

貯水池排砂のための潜行式吸引排砂管の開発

DEVELOPMENT OF THE BURROWING TYPE SEDIMENT REMOVAL SUCTION PIPE FOR A RESERVOIR SEDIMENTATION

櫻井寿之¹・箱石憲昭²

Toshiyuki SAKURAI, Noriaki HAKOISHI

¹正会員 工修 (独) 土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 (独) 土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

By means of the dam construction, a part of the sediment transportation through the river is interrupted. Decrease of the sediment supply to downstream causes the environmental problems related to riverbed. Furthermore, the sedimentation causes the reduction of the reservoir storage capacity. Then, the sediment supply measures from the reservoir are required. Considering more detail condition and time variation of the downstream riverbed environment, it is desirable to be able to control the timing, volume and particle size of the supplied sediment. Then, we have been trying to develop the new sediment supply measures using the differential water head energy between upstream and downstream of the dam. We have been doing research about the measure using sheet and suction pipe. From the results of the hydraulic model tests, we proposed the burrowing type sediment removal suction pipe. It was confirmed that the measure was able to discharge the non-cohesive sediment such as sand and gravel.

Key Words : *Reservoir sedimentation, Sediment removal facility, Suction pipe, Sheet, Hydraulic model test, Burrowing type sediment removal suction pipe*

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、下流への土砂供給が減少し、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。

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、これらの手法は大規模な水位低下が必要であったり、流入量や流入土砂量の影響を大きく受けたりするなど貯水池の水理条件や貯水池運用条件における制約が大きく、排砂量のコントロールに限界がある。また施設が大規模なためコスト面での制約も大きい。多くのダムで適用する

ためには、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。

そこで、筆者らはより広範囲な貯水池条件に適用可能で、ある程度土砂量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。

筆者らはこれまでに民間企業との共同研究により、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(「シート排砂」と称す)¹⁾を開発してきたが、以下のような課題があった。①シートが大きいため排砂が進むとシートが浮き上がったり皺ができて水みちができてしまい土砂の吸引力が減少する。②すり鉢が大きくなり崩落土砂量が多くなると水の取り入れ口が土砂に埋まり土砂濃度が極端に大きくなって管が閉塞する。③水中でのシートの展開が困難。そこで原型の1/10程度の縮尺を想定した水理模型実験により、これらの課題を克服する形状の検討を行い、新たな方法である「潜行式吸引排砂管」を考案した。本稿では、その検討経緯を報告する。

2. シート排砂の概要

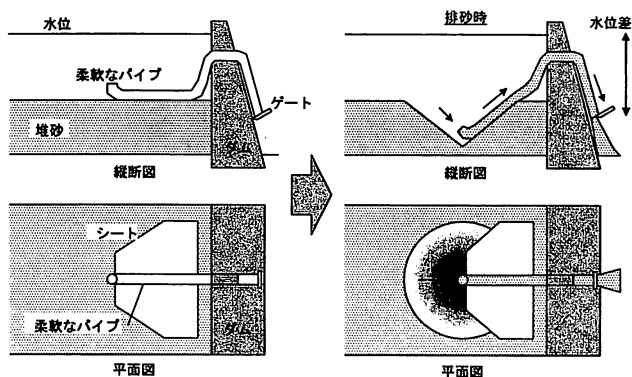


図-1 シート排砂のイメージ

(1) 既往の研究概要

筆者らはこれまでに民間企業との共同研究により、「シート排砂」の開発を実施してきた。

シート排砂のイメージを図-1に示す。シート排砂は水底部の堆砂面上に設置することが特徴であり、①貯水池運用の変更が不要、②放流量に対する供給土砂量の制御精度が高い、③設備規模が小さく経済的、となることを目標として検討を実施してきた。装置は管、シート及び流量調節施設から構成される。管の貯水池内の部分は、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。また、管の上流側は、土砂を吸引するため底面を切り欠いた形状になっている。設置、維持管理及び回収を行いやすくするために、管は堆砂の上に設置する。ここで、管を堆砂上に置いただけでは、切り欠きの最下流部に窪みができた時点で周囲の土砂への掃流力は小さくなり、水のみが吸引され、土砂の排出ができなくなる。そこで、管に水密シートを設置し、放流時の管の内外水压差を利用して管を堆砂面に張り付かせるとともに、管の周囲からの水の進入を防止する構造としている。

既往の管内径101.6mmの模型を用いた実験²⁾により、砂材料については、管径の5倍程度までの深さのすり鉢形状を形成するような排砂が可能であり、排砂能力についても掃流力と排砂量に相関が認められた。

その後、排砂がより進行した状態（掘削深と管径の比が大きい状態）を把握するために、以前用いていた管内径101.6mmの模型から縮尺を小さくして管内径60.5mmの模型として、排砂の状況を確認しながらレイアウト形状を検討³⁾しており結果の概要を以下に示す。検討した管及びシートの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形状に大別される。

吸い込み口が1つの場合については、水中でのシートの展開・設置等を考慮すると、シートは小さい方が望ましいので、シートを小さくした検討を行った。シートのおおきさについては、管径の8倍程度のおおきさまで小さくしても排砂が可能であることを確認した（図-2参照）。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、崩れた土砂がシートの上に堆積し、最終的には吸い込み口が埋まってしまい、管内

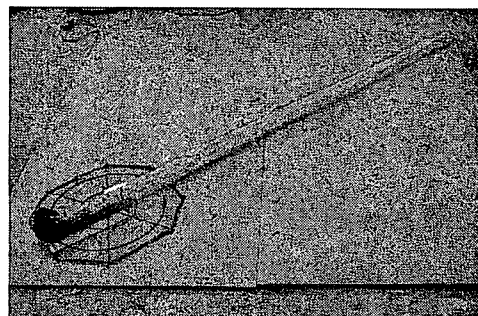


図-2 吸い込み口が1つの形状



図-3 吸い込み口が1つの形状の排砂後の状況

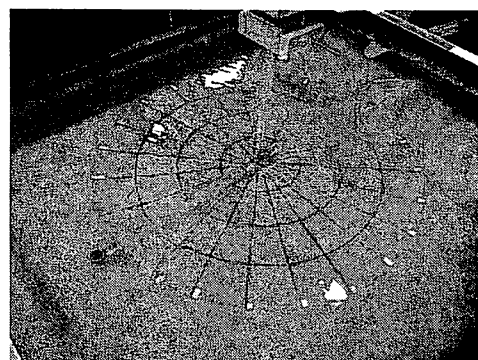


図-4 吸い込み口が2つの形状



図-5 吸い込み口が2つの形状の排砂後の状況



図-6 吸い込み口が4つの形状の排砂後の状況
(管底面全体を切り欠いた場合)

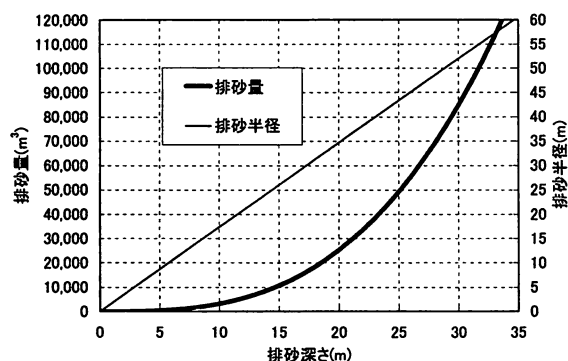


図-7 排砂深さと排砂量および排砂半径の関係

の断面がほとんど土砂で満たされ、閉塞される状況となった(図-3参照)。

吸い込み口が2つの場合は、円形のシートの中心線上に底面を切り欠いた管を取り付け、その管の中心に別途管を接合し、その先から放流するレイアウトである(図-4参照)。2つの吸い込み口から広い領域の土砂の吸引を目的として考案した。シートがついている管の底面の全体を切り欠くと、排砂したときに、中心部が先行して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を塞いだところ、両端付近が先行して低下する状況となった(図-5参照)。ただし、終盤にシートがしわになって管付近に集まってしまう状況が認められた。

吸い込み口が4つの場合は、円形のシート上に十字の形状で底面を切り欠いた管を取り付け、その中心に別途管を接合し、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管を利用することを目的として考案した。管の底面を全面切り欠くと、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、シート周囲の土砂はあまり吸引されない状況となった(図-6参照)。また、中心の領域の切り欠きを塞ぐと、十字型の管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。

(2) シート排砂の課題

既往の検討結果からは、吸い込み口を増やすことのメリットは認められず、一式の装置としては1つの吸い込み口の形状が構造も単純で有望と考えられ、対象土砂量が多い場合は装置の数を増やしていくことが得策と考えられた。

管径の小さい模型実験の結果から、1つの吸い込み形状とした場合に、排砂によってすり鉢形状が大きくなり崩落土砂量が多くなると水の取り入れ口が土砂に埋まり土砂濃度が極端に大きくなって管が閉塞する問題が確認された。

実際の装置を想定した場合に、排砂後の堆砂形状を水

中安息角が 30° の円錐形と仮定すると、排砂深さと排砂量・排砂半径の関係は図-7のようになる。堆砂量のデータがある日本の貯水池のおよそ半数は年平均堆砂量が 1万m^3 以下であるが、仮に 1万m^3 の土砂を排出するためには15m程度の排砂深さが必要である。ここで、実際に用いる管径を0.5~0.8mと想定した場合、管径と排砂深さの比は20~50程度となる。これに対して既往の実験では、この比は101.6mmの管径の場合で最大5程度、60.5mmの管径で最大8程度であり、実験の排砂深さは管径に比べて小さい。よって実験の範囲内で吸い込み口が埋まる状況では実際の貯水池への適用は困難と考えられる。

3. 排砂管形状の検討

2章でのべたシート排砂の課題を解決するために、水理模型実験により管とシートの形状の検討を実施した。

(1) 実験方法

実験に用いた装置を図-8に示す。実験水槽は、長さ4.5m、幅2.5m、深さ1.3mであり、水位を維持するための余水吐きおよび排砂を行うための管(内径60.5mm)を設置している。水槽外の管の先端には流量調整が可能なゲートを設けている。実際に用いる管径を0.5~0.8mと想定した場合、模型の縮尺は1/13.3~1/8.3程度に相当する。

実験の手順は、始めに水槽内に土砂を厚さ0.8mに整形した初期河床の上に排砂装置を設置して、一定流量(45L/s)を給水し余水吐きからの越流によって水位を保つ。その後、排砂管の下流端のゲートを開けて排砂を実施して、水槽内の水位、排砂管内の圧力、流砂量、流況等の調査を行った。ゲート開度は排砂状況を確認しながら適宜調節を行った。実験の土砂材料には平均粒径1.56mmの一樣粒径珪砂を用いた。

実験を行った排砂管形状の一覧を表-1に、各形状の概要を図-9~12に示す。以下の結果の記述では詳細な水理量の結果は省略し、土砂吸引部の埋没とシートの曲げやめくれに着目した排砂状況を述べる。

(2) 排砂管吸引部の取水管形状の検討

排砂管の土砂吸引部がある程度埋没しても土砂濃度が著しく大きくならないように、埋没しにくい取水口とすることを目的として、ケース1の形状を検討した。管の上流端に鉛直方向の取水管を設置して清水取り入れ口の標高を高くした形状である。排砂実験を行ったところ、すり鉢形状が大きくなるに従って、土砂吸引部は次第に埋没し、取水口の上端からも土砂が流入するようになった。土砂濃度は急激に上昇し安定した排砂は不可能となった(図-3と同様な状況)。

次にすり鉢形状が形成された後に、崩落してくる土砂を制御して埋没を防ぐことを目的としてケース1の取水管

表-1 実験ケース一覧 (管およびシートの形状)

ケースNo.	管形状					シート形状				
	線形	底面切り欠き領域 (図-10参照)	取水管	ヒモによる吊り下げ	開口部	幅(m)	長さ(m)	厚さ(mm)	形状	開口部
1	直線	上流端から0.48m	高さ0.24mの鉛直管	無し	無し	0.48	0.48	1	八角形	先端から0.24mの範囲
2			ケース1に直径0.3mの円形プレート設置							先端から0.60mの範囲
3			上流端から1.20m			高さ0.24mの鉛直管	先端から0.60mの範囲に直径0.03mの5つの穴			
4							上流端から1.70m			先端から0.39mの範囲に直径0.03mの3つの穴
5		上流端を吊り下げ								2.2
6	U字	折り曲げ部から下流0.6m	無し	湾曲部側面に直径0.02mの1つの穴	0.24		0.44	0.5	曲線形	湾曲部底面に直径0.03mの5つの穴
7			湾曲部をワイヤーで吊り下げ							
8										

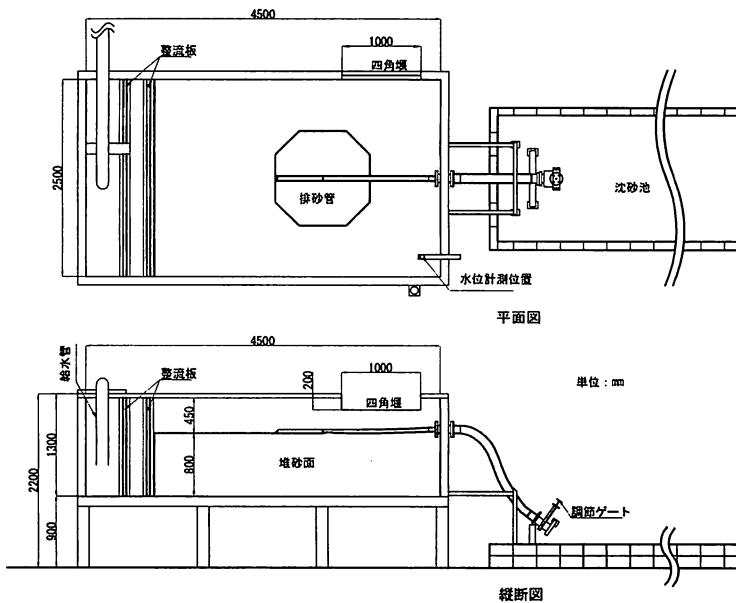
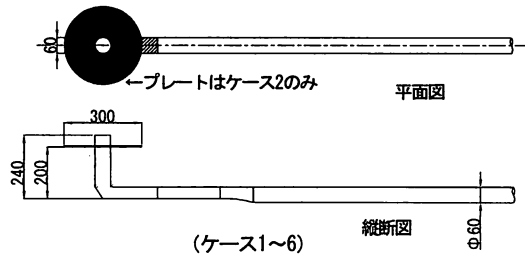
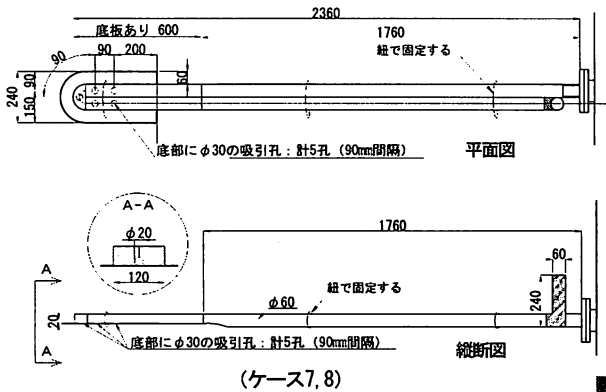


図-8 実験装置概要



(ケース1~6)



(ケース7, 8)

図-9 管の形状

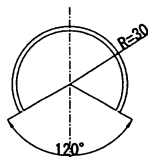
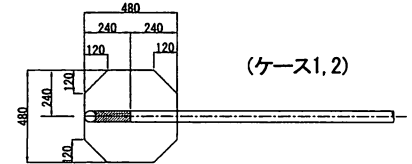
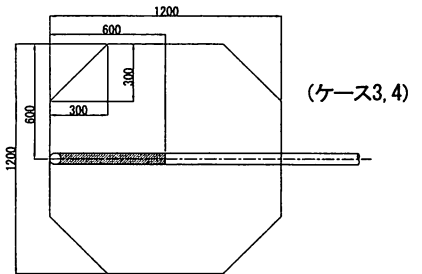


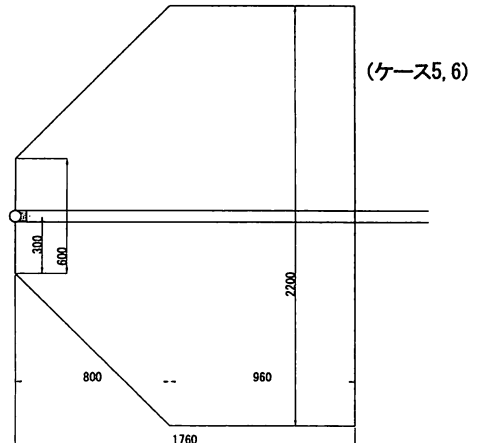
図-10 底面を切り欠いた管の断面形状



(ケース1, 2)

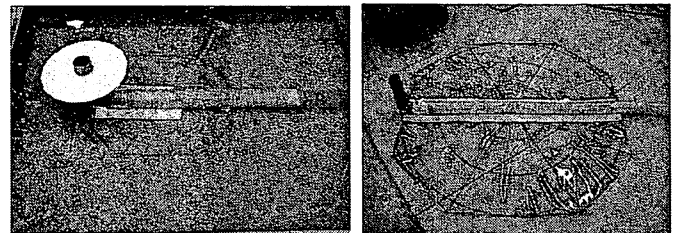


(ケース3, 4)



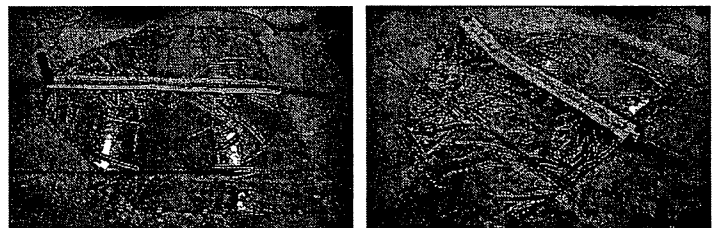
(ケース5, 6)

図-11 シートの形状



(ケース2)

(ケース3)



(ケース5, 6)

(ケース5, 6裏面)

図-12 模型概要

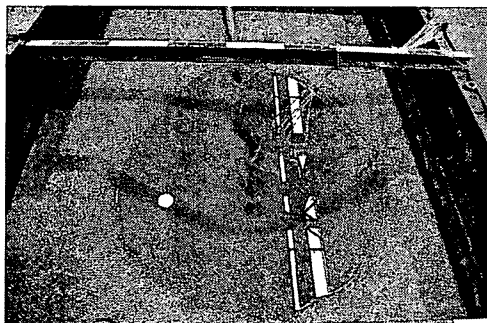


図-13 ケース3の排砂後の状況

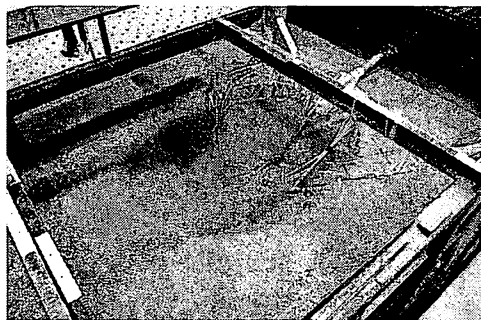


図-14 ケース6の排砂後の状況

に円形のプレートを設置したケース2の排砂実験を行った。その結果、プレートの効果はなく、排砂の進展に伴って取水口は埋没した。

さらに高い取水管を設置する選択もあり得るが、実際の貯水池に適用する場合は深さ十数mの大きなすり鉢の形成が想定されるため、非常に大規模な取水管となり、現実的ではないため、取水管の規模拡大による対応は得策でないと判断した。

(3) シートの形状検討

シートを大きくすることで堆砂のすり鉢形状からの土砂崩落を制御して吸引部の埋没を防ぐことを目的として、ケース3の形状を検討した。排砂を行うと、すり鉢形状がシートよりも小さい状態では土砂吸引部が埋没することはないが、すり鉢の規模がシートよりも大きくなると斜面から崩落する土砂によって、シートがめくれて折りたたまれ排砂管が埋没する状況となった(図-13参照)。

ケース4は、底面の開口部を直径0.03mの5つの穴とすることで開口面積を小さくして、排砂管の底面からの土砂の吸引力を緩和させることで埋没を回避することを目的とした形状である。土砂を吸引するためには下流端のゲートをケース3よりも大きな開度にする必要があった。初期の段階は排砂管が埋没することにはなかったが、すり鉢が大きくなってくると急激に土砂の吸引が著しくなり、シートの中央付近からめくれ始め、一気にシートおよび排砂管が土砂で埋没した。

ケース5ではシートをさらに大きくし、堆砂面への追随性を高めるためにシートの厚さを薄くした。また、開口部は直径0.03mの3つの穴とした。土砂は主に排砂管の先端から吸引され、近傍の河床面が徐々に低下する。

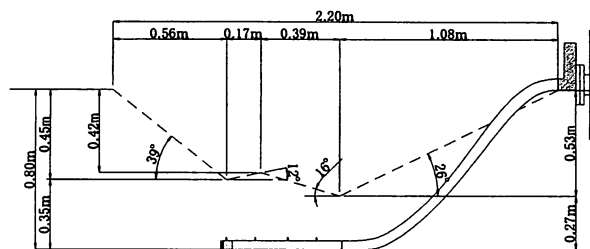


図-15 ケース7の排砂後の河床形状と排砂管の縦断スケッチ

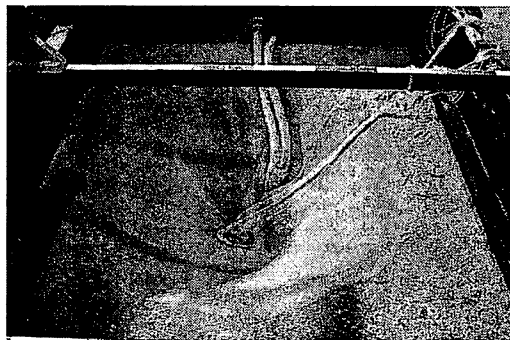


図-16 ケース8の排砂後の状況

シートの河床面への密着は良好であるが、洗掘が進行するに伴って、中心に向かって引っ張られるようになり、洗掘範囲がシートの大きさに達する前にめくれが始まった。さらに排砂が進行するとシートがめくれ、排砂管およびシートが土砂で埋没した。

ケース6では、ケース5と同じ形状で、排砂管の標高を先端部に取り付けたヒモによって調節することで埋没を防ぐことを目的とした。10cm間隔で標高を下げることを試みた。初期は安定した排砂状況であったが、排砂が進行し、標高を20cmまで下げると、崩落土砂によってシートが押し退けられ、排砂管の一部がシートで覆われるようになった。最終的にはシートのめくれと排砂管の埋没を防ぐことはできなかった(図-14参照)。

以上の検討より、シートを大きくしてもすり鉢の規模がシートより小さい段階でシートのめくれや排砂管の埋没が生じてしまい、シートで土砂の崩落をコントロールする対策も効果が得られなかった。

(4) 潜行式吸引排砂管の検討

上述の検討では、排砂管のメンテナンスを考慮して排砂の過程で排砂管が堆砂面上に露出することを条件として試行錯誤を行ってきたが、排砂管の埋没を防ぐことができなかった。そこで、発想を転換して、排砂中は管が埋没することを許容し、取水口については常に埋没せずに土砂濃度を制御できる形状としてケース7を考案した。この形状は排砂管をU字形状として一方を取水口とし、折り曲げた湾曲部の底面を切り欠いてシートを貼り底面に穴を設けて土砂の吸引口としたものである(潜行式吸引排砂管と称する)。取水口は想定される最大のすり鉢形状のさらに外側に位置する必要がある。また折り曲げ部は埋没するためシートはなるべく小さい形状(管径程

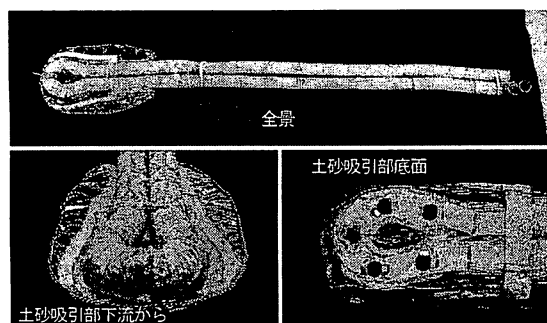


図-17 潜行式吸引排砂管の概要

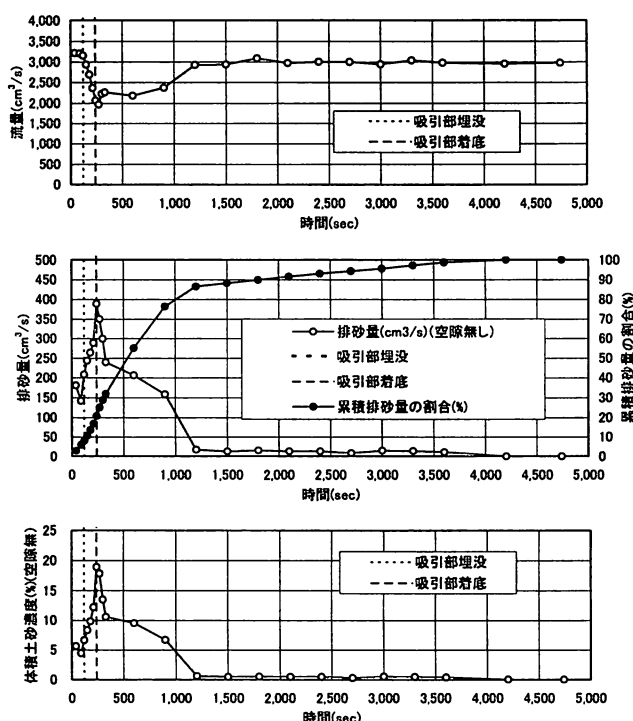


図-18 潜行式吸引排砂管の排砂時の水理量時系列

度の張り出し) として。排砂を行った結果、排砂管が初期河床高から40cm程度沈下した時点で、土砂吸引部が土砂中に埋没した。埋没後も取水口は堆砂面上にあり、安定した排砂状況が得られた。ただし、排砂管の堆砂中の潜行速度は速く、すり鉢が大きくなる前に土砂吸引部が水槽底面に達した。土砂吸引用の穴が底面にあるため、水槽底面に達した後は土砂の吸引はほとんどない状態になった(図-15参照)。

排砂管のメンテナンスのためには、排砂終了後には管が堆砂面上に露出することが望ましい。そこで、ケース8では土砂吸引部の潜行を水槽底面に達する前に止めるために土砂吸引部にワイヤーを設置した。また、管が露出しやすいように、湾曲部のシートの上側の管側面に直径0.02mの土砂吸引口を1つ設置した。ワイヤーの長さは、初期河床高から60cm低い地点までの長さとした。排砂を行った結果、土砂吸引部は、初期河床高から60cm低下した位置で固定され、排砂は長時間安定した状態で継続された。埋没した排砂管は、時間経過とともに近傍の土砂が吸引され、一部は土砂が覆っているもののある程

度露出することが確認できた(図-16参照)。

4. 潜行式吸引排砂管の排砂特性

3章までの検討結果を踏まえて、ケース8の形状を基本とした潜行式吸引排砂管による排砂時の水理量の調査を行った。ケース8ではワイヤーにより排砂深さの制御を行ったが、実際の貯水池ではかなりコストと労力のかかる手法であるため、土砂吸引部が底面に到達後も管側面の土砂吸引口から排砂を行い、最終的に管が露出することが望ましい。そこで、ワイヤーによる制御は行わないこととした。また、シートの形状は初期の吸引力を確保するために横方向への張り出しを管径の2倍(0.12m)とし下流方向へも若干延長した。また、上流方向への張り出しは潜行時にシートが側方の土砂吸引口を塞がないように小さく(0.02m)した(図-17参照)。

実験での堆砂の厚さは0.6mとした。排砂管下流端のゲートの開度は清水時で3.32L/sの放流量(管内平均流速1.17m/s)となる24%に設定した。実験結果の水理量時系列を図-18に示す。土砂吸引部が埋没すると流量は減少し、排砂量は増加して、10%以上の高い土砂濃度を示す。これらの傾向は土砂吸引部が水槽底部に達するまで継続し、底部に達した後は流量が増加し排砂量が減少する。排砂開始後1200秒程度で全排砂量の9割程度は排出が終了しており、その後は、少量の土砂の排出が継続した。これは、すり鉢形状の間欠的な斜面崩壊によるものと考えられる。

5. おわりに

既往の検討で確認されたシート排砂の課題を解決するために水理模型実験により検討し、潜行式吸引排砂管を新たに考案した。非粘着性の土砂を用いた排砂実験においては課題を克服し、安定した排砂が可能であることを確認した。今後は、実験条件を増やして排砂管のエネルギー損失や排砂特性の検討を行うとともに、より規模の大きい実験や現地試験によって動作の検証を行い実用化に向けて研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 箱石憲昭, 櫻井寿之, 泉谷隆志: ダムからの排砂技術の開発, 土木技術, Vol. 64 No. 2, pp. 49-54, 2009.
- 2) 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.
- 3) (独) 土木研究所: 貯水池下流供給土砂の高精度制御に関する研究, 平成19年度重点プロジェクト研究報告書, (Web公表準備中)

(2009. 4. 9受付)