

新しい排砂技術の開発

箱石憲昭* 櫻井寿之** 泉谷隆志*** 久保康夫****

HAKOISHI Noriaki, SAKURAI Toshiyuki, IZUMIYA Takashi, KUBO Yasuo

1. はじめに

ダムは、流水を貯留して放流量を調節することにより、洪水調節、用水補給等の目的を達成するものであるが、流水とともに流下する土砂をも同時に貯留する。これにより、ダムの貯水容量が減少するとともに、ダム下流の流況は平滑化され、下流への土砂供給が減少し、程度の差はあれ、ダム下流の河床形状や河床構成材料の変化など、何らかの物理環境の変化が生じる。物理環境の変化は、生物の生息環境の変化につながりうることから、ダム下流の河川環境の保全・改善を目的として、洪水中に適切な粒径の土砂を供給することが求められるようになってきている。

また、堆砂による貯水容量の減少は、現在問題となっていないダムにおいても避けては通れない課題であり、できるだけコストのかからない堆砂対策技術の開発が求められている。

これまで、対象とする土砂量が数十万 m^3 /年以上となるような場合には、土砂フラッシング（出し平ダム、宇奈月ダム）や土砂バイパス（旭ダム、美和ダム）といった手法が開発され実用化されている。しかしながら、土砂フラッシングでは、貯水池全体の堆砂を移動させて排砂するために、貯水位を完全に低下させて河川に近い状態に戻し、土砂が動く程度に流速を高めなければならない。貯水目的とするダムでは、排砂終了後の貯水量回復ができるぐらい条件のよい河川でなければ適用は難しい。土砂バイパスにおいても、バイパス可能流量は、洪水調節による貯留、利水容量の回復、発電といった貯水池運用の影響を受ける。

このように、これまで適用されてきた土砂フラッシング・土砂バイパスは、貯水池運用条件やコスト面での制約が大きい。

そこで、土木研究所では、民間との共同研究等により、より広範囲な貯水池条件に適用可能で、ある程度の土砂の量と質（粒径）をコントロールでき、かつ貯水池の上下流水位差によるエネルギーを活用した低コストの土砂供給手法の開発を試みている。

現在開発している手法は、堆砂面上に底面を切り欠いたフレキシブル管を設置し、管の周辺にシートを展開する方法（以下、「シート排砂」という。）と、連続したサイフォンのエアバルブを切り替えて排砂に伴う堆砂面の変化に対処する方法（以下、「エアバルブ排砂」という。）である。シート排砂については、土木研究所と株式会社 IHI との共同研究によって、エアバルブ排砂は、土木研究所と八千代エンジニアリング株式会社との共同研究で開発したものである。

これらの技術開発は、水理模型実験による検討段階にあり、本稿では、シート排砂の排砂機能確認実験及びレイアウト確認実験、エアバルブ方式の排砂機能確認実験及びサイフォン切り替え実験の結果から得られた排砂特性と実用化に向けての課題を報告する。

2. シート排砂

2.1 排砂方法の概要

シート排砂は、設置、維持管理及び回収を行いやすいように、堆砂面上に排砂パイプを置いて堆砂を吸引・排出するものであり、そのイメージを図-1に示す。貯水池内のパイプは排砂中の堆砂形状の変化に追従できるような柔軟性を有するものとし、土砂を吸引するために底面を切り欠いた形状とする。

パイプを置いただけでは、排砂の進行に伴い堆砂形状が変化してパイプと堆砂面に隙間ができると、水だけを吸い込むよう

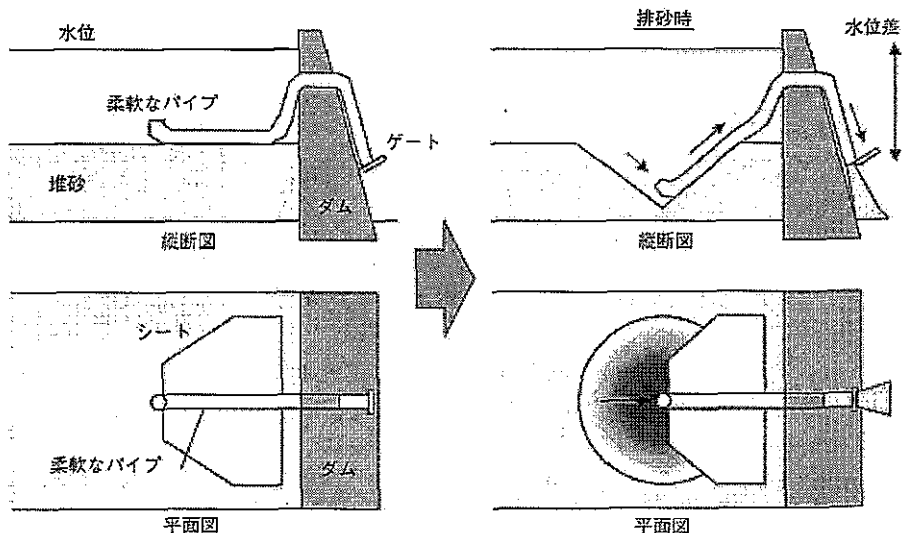
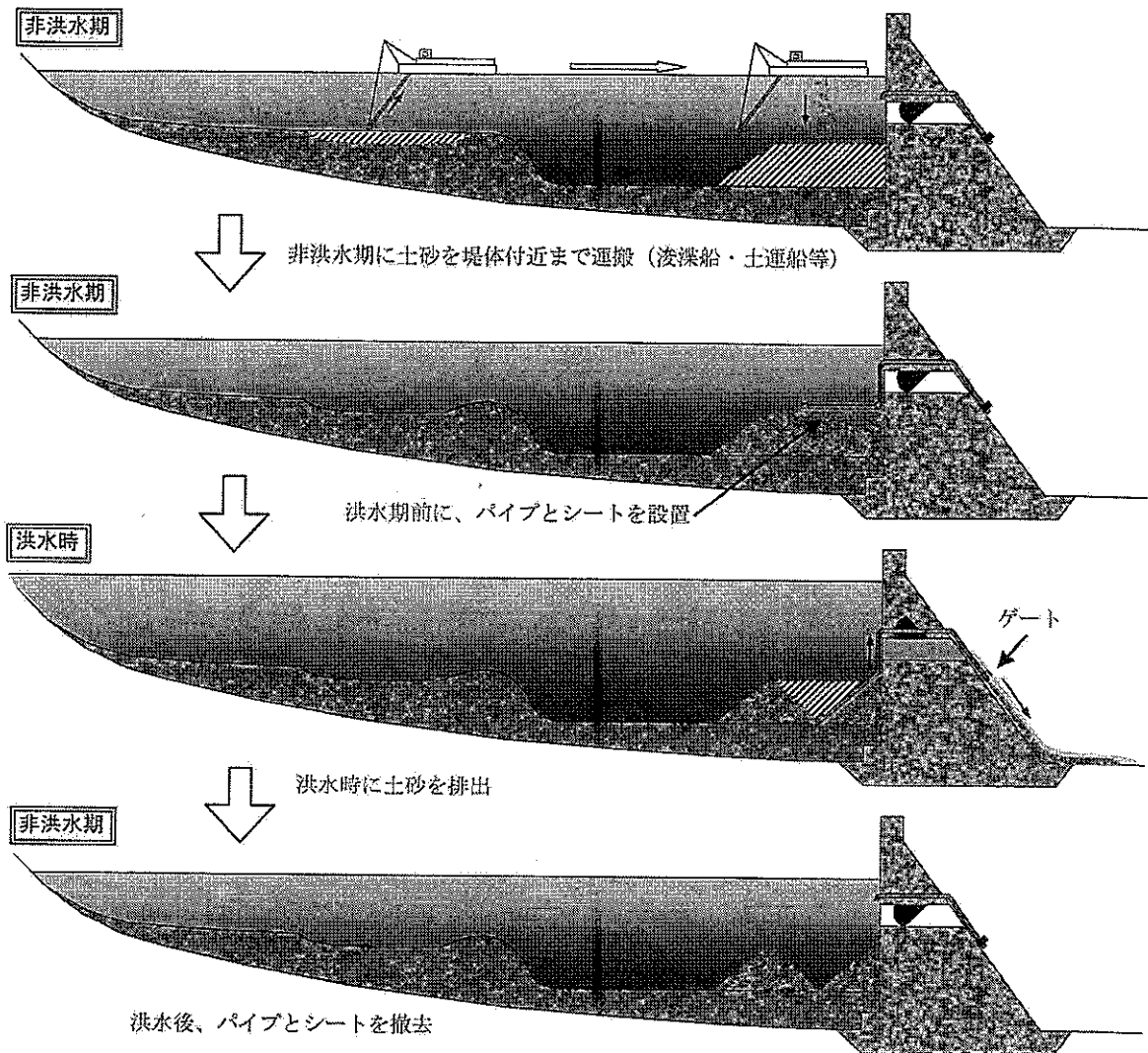


図-1 シート排砂のイメージ

* (独)土木研究所 河川ダム水理チーム 上席研究員
 ** (独)〃〃〃 主任研究員
 *** (独)〃〃〃 交流研究員 (八千代エンジニアリング(株))
 **** 元(独)〃〃〃 交流研究員 (現IHI)



図一 2 シート排砂の運用イメージ

になってしまい、土砂を吸引しなくなる。そこで、パイプに水密シートを設置し、放流時のパイプの内外水圧差を利用してシートとパイプを堆砂面に張り付けさせるとともに、水の進入を防止する構造とした。

この排砂方法では、排砂後の堆砂形状はすり鉢状になるものと想定されるが、その大きさには限界があるため、1系列の施設で大量の土砂を排出することは困難と考えられる。土砂の水中安息角を 30° と仮定すると、 1万m^3 を排砂するためには、深さ 15m 程度、半径 26m 程度のすり鉢状の円錐を形成する必要がある。しかしながら、我が国では年平均堆砂量が数万 m^3 以下の貯水池も多く存在しており、このような堆砂量が大きくない貯水池において、維持管理の容易な低コストの施設として導入されることが期待される。

シート排砂で想定している運用方法は以下のとおりである。（図一 2）

- ① 非洪水期に土砂を堤体近くまで運搬しておく。
- ② 洪水期前に、運搬した土砂の上にパイプとシートを設置する。
- ③ 出水時にパイプ下流端のゲート操作により土砂を排出する。

④ 洪水期終了後、パイプとシートは一旦回収し、メンテナンスを行う。

⑤ 以上のプロセスを毎年繰り返す。

ここで、排砂を出水時に行うのは、より自然に近い状態で下流に土砂供給を行うためである。また、複数系列の施設を配置して、粒径の異なる土砂をそれぞれの系列の場所に運搬し、各系列の排砂量を制御して混合させることにより、ある程度の排砂粒径のコントロールも可能となる。

2.2 実験方法

2.2.1 排砂機能確認実験

シート排砂の排砂特性について水理模型実験により調査を行った。実験は、図一 3に示すように、長さ 4.5m 、幅 2.5m 、高さ 1.3m の水槽に土砂を 0.8m の厚さで敷きつめ、その上に図一 4及び写真一 1に示すようなシート付きのパイプを設置して行った。パイプは土砂を吸引する区間の底面に 120° の切り欠きを設け、上流端にエルボ管を設置した。ここでは、内径 101.6mm の塩化ビニル管をパイプとして用いて排砂特性の確認実験を行った。

排砂実験は、ポンプを用いて水槽へ一定流量を給水し、水槽に設けた四角堰から越流させることにより、水位をある程度一

定に保ちながら行った。パイプの下流端に設置した調節ゲートにより、排砂装置の流量を調節することができる。

堆砂材料は、平均粒径0.3mmと平均粒径1.3mmの2種類の一樣粒径珪砂および0.1mm程度以下のシルト・粘土成分が大半を占める実際の貯水池堆砂(粘性土)を用いた。

測定項目は、流量、流砂量、圧力水頭（パイプ内）、堆砂形状である。排砂装置の流量は、水槽内水位を連続的に計測することにより、水位変化から算定した。流砂量は定期的に下流にて網で直接土砂を捕捉することにより計測し、総排砂量は沈砂池への堆積量により概略を把握した。パイプ内圧力については、パイプの上流と下流の二つの断面において、上部と側部にピエゾ管を設置して計測した。

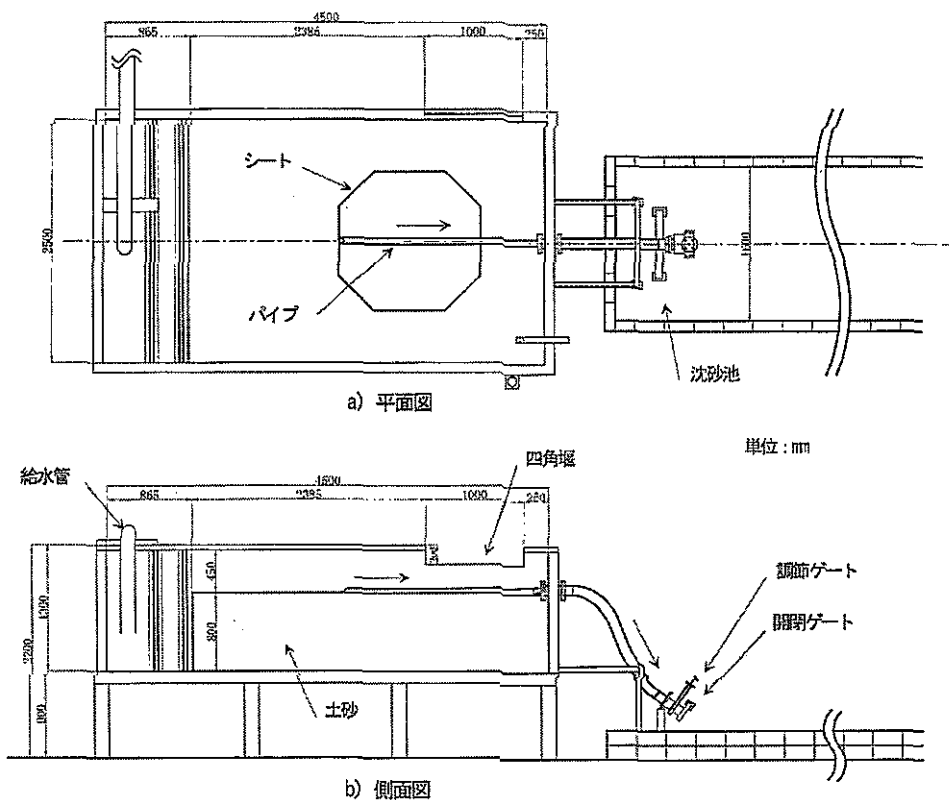
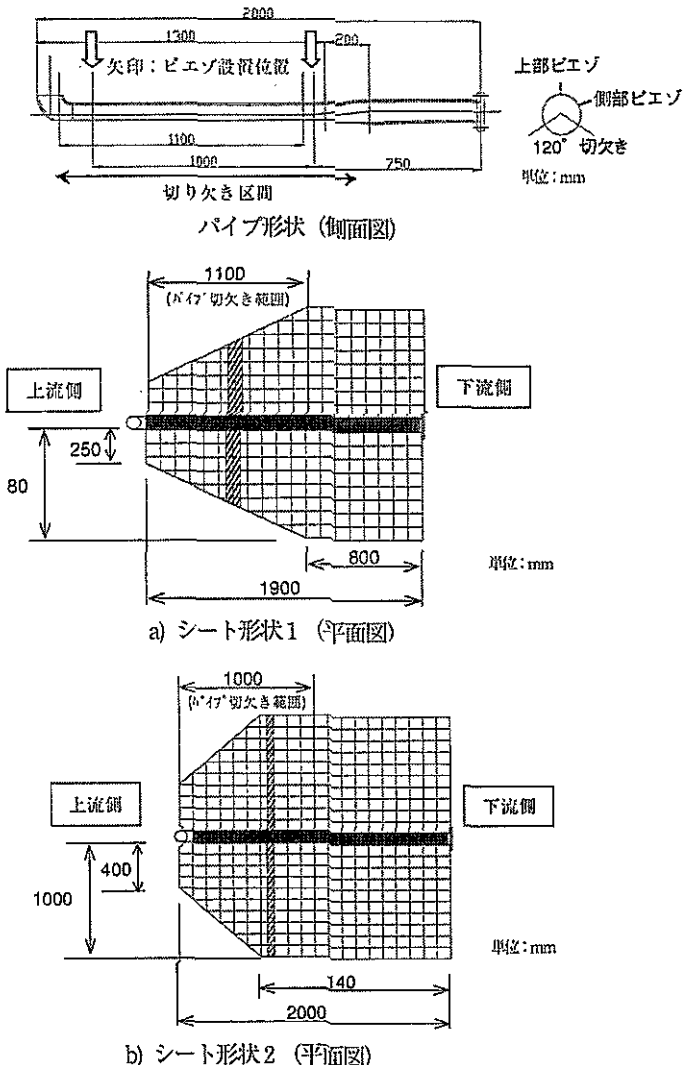


图-3 水理模型概要 (全体)



図一 4 水理模型概要 (パイプ及びシート)

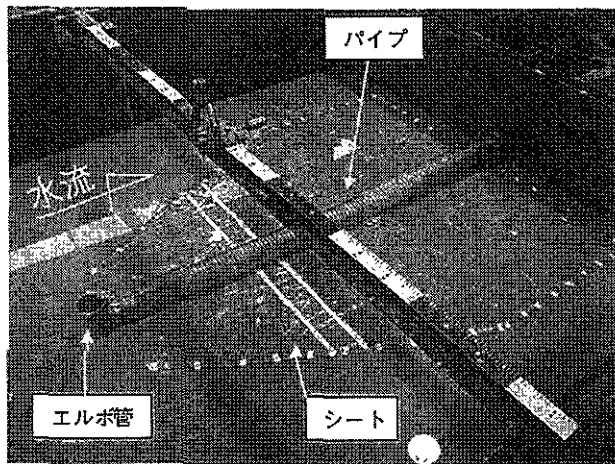


写真-1 シートとパイプの設置状況

2.2.2 レイアウト検討実験

パイプとシートのレイアウトの検討と、排砂後のすり鉢形状の深さと管径の比がさらに大きい条件での排砂特性を調査するため、排砂機能実験と同じ水槽において、内径60.5mmパイプを用いて実験を行った。堆砂材料は、平均粒径1.3mmの一樣粒径珪砂を用いた。レイアウト案としては、吸い込み口が1つの場合、2つの場合、4つの場合の3形状について排砂状況を確認した。

2.3 實驗結果

2.3.1 排砂機能確認実験

(1) 排砂後の状況

管径101.6mmの実験結果について水理量の平均値を表一に示す。実験は堆砂形状の最深部標高が初期堆砂高から概ね50cm

表-1 排砂実験結果 (管径101.6mm)

ケース	シートとパイプの形状	堆砂材料	平均流量 (L/s)	断面平均流速 (m/s) (排砂路内)	平均流砂量 (空隙無し) (L/s)	排砂時間 (min)	総排砂量 (空隙無し) (m³)
ケース A-1	形状 1	細砂	4.21	0.65	0.0266	170	0.42
ケース A-2			5.29	0.81	0.0865	45	0.31
ケース A-3			6.08	0.93	0.2628	30	0.44
ケース A-4			8.37	1.28	0.8107	7	0.34
ケース B-1	形状 2	粗砂	4.30	0.66	0.0035	150	0.03
ケース B-2			5.11	0.78	0.0158	145	0.09
ケース B-3			6.67	1.02	0.0986	30	0.23
ケース C	形状 1	粘性土	7.80	1.20	—	90	—

注：堆砂材料の砂については一様粒径の珪砂を用いており、平均粒径は細砂：0.3mm、粗砂：1.3mmである。

注：平均流量は、初期の流量増加時期を除いた計測値の平均値。

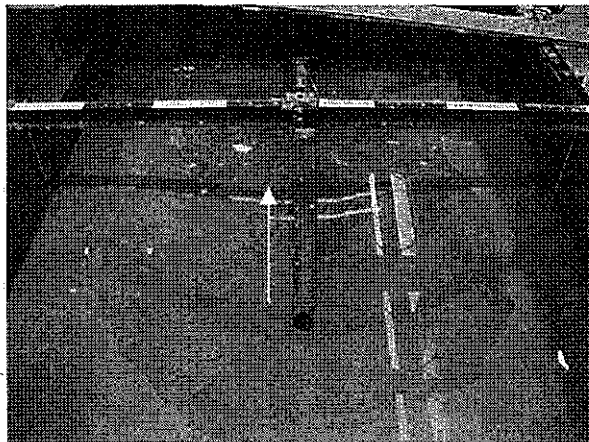
注：平均流砂量は、計測値の平均値、総排砂量は沈砂池の土砂を計測した値。

低下した時点、または堆砂形状の変化があまりみられなくなった時点で終了としている。ケースB-1、B-2については、後者の状態になり終了した。

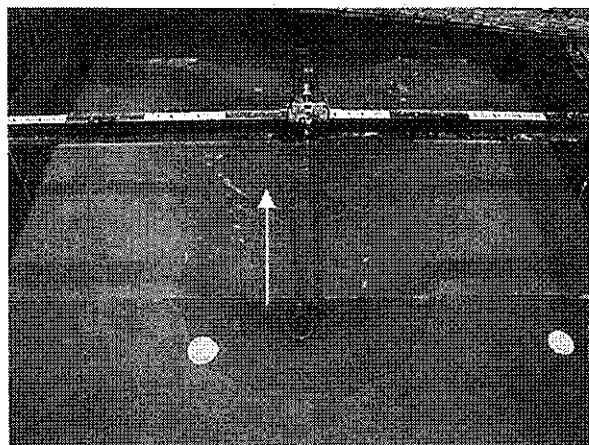
排砂状況の例として、ケースA-1とA-4の排砂後の堆砂形状を写真-2に示す。ケースA-1では、パイプ上流端を中心にすり鉢状の堆砂形状が形成されている。一方、ケースA-4では、パイプ上流端にもすり鉢形状がみられるが、パイプの切

り欠き下流端位置においてより大きなすり鉢形状が形成されており、パイプの切り欠き下流端位置周辺のシート下の土砂が吸引されている。

各ケースの排砂終了後の堆砂形状を示した図-5をみると、上述の切り欠き下流端での土砂の吸引込みは流量が大きくなるほど顕著になる傾向が認められる。この現象は、切り欠き下流端位置周辺のシート下の土砂がパイプ内の圧力低下により、パイピング現象を生じて吸引されていると考えられる。排砂後のすり鉢形状の勾配は、概ね30～37°程度であり、通常の砂の水巾安息角がそれよりやや大きめの値となった。

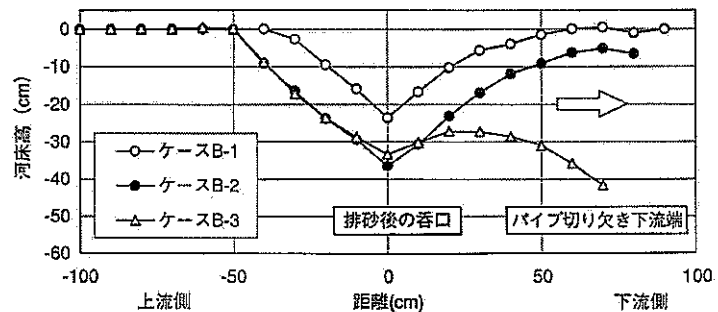
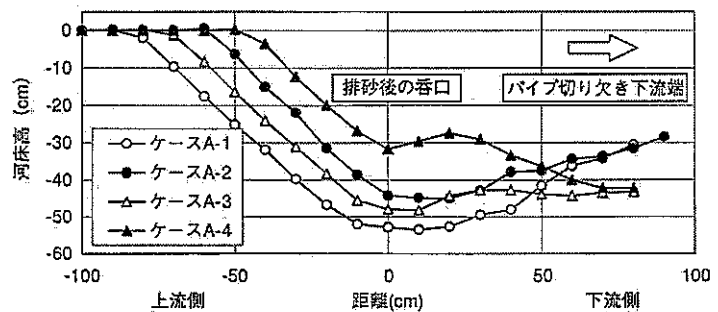


ケースA-1 (粒径, 流量421L/s)



ケースA-4 (粒径0.3mm, 流量837L/s)

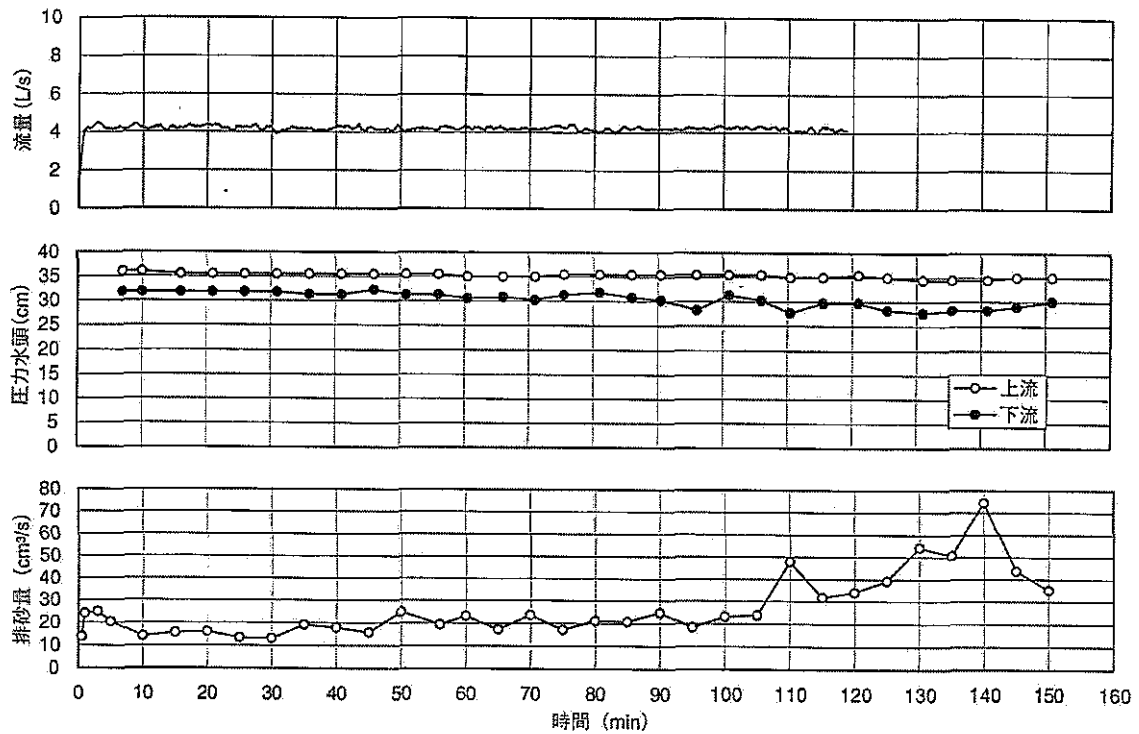
写真-2 排砂後の堆砂形状



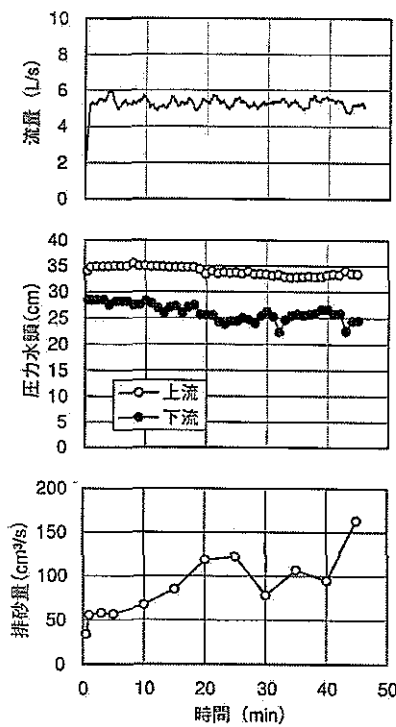
注：原点の位置は、上下流方向には排砂終了後の最深部を基準とし、鉛直方向には、初期堆砂面を河床高の基準としている。

図-5 排砂終了後の堆砂縦断形状

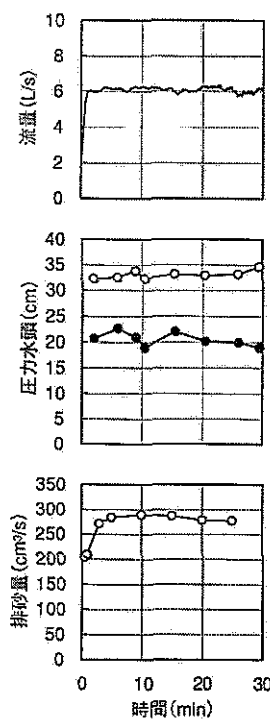
排砂中のケースA-1～A-4の流量、圧力水頭、排砂量の時系列を図-6に示す。



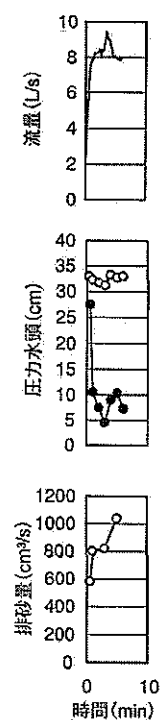
a) ケースA-1



b) ケースA-2



c) ケースA-3



d) ケースA-4

図一 6 流量、圧力水頭、排砂量の時系列

流量は、水槽内水位を2秒間隔で測定した値を1分間移動平均した値を用いて算出している。流量については、ケースA-4で若干不安定になっているものの、他のケースでは、ほぼ安定した値を示している。

圧力水頭についてみると、切り欠き部の上流と下流の圧力差は流量が大きくなるほど大きくなり、若干変動している。時間の経過につれて圧力差が大きくなる傾向が見られる。

排砂量については、全体としてみると流量が増加すると流量の増加率と比較して、大きな増加量を示している。実験中に排砂量の変動がみられるが、圧力水頭の結果と合わせてみると、排砂量が大きくなると、圧力差が大きくなり、排砂量が小さくなると、圧力差が小さくなる傾向が認められ、排砂量の増加に伴って損失水頭が大きくなっていることが確認できる。

ケースB-1～B-3については、ここでは結果を示していな

いが、B-1及びB-2では、初期に大きな排砂量がみられ、その後は排砂量が小さくなり、終盤にはさらに排砂量が小さくなり実験を終了している。B-3では、B-1、B-2と同様に初期に大きな排砂量を示し、その後は、ケースAと同様な経過を示した。

ケースBでは粒径が大きく土砂が動きにくい、掃流力が小さい場合（B-1、B-2）には、パイプ切り欠き部の堆砂面に傾斜がついてくると土砂の輸送量が減少すると考えられる。一方、掃流力が十分大きい場合には、終盤にすり鉢形状が発達し、すり鉢の中心に供給される土砂量が多くなることによって、排砂量が増加すると考えられる。

粘性土を用いたケースCの実験終了後の堆砂状況を写真-3に示す。ケースCでは、瞬間的に濃度の高い濁水が排出されたが、1分後にはかなり濃度が小さくなり、3分後にはやや透明感がある濁水となって、それ以降大きな変化はなかった。写真-3を見ると、パイプの上流端でやや広い範囲の土が流出しているものの、それ以外はほぼ切り欠き直下の土だけが流失した状態となっている。この実験では含水比が通常の貯水池内の条件よりも小さい値であったことも一因かも知れないが、排砂後

の粘性土は垂直に切り立っても自立している状態であった。

シート排砂は、すり鉢状に崩壊するような非粘着性の堆砂に対して有効と考えられる。

(2) 排砂能力

排砂装置の排砂量は、パイプ内のせん断抵抗力（または掃流力）によって決まっていると考えられる。また、パイプ内のエネルギー損失は、土砂が移動することにより増加しているものと考えられる。そこで、ここでは、パイプの切り欠き部分に着目し、パイプ内の流砂が存在する場合の壁面せん断抵抗力が流水のせん断抵抗力と砂礫の摩擦抵抗力の和で表されるものとして、以降の解析を進める。

流水のせん断抵抗力については、堆砂面を固定床とした場合の実験におけるパイプの切り欠き上下流端の圧力水頭の測定結果から、以下に示す摩擦損失係数の推定式を求めた。

$$f = 0.02675 - 0.00133 \ln R \quad (1)$$

$$R = \frac{vD}{\nu} \quad (2)$$

ここで、 f : 摩擦損失係数、 R : レイノルズ数、 v : 断面平均流速、 D : パイプ内径、 ν : 水の動粘性係数を表す。この摩擦損失係数から、流水の無次元せん断抵抗力を次式で求める。

$$\tau_w = \rho g R f = \rho f \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

$$\tau_{*w} = \frac{\tau_w}{(\sigma/\rho - 1) \rho g d} \quad (4)$$

ここで、 τ_w : 流水のせん断抵抗力、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 R : 径深、 τ_{*w} : 流水の無次元せん断抵抗力、 σ : 砂の密度、 d : 砂の粒径を示す。

砂礫の無次元摩擦抵抗力については、排砂実験時の圧力水頭の結果を用いて以下の式から求めた。

$$\tau = \rho g R f = \rho g R \frac{\Delta h}{L} \quad (5)$$

$$\tau_t = \tau - \tau_w \quad (6)$$

$$\tau_{*t} = \frac{\tau_t}{(\sigma/\rho - 1) \rho g d} \quad (7)$$

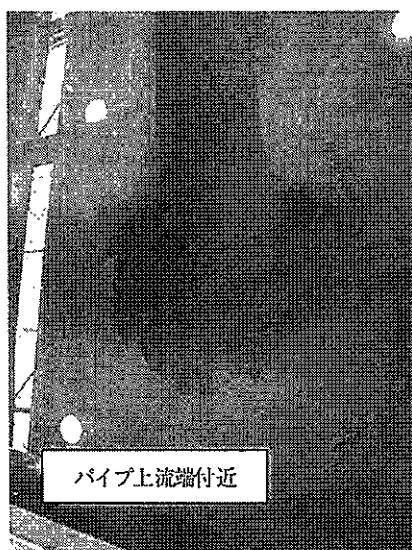
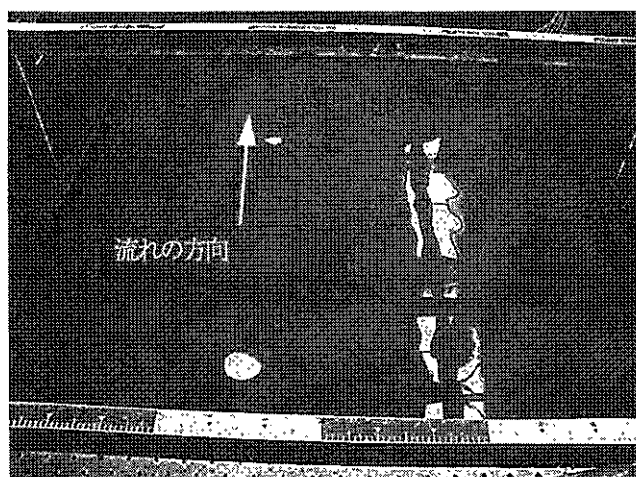
ここで、 τ : 流砂が存在する場合の壁面せん断抵抗力、 L : 上下流のピエゾ間隔、 Δh : 排砂時の上下流のピエゾ水頭差、 τ_t : 砂礫の摩擦抵抗力、 τ_{*t} : 砂礫の無次元摩擦抵抗力を示す。無次元流砂量については、次式で求めた。

$$q_{B*} = \frac{Q_B}{B \sqrt{(\sigma/\rho - 1) g d^3}} \quad (8)$$

ここに、 q_{B*} : 無次元流砂量、 Q_B : 流砂量、 B : 水路幅（切欠き幅）を示す。

図-7に、実験結果の流水の無次元せん断抵抗力 τ_{*w} と無次元流砂量 q_{B*} の関係を示す。これより、 τ_{*w} の値が小さいケースB-1、B-2については、ばらつきが大きい、その他のケースについては、概ね τ_{*w} と q_{B*} の相関は高く、その関係は次式（図-7にも表示）で表される。

$$q_{B*} = 84.8 \tau_{*w}^{2.36} \quad (0.2 < \tau_{*w} < 2) \quad (9)$$



(粘性土の条件：平均粒径0.01mm、
最大粒径0.1mm程度、含水比45%)

写真-3 粘性土を用いたシート排砂の実験終了後の堆砂形状

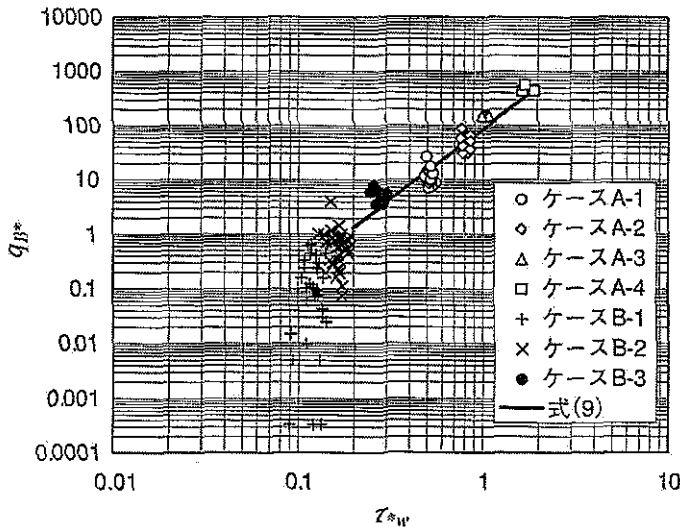
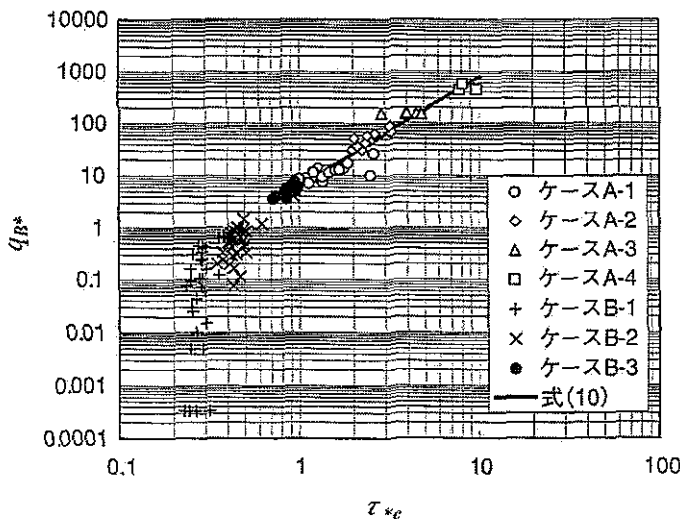
図-7 τ_{*w} と無次元流砂量 q_{B*} の関係

図-8に、実験結果の砂礫の無次元摩擦抵抗力 τ_{*c} と無次元流砂量 q_{B*} の関係を示す。ここでも、 τ_{*c} の値が小さいケースB-1、B-2については、ばらつきが大きい、その他のケースでは高い相関を示している。関係式は、次式(図-8にも表示)で表される。

$$q_{B*} = 6.29 \tau_{*c}^{2.145} \quad (0.7 < \tau_{*c} < 10) \quad (10)$$

上述の関係式は、限られた実験条件から求められたものであるが、式(9)からは、装置の排砂量を求めることができ、式(10)からは、排砂時の切り欠き部分におけるエネルギー損失を見積もることができる。ただし、切り欠き部より下流については別途エネルギー損失を検討する必要がある。

図-8 τ_{*c} と無次元流砂量 q_{B*} の関係

ここで、表-1の平均流量とパイプの諸元から式(1)~(4)及び(9)を用いて流砂量を推定した結果を表-2に示す(相関の小さいケースB-1、B-2は除いた)。これより、ばらつきは認められるが、概ね30%程度以下の誤差で流砂量が推定できる。

排砂機能確認実験の結果を要約すると以下のとおりとなる。

表-2 流砂量の推定結果

ケース	平均流砂量 (空隙無し) (L/s)	流砂量推定値 (空隙無し) (L/s)	誤差 (%)
ケース A-1	0.0266	0.0300	13.0
ケース A-2	0.0865	0.0921	6.4
ケース A-3	0.2628	0.1821	-30.7
ケース A-4	0.8107	0.8693	7.2
ケース B-3	0.0986	0.0561	-43.2

- ・非粘着性材料(珪砂)では、管径の5倍程度の深さまでの排砂が可能。
- ・流量が大きいほど、粒径が小さいほど排砂量が多くなる。
- ・流量が大きくなると、パイプの切り欠きの下流端付近からの土砂の吸い込みが大きくなる。
- ・すり鉢形状が大きくなると、排砂量が増加する。
- ・掃流力と排砂量には相関がみられる。

2.3.2 レイアウト検討実験

先に述べた排砂機能確認実験の結果を踏まえて、排砂の状況を確認しながらレイアウト形状の検討を行った。

吸い込み口が1つの場合については、管径101.5mmの実験でも検討しているが、実機における水中でのシートの展開及び設置を考慮すると、シートは小さい方が望ましいので、シートを小さくする検討を行った。その結果、写真-4に示すようにシートの幅と長さを管径の8倍程度まで小さくしても排砂が可能であることを確認した。しかしながら、排砂が進展し、吸い込み口を中心としたすり鉢形状が大きくなると、すり鉢の斜面で崩れた土砂がシートの上に堆積し、最終的には写真-5に示すように吸い込み口が埋まってしまい、土砂の濃度が急激に上昇し、パイプ内の断面がほとんど土砂で満たされる状況となった。この状況では、土砂を安定して排出することができず、また、ゲートを閉めて排砂を停止した際、パイプ内が土砂でほとんど満たされたような状況となるため再起動が困難となる。また、堆砂に埋没してしまうことから、排砂後のパイプとシートの回収も困難となる。したがって、土砂濃度を極端に大きくしない対策及びパイプが埋まらない対策が必要と考えられる。

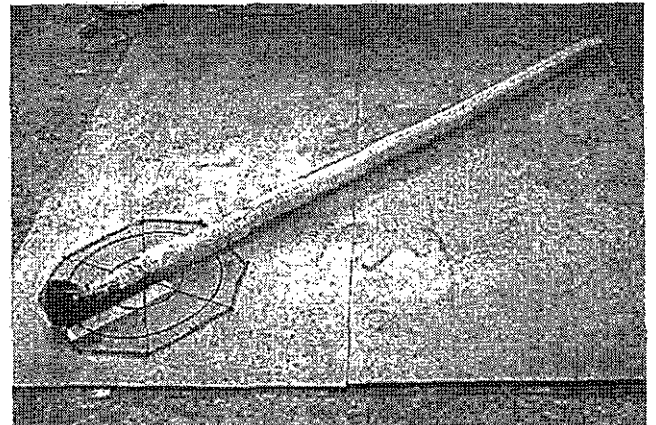


写真-4 吸い込み口が1つの形状

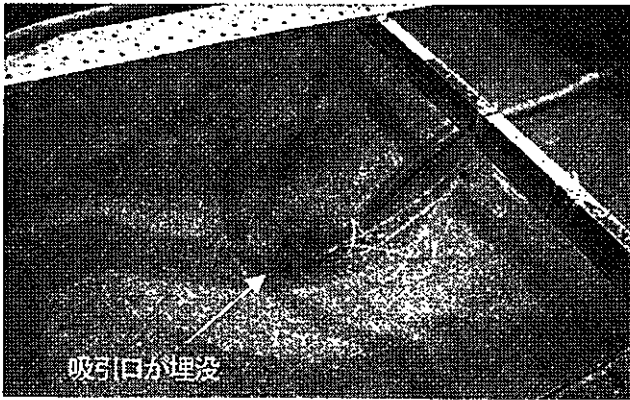


写真-5 吸い込み口が1つの形状の排砂後の状況

吸い込み口が2つの場合は、写真-6に示すように、円形のシートの中心線上に底面を切り欠いたパイプを取り付け、そのパイプの中心に別途パイプを接合し、その先から放流するレイアウトで実験を行った。広い領域の土砂を吸引することを目的とし、2つの吸い込み口でそれぞれすり針状に吸引することを想定して考案した。シートがついているパイプの底面を全長にわたって切り欠いた場合、円の中心部付近が先行して排出され低下する状況が確認された。中心部が土砂に埋まってしまうと、排砂後の回収が困難になるため、中心部から一定の距離の底面の切り欠きを塞いだところ、写真-7に示すように、両端付近が先行して低下する状況となった。ただし、排砂の進行に伴って、シートがしわになってパイプ付近に集まり、吸い込み口が埋没する状況が認められた。

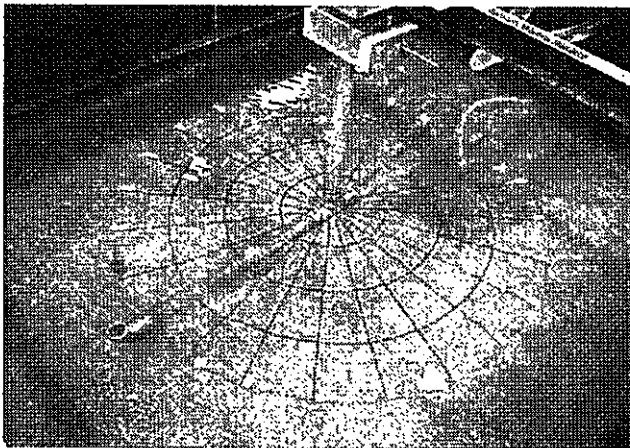


写真-6 吸い込み口が2つの形状

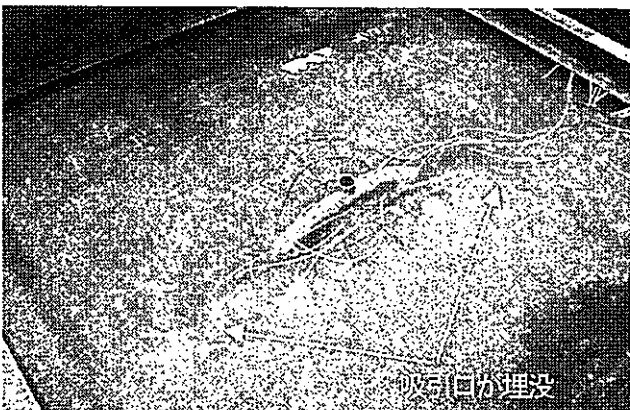


写真-7 吸い込み口が2つの形状の排砂後の状況

吸い込み口が4つの場合は、写真-8に示すように、円形のシート上に十字の形状で底面を切り欠いたパイプを取り付け、その中心に別途パイプを接合し、その先から放流するレイアウトである。土砂を広範囲から吸引するとともに、シートを広げる際の骨組みとしてパイプを利用することを目的として考案した。パイプの底面を全長にわたって切り欠くと、写真-9に示すように、吸い込み口が2つの場合と同様に、中心部が先行して低下して、シート周囲の土砂はあまり吸引されない状況となった。また、中心の領域の切り欠きを塞ぐと、写真-10に示すように十字型のパイプがシートの堆砂面への追従を妨げて、吸い込み口が浮き上がってしまい、吸引ができない結果となった。

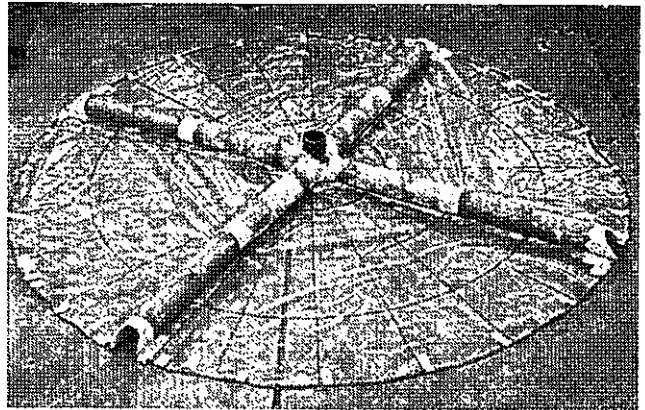


写真-8 吸い込み口が4つの形状



写真-9 吸い込み口が4つの形状の排砂後の状況
(底部全域に切り欠き)(パイプ底面全体を切り欠いた場合)

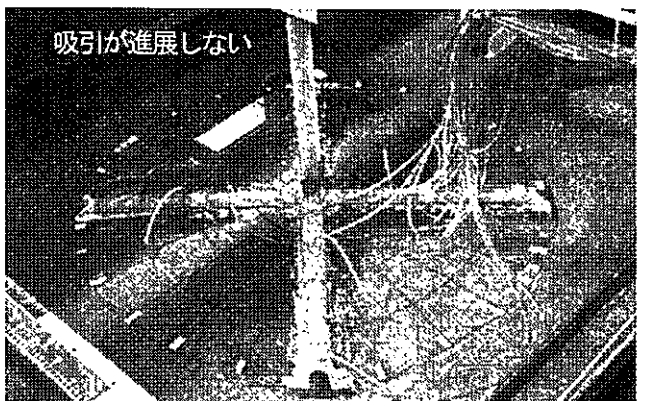


写真-10 吸い込み口が4つの形状の排砂後の状況
(端部の領域に切り欠き)(パイプ底面の呑口付近のみ切り欠いた場合)

現状では、それぞれの形状に課題があるため、形状が単純な吸い込み口が1つの場合が有望と考えており、今後、吸い込み口が埋まる問題を改良していきたい。

3. エアーバルブ排砂

3.1 排砂方法の概要

ダム堤体直上流等に設置した排砂設備を用いて、貯水位を低下することなく排砂を行うためには、排砂の進展に伴って低下

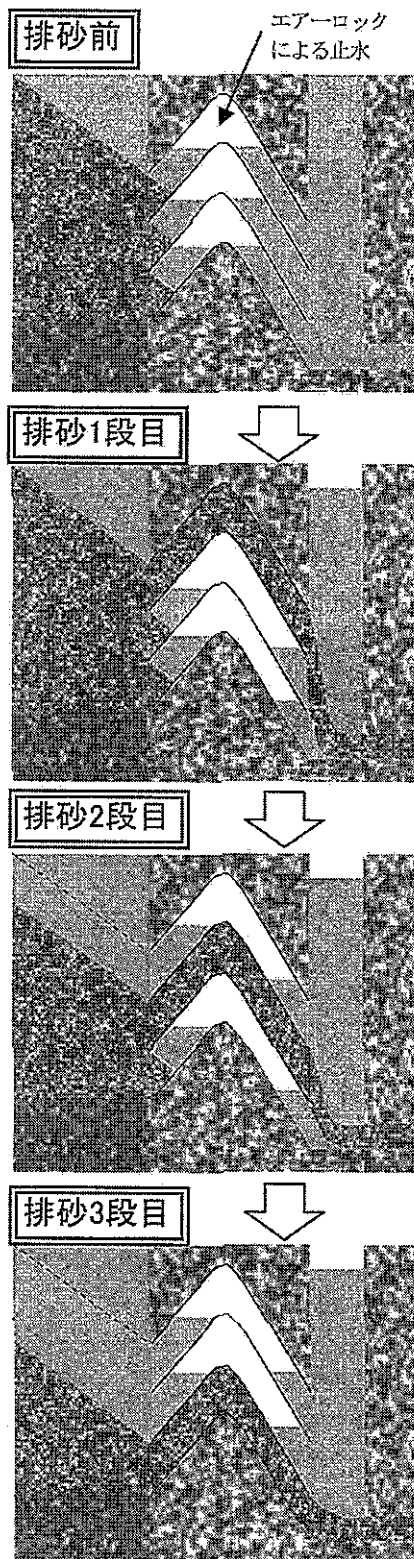


図-9 エアーバルブ排砂のイメージ(1)

する堆砂面に対して呑口の位置を追従させる必要がある。これは、土砂に対して、常に放流による吸引力を作用させるためである。そこで、エアーバルブ排砂では、呑口を鉛直方向に移動させる方法として、エアーバルブ式放流設備を採用している。

エアーバルブ式放流設備とは、空気によって止水を行うタイプの選択取水設備で、連続して配置された逆V字管の頂部に空気を出し入れすることで開閉を行い、任意の取水管から取水することを可能とするものである。連続サイフォン式放流設備と称されることもある。

この設備は空気止水し、ゲートの摺動部分を有しないため、土砂の噛み込みによるゲート操作不能等が懸念されるダム排砂設備の呑口施設への適用性が高いと考えられる。

排砂方法のイメージを図-9及び図-10に示す。堆砂面の低下に伴って、通水を行うサイフォン管を順次下段に移していくことで、継続的に排砂を行う。

この排砂方法では、排砂後の堆砂形状は、すり鉢を半分に割った半円錐形状になるものと想定され、シート排砂と同様に、1系統の施設で一回の操作により大量の土砂を排出するのは困難と考えられる。土砂の水中安息角を 30° と仮定すると、1万 m^3 を排出するためには、深さ19m程度、直径33m程度の半円錐形状を形成する必要がある。

この排砂方法について、想定している運用方法は以下のとおりである。(図-11)

- ① 非洪水期に、土砂を堤体近くまで運搬する。
- ② 出水時に、サイフォン管の切り替えを上段から下段へ順次行って土砂の排出を行う。
- ③ 以上のプロセスを毎年繰り返す。

3.2 実験方法

3.2.1 排砂機能確認実験

実験は、幅3m、長さ4m、高さ1.4mの水槽に、幅33cm、高さ5cmのサイフォン管1要素を水槽に設置し、主に放流量と排砂量の関係及びサイフォン管内の壁面圧力に着目した定常実験と、排砂操作初期の特性を把握するため、排砂管呑口が一部砂に埋没した状態からゲートを開き排砂状態を確認する非定常

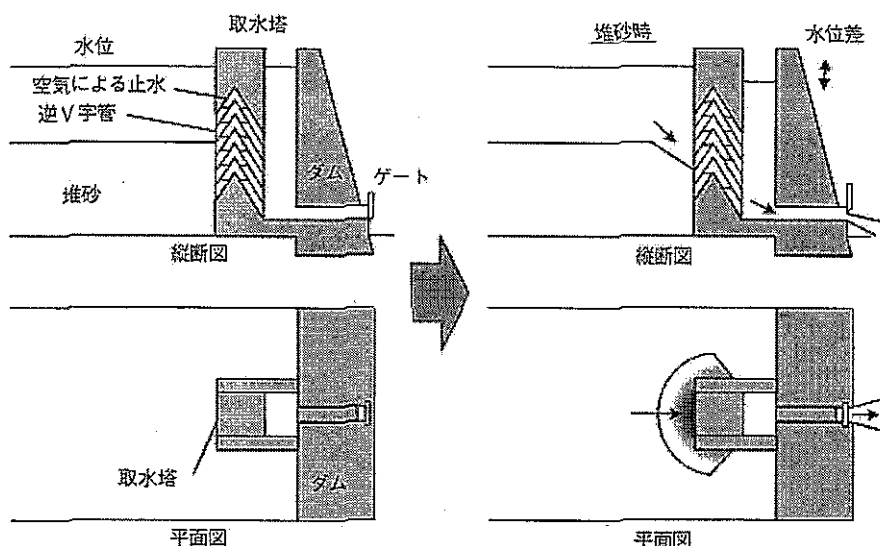


図-10 エアーバルブ排砂のイメージ(2)

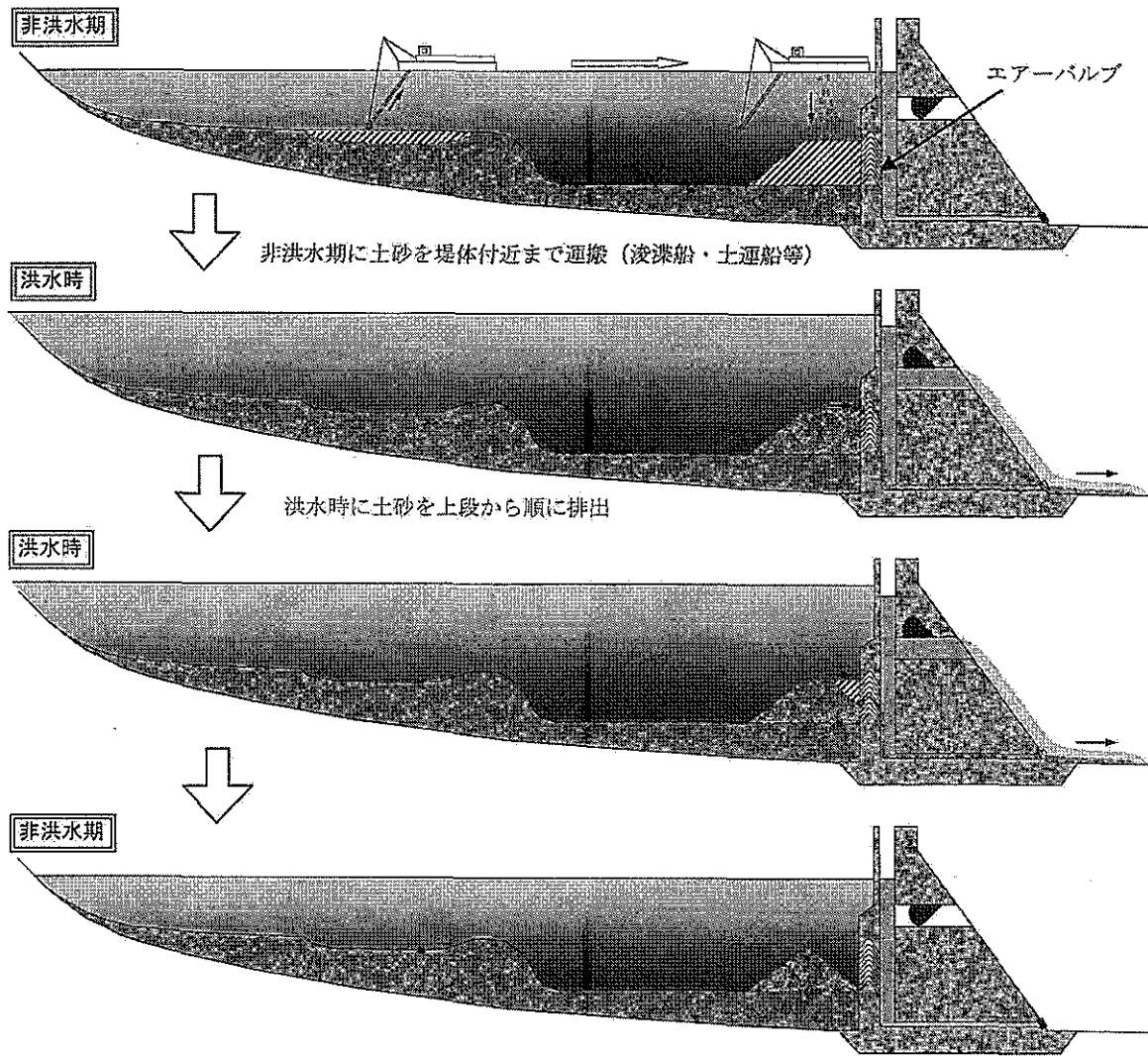


図-11 エアバルブ排砂の運用イメージ

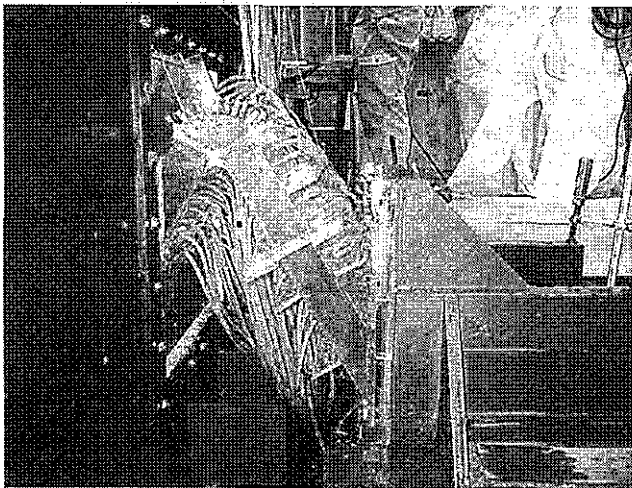


写真-11 排砂機能確認実験のサイフォン管模型

実験を行った。堆砂材料は一樣粒径とし、0.7mm及び1.3mmの2種類とした。用いた模型を写真-11に示す。

3.2.2 サイフォン管切り替え実験

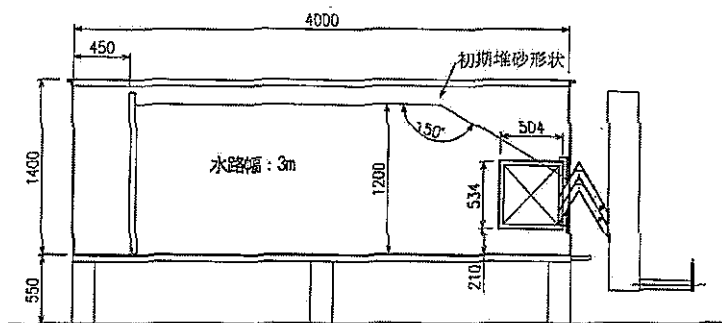
排砂機能確認実験を行った水槽に、排砂機能確認実験で用いたものと同じサイズの矩形断面のサイフォン管を2段重ねて、

その下流に取水塔及び放流管を設置し、サイフォン管の切り替えを行った場合の排砂特性を調査した。

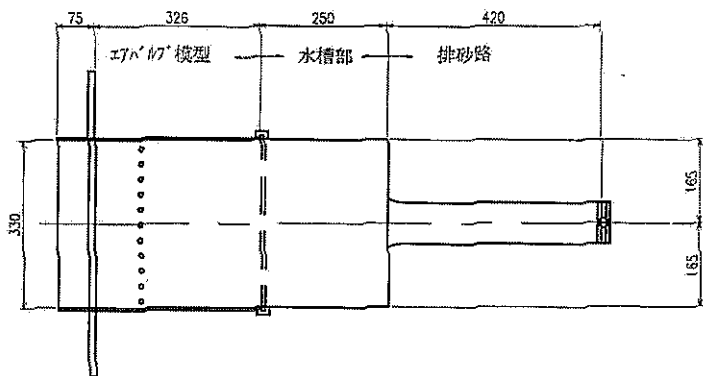
用いた模型の概要を図-12に示す。取水塔からの放流管は直径8cmの円管である。実験では、土砂がない場合のエアバルブの放流特性を調査した後、水槽内に土砂を設置して、排砂実験を実施した。堆砂材料としては、平均粒径1.3mmの一樣粒径珪砂を用いた。

実験の手順は以下に示すとおりである。

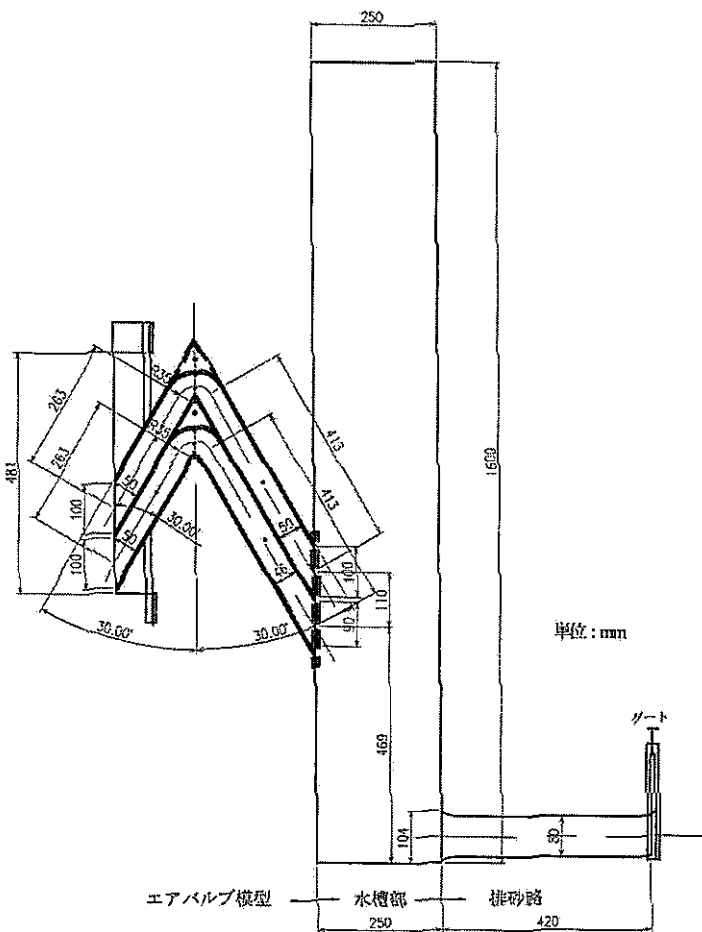
- ① 土砂を水槽内の水平堆砂標高から、上段管口の半分程度が埋没するように水中安息角ですり付けて設置。
- ② 流量調節ゲートの開度を80%（下段管のエアロックが破壊されない条件下での最大流量に近い状態）として上段のサイフォン管から排砂を行う。
- ③ 土砂が排出されなくなった状態で、一旦流量調節ゲートを閉めて、水槽内の堆砂形状を測定する。
- ④ 空気弁を調整して通水を上段管から下段管に切り替え、流量調節ゲートを所定の開度に調整し、排砂を実施して、排砂量、水槽内水位、取水塔内水位、管内圧力を測定するとともに流況観察を実施する。



a) 実験水槽縦断面図



b) 排砂設備平面圖



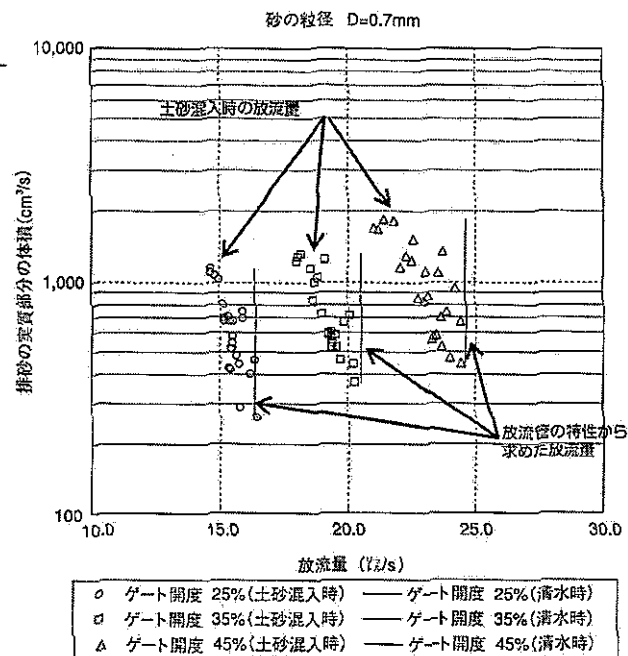
c) 排砂設備縱斷圖

図-12 エアーバルブ排砂の模型概要

3.3 實驗結果

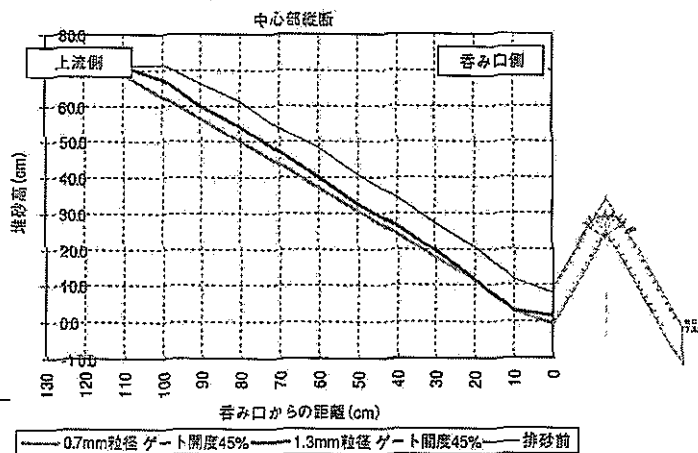
3.3.1 排砂機能確認実験

粒径0.7mmの定常実験における放流量と排砂量の関係を図-13に示す。放流特性調査結果から求められる放流量を実線で示しているが、排砂量が多くなると放流量が減少する傾向が認められる。



圖一13 放流量と排砂量の関係 (定常実験)

非定常実験では、排砂量はゲート開放直後にピークとなり、初期排砂量はゲート開度が大きい（放流量が大きい）ほど多い傾向が見られた。また、粒径0.7mmの場合はゲート開放直後に総排砂量の約60%が排砂されたのに対し、粒径1.3mmの場合は90%が排砂された。図-14に非定常実験前後の堆砂形状を示す。排砂後には排砂管管口数高の下部まで堆砂面が低下しており、粒径1.3mmのケースよりも、0.7mmのケースで堆砂面の低下がより顕著であった。



図一14 排砂前後の堆砂形状 (側面図)

3.3.2 サイフォン管切り替え実験

流砂量の測定結果を図-15に、堆砂形状の縦断図を図-16

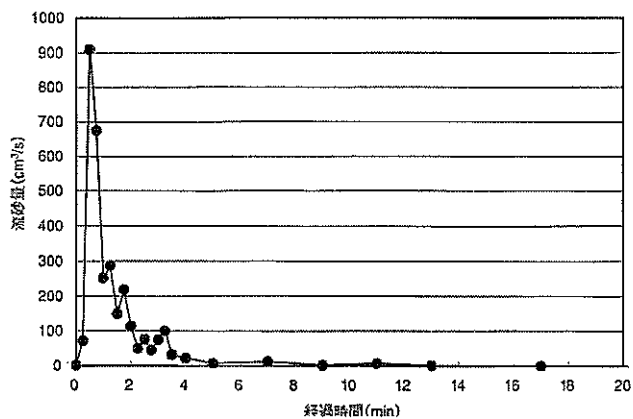


図-15 下段水路からの流砂量時系列

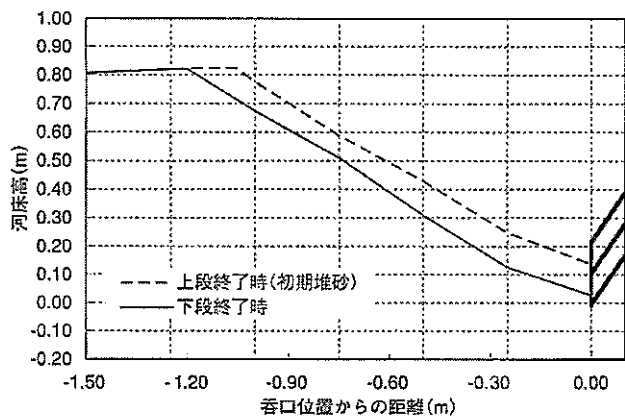


図-16 排砂前後の堆砂形状 (呑口中心位置、縦断方向)

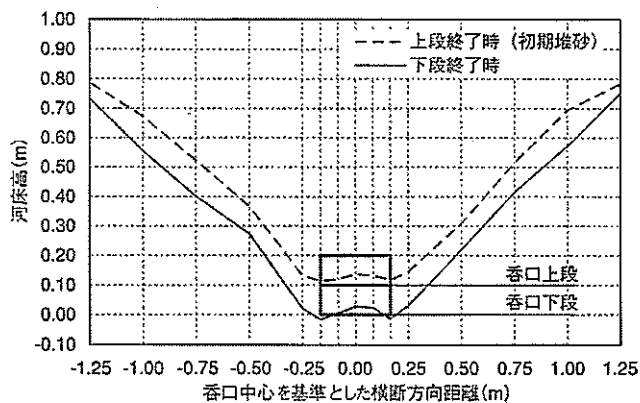


図-17 排砂前後の堆砂形状 (呑口直上流位置、横断方向)

に、横断図を図-17に、排砂状況を写真-12に示す。

図-15の流砂量の結果より、排砂を開始した直後に大きな流砂量が発生し、そのピークは1分以内に現れている。その後は急激に流砂量が減少しており、5分以降にはほとんど土砂の排出がみられない。

図-16, 17より、下段管からの排砂が終了した後の堆砂形状をみると、排砂前のすり鉢形状が一回り大きくなった形状で安定している。呑口前面では、上段終了時及び下段終了時ともに中心部で盛り上がり、両端部で河床が下がっており、これは端部の局所流による洗掘の影響と考えられる。

流況の観察からは、以下のような点が確認された。図-17か

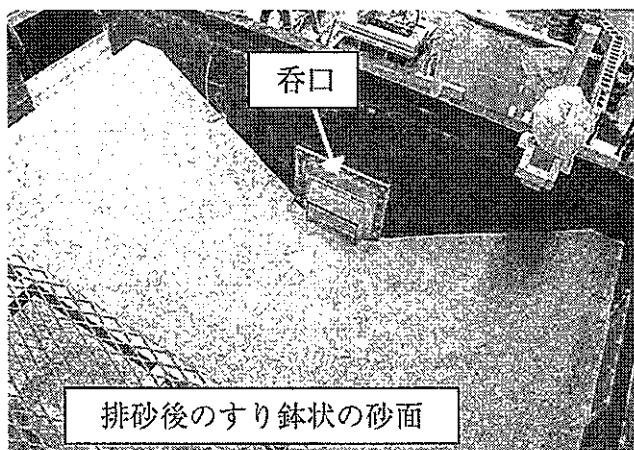
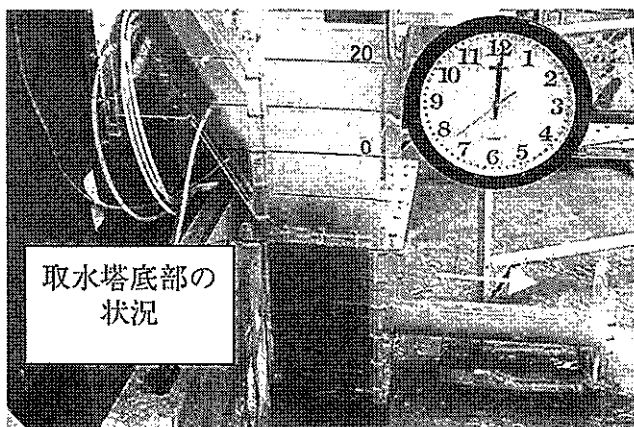
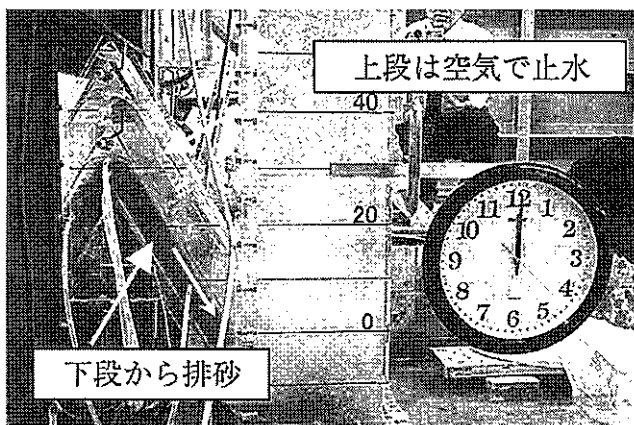
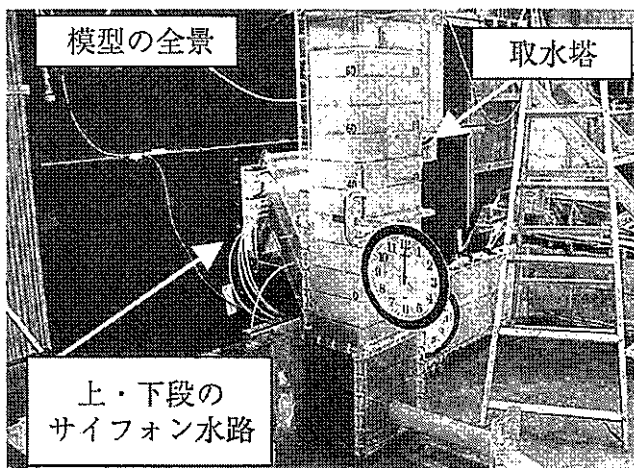


写真-12 エアバルブの排砂実験状況

らも分かるように、上段からの排砂が終了した状態では、下段呑口は若干埋もれた状態にあったが、下段管への通水の切り替えによって、土砂の排出は可能であった。排砂開始直後は非常に高濃度の土砂が管から取水塔へ一気に流れ、取水塔の水位も大きく低下した。予備実験でゲート開度を瞬時に大きくすると、一時的な取水塔内の水位低下が大きく、上段管を止水している空気が抜けてしまう場合もあり、運用時のゲート操作において留意する必要がある。また、初期の高濃度の排砂時には、今回の模型で管湾曲部上面に設けた給気口から土砂が給気用の空間に入り込む様子がみられ、施設設計において留意する必要がある。取水塔内の状況は流砂量が多い期間は、土砂がかなり乱れた状況になっており、底部への土砂の堆積も認められたが、土砂は比較的スムーズに排出された。

今後は、流量調節ゲートの開度や土砂の粒径を変化させて実験を行ってデータを蓄積し、土砂輸送能力の解析を行い、設計のための水理特性の把握と運用方法を検討していきたい。

4. まとめと今後の課題

貯水位を低下することなく、水位差のエネルギーを利用して土砂を排出する方法の開発について報告した。シート排砂とエアバルブ排砂について、水理模型実験により、非粘着性土砂の排出が可能であることを確認し、その排砂特性を把握した。

今回紹介した手法は両者とも、ある固定した位置の土砂を吸引することで、周囲の土砂が崩れて吸引位置までくることが期待している。そのため、水中で鉛直面を形成して自立するような粘着性を有する土砂の排出は困難と考えられる。この問題に

対しては、粘性土を乱すような補助的な対策を検討するか、これらの手法の対象とする土砂を非粘着性のものに限定することが考えられる。また、両手法とも施設位置を固定しているため、排砂前に施設位置に土砂を運搬しておく必要がある。現状では、浚渫船や土運船を用いて土砂を輸送することになるが、比較的成本が高く、低コストで湖内の土砂を輸送可能な手法の開発が求められている。

参考文献

- 1) 久保康夫・西村敬一・櫻井寿之・柏井条介：シート排砂方式に関する排砂現象の把握，土木学会第60回年次学術講演会，2-095，pp.189-190，2005.9
- 2) 櫻井寿之・箱石憲昭：貯水池を有効に活用するための堆砂対策に関する取り組み－堆砂予測手法および排砂手法の開発－，ダム技術，No.242，pp.35-46，2006.11
- 3) 櫻井寿之・柏井条介・久保康夫：シートとパイプを用いた排砂装置，土木技術資料，Vol.48，No.12，pp.30-35，2006.12
- 4) Toshiyuki Sakurai, Noriaki Hakoishi, Josuke Kashiwai, Takashi Izumiya and Yasuo Kubo: Development of sediment supply measures for restoration of riverbed environment at the downstream of the dam－Sediment discharge facility by sheet and suction pipe, and air valve－, International Symposium on Modern Technology of Dams－The 4th EADC Symposium, pp.248-262, 2007.10