

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

五 明 美 智 男*

1. はじめに

港湾工事, 特に土砂を扱う埋立・浚渫・浅場造成などでは, 自然環境への配慮から工事に伴う汚濁発生を極力小さくすることが要求されている。そのため, 著者らは, 汚濁発生源での負荷を低減する一方策として土砂投入工事に二重式鉛直管を適用するとともに (奥村ら, 1997), その汚濁拡散・低減機構について検討してきている (五明ら, 1998, 以下前報とする)。

二重式鉛直管は, 静水面付近にスリット式の開口部を有する鉛直管 (内管) の周囲に, 管径・管長ともに内管よりも大きな鉛直管 (外管) を配置した構造である。前報の結果をふまれば, その汚濁低減機能は以下のように考えられる。すなわち, ①二重式にすることによって内管継ぎ目から流出する汚濁の拡散を抑制し, 投入地点での汚濁発生を底層に限定する, ②「土砂投入時に生じる内管内水位低下と開口部から内管内への水の流入によって発生する内管・外管間の自然循環」または「外管内にエアレーションを装着することによって誘起される強制循環」によって, 管内への浮遊土砂の貯留を促し管下端から外部への飛散を低減する, ことである。前者が構造上保証される機能であるのに対し, 後者の機能を満足させるためには, 外管内の上昇流を大きくかつ内管内の落下速度を小さくする必要がある。しかしながら, 前報で強制循環について検討したものの, 自然循環の支配要因など二重式鉛直管内の水循環機構については不明な点が少ない。

そこで, 本研究では, 管内水位, 外管内鉛直流速, 土砂塊の落下時間に着目し, 理論, 水理実験, 現地観測によって, 二重式鉛直管内における水循環機構ならびに循環形成のための適正な設計・運転条件について検討する。

2. 水理実験概要

後述する実工事で使用した二重式鉛直管の 1/25 相当の縮尺模型を用いて水循環機構の検証のための実験を

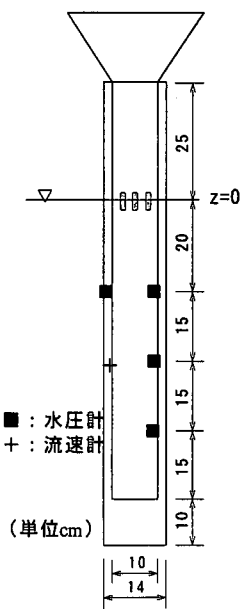


表-1 実験条件

土砂密度: 1.4~2.0 g/cm ³
投入土砂形状: 円柱
投入土砂量: 402 cm ³
土砂塊閉塞率: 0.64
土砂投入間隔: 単発, 3, 6 秒間隔
静水面: z=0 cm
開口部諸元: 4 cm×2 cm
開口部中央深度: z=-10~2 cm
開口部個数: 8

図-1 実験模型

行った。図-1 に示すように, 静水面を $z=0$, 鉛直上向きを正とし, 内管・外管の径は深度によらず均一とした。また, 落下させる土砂の閉塞率算定と繰り返し実験の便宜を図るため, ビニル製の円柱容器に浚渫土, 碎石等を詰めて投入し, 土砂塊による閉塞率を土砂塊断面積/内管断面積として算出した。なお, 開口部深度の影響を調べる実験では, 管の没水長を変えて実験を行うとともに, 比較のための単式鉛直管の実験については内管を用いて実施した。

測定項目は管内水位, 鉛直流速, 落下時間であり, 水位については管壁に水圧計を取り付け, 流速については外管内に設置した電磁流速計で計測した。表-1 に実験条件をまとめて示す。

3. 単式鉛直管

最初に, 二重式鉛直管との比較および考察の基礎とするために, 単式鉛直管について検討する。

(1) 理論的考察

管内を土砂塊が比較的高い閉塞率で落下する場合, 管

* 正会員 水修 東亜建設工業株式会社技術研究所

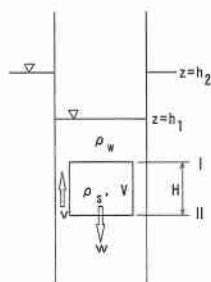


図-2 単式鉛直管内
落下モデル



写真-1 単式鉛直管内での
水位低下状況

内水位の低下に伴い、土砂塊と管壁の間では土砂塊上面と下面の水圧差によって上方への水流が発生する(図-2)。こうした現象に対して、土砂塊上面(I)、下面(II)の水圧がそれぞれ管内水位、管外部水位による静水圧に等しく、土砂塊および水流には相対速度の二乗に比例する摩擦抵抗が働くものと仮定し、以下に示すような土砂塊、隙間水の運動方程式および管内水面の上下動と運動する水の連続式を構成した。

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s(1 + C_M)}g - \frac{fs}{2V} \frac{\rho_w}{\rho_s(1 + C_M)}(w - v)|w - v| \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{A_1 - A}{V_1 - V}g(h_1 - h_2 + H) - \frac{fs}{2(V_1 - V)}(v - w)|v - w| - \frac{fs}{2(V_1 - V)}v|v| \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{A}{A_1}w + \frac{A_1 - A}{A_1}v \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 w : 土砂塊沈降速度、 v : 間隙水流速度、 ρ_s : 土砂塊の密度、 ρ_w : 水の密度、 s : 土砂塊の側面積 ($=\pi dH$)、 s_1 : 土砂塊厚さ相当部分の鉛直管側面積、 A : 土砂塊底面積、 A_1 : 鉛直管断面積、 V : 土砂塊体積、 V_1 : 間隙体積、 d , d_1 : 土砂塊、鉛直管の内径、 h_1 : 鉛直管内水位、 h_2 : 鉛直管外部水位、 f : 摩擦係数、 C_M : 付加質量係数であり、流速、水位は上向きを正としている。上述の支配方程式群を差分化し適当な初期値を与えて解くことにより、土砂塊挙動および管内水位の数値解を得ることができる。

数値計算による感度分析の結果、管内水位、落下時間、落下状況について以下のことが明らかとなった。①閉塞率、土砂塊密度、投入速度が大きいかほどおよび投入量が多いほど、土砂塊投入直後の管内水位低下量が大きくなる、②閉塞率が大きいほど、土砂塊密度が小さいほどおよび投入量が少ないほど、平均落下速度が小さくなり、

一定長の管内を通過するのに要する時間が増加する、③落下速度が小さい場合、土砂塊は上下の脈動を繰り返しながら落下する。

(2) 水理実験による土砂塊の落下状況

土砂塊の投入直後には管内で水位低下が生じ、その後水面は振動する(写真-1)。この後の土砂塊の落下状況、水位変動の時間変化は、土砂塊の密度と開口部の有無によって異なった傾向を示す。

図-3は、開口部の有無による管内水位変動、土砂塊落下距離の時間変化の一例を示したものであり、開口部中央深度を $z=0$ に設定した場合である。開口部がない場合、投入直後に大きな水位低下が生じるとともに、その後の水位変動は土砂塊の運動と連動する。この時、土砂塊は、管内水位変動の谷となる時刻で一旦停止し、上下の脈動を繰り返しながら落下する。一方、開口部がある場合には、土砂塊落下によって水位が低下しても速やか

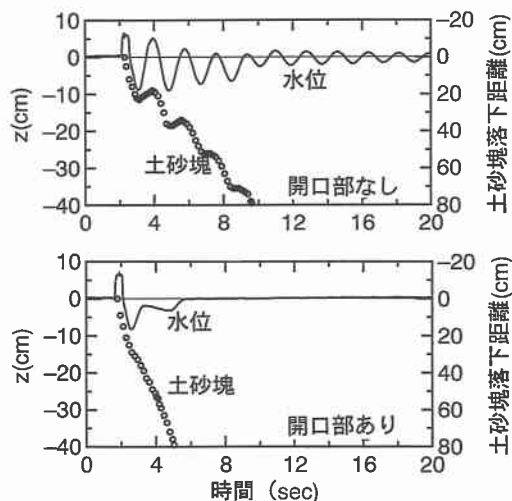


図-3 単式鉛直管内の水位および土砂塊落下距離の経時変化 (上: 密度 1.42 g/cm^3 , 下: 密度 1.44 g/cm^3)

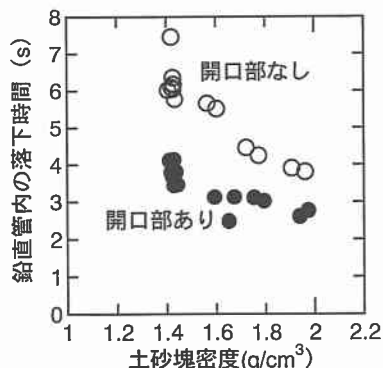


図-4 土砂塊密度と単式鉛直管内落下時間の関係

に周囲の水が供給されるため、管内外の水位はすぐに平衡状態に至り水面振動および砂塊の脈動は持続しない。そのため、図-4の土砂塊密度と落下時間(投入後外管下端を通過するまでの所要時間)の関係に示すように、開口部がある場合には土砂塊の落下時間も短くなる。

4. 二重式鉛直管

開口部のない単式鉛直管では、管内の水位低下と水位変動によって、土砂塊を脈動させながらゆっくりと落下させることができるが、閉塞の可能性があるために大量の土砂を投入することはできない。一方、開口部を設けた場合には、外部からの水の流入によって閉塞を回避することはできるものの、水の流出時に汚濁が流出する、落下速度が増大するなどの問題が生じる。二重式鉛直管は、開口部のある単式鉛直管を内管とし外管で囲むことにより、こうした問題を解決するとともに管内循環の誘起を図るものである。

(1) 単発投入時の土砂塊の落下状況

二重式鉛直管の場合においても、写真-2に示すように、土砂塊の投入直後に内管内で水位低下が生じる。この後、条件によって、開口部のない単式鉛直管と同様の水位変動が継続し土砂塊は脈動しながら落下するようになる。

こうした土砂落下状況の典型例として、図-5は密度 1.45 g/cm^3 の土砂塊を開口部中央深度 $0, -4 \text{ cm}$ の条件で単発投入した際の内管内・外管内水位および外管内鉛直流速の経時系列を示したものである。この時の管内通過時間はそれぞれ約 $5.6, 2.6 \text{ 秒}$ であり、どちらの場合も内管内での水位低下が生じている。しかしながら、管内での循環状況は開口部の深度によって大きく異なり、 -4 cm の条件では外管内で顕著な上昇流が発生しているのに対し、 0 cm の場合には上昇流は見られない。

(2) 外管内の上昇流の支配要因

上述のように、開口部深度によって鉛直流速が異なった傾向を示すことから、ここでは上昇流の支配要因について検討する。

図-6は、ある時刻における内管開口部付近での諸量を定義したものである。ここで、内管内、外管内水位を h_1, h_2 、静水面、開口部上端深度、下端深度をそれぞれ $z=0, z_U, z_L$ 、開口部高さ $H (=z_U - z_L)$ とする。流入状況は、内管内、外管内の水位と開口部深度との関係によって表-2のように整理されることから、外管内の上昇流を増大かつ継続させるためには、内管内への流入を増大させる以下の条件を同時に満足する必要がある。

① 外管水位 : $h_2 > z_2$ かつ $h_2 \rightarrow \Delta$

② 管内水位差 : $h_2 > h_1$ かつ $\Delta h = h_2 - h_1 \rightarrow \Delta$

実際には、開口部の深度との関連で外管水位を評価する

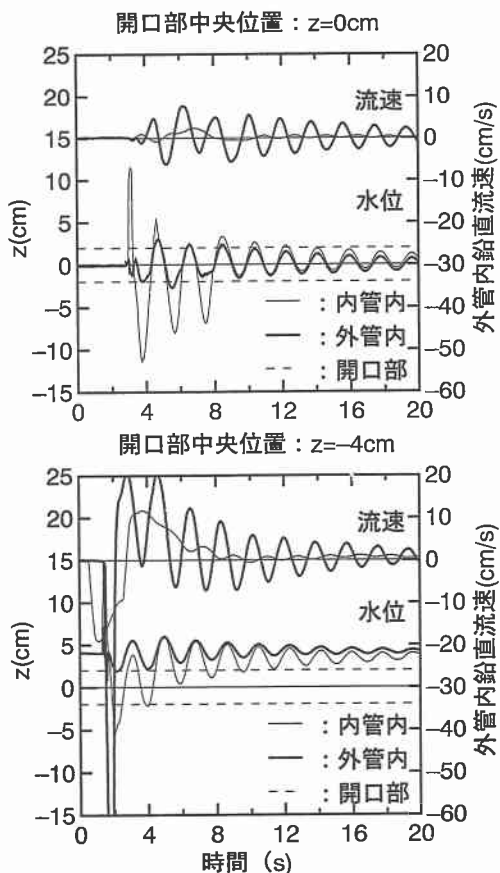


図-5 単発投入時の内管・外管内水位、外管内流速の経時変化 (密度 1.45 g/cm^3)

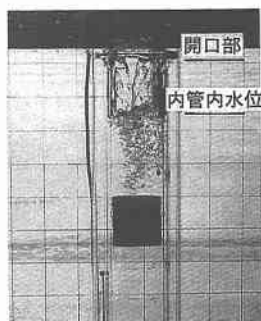


写真-2 二重式鉛直管内水位低下状況

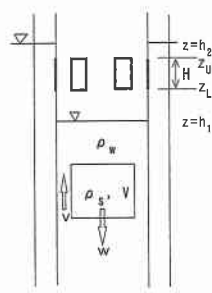
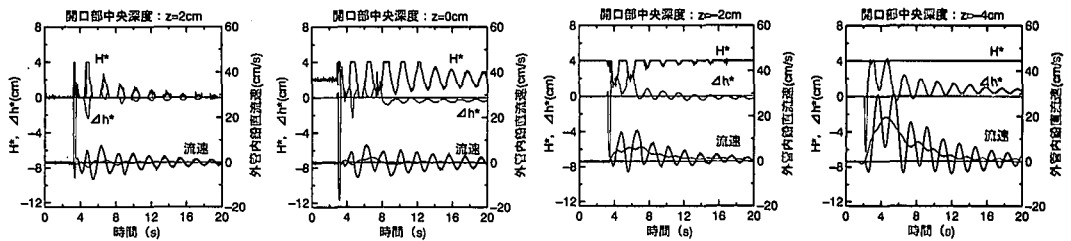


図-6 二重式鉛直管開口部における物理量

表-2 外管水位、水位差と流入状況の関係

外管内水位 h_2	水位差 $h_2 - h_1$	内管内への流入形態
$h_2 > z_L$	> 0	流入
	< 0	逆流
$h_2 < z_L$	> 0	流れ無し
	< 0	逆流または流れ無し

図-7 有効通水高さ, 有効水位差の時間変化 (密度 $1.40 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$)

必要があること, および内管および外管水位のうち一方が開口部下端深度より低下する場合を考慮し, 有効通水高さ H^* , 有効水位差 Δh^* (流入時を正とする) を次式で定義しデータの解析に用いる。ここで, $\max(a, b)$ は a, b のいずれか大きな値を示す。

$$H^* = A - z_L \quad (4)$$

$$A = \max(h_1, h_2, z_L) : h_1 \leq z_U \text{ and } h_2 \leq z_U$$

$$A = z_U : h_1 > z_U \text{ or } h_2 > z_U$$

$$h^* = \max(h_2, z_U) - \max(h_1, z_U) \quad (5)$$

式 (4), (5) において上昇流を最大とするためには, $H^* \cdot h^*$ が最大となるようにすればよい。

図-7 は, 有効通水高さ H^* , 有効水位差 Δh^* を求め時系列として示したものである。これより, 開口部中央深度が $2, 0 \text{ cm}$ にある場合, 落下中の内管内水位低下によって水位差が生じて有効通水高さが小さいために内管内への流入がほとんどなく, 上昇流が発生しづらい状況となっている。一方, 開口部中央深度が -2 cm 以下となる場合には, 有効通水高さ, 有効水位差が確保され, 顕著な上昇流が発生している。これらの結果から, 今回の実験範囲では開口部を没水させ, $H^* \cdot h^*$ を大きくすることで効率よく上昇流が発生することがわかる。

(3) 落下時間の支配要因

次に, 土砂塊の落下時間を支配する要因について検討する。

単式鉛直管の落下時間が開口部の有無によって大きく

異なるのに対応し, 二重式鉛直管の場合には開口部深度の影響を強く受ける。図-8 は, 土砂塊の密度をパラメータとして, 開口部中央深度と落下時間の関係を示したものである。二重管内の落下時間は自由落下時間の $2.5 \sim 6$ 倍程度となっており, 落下速度の低減が明らかである。しかしながら, 実験範囲での土砂塊の管内落下時間は, 密度が小さいほど長くなる傾向にある。特に, 開口部中央深度が $0, 2 \text{ cm}$ の場合の落下時間は, 図-4 で示した開口部のない単式鉛直管の場合とほぼ一致しており, 開口部の影響がなくなることがわかる。

また, どの密度の土砂塊においても開口部中央深度が $-4, -6 \text{ cm}$ にある場合に最も落下時間が短くなる。さらに, この位置より深度を下げた場合, 低密度の土砂塊では落下時間が再び長くなるのに対し, 高密度の土砂塊では落下時間はわずかに増える程度である。

(4) 連続投入時の循環状況

図-9 は, 開口部深度を 0 cm , 土砂塊を約 3 秒間隔で投入した場合の内管内, 外管内の水位変動, 外管内の鉛直流速の一例を示したものである。土砂塊投入中には内管内の平均水位が低下するとともに, 外管内に比べ最大水位低下量が大きくなり, 内管内, 外管内での水位差が維持されていることがわかる。内管上部の開口部からの内管内への水塊流入によって, 外管内には図に示すような上向きの鉛直流が発生している。このケースは, 図-7 に示した単発投入時の結果のうち上向き流速が発生しなかったものであるが, 周期的に土砂塊を投入することによって振動が励起され, 鉛直上向きの平均流が発生するようになる。しかしながら, 投入間隔を大きくするとこ

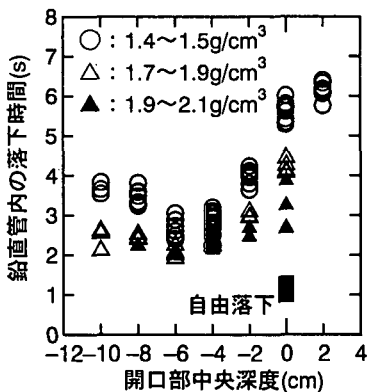
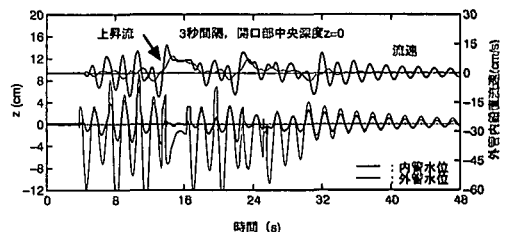


図-8 開口部深度と落下時間の関係

図-9 連続投入時の内管・外管内水位, 外管内流速の経時変化 (密度 1.45 g/cm^3)

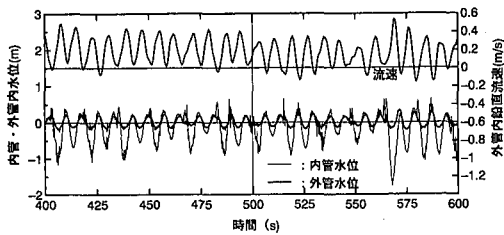


図-10 実工事における内管・外管内水位、外管内流速の経時変化

うした効果も小さくなる。

5. 現地調査

二重式鉛直管を採用している東京湾湾奥の浅場造成工事現場において、上述の水理実験と同様の調査を1999年の9月初旬に実施した。本工事の場合、土運船によって運ばれてきた土砂は、走行式の2台のバックホウ(7.5 m³)によって、二重式鉛直管上に設置されたホッパーを経由し内管内に投入される。土量1300 m³を投入するのに要する時間は約1時間、投入サイクルは約20秒/回である。

調査にあたり、内・外管内の水位測定については深度5 mの地点に水圧計を、また外管内の鉛直流速については深度3 mの地点に電磁流速計を設置して、デジタルデータレコーダーに集録した。図-10は、これらの時系列変化の一例を示したものであり、水位、流速ともに周期約8秒の規則的な変動を示し、内管内の平均水位は静水面下約0.3 m、水位最大低下量は1.0 m程度となっている。この時、外管内水位は静水位を中心とした振幅0.2 m程度の振動となり、外管内流速は平均22 cm/sの鉛直上向き流れとなる。

このように、今回の調査では、二重式鉛直管内での自然循環が確認されている。そこで、前章までの考察および現地調査結果にもとづき、自然循環の見られなかった前報の川崎港事例との循環状況の相違について考察する。表-3は、両事例の投入条件、二重式鉛直管の構造を比較したものであり、川崎港事例については以下のような状況が推測される。すなわち、①投入間隔が内管内水位変動周期の7～8倍となったため、循環を励起する外力作用間隔が長すぎたこと、②投入量が多いために管内を早く落下するため、水位変動の持続が難しかったこと、③飽和度100%を仮定した場合、土砂塊密度は1.61となり、湾奥事例に比べて高密度であったこと、④水面位置が開口部中央であったことである。これらの理由から、循環を誘起できるような水位差を維持できなかったものと思われる。これに対し、湾奥事例においては、土砂塊

表-3 2つの工事事例の施工条件、管構造の比較

項目	川崎港	湾奥
内管径(平均)(m)	1.80	2.45
外管径(平均)(m)	2.45	3.25
内管内断面積(m ²)	2.54	4.71
外管内断面積(m ²)	2.17	3.58
土砂密度(g/cm ³)	1.61	1.43
投入量(m ³)	13	7.5
投入量/内管内断面積(m)	5.11	1.59
投入間隔(秒)	60	20
開口部に対する静水面位置	開口部中央	開口部天端

の密度が小さくしかも投入間隔が水位変動周期の2～3倍であったこと、水面が開口部天端であったことから、上述の水理実験結果と同様の循環が確認されたものと考えられる。

6. 二重式鉛直管の効率的な設計・運転方法

以上より、二重式鉛直管内の循環を支配する要因として、①外管水位、②内管・外管水位差、③管内落下時間、④土砂投入間隔、⑤開口率、⑥開口部深度の6項目が考えられる。今回の実験結果から、効率よく循環を形成しかつ落下速度を抑えるためには、開口部天端が静水面と一致するかもしくは没水するように設定し、落下時間が長くなるよう低密度の土砂塊を対象とするのが望ましい。また、単発投入で循環が見られないような条件でも、管内水位変動の周期を考慮して投入間隔を設定することにより、循環を形成できる場合がある。

7. おわりに

二重式鉛直管内の水循環機構について、理論、実験、現地観測より検討した。その結果、循環を支配する要因を示すとともに、効率的に循環を発生させるための条件について明らかにした。なお、本研究の実施にあたり、現地調査の場を提供していただいた東京都ならびに東京港埠頭公社の関係者の方々に謝意を表する。また、調査の実施に際しては、東亜建設工業東京支店湾奥部浅場造成作業所の方々にお世話になった。あわせて謝意を表する次第である。

参考文献

- 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.
- 五明美智男・飯田 勲・矢内栄二(1988): 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, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1186-1190.