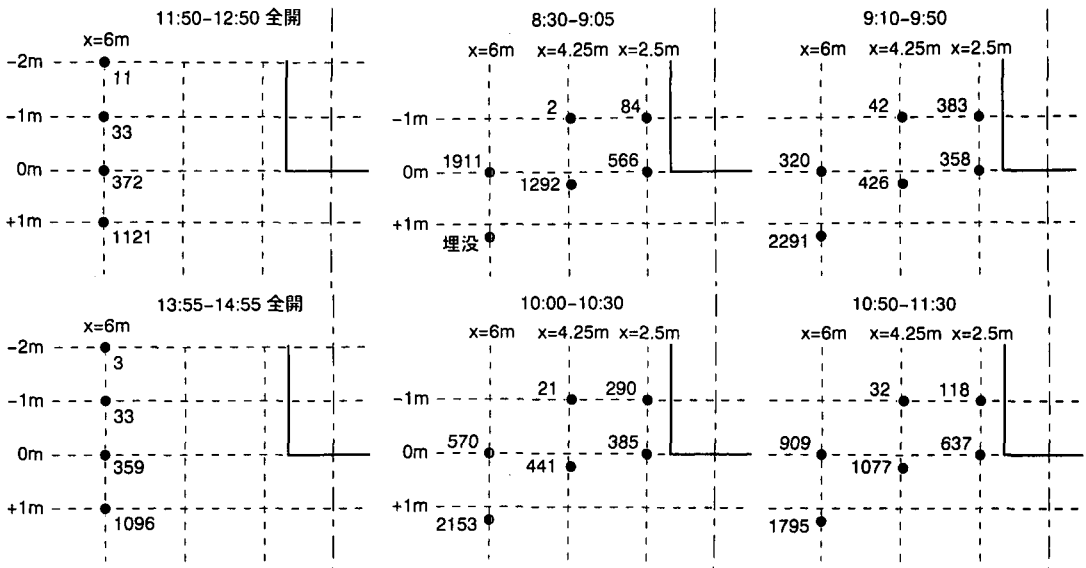
も小さくなっていることがわかる。また、他の時刻の分布から、海底上1mについては、常に上述の流れが見られることが確認されている。しかしながら、海底上2mでは、周囲へ拡がる流れはないものの、管中心へ向かうような流れが常に生じているとは限らなかった。これらのことから、土砂投入直後に周囲へ拡がる顕著な流れは、たかだか海底上1m程度であると推測される。また、海底上2mの位置のSSは、こうした水平方向の強い流れに伴う連行による混合や衝突時の巻き上がりによるものと考えられる。

そこで、底層付近のSSの分布について検討する。図-5(a), (b)は、それぞれ第1回、第2回調査時における投入1隻あたりの底層SS平均値の断面分布を示したものである。10³オーダーの高いSSは、海底直上(+1m)に限定されており、上述の流況と良く対応している。また、上方に移るにつれSSが低下し、その割合は概ね1オーダー/m程度となっている。特に、鉛直管中心より4.25m以上、鉛直管下端より上方へ1m以上離れたと、SSは数ppmから数十ppmまで減少する。

5. 土砂投入時のSS拡散状況

今回の調査では、船上で確保できる鉛直管中心からの最大距離地点は浚渫船艦側であり、その距離は投入中心点から50mとなった。この点において、周辺への拡散状況を把握するために、SSの鉛直分布と流況を調べた。

図-6(a), (b)は、それぞれ上げ潮、下げ潮時のSSの



(a)1997/2/7

(b)1997/8/22

図-5 底層付近のSSの断面分布

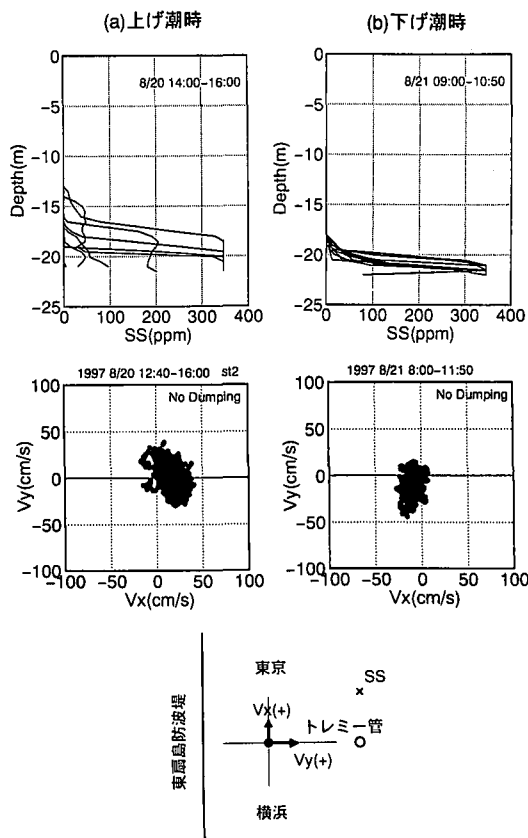


図-6 流況とSSの関係

鉛直分布と土砂未投入時の底層流動ベクトル散布図を示したものである。トレミー管からの移流に対し、 $V_x > 0$ が順流、 $V_x < 0$ が逆流として作用する。8月20日の上げ潮時には、平均20 cm/s程度の潮流が順流として作用し、投入後すぐにSSが移動する。また、底層流速が大きいため、鉛直上方への拡散も見られる。一方、8月21日の下げ潮時には、逆流となると同時に潮流も小さくなっており、鉛直拡散はほとんど生じていない。

6. 二重式鉛直管のSS低減効果

前章までの結果から、二重式鉛直管によるSS低減効果として、少なくとも以下のことが指摘できる。すなわち、鉛直管としたことにより、土砂投入時における投入地点での汚濁発生を底層に限定するとともに、二重式としたことによって管継ぎ目からのSS流出を抑制している点である。ここでは、二重式鉛直管を用いたもう1つのねらいでもある管内での循環効果について考察する。

(1) エア供給時の循環

二重式鉛直管の外側で行った計測の結果からは、エア供給の有無の差を確認することができなかった。そこで、前報でも示した鉛直管内部の計測結果を改めて引

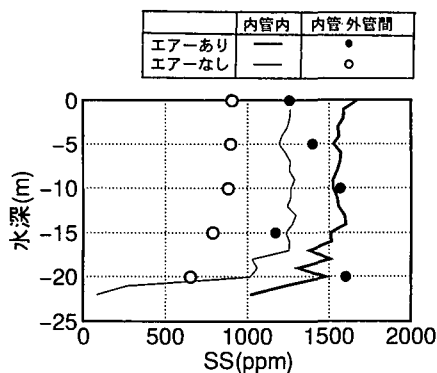


図-7 二重式鉛直管内のSS分布

用し検討する。

内管・外管間に室内計測用の電磁流速計を吊り下げ、水面下13 mにおける鉛直流速を測定したところ、エアを供給していない場合には、鉛直流速はゼロであった。すなわち、内管水面付近に存在する開口部と下部の開口部付近での局所的な水の動きはあるものの、自然循環が生じるまでには至っていないことがわかる。一方、エアを供給した場合には、概ね30~40 cm/s程度の上昇流が観測されている。こうした結果は、内管と内管・外管間を循環する流れの存在を予想させるものである。事実、図-7に示すように、エア供給時には、内管内および内管・外管間においてSSの増大が確認されている。これより、エア供給により強制循環が生じていることがわかる。なお、1隻あたり投入時の総供給空気量は約60 m³であり、これにより二重式鉛直管内部全体で約400 ppmのSS増加となっている。

(2) 循環による鉛直管外部へのSS低減効果

循環の効果を把握するために、二重式鉛直管下端で発生するSS負荷について考察する。簡単のため、図-8に示すように、二重式鉛直管のキャンパスシート内およびその下方(領域1)でのSS、外管下方(領域1、2の境界)での流速、鉛直管周辺(領域2)でのSSをそれぞれ次式で定義する。

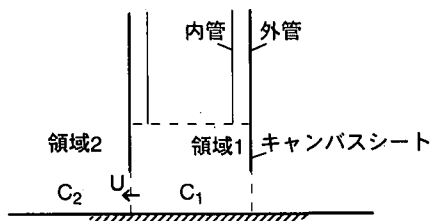


図-8 二重式鉛直管下方および周辺でのSS、流速の定義

表-2 二重式鉛直管で卓越するSS負荷

	土砂投入合間	土砂投入時
移流 CU	$C_0 \cdot U_0$	$C' \cdot U' (\gg C_0 \cdot U' + C' \cdot U_0)$
拡散 $-k \frac{\Delta C}{\Delta x}$	$-k \frac{\Delta C_0}{\Delta s}$	$(\ll C' \cdot U')$

$$C_1 = (C_0)_1 + C'$$

$$U = U_0 + U'$$

$$C_2 = (C_0)_2 + C'_2$$

ここに、 C : SS濃度、 C_0 : 土砂投入合間のSS濃度、 C' : 土砂投入時における C_0 からのSS濃度の変化分、 U : 水平流速、 U_0 : 潮流などによる土砂投入合間の場の水平流速、 U' : 土砂投入時における U_0 からの水平流速の変化分であり、添字1, 2はそれぞれの領域を示す。これらの関係を用い、さらに2つの領域間のSS水平勾配、拡散係数を便宜的に $\Delta C/\Delta x$, k で表すことにすれば、二重式鉛直管で卓越するSS負荷は表-2のようになり、SS低減機構は以下のように整理される。

① 土砂投入時は移流 $C' \cdot U'$ が卓越し、この場合にはSS負荷を低減することは難しい。

② しかしながら、土砂投入の合間においては、キャンパスシート内およびその下方に存在するSSを管内に吸い込み循環させることによって、 C_0 および $\Delta C_0/\Delta x$ を小さくしているものと考えられる。その結果、土砂投入合間の移流成分 $C_0 \cdot U_0$ および拡散成分 $k\Delta C_0/\Delta x$ を低減しているものと推測される。

7. おわりに

二重式鉛直管を用いた土砂投入においては、土砂投入直後に海底上を周囲へ広がるフラックスが汚濁発生の主要因となっている。しかしながら、鉛直管を用いたことで高濃度のSSが観測される領域は底層付近に限定され、さらに二重式とすることで管近傍の表層、中層へのSSの流出が抑制されている。また、今回の投入形態では、投入直後の周囲への移流を低減することは難しいが、エア供給時の管内部の循環により鉛直管下端付近のSSが低減されているものと推測される。これより、投入合間における周辺への移流拡散を多少なりとも抑える効果があるものと考えられる。

なお、施工条件、土砂投入方法、土砂量、土砂性状などのさまざまな条件に対し、必ずしも最適な二重式鉛直管の構造や空気量が把握できているわけではない。今後は、こうした課題についても検討していく必要がある。最後に、本研究の実施に際し、現地観測の機会を与えていただき、また観測結果の検討にあたり有益な助言をいただいた運輸省第二港湾建設局京浜港湾建設事務所の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 鶴谷広一・村上和男・中川康之・安井章雄 (1997): 汚濁防止膜周辺の土砂拡散機構に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1146-1150.
- 奥村研一・手塚 哲・高木幸夫・五明美智男・飯田 勲・矢内栄二 (1997): 二重式トレミー管を用いた土砂投入, 海洋開発論文集, 第13巻, pp. 375-379.