

鉛直管に投入された土砂の水中落下挙動と管内水振動

五明美智男*・栗原明夫**・三村信男***

汚濁防止膜が展開できないような場所での土砂投入工事において、鉛直管形式の投入方法が適用される事例が増えている。本研究では、単式および二重式の鉛直管を対象に、管内における土砂の落下形態、水位変動およびその振動特性、鉛直管下端からの土砂の流出特性、土砂の落下時間について、新たな水理実験と著者らの既往の研究成果をもとに検討した。さらに実工事における汚濁発生量調査を実施し、現地における鉛直管構造と落下形態が汚濁発生量に及ぼす影響について考察するとともに、鉛直管の設計、施工管理における留意点について整理した。

1. はじめに

汚濁防止膜の展開できない港湾区域の整備や浚渫溜地などの埋め戻し、浅場造成などでは、施工精度の確保や汚濁対策の軽減を目的とし鉛直管が用いられることが少なくない。図-1 は、鉛直管の代表的な形式として、開口部有無の違いのある単式鉛直管（以下、単管）および二重式鉛直管（以下、二重管）の模式図を示したものである。一般的に、これらの管内を落下する土砂の落下挙動やそれに伴う管内水の運動は、鉛直管の形式（単式、二重式）および鉛直管の諸元（管長・管径）、開口部構造（有無・深度・形状・開口率）、土砂の投入条件（密度・投入量・投入間隔）、土砂の落下状況（閉塞・分散）、施工条件（投入方法・水深）などに依存する。

著者らは、すでに二重管の汚濁低減効果（五明ら, 1998, 以下前々報）や管内の水循環機構（五明, 2000, 以下前報）について明らかにした。しかしながら、二重管の場合の管内での汚濁の貯留効果や管内水循環に与える投入間隔・開口部深度の影響について報告したが、鉛直管の形式の違いや土砂落下状況の影響などについては不明な点があった。

こうした背景をふまえ、本研究では、単管および二重管内を落下する土砂の挙動と管内水の振動特性、土砂流

出特性について水理実験、現地観測により明らかにし、鉛直管の設計、施工管理に寄与することを目的とする。

2. 水理実験

水理実験にあたっては、前報同様、実工事の約 1/25 の模型管内に、管上端から碎石などで比重調整したビニール製の円柱、含水比調整をした東京湾の底泥、豊浦標準砂を投入した。底泥のせん断強度は、ペーン試験により求め、土砂投入時における単管内および二重管の内管内、外管内の水位と外管内の鉛直流速などの計測と土砂落下状況のビデオ撮影を行った。なお、矩形状の開口部中央深度については、前報と同様、水面位置を調整して制御した。表-1 に実験条件をまとめて示す。

なお、閉塞率は、円柱底面積と内管断面積の比として、開口率は、開口部総面積と開口部高さ部分の内管表面積（開口部高さ×内管円周）との比で定義した。また、開口部中央の深度 z_c は、水没する場合がマイナスとなっている。

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、浚渫底泥、豊浦標準砂
投入土砂量	402~1000 cm ³
円柱閉塞率	0.64
土砂投入間隔	単発, 3, 6 秒間隔
静水面	$z=0$ cm
開口部形状(率)	4×1(25%), 4×2(50%), 4×3(75%) cm
開口部中央深度	$z_c = -10 \sim -2$ cm
開口部個数	8

3. 鉛直管形式・構造の比較

図-2 は、図-1 に示した 3 形式について、開口率 50% で静水面 $z=0$ に開口部中央を設置した場合の円柱土砂塊の落下時間を示したものである。ここで、落下時間は、土砂塊が管長に相当する距離を自由落下する時間により正規化して比較している。

概ね実験で対象とした密度範囲内では、単管に開口部を設けることで速やかに落下するようになる。ここで重要な点は、開口部を有する単管を二重管とすることに

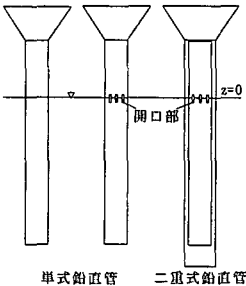


図-1 鉛直管形式・構造

* 正会員 博(工) 東亜建設工業株式会社技術研究所
** 正会員 工 修 東亜建設工業株式会社技術研究所
*** 正会員 工 博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

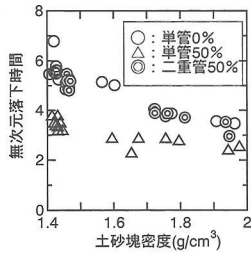


図-2 落下時間に及ぼす鉛直管形式・構造の影響

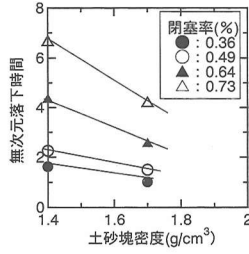


図-3 落下時間に及ぼす閉塞率の影響

よって、開口部のない単管と同程度まで落下時間が増大している点である。

図-3は、前報で示した単管内の土砂落下運動に関する数値計算法を用い、土砂の落下時間に及ぼす管内の閉塞率の影響について検討したものである。図に示すように、閉塞率の低下に伴い落下時間は増大する。実工事においては、開口部のない単管の場合、土砂投入中の管内での閉塞等が懸念されるため、単位時間あたりの投入量を考慮する必要がある。また、閉塞を防ぐために開口部を設置した場合には、開口部からの汚濁の流出対策が必要となる。二重管は、こうした管内の閉塞および水面付近の汚濁流出について、構造的な対処が施されたものである。

4. 二重管内の土砂落下挙動と管内水振動

(1) 土砂落下形態

矢内(1992)は、バージから投棄した底泥の落下拡散過程における沈降形態について、泥塊沈降型、多塊拡散型、分離拡散型の3形態に分類した。また、これらを規定する力学的パラメータとして、以下に示す無次元沈降指数を導入した。

$$E^* = \rho_0 w_{f0}^2 / \tau_{\text{mud}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ_0 ：水の密度、 w_{f0} ：底泥塊の沈降速度、 τ_{mud} ：底泥のせん断強度であり、落下する底泥塊が周囲の流体から受ける抵抗力と底泥の分離抵抗力との比を示すものである。鉛直管内を落下する土砂の場合、最大落下速度は鉛直上方のホッパー部分で投棄された後、水面に衝突する瞬間となる。そのため、投入した底泥が分離するかどうかは、まず衝突時の状態に左右される。また、海洋投棄に比べ水中の落下距離が15～20 mと小さく、また管内での脈動による落下速度の指標化が難しいことを考慮すると、鉛直管の場合には、(2)式に示すように底泥塊の沈降速度として衝突時のものを用いるのが適当と考えられる。

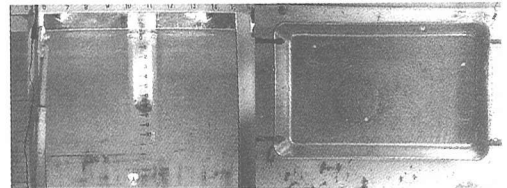
$$w_{f0} = w_{f\text{max}} = \sqrt{2gh_0} \dots\dots\dots (2)$$

ここに $w_{f\text{max}}$ ：衝突時の落下速度、 h_0 ：水面までの落下高さである。

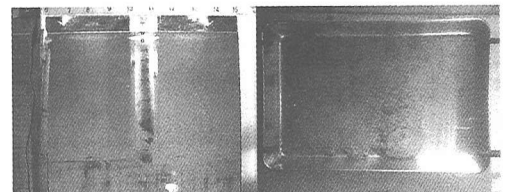
表-2は、落下高さ25 cmで浚渫土砂を開口率50%、開口部中央深度 $z_c = -2$ cmの二重管に投入した際の土砂条件、無次元沈降指数、目視観察による落下形態を示したものである。ここでは、管壁に拘束されて拡散しないなどの底開式バージとの相違も考慮した上で、土砂塊型、多塊分離型、土砂分散型として落下形態を定義した。土砂塊型は管内を塊状で落下する形態であり、含水比の小さな底泥に見られる形態である。管内断面積に対する閉塞率が大きい場合には、土砂塊は脈動しながら落下する特性を持つ。一方、土砂分散型は、砂あるいは非常に高い含水比の底泥を投入した場合に見られる形態で、管内全体に短時間のうちに拡散した後徐々に沈降する。多塊分離型は投入した底泥が分離して小さな土塊になりながら落下する形態であり、前2者の中間の性質を有する。

表-2 土砂の落下形態実験結果

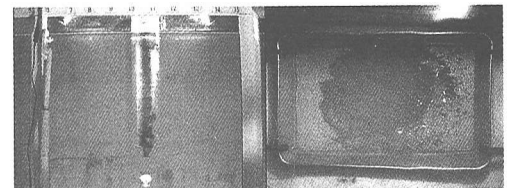
Case	含水比(%)	せん断強度(Pa)	E^*	沈降形態
1	133	298.6	16.4	土砂塊型
2	142	223.9	21.9	土砂塊型
3	158	181.3	27.0	多塊分離型
4	181	117.3	41.8	土砂分散型
5	砂	—	—	土砂分散型



(a) Case2：土砂塊型



(b) Case3：多塊分離型



(c) Case4：土砂分散型

写真-1 土砂の落下および堆積形状

さらに、写真-1は、管内の沈降状況と落下後の堆積状況を示したものである。今回の実験では、濁度等の測定は実施していないが、管内での汚濁の発生量は、土砂分散型ほど大きくなるものと推測される。

(2) 水位変動と振動

二重管へ土砂分散型および土砂塊型で土砂が投入された際に見られる管内水振動について、内管内の圧力水頭により考察する。

a) 土砂分散型

図-4は、管内水位変動の一例として、開口率50%、開口部深度 $z_c=0$ cmとした土砂分散型の内管内の水圧変化を示したものである。

管内の圧力水頭変動は、

$$p/\rho g = \bar{p}/\rho g + p'/\rho g \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表すことができる。ここに、 ρ :管内水密度、 g :重力加速度である。右辺第1項は、管内に投入された土砂による密度増加に対応して生じる平均水面低下量に相当する。ここで、投入直後の土砂は内管内のみに滞留し、管の下端での圧力水頭が外部の静水圧に等しいと仮定すれば、その最大値は

$$(\bar{p}/\rho g)_{\max} = h(1 - \rho_w/\rho) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここに、 h :水面から管下端までの長さ、 ρ_w :水の密度である。

図示した条件では $\rho=1.157$ g/cm³となることから、 $\bar{p}_{\max}/\rho g = -8.8$ cmと推定され、図中の最大値とほぼ一致する。一方、右辺第2項は、土砂投入時に誘起された

管内水圧の変動分を示すものであり、減衰振動となっている。U字管の振動周期の考え方を適用し、

$$T = 2\pi\sqrt{l/2g}, \quad l=2h \quad \dots\dots\dots (5)$$

によりその固有周期 T を推定すれば1.74 sとなり、図中に示した振動の周期1.78 sに等しいことがわかる。

b) 土砂塊型

上述の考え方は、土砂塊型の場合にも適用可能である。図-5は、開口率50%、開口部深度 $z_c=-2$ cmの内管内の水圧変化を示したものである。土砂塊は脈動しながら落下するが、管より抜け出ると同時に管内の水位変動は急激に減衰する。円柱状土塊が投入された際の管内の密度は $\rho=1.03$ g/cm³と小さく、その結果(4)式より推定される最大の平均水位低下量は $\bar{p}_{\max}/\rho g = -1.95$ cmとなり、やはり実験結果とほぼ一致している。また、図中の変動成分の振動周期も1.74 sとなり、分散型と一致している。

(3) 土砂流出

上述した(3)式の右辺第1項の微分 $d(\bar{p}/\rho g)/dt$ は、管内の密度変化する土砂の流出状況を表す。図-4(c)、5(c)は、それぞれ図-4(a)、5(a)に示した平均水頭波形より、 $d(\bar{p}/\rho g)/dt$ を算定したものである。

分散型の場合、管下端からの砂の流出は、投入直後の水位変動1周期のみ顕著で、その後は下端での脈動を繰り返しながら徐々に沈降していく。そのため、二重管の内管と外管の間の水位差が持続し、管内の循環が継続する。一方、土砂塊型の場合には、土砂塊を投入した直後に管下端からの水の流出が卓越するが、その後は分散

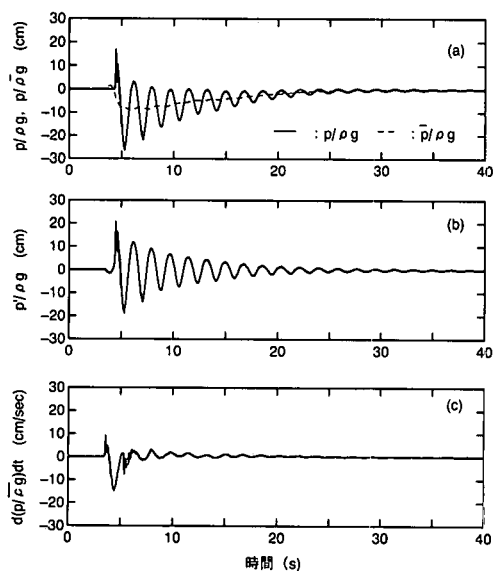


図-4 土砂分散型での圧力水頭の経時変化

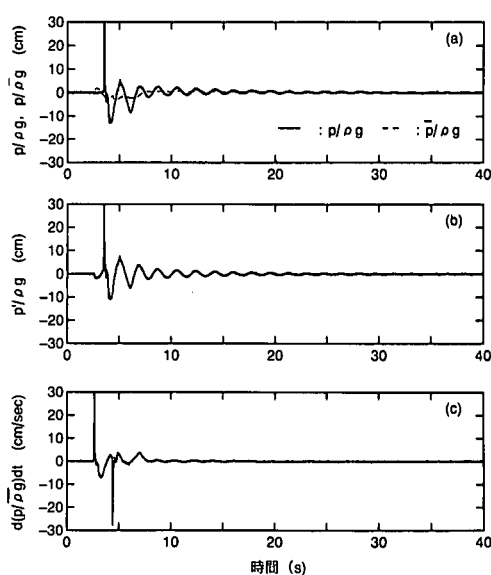


図-5 土砂塊型での圧力水頭の経時変化

型同様、管下端での脈動を繰り返す。しかしながら、こうした脈動は土砂塊が管内を落下している間のみとなり、流出後は水位差が急減し管内循環が減少する。

(4) 土砂落下時間

上述のように、土砂塊型の場合には、二重管内で循環を支配する要因として、土砂塊の脈動の継続時間すなわち落下時間が重要な要因となる。そこで、内管の開口部条件の影響について検討する。

前報で明らかにしたように、開口部深度を変化させることにより土砂塊の落下時間を操作することが可能である。図-6は、開口率50%の条件において、開口部深度を変えた場合の結果である。これより $z_c \geq -4$ cmの条件において落下時間が長くなることがわかる。

また、図-7は、 $z_c = -2$ cmに開口部を設置し、開口部幅を変えることによって開口率を0~75%に変化させた場合の落下時間を示したものである。開口部が没水する $z_c = -2$ cmでは開口率の影響はほとんど見られない。こうした傾向は開口部深度をさらに下げた場合も同様となっている。

(5) 単管との比較

単管と二重管の類似性については、開口部深度によって2つの領域に分類することができる。開口部中央が静水面より上方にある場合($z_c \geq 0$ cm)、落下形態、管内の水位変動と振動、落下時間は、単管と二重管でほぼ一致する。一方、開口部上端が静水面下に没水する場合($z_c \leq -2$ cm)には、開口部の影響によって異なった傾向となる。前報でも示したように、没水することによって二重管の開口部の有効通水高さが増え、 $z_c \leq -4$ cmのときに外管内での鉛直上方への流速が最大となる。そのため、管内落下時間は、単管に比べて顕著に短くなる。

5. 現地調査

以上述べたようなメカニズムにより実際にどのような落下形態、汚濁発生状況となるかを把握するために、東京湾湾奥の浅場造成工事において、二重管および単管の汚濁発生量の比較調査を2000年の5月25、26日に実施した。

表-3 実工事における土砂落下形態

	不攪乱条件	攪乱条件
$W=120\sim170\%$	強度 $2\sim10$ kPa	強度 $0.7\sim1.3$ kPa
E^*	$12.5\sim62.7$	$96.7\sim179$
落下形態	土砂塊型 ~土砂分離型	土砂分散型

(1) 土砂の落下形態

表-3は、投入土砂の含水比 w から、五明・三村(1992)の強度と含水比の関係を参考にしてせん断強度を推定し、ホッパー下端から水面までの高さ6.4 mを用いて無次元沈降指数を算定したものである。これより、バックホウ(7.5 m³)で投入する二重管においてはどの形態も生じると考えられるが、ベルトコンベヤーで少量づつ投入する単管の場合には、土砂分散型となっているものと推測される。

(2) 汚濁発生量

鉛直管の下方からの周囲への汚濁量フラックスを計測するために、二重管、単管それぞれ管中心から15 m, 13.3 mの地点の海底上に濁度計(海底上1, 2, 3, 4, 5 m)、流速計(海底上1, 2, 3 m)を設置し、投入中の連続観測を実施した。

図-8は、土砂投入中の海底上1 mにおける流速ベクトル散布状況を示したものである。投入前の平均流速はほぼゼロであり、図に示されるベクトルは土砂投入に伴うものとなっている。図中の▲印は、計測器の設置方位であり、ほぼ主流方向上に存在することが確認された。

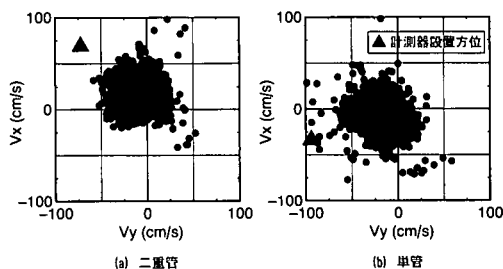


図-8 土砂投入中の流速ベクトル散布図

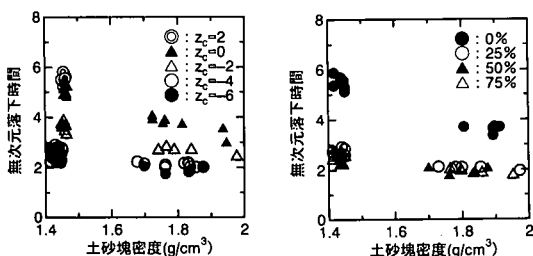


図-6 開口部深度の影響

図-7 開口率の影響

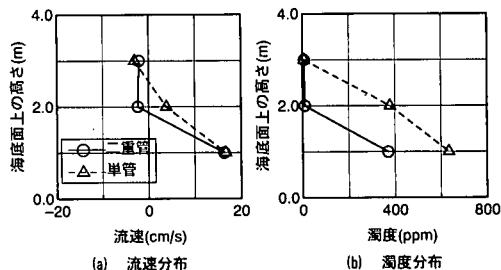


図-9 海底面上の平均流速、平均濁度分布

汚濁量は、堆積進捗に伴う影響を避けるため、投入後定常に達した後の30分間のデータを用いて算定した。図-9は、海底上の各深度における主流方向の平均流速および平均濁度を示したものである。管から周囲へ向かう流速は底層に限定され、海底上3mでは濁度もゼロとなっており、二重管、鉛直管ともに汚濁の発生位置を底層に限定する機能が明らかである。汚濁拡散量は、平均濁度と平均流速の積としてフラックスを定義して比較するが、今回の計測では管中心から観測地点までの距離が異なるため、1地点でのフラックス量で比較することは出来ない。そこで、ここでは管中心から観測位置までの距離を半径として一周分の積分をして単位時間の総フラックス量を求め、それを単位時間投入土量で割り、投入1m³当たりの汚濁発生量を概算した。

表-4は汚濁量算定の結果を示したものであるが、投入1m³当たりの汚濁量は、単管を1とすると二重管は0.28となっている。(1)で示した土砂落下形態の違いもあるが、従来の単管を二重管とすることで、さらに汚濁発生量を低減できることがわかる。

表-4 汚濁発生量算定結果

形 式	二重管	単管
土量(m ³)	1294	1318
投入時間	0:51:00	1:45:00
単位時間当たり投入量(m ³ /s)	0.423	0.209
30分間平均汚濁量(g/s)	5679	10025
投入1m ³ 当り汚濁量(kg/m ³)	13.4	48.0

6. 鉛直管の設計・施工管理

二重管の設計にあたっては、開口部がちょうど没水するような深度を基準に、施工性と汚濁対策とのバランスを考慮して決定する必要がある。その範囲は、開口部が水面上に出る場合から、開口部高の2倍程度没するまで

である。また、管内での落下時間を増大させるには、少なくとも50～60%以上の閉塞率が必要と考えられる。

次に、施工管理にあたっては、投入土砂の性状をもとに管内の落下形態を事前に把握しておく必要がある。土砂塊型の場合には、管内の固有振動周期を算定した上で投入間隔を設定することにより、汚濁低減のための管内循環がより効率的に形成されるようにすることが望ましい。

7. おわりに

管内の水循環のメカニズムについて検討した前報に続き、単式および二重式の鉛直管を対象に、管内における土砂の落下形態、水位変動およびその振動特性、鉛直管下端からの土砂の流出特性、土砂の落下時間について検討した。

鉛直管は、汚濁防止膜の展開できないような条件で、汚濁対策を図る上で有効な方法である。特に、二重管は、その構造と土砂の落下に伴う管内水理現象によって、広範囲の性状を持つ土砂の投入に際し有効な工法となるものである。

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

- 五明美智男・三村信男 (1992): 現地不撓乱底泥の強度特性について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 501-505.
- 五明美智男・飯田 勲・矢内栄二 (1998): 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. 1187-1190.
- 五明美智男 (2000): 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, 第47巻, pp. 891-895.
- 矢内栄二 (1992): 海洋投棄した底泥の分離過程, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 956-960.