

土砂投下時の汚濁拡散抑制に関する水槽実験

Water Tank Tests of Turbidity Diffusion Control with Soil Dumping

黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

戸村 豪治 GOJI TOMURA

機電部 泉 国彦 KUNIHICO IZUMI

土木営業第一部 河村 俊治 SYUNJI KAWAMURA

水力発電ダムの堆砂の処理方法として、ダム貯水池内の大水深の死水域に浚渫土を投下する方法が検討されている。投下の際の汚濁防止策を検討する目的で、二重トレミー管と新たな汚濁防止フェンスを併用したトレミー管を用いた場合について、土砂投下による汚濁の拡散状況の確認をするために大型水槽を用いた基礎的実験を実施した。試験結果から得られた汚濁の拡散状況について報告する。

キーワード：ダム貯水池、堆砂対策、汚濁拡散、水槽実験

As a disposal method of sedimentation soil of a hydraulic power dam, the dumping of dredged soil into the very deep, i.e. dead-water zone is under examination. In order to investigate the diffusion control of turbidity by depositing the soil into the large depth water with a double tube tremie and the new type tremie with turbidity control fences, the experimental studies were carried out using a large-scaled water tank. This paper shows the test results about the diffusion conditions.

Key Words: Dam Reservoir, Sedimentation Problems, Diffusion of Turbidity, Water Tank Test

1. はじめに

ダム貯水池における堆砂の処理が従来から問題となっている。特に、流域の生産土砂量が多いダムでは大量の流入土砂が貯水池に堆積し、その機能低下が懸念されている。多くのダムで維持管理のために堆砂対策が実施されているが、大別すると①貯水池への土砂の流入軽減、②貯水池内に堆積した土砂の排除という2つの方法に区分される¹⁾。前者の方法としては貯砂ダムの設置など、後者の方法としては土砂フラッシングのように堆砂を強制的に押し流す方法も試行されているが、土砂を浚渫あるいは掘削し搬出処分する方法が最も一般的に行われている。しかしながら、土砂搬出には、需要地から遠隔のため運搬コストが高い、搬出用ダンプトラックの通行に障害が多い、堆砂の再利用の用途が限られるなどの問題がある。

このため、水力発電ダムでは貯水池内で堆砂を処理する方法も検討されている。揚水発電を行う貯水池においては水面下の限られた水深のみを利用しそれ以深は死水域となるが、堆砂は水深の浅い部分に貯まる傾向があるため、この土砂を貯水池内の深部へ移動させる方法は有

効な処理方法となる。

最近では、貯水池における豪雨後の長期間の濁りが問題となるケースが出てきており、下流河川への濁りの影響を避けるため、貯水池内で堆砂処理を行う場合には濁りの発生を可能な限り抑制する必要がある。しかし、貯水池のような水域へ土砂を投下した施工事例はきわめて少ない。貯水池内への土砂流入や、流入した濁質の挙動に関する研究は幾つか行われており²⁾、また、海上など開放水域での土砂投下による濁質の挙動については研究事例があるが³⁾、貯水池内の大水深でかつ閉鎖された水域への土砂投下による濁質の拡散現象は明らかになっていない。

そこで、こうした場合の汚濁防止対策を検討するために、土砂投下による濁質の拡散状況を確認する大型水槽を用いた実験を行った。二重トレミー管を用いて土砂を投下した場合の濁質の拡散状況と、汚濁拡散を抑制するためにトレミー管と筒状の汚濁防止フェンスを組み合わせた新たな装置を用いた基礎的な実験を行ったものである。この結果、濁質の拡散状況について有効な知見が得られたのでここに報告する。

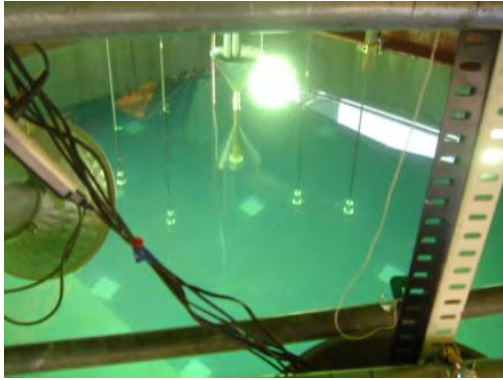


写真-1 大型水槽実験状況

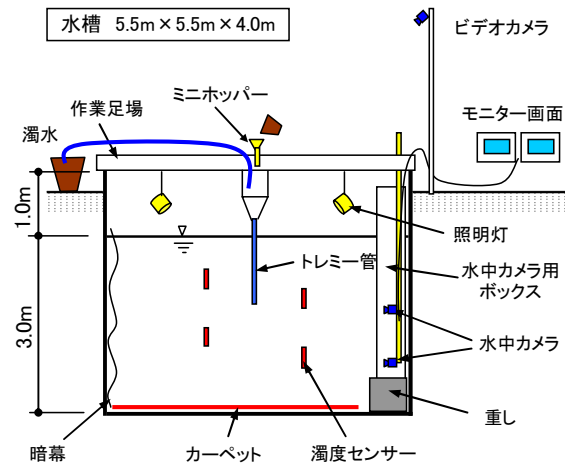


図-1 水槽実験装置概要

2. 実験概要

(1) 実験目的

想定したダム堆砂の処理方法は、土砂流入箇所において浚渫あるいは掘削した土砂をポンプ圧送にて湖上搬送し、貯水池中央付近の死水域にトレミー管を用いて投下する方法である。先に述べたように、この堆砂処理方法については貯水池内の濁りを可能な限り抑制することが重要なポイントとなる。トレミー管を用いるのは貯水池において形成される温度成層上部の高温層を避けて、下部低温層に土砂を投下する方法が濁質の拡散抑制の観点から有効と考えられるためである。

問題点としては、一般にトレミー管による土砂投下は筒先を底面近くまで近づけた状態で行うが、トレミー管の実用上の長さに限界があり、大水深の場合には筒先から底面までの間隔が大きくあいて濁り抑制効果が大幅に減少すると考えられる点である。また、大水深の場合、河川あるいは海洋工事のように汚濁防止フェンスで施工箇所全体をカバーするように設置するのは困難である。そこで、大水深に対応するものとして、トレミー管の周囲に限定して筒状汚濁防止フェンスを取り付ける新型トレミー管を考案した。

今回の実験は、通常のトレミー管を用いた場合の濁質拡散状況の確認と考案した方法の効果を検証することを目的に行ったものである。

(2) 実験装置

水槽実験には5.5m×5.5m×4.0mの大型水槽を用い、縮尺約1/12として、水深30m程度の場合を想定した実験を行った。水槽中央に架台からトレミー管を吊り下げ、土砂を3m水深（容量約91m³）の水中に投下し濁質の拡散状況を確認する実験である。図-1に装置概要を示す。

トレミー管には濁質の拡散抑制に効果があるとされる二重トレミー管⁴⁾を用いた。二重トレミー管は外筒管と

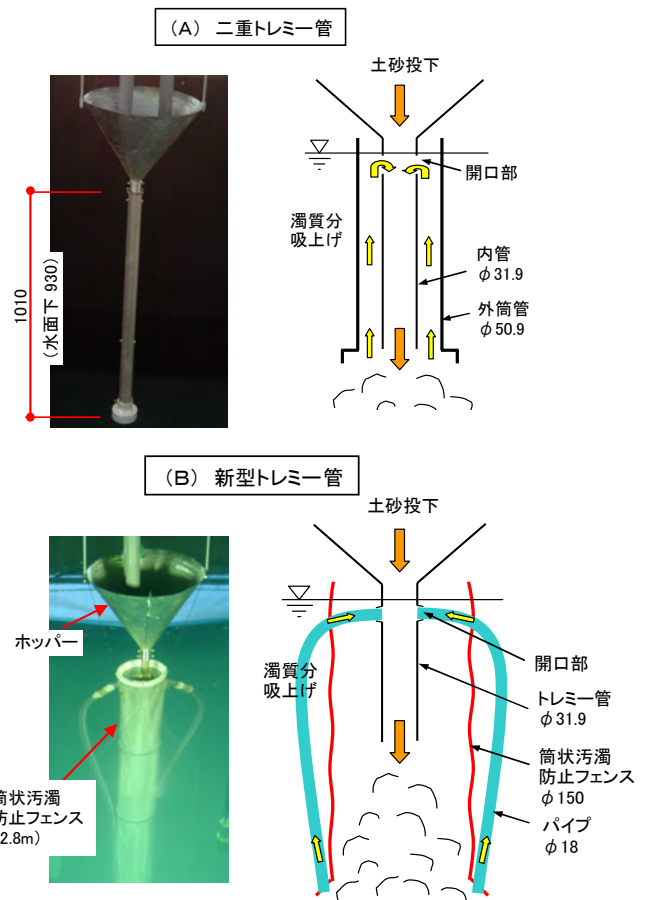


図-2 トレミー管

内管で構成され、内管上部に開口を設けた構造となっている（図-2・A右図参照）。土砂投入時に内管の上部開口部に負圧が発生し、濁質分が外筒管と内管の間から吸い上げられ、内管内に戻されることで濁質の沈降を促進し濁りの拡散を抑制する効果がある。今回の実験では1/12縮尺の模型として、外筒管φ50.9mm(t=1.7mm)、内管φ31.9mm(t=1.6mm)、長さ1,010mmの模型を製作して実験に使用した。水底からトレミー管の先端までの間隔

表-1 投入土砂の材質

種別	粒径 mm	平均粒径 mm	重量比率 %	材質
砂分	0.075~2.00	1.00	95	Aダム堆砂(ふるい分け)
濁質分	0.010以下	0.004	5	カオリン粘土

表-2 フルードの相似則による物理量

諸量		次元 (L-F-T)	比	実験
幾何量	水平	L	X_r	1/12
	鉛直	L	Hr	1/12
	面積	L^2	$H_r \cdot X_r$	1/144
	体積	L^3	$H_r \cdot X_r^2$	1/1,728
水理量	フルード数		1	1
	流速	$L \cdot T^{-1}$	$H_r^{1/2}$	1/3.5
	流量	$L^3 \cdot T^{-1}$	$X_r \cdot H_r^{3/2}$	1/499
	時間	T	$X_r \cdot H_r^{-1/2}$	1/3.5

表-3 実験ケース

No.	投入装置	投入土砂量			投入時間 (秒)
		砂分 (g)	濁質分+水 (g)		
			濁質分	添加水	
CASE-0	二重トレミー管	0	5.6	500	-
CASE-A	二重トレミー管	1,900	100	9,000	60
CASE-B	新型トレミー管	1,900	100	9,000	60

は2.07mとした。

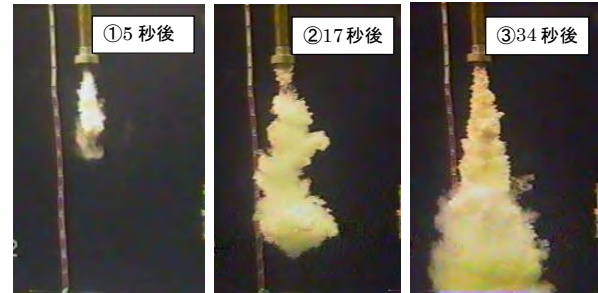
図-2に示す(B)新型トレミー管は、トレミー管の周囲に水底付近まで届く筒状の汚濁防止フェンスを取り付けたものである。実際の汚濁防止フェンスのカーテン部に用いられる合成繊維性の布地を用いて筒状のフェンスを製作し、形状保持用のリングを50cmピッチで取り付けた。直径はトレミー管径の約5倍のφ150mmとし、水底から先端までの間隔は0.2mとした。併用するトレミー管は二重トレミー管の内管(φ31.9mm)と同じ管径・長さのもので、上部に開口部を設けており、負圧が発生すれば取り付けたホース(φ18mm)から濁質分を吸い上げる機構を付加した。

(3) 投入土砂および実験ケース

本実験では土砂のポンプ圧送を想定し、加水した土砂を投下した。材料分離を避け土砂落下状態を安定させるため、土砂材料を砂分と、濁質分に水を加え攪拌混合したものに別ルートから同時に投入し、ホッパー内で混合して投下する方法を採用した。

土砂材料の砂分は、Aダムにて採取した堆砂を使用した。縮尺を考慮して粒径範囲0.075~2.0mmの砂分のみ使用、濁質分はカオリン粘土(平均粒径4μm)にて代用することとし、Aダム堆砂の既往の粒度分布データから濁質分の含有量を5%に設定した。投入土砂の材質を

CASE-0



CASE-A

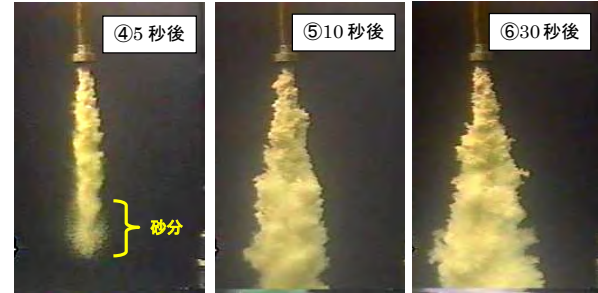


写真-2 土砂投下直後の濁質の拡散状況

表-1に示す。重力が支配的な流れの場合、模型実験はフルードの相似則に従って行われる。本実験では縮尺を1/12に設定し表-2に示す相似率から、施工時土砂投入量を300m³/hr(土砂:押水=1:9)として、投入土砂量は1/499倍、約10L/minとした。濁質沈降後の挙動を確認するため投下時間は60秒以内とし投入土砂量を少なくした。

実験ケースを表-3に示す。二重トレミー管を用いて濁質分+水のみを少量投下したCASE-0、砂分と濁質分+水を投下したCASE-A、新型トレミー管を用いて同量の砂分と濁質分+水を投下したCASE-Bの3ケースの実験を行った。

(4) 計測および記録方法

計測項目は、水温、濁度とし、濁質の拡散状況はビデオカメラによって記録した。大型水槽は天蓋にて覆い日光の影響を遮断するとともに、撮影画像の鮮明度を高めるため暗幕を水槽壁面に張り、水槽底にも一部カーペットを設置した。また、撮影用の照明として1,000Wの水銀灯4基を設置した。水中撮影は撮影用の窓を設けたφ400mmの塩ビ管を沈めて、中にビデオカメラを2台セットして行った。また、ビデオカメラは水槽の上部にも1台設置して、濁質の面的な拡散状況を撮影記録した。

濁度については濁度センサーを4台設置して連続的な計測を試みたが、撮影画像を優先して土砂投下量を制約したために、センサー位置で計測可能な濁度に達せず有効なデータは得られなかった。したがって、濁度について

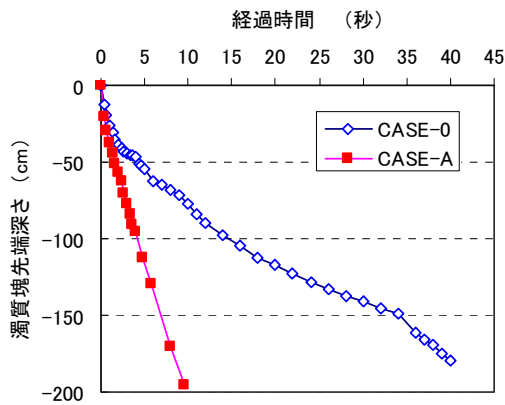


図-3 濁質塊の沈降速度 (CASE-0,A)

ては採水して計測する方法に切り替えた。

3. 実験結果および考察

(1) 土砂投下直後の濁質拡散状況

土砂投下直後の濁質塊の状況を、CASE-0 と CASE-A の結果を比較して写真-2に示す。CASE-0 の場合は濁質分+水を数秒投下したのみであるが、濁水は数分にわたって筒先から緩やかに流れ出るため初期状態のみ比較した。砂分と濁質分を投下した場合、砂分が先行して沈降(写真-2④)、濁質分は土砂および水の投下によって生じる水流とともにすぐ後に続いて沈降する。30秒程度経過すると、どちらのケースでも土砂の筒先からの噴出形状がほぼ同様の角度、約12°で安定した状態を示すようになる(写真-2③, ⑥)。

図-3に濁質塊の沈降速度を示すがCASE-0 と CASE-A で大きな差が生じている。CASE-A では、投下直後の初速度約60cm/secが1秒後には約20cm/secに低下し、その後はほぼ同じ速度で沈降する。CASE-0 の場合は初速度約30cm/secが約6cm/secに急低下した後、約2cm/secまで緩やかに低下するが、濁質塊が数回に分かれて沈降する形になっており沈降状態は安定しない。

土砂投入によって生じる水の流れは、投入水によって生じる噴流と、レイノルズ数の小さい濁質分による拡散を伴う遅い流れと、砂分による速い流れの組み合わせられた複雑な挙動を示す。実験の結果から、濁質分の沈降および拡散は土砂および水の投入によって誘起される水流に支配されており、その影響範囲から外れた部分は渦流に乗って拡散しながら緩やかに沈降すると考えられる。

(2) 水底での濁質拡散状況の比較 (CASE-A, B)

CASE-A と CASE-B について、濁質塊が水底に到達した後の拡散状況を写真-3, 4に示す。CASE-A では濁質は水底に到達すると巻き上がりながら水平方向に拡散し

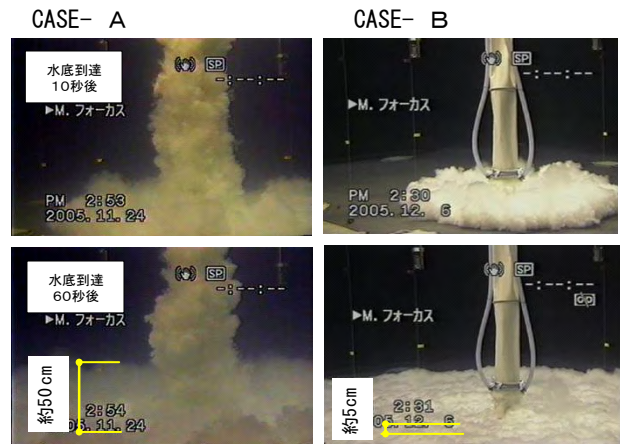


写真-3 濁質の拡散状況 (CASE-A,B)

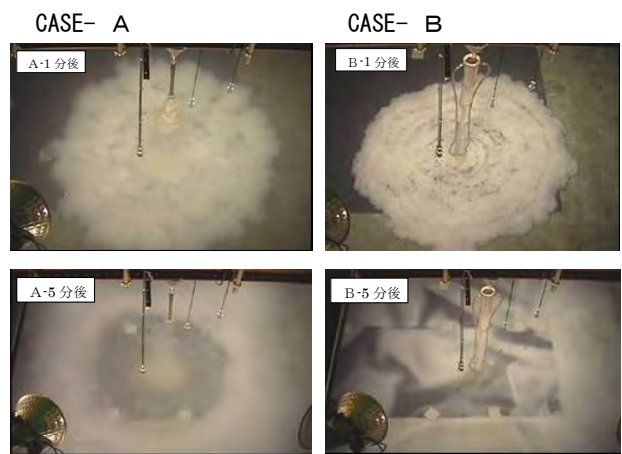


写真-4 濁質の面的な拡散状況 (CASE-A,B)

ていく。濁質塊は投下約2分後に水槽壁面に到達し、跳ね返っては中央に戻る動きを数回繰り返して約20分後には安定する。CASE-B では濁質塊は水底に到達すると同じように巻き上がりながら水平方向に拡散していくが、20秒程度の短い間に巻き上げ高さは低くなり細かな波状的な拡散を続ける。約2分後に濁質塊は壁面にあたり跳ね返ってくるが、水底に敷いたカーペット(やや凹凸がある)のへこみ部分に滞留し拡散がそこで止まっている部分もあり、数分で安定する。

水底での濁質の巻き上げ高さは、CASE-A では水底到達直後に30~40cmの高さまで達し、その後50cm程度で安定する。一方、CASE-B では水底到達直後に20cm程度の高さまで達するが、約20秒後には5cm程度まで低下してそのまま安定し、CASE-A の巻き上げ高さに比較すると約1/10程度と非常に低い状態となる。

CASE-A と CASE-B で拡散状態が大きく異なる理由としては、まず、筒状汚濁防止フェンスによって拡散が抑制されるため沈降時の濁質濃度が高いこと、水底到達時の濁質塊容積を比較すると4倍程度以上異なることが挙げられる。粒子群の沈降状態はその濃度によって変化し

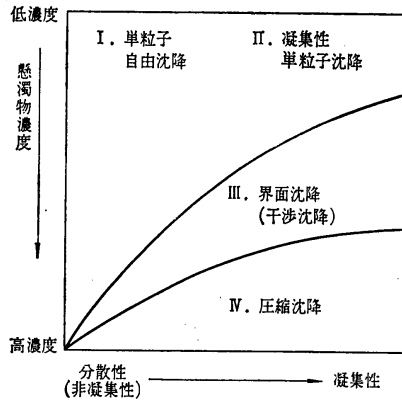


図-4 粒子群の沈降状態の変化
(水理公式集(昭和46年版)土木学会編より引用)

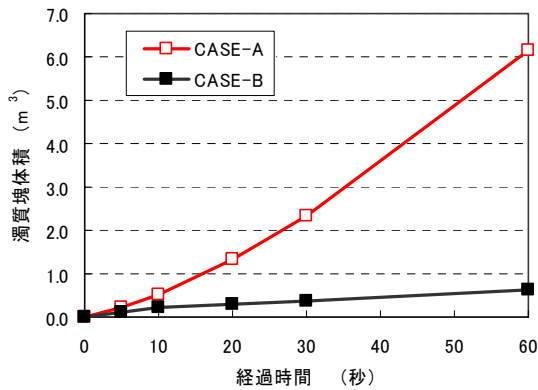


図-5 濁質塊体積の変化 (CASE-A,B)

高濃度になれば自由沈降状態から凝集性沈降、干渉沈降状態に移行する(図-4参照)。したがって、濁質分の濃度は粒子の沈降状態を大きく左右すると考えられる。

図-5は濁質塊の拡散面積(円形と仮定)と平均的な厚み(推定値)から算出した濁質塊体積の拡大状況を比較したものである。濁質塊の水底到達60秒後の体積は10倍程度の差が生じており、濁質濃度についても10倍程度異なると考えられる。

また、CASE-Bではわずかの間に濁質塊の巻き上げ高さが低下し安定した状態で拡散していく。これは、渦流の状態から整流状態に移行したと考えられ、筒状汚濁防止フェンスによって濁質の流れを安定させる整流効果のようなものが生じたと考えられる。トレミー管筒先から水底までの距離が大きく異なることも影響していると考えられる。

(3) 濁質の再浮上現象

土砂投下後水槽底に沈降した濁質は、数10分で揺動が収まりほぼ安定した状態となりしばらく変化しない。しかし、3~4時間後に濁質分の再浮上が始まり濁りが水槽全体に拡がった状態となって3日間経過した後も同じ

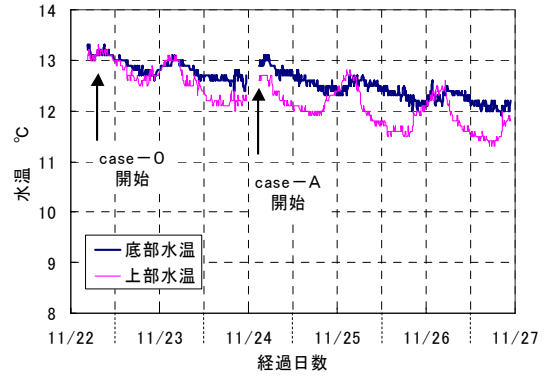


図-6 水温の変化 (CASE-0,A)



写真-5 濁質塊の再浮上 (CASE-A,B)

状態であった。この現象は少量の濁質と水のみを投下したCASE-0でも生じているので、投下土砂量などに関係なく水槽内の水の循環に伴って生じる現象と考えられる。図-6に示す水温の計測結果から、夜間に底部水温が上部水温より高くなる状態が確認されており、水槽内部で大きな熱対流現象が生じていたと推察される。

約24時間後の状況を比較したものを写真-5に示すが、再浮上後の状況はCASE-A, Bで異なる。CASE-Aの場合、透視度が1.0m程度で濁度が平均1.9度(FTU)であるのに対し、CASE-Bでは水底が目視出来る状態で透視度は3.0m以上、濁度は平均0.8度(FTU)で2倍程度の差が生じている。CASE-Bでは凝集沈降により微粒子のフロック化がより進行したものと考えられる。

4. まとめ

(1) 土砂投下時の濁質の拡散

大水深水域への土砂投下を想定し、投下時の濁りの拡

散状況を確認する大型水槽実験を行った。その結果、土砂投下に伴う濁質の拡散挙動について以下の知見が得られた。

- ①土砂投下時の水の流れは、投入水によって生じる噴流および砂分による速い流れが支配的であり、濁質分の拡散沈降はその影響を受ける。
- ②濁質の大部分はこの水流のついで水底まで到達した後水平方向に拡散する。
- ③濁質の一部は沈降の途中で主水流から逸れ、水平方向に拡がりながら緩やかに沈降する。
- ④一度沈降した濁質が水槽内の循環流のついで再浮上する現象が生じる。

今回の水槽実験は濁質の拡散状況把握のために行った約1/10の縮尺モデルの基礎的実験であるが、濁質分は相似則に則った物性ではなく大水深での拡散状況を正確に反映させた実験とはいえない。また、水流の状態は投下土砂の粒径・量、添加水量などによって異なり、濁質分の乱流拡散については距離の影響を考慮する必要があるため、解析的な検討が必要と考えられる。

今後は、今回の実験結果を踏まえ新たな水槽実験を行うとともに、実験で確認した基本的な濁質の拡散状況を基に3次元熱流体解析を行うことによって、大水深での濁質の拡散状況を把握する方向で検討を進めたい。

(2) 新型トレミー管の効果

今回の実験では、二重トレミー管を用いた場合と新たに考案した新型トレミー管による濁り拡散抑制効果についても比較検証し、新型トレミー管の濁り拡散抑制効果が非常に高いことを確認した。新型トレミー管による効果としては以下の3点が考えられる。

- ①干渉沈降効果＝筒状汚濁防止フェンスによって濁質塊の濃度が高められ、土粒子の凝集沈降あるいは干渉沈降が生じて拡散が抑止される効果
- ②整流効果＝濁質塊をフェンス内に拘束することで大きな渦の発生を抑制し一様な流れに近づける効果
- ③沈降水深短縮効果＝筒状汚濁防止フェンスを水底近くまで下げることによって濁質塊の拡散域を小さくする効果

また、濁質再浮上の状態の違いからも新型トレミー管による拡散抑制効果が確認できた。新型トレミー管には二重トレミー管と同じく、負圧による濁質分の吸い上げ装置を付加したが、負圧による吸い上げ効果はどちらのケースでも確認できなかった。ただし、筒状汚濁防止フェンスが土砂投下時に断面が縮小するという現象がみられたので、負圧は発生していたと考えられる。筒状汚濁防止フェンスは、通常の汚濁防止フェンスの使用手法と

異なり、使用範囲を大幅に狭め限定することで、濁りの抑制効果が高くなることがわかった。実際の適用にあたっては、その吊り下げ深さや、内空のサイズ、調水池内の水流により下端が流されることへの対策など、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 上阪恒雄：貯水池の土砂管理，ダム技術，No.159，pp4-23,1999
- 2) 井上素行，米山望：揚水発電所貯水池における濁質挙動の制御，土木学会論文集，No.698/ II -58，pp45-55,2002
- 3) 秋山壽一郎，応新亜，浦勝，重枝未玲：有限な水深を有する静水中に直投された微細粒子群の数値シミュレーション，土木学会論文集，No.663/ II -53，pp43-53,2000
- 4) 五明美智男，飯田勲，矢内栄二：二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45-2巻，pp1186-1190,1998