

環境に配慮したダムからの土砂供給施設の開発及び運用に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水工研究グループ（水理）

研究担当者：箱石憲昭、宮脇千晴、海野仁、
櫻井寿之、宮川仁

【要旨】

ダムが土砂を捕捉することにより、下流の河床の粗粒化など河床環境への影響が懸念されており、出水中にできるだけ自然に近い状態でダムから土砂供給することが求められている。また、想定を超える堆砂の進行により、恒久的堆砂対策が必要なダムがあるが、実用化されている排砂設備や土砂バイパスは適用条件が限られ、貯水池運用を変更せずに排砂する技術が求められている。さらに、堆砂対策は現在問題となっていないダムにおいても将来必ず直面する課題である。

そこで、本研究では、これまでに実用化されていない、貯水位を低下させずにダム堆積土砂を適切な量と質に制御しつつ下流へ供給可能な施設を開発すること、及び開発した施設によりダム下流河川の環境を回復させるための運用方法を提案することを目的としている。

25年度は、過年度に実施した潜行吸引式排砂管の検討結果から、さらに形状の検討を加えた上で実際のダム貯水池内において実証試験を実施し、比較的小さな水頭差でも自然堆砂を排砂できることを明らかにするとともに、塵芥に対する課題なども明らかとした。また、流量調節設備の検討も行った。

キーワード：ダム貯水池、堆砂対策、潜行吸引式排砂管、現地実証試験

1. はじめに

ダムが土砂を捕捉することにより、下流の河床の粗粒化など河床環境への影響が懸念されており、出水中にできるだけ自然に近い状態でダムから土砂供給することが求められている。また、想定を超える堆砂の進行により、恒久的堆砂対策が必要なダムがあるが、実用化されている排砂設備や土砂バイパスは適用条件が限られ、貯水池運用を変更せずに排砂する技術が求められている。さらに、堆砂対策は現在問題となっていないダムにおいても将来必ず直面する課題である。

そこで、本研究では、これまでに実用化されていない、貯水位を低下させずにダム堆積土砂を適切な量と質（粒径）に制御しつつ下流へ供給可能な土砂供給施設を開発すること、及び開発した土砂供給施設によりダム下流河川の環境を回復させるための運用方法を提案することを目的としている。

23年度には、22年度までの重点プロジェクト研究において提案した「潜行吸引式排砂管」¹⁾²⁾について、管径 200mm の排砂管を用いた室内実験により、実際の装置に近い規模での排砂特性を把握した。24年度には、現地実証試験のための改良を行い、管径 200mm の「潜行吸引式排砂管」による小規模堰堤での排砂試験を実施した³⁾。

25年度は、24年度までの知見を基に、さらに「潜行吸

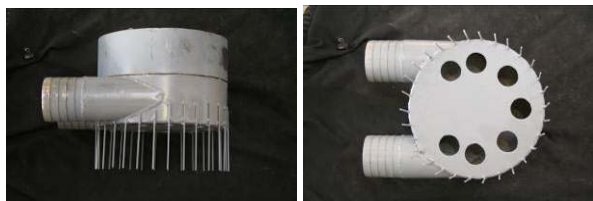
引式排砂管」を改良、実際のダム貯水池内において、管径 200mm の排砂管を用いた現地実証試験を実施した。その結果、比較的小さな水頭差においても、自然堆砂を排砂可能であることなど、実用化に向けて参考となる知見を得た。一方、堆砂への追従に関する過年度の課題を引き続き確認するとともに、塵芥の集積に伴って土砂の吸引が停止する課題も明らかとした。また、潜行吸引式排砂管に適した流量調節設備についての検討も行った。

2. 潜行吸引式排砂管の設計手法の検討

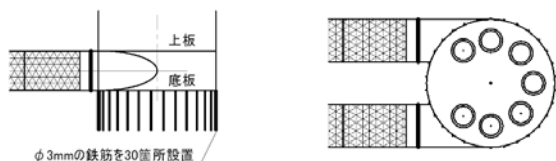
2.1 潜行吸引式排砂管の改良

「潜行吸引式排砂管」とは、フレキシブル管をU字形状として一方を取水口とし、折返し部（以下、吸引部）の管底面にシートを貼り、吸引部と上流部の管底面等に穴を設けて土砂の吸引口としたもので、平成 25 年 7 月には、22 年度までの重点プロジェクト研究において提案した「潜行吸引式排砂管」が特許として登録（特許 5305439 号）された。

24 年度の検討では、「潜行吸引式排砂管」の実用化に向け、装置を簡略とするためにシートの機能を代用する目的で吸引部上面に重りを設置するなどの図-1 に示す形状の改良を行い、塵芥を含まず、粘着性のない砂礫について土砂吸引・排砂が可能であることを確認した¹⁾³⁾。



a) 排砂管吸引部 (左: 側面、右: 底面)



b) 排砂管吸引部 (左: 側面、右: 底面)

図-1 平成24年度における改良形状



図-2 室内実験場の全景

しかし、吸引部の堆砂面への追従に関する課題も確認された⁴⁾。

25年度においては、この課題への対応のため、吸引部の形状を改めて検討した。具体的には、図-2に示す幅7.5m、奥行き7.5m、高さ3.5mの水槽を有する実験施設において表-1に示す排砂管径100mmで吸引部形状が4形状の室内実験を実施した。ケース1は24年度の小規模堰堤での排砂試験の形状と同様であり、他ケースと比較するための基本とするデータを収集する目的で実施した。ケース2は塵芥止めが堆砂面への追従に対し抵抗となると考えられたため、これを除去したケースとして実施した。ケース3は装置の形状は簡略とする一方、堆砂面への追従性をさらに高めるため、ケース2の吸引部の底面に半径200mmの円形の天然ゴム(厚みは3mm)をシートとして設置した形状において実施した。ケース4はケース3のゴムシートの巻き込みによる吸引口の閉塞を防止する観点から、ゴムを鋼板で挟み、ゴムを固定する形状として実施した。

この4つの検討ケースについて、吸引部の堆砂面への追従性の程度を評価できるよう、吸引部の潜行速度と鉛直位置の時間変化を計測した結果を表-1、図-3に示す。

表-1 平成25年度における検討形状

ケース名	ケース1	ケース2
管径	100mm	100mm
形状		
潜行速度	深さ 0m~0.5mまで 深さ0.5m~1.0mまで 深さ1.0m~1.5mまで	0.136 cm/s 0.023 cm/s 0.017 cm/s
ケース名	ケース3	ケース4
管径	100mm	100mm
形状		
潜行速度	深さ 0m~0.5mまで 深さ0.5m~1.0mまで 深さ1.0m~1.5mまで	0.212 cm/s 0.114 cm/s 0.123 cm/s
		0.130 cm/s 0.066 cm/s 0.063 cm/s
		0.156 cm/s 0.234 cm/s 0.178 cm/s

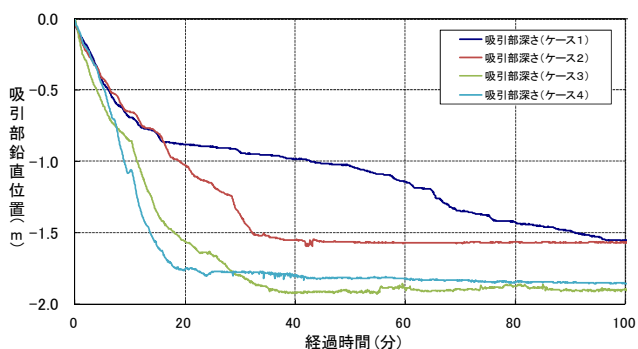
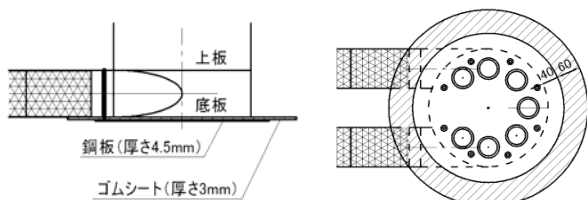


図-3 表-1の検討形状別の吸引部鉛直位置の時間変化

なお、実験中、吸引部は上から吊らずに自重で潜行するようにしたが、水槽の深さが限られているため、-2.0m近く潜行した場合には吸引部が吊られる状態となるようワイヤーを設置した。図-3を見ると、ケース1及びケース2は実験開始から20分程度で吸引部鉛直位置が1m程度下った。他方、ケース3及びケース4は、同時刻で1.5mを超えて潜行した。このことから、ゴムを設置した方が、堆砂面への追従性が向上することが判明した。また、ケース1とケース2を比較すると、20分を超えると、ケース1は潜行しづらくなった。吸引部底部にある塵芥止めが潜行に対して抵抗となったことが考えられた。また、ケース3とケース4を比べると、表-1を見ると、開始直後(深さ0m~0.5m)ではケース3の潜行速度が速いが、深さが0.5m以降となると、ケース4の方が潜行速度が速くなった。これは、実験初期においては底面部に段差のないケース3が堆砂面に対し吸着が強くなるが、ある程



a) 排砂管吸引部 (左: 側面、右: 底面)



a) 排砂管吸引部 (左: 側面、右: 底面)

図4 平成25年度における検討最良形状(ケース4)

度潜行し、土砂吸引が進むとケース3の形状では、吸引部底面のゴムが吸引口に巻き込まれ堆砂面への追従ができなくなり、潜行速度がケース4に比べて遅くなったと考えられた。これらから、図-4に示す形状が、現時点において吸引部の堆砂面への追従に関する課題に対しては最良の形状であると判断した。

なお、4ケースとも排砂は行うことができ、これまで確認してきた「潜行吸引式排砂管」の機能の有効性を改めて確認できた。

2.2 現地実証試験

2.2.1 現地実証試験の準備

以上の検討結果を踏まえ、現地実証試験を実施した。現地実証試験は千葉県が管理する養老川の中流部にある高滝ダムの貯水池内の日竹貯砂ダムにおいて、準備期間を含めて2013年11月18日～11月23日の間に管径200mmの排砂管を用いて実施した。潜行吸引式排砂管を用いた排砂装置の実用化のためには、関係者との合意形成や装置の設置方法における事前の検討・知見も重要となる。そこで、今回の現地実証試験における準備状況をまず記載する。

① 関係者との合意形成

高滝ダム^{5),6)}は、2級河川の養老川水系養老川に平成2年に21年の歳月をかけ、373億円、180haの用地買収、110戸におよぶ家屋移転という多大な地元協力により建設された。洪水調節、流水の正常な機能の維持(不特定用水)、水道水の確保を目的とする、堤高24.5m、堤頂長379m、総貯水容量1,430万 m^3 (うち、有効貯水容量

1,250万 m^3)の多目的ダムである。貯水池は農業用水の取水、ワカサギやアユの漁場、観光としても利用されており、地域にとって重要な資源、財産となっている。一方、高滝ダムでは、近年、年約10万 m^3 の土砂が貯水池に流入し、堆砂対策がダムを管理していく上で、重要となってきており、現在、貯水池内で堆砂の掘削を行うとともに、2基の貯砂ダムを設置するなど、総合的な堆砂対策を進めている。

本試験を実施するきっかけとなったのは、以上のような状況を平成25年8月に視察したことに始まる。今回の試験サイトとなる日竹貯砂ダムを視察し、現地実証試験を行うに当たって、適当な土砂、落差を有していたことから、千葉県へ現地実証試験の実施について打診し、趣旨に賛同いただいた。その後の10月上旬には河川の一時使用及び日竹貯砂ダムの施設借用の許可をいただくとともに、25年度に予定されていた日竹貯砂ダムにおける堆砂除去工事の期間についても調整をいただけることとなった。また、日竹貯砂ダムの直下流はアユの漁場であり、農業用水の取水口も設置されていたことから、養老川漁業協同組合、加茂土地改良区へも試験の目的、意義についてご説明し、ご理解いただいた上で、実証試験を実施できることとなった。なお、これらの調整の際に、本技術の早期開発、実用化を期待する意見もいただいた。

② 事前調査、実施計画の立案、関係機材の設置

①の作業と併行して、数回にわたり日竹貯砂ダム周辺を事前に現地調査した上、現地実証試験のための実施計画を検討・立案し、試験サイトへ関係機材を設置した。

具体的には、日竹貯砂ダムにおける流況、堆砂状況、構造等に関する情報や、試験サイトへ完全かつ確実に関係機材を運搬できるのかといったアクセス性に関する情報の収集を行った。その結果、日竹貯砂ダムのダム高は3.2m、ダム頂長は82.1mであり、平水時であれば、越流水深数センチ、水位差は約1.6m程度確保できることなど現地実証試験を行う上での基本的な詳細情報を収集した。また、高滝ダム管理事務所へのヒヤリングから貯砂ダムの堆砂は、礫分はなく、砂分が約8割を占め、これまでの実験から十分土砂の吸引が可能と考えられた。また、千葉県施工の工事と交錯しないよう業者との調整も行い、これらの情報を整理し、現地実証試験を実現させるための実施計画を立案した。

なお、2013年10月の台風26号の襲来により、養老川は大出水となり、日竹貯砂ダムにおいても水位が大幅に上昇し、洪水とあわせて、上流からは大量の土砂も流入したことから試験サイトの再調査と整備を緊急に行った。

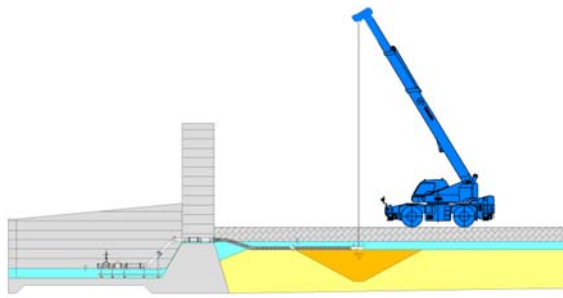


図-5 試験装置全体図

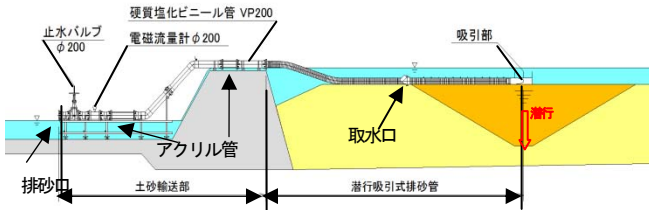


図-6 試験装置詳細図



図-7 潜行吸引式排砂管設置状況(11/19)



図-8 潜行吸引式排砂管設置状況(11/19)



図-9 潜行吸引式排砂管設置状況(11/19)

以上の検討を行い、2013年11月18日に排砂管、計測機器、その他機材等を、茨城県つくば市の土木研究所つくば中央研究所から高滝ダム日竹貯砂ダムまでユニック車2台で運搬した。試験装置の概要図を図-5、図-6に示す。ダム上流は試験終了後に吸引部を回収できる等の構造とするため、試験実施中は、25t ラフタークレーンと吸引部を繋げた状態として、潜行吸引式排砂管（主に吸引部は鋼製、その他は繊維補強ポリ塩化ビニール樹脂管（質量9720g/m、許容圧力0.14MPa、許容曲げ半径1050mmで構成）を設置、ダム下流は土砂輸送部（硬質塩化ビニール管、電磁流量計、止水バルブ、アクリル管）を設け、貯水池の水位差のエネルギーを活用して排砂できるように、装置を設置した。試験を行う準備としての装置の設置手順は、図-6の土砂輸送部を貯砂ダムに固定した後、潜行吸引式排砂管を土砂輸送部に連結した上で、25t ラフタークレーンで吸引部を水中において吊りながら、徐々に管内を満水にした後、土砂輸送部も充水し、ダム頂部の管を真空状態として、下流端のバルブを一気に全開にし、サイフォンを形成させ、装置の設置を行った。潜行吸引式排砂管の設置時間は2時間程度で、比較的簡便に設置することができた。図-7～図-9に潜行吸引式排砂管の設置状況を示す。

2.2.2 現地実証試験の試験ケース・計測方法

試験は表-2に示す4ケースを実施した。貯砂ダムにおける試験時の全景を図-10に示す。2.2.1で設置した装置

表-2 試験ケース

ケース	実施日	時刻	塵芥止め	排砂管長	初期条件(吸引部設置時)	吸引部重量
1	11月20日	12:30~13:10	あり	25m	下流バルブ全開	263kg
2(予備試験)	11月20日	13:30~15:20	あり	25m	下流バルブ全開	263kg
3	11月22日	9:27~11:05	なし	15m	下流バルブ全閉	209kg
4(予備試験)	11月22日	11:15~12:50	なし	15m	下流バルブ全開	209kg



図-10 日竹貯砂ダム(試験時に左岸側から撮影)

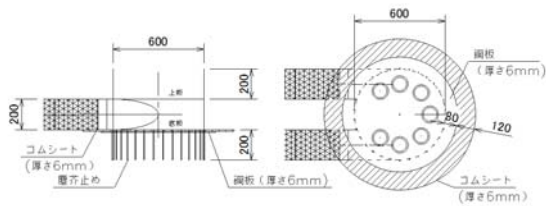


図-11 潜行吸引式排砂管吸引部形状（ケース1）

において、吸引部を水中で吊った状態から、堆砂面に設置することで試験を開始することとした。また、2013年11月18日から2013年11月23日の間は、周辺での降雨は全くなく、貯砂ダムへの流入量が $0.73\text{m}^3/\text{s} \sim 0.88\text{m}^3/\text{s}$ （貯砂ダム越流水深8cm程度）と安定し、水位差は約1.7mに維持されたことから、トラブルなくスムーズに関係機材を設営から撤去まで行うことができた。なお、ケース1及びケース2の吸引部の形状は、室内実験の結果と塵芥による影響も考慮し、図-11の形状で実施し、ケース3及びケース4については、室内実験におけるケース4の形状（図-4）で実施した。また、ケース2とケース4は実用機能上の知見を得ることを主眼とした予備試験として実施した。計測を行った項目と計測方法を以下に示す。

- ① 上下流水位：小型のメモリ式水位計（大起理化工業製、ダイバー水位計）を上下流に設置し、上流水位と下流水位を観測し、貯砂ダムの水位差の時間変化を記録した。
- ② 管内流速：土砂輸送部に電磁流量計を設置し、管内流速の時間変化を記録した。
- ③ 吸引部の鉛直位置：吸引部上面の上流、下流、左岸側、右岸側（排砂管の上流から下流をみる方向を基準とする）の4箇所（上下流水位の計測に用いたのと同様のメモリ式水位計を設置して各箇所の鉛直位置の時間変化を記録し、平均値を吸引部鉛直位置とした）。
- ④ 管内圧力：図-12に示す位置で排砂管にピエゾ管を設置し、管内圧力分布を計測した。

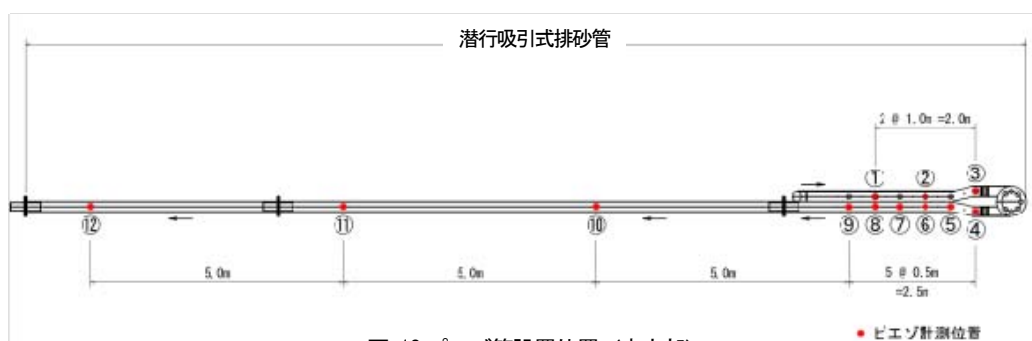


図-12 ピエゾ管設置位置（赤点部）

- ⑤ 吊り荷重：25t ラフタークレーンに荷重計を設置し、排砂管吸引部における吊り荷重を計測した。
- ⑥ 土砂濃度：放流バルブの下流で放流水を採水して適時に土砂濃度を計測した。
- ⑦ 管内流況、排砂状況：カメラとビデオカメラにより、土砂輸送部に設置したアクリル管の管内流況と排砂口において排砂状況を記録した。
- ⑧ 下流濁度：下流河川への影響と土砂濃度との相関関係を検討するため、放流管約5m下流に濁度計を設置し、濁度（NTU）を計測した。
- ⑨ 河床形状：ケース1及びケース3について実験の前後で縦断方向、横断方向の河床形状を測量した。
- ⑩ 土砂の粒度：実証試験後、ケース3について吸引部設置位置周辺において柱状でサンプル採取した土砂の粒度分布をふるい分け試験により求めた。また、排砂口から排砂された土砂のうち比較的大きな礫を採取、整理した。
- ⑪ ダム流入量：千葉県高滝ダム管理事務所からダム直上流にある流量観測所で計測された日竹貯砂ダムへの流入量をヒヤリングにより収集した。

2.2.3 現地実証試験の検討結果

表-2に示したケースの実証試験の結果を以下に示す。

1) ケース1（11月20日 12:30~13:10）

貯砂ダムから上流約20m、流心付近に吸引部を設置するケースとして実施した。また、排砂管長は25m、吸引部形状は塵芥による吸引口の閉塞の懸念もあったことから、24年度の実証試験と同様に塵芥止めを設置する図-11に示す形状で実施した。一方、24年度の実証試験とは異なり、準備段階から、水中に吸引部を設置する必要があったため、塵芥止めによる、吸引部底部の堆砂面への接着不足による初期の潜行速度の低下を防ぐ目的で、24年度の実証試験と比べ約50kgの重りを吸引部上面に追加し、吸引部重量を263kgとして実施した。また、運用面での知見を得ることを目的として、試験開始時には

吸引部を堆砂面ギリギリで吊り、下流バルブを全開にして管内に流水が流れている状態とした上で、吸引部の吊り荷重を下げ、堆砂面に設置することとした。また、吸引部の急激な潜行による埋没によって排砂管が回収できない可能性もあったことから、ケース1の実施中は、ラフタークレーンの吊り荷重を無荷重とせず、吸引部を少し吊りながら徐々に下げ、試験を実施した。

① 吸引部鉛直位置と吊り荷重

吸引部鉛直位置と吊り荷重の関係を図-13 に示す。12:30 においては、吸引部鉛直位置は初期河床の 0 となっており、荷重計の値は、排砂管が吊られている状態となっていることから約300kgを示している。12:33 頃に、吊り荷重を一気に下げると、鉛直位置は 12:42 頃までに 50cm 程度下がった。一方、荷重計の値は土砂吸引が進んだことで約 300kg に近い値に回復し、再び排砂管が吊られている状態となった。このため、再度吊り荷重を一気に下げた。しかし、吸引部鉛直位置は、一端下がったものの、12:42 頃の-0.6m 付近からの降下傾向は鈍化し、排砂管が堆砂面にほぼ支えられている状態となってしまった。この状況を 12:53 頃まで続けた。なお、12:53 頃、13:05 頃には、土砂吸引がほとんど停止してしまつたと判断したことから、堆砂に衝撃を与えて乱し、土砂吸引を進行させようと、一旦排砂管を吊りあげ、同位置に排砂管を一気に落下させる操作をしたが、吸引部鉛直位置が-0.7m 付近で、停止してしまつた。なお、このケースでは、吸引部が土砂中に潜行することがなかった。

② 管内流速（流量）と吸引部鉛直位置

管内流速と吸引部鉛直位置の計測結果を図-14 に示す。吸引部鉛直位置については、上述したとおりであるが、土砂吸引を開始した 12:32 過ぎに若干管内流速が低下するものの、管内流速は、約 2.3m/s（約 75L/s）程度を示し、一定であった。

③ 土砂濃度、下流濁度

図-15 に図-6 の排砂口の下流に設置した濁度計の数値と人力において排砂口の水をサンプル採水し、分析した土砂濃度の結果を示す。ここで、土砂濃度は、採取した水と土砂について「土砂体積 / (水体積 + 土砂体積)」から算定した体積濃度であり、土砂体積に空隙は含んでいない。図-15 から判るとおり、12:38 頃、12:50 頃、13:08 頃に土砂濃度を計測したものの、計測結果は 1.0%未満となつてしまつた。一方、濁度計の数値を見ると、12:35

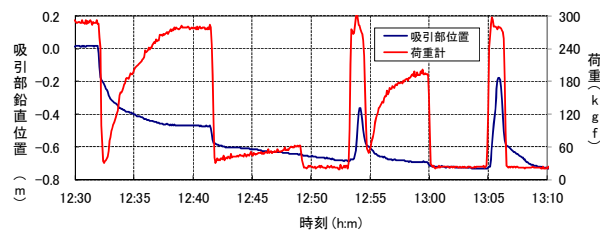


図-13 吸引部鉛直位置と吊り荷重の関係

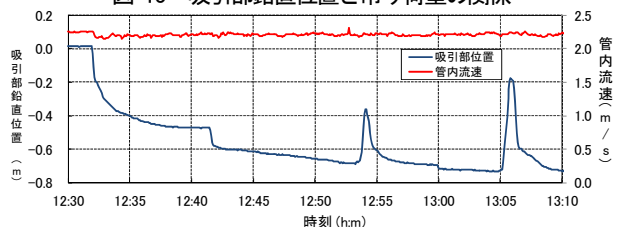


図-14 管内流速と吸引部鉛直位置の関係

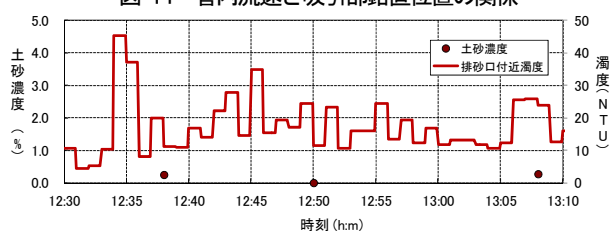


図-15 排砂口付近濁度と土砂濃度の関係

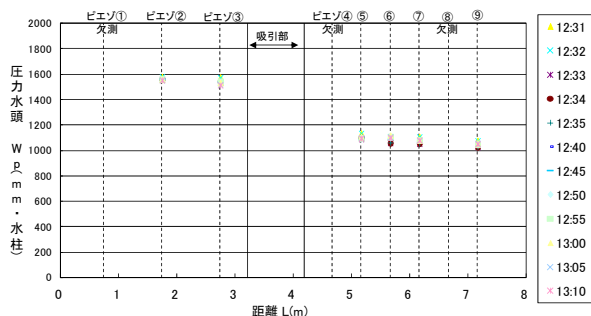


図-16 排砂管内のピエゾ水頭分布

頃に最大濃度約 45NTU が検出され、土砂吸引・排砂が開始された直後に土砂濃度の最大値が検出されたのではないかと考えられた。しかし、土砂濃度の計測については、人力によって行っており、当初の予想では、室内実験での経験から、吸引・排砂が長く継続し最大値は遅い時刻に表れると考えていたことや、排砂口からの放流量が多かったため、安全面から頻度を高く計測できなかったこと、土砂濃度を計測していた下流では吸引部の状況を的確に把握できなかったことが土砂濃度の最大値を計測できなかった原因であり、人力での土砂濃度の計測方法の限界が明らかになった。

④ エネルギー損失

図-16 に排砂管の管軸に沿って計測した管内のピエゾ水頭の分布を示す。図-12 に示したとおり、取水口から

吸引部までの管に3箇所、吸引部から下流に向けて管の9箇所の上面にピエゾ管を設置し、ピエゾ水頭分布を計測した。しかし、①、④、⑧、⑩、⑪、⑫のピエゾでの計測が欠測となった。

取水口から吸引部までの管の底面には吸引口があり、堆砂上に管がある状態では吸引口から水を吸い込むため、管内は土砂の通過が少なく、圧力の低下量は小さい。吸引部直下流では、吸引部を通過することで大きな圧力低下が認められ、その後の管内でも土砂の流下にともない上流管と比較して圧力の低下が生じている。

体積土砂濃度と吸引部の上流管及び下流管、吸引部のピエゾ水頭の圧力低下勾配を用いて求めたエネルギー損失係数の関係を図-17、図-18に示す。エネルギー損失係数の算定には、以下の式を用いた。

$$f = \frac{h_L D}{L} \frac{2g}{V^2} \quad (1)$$

ここで、 f : エネルギー損失係数、 h_L : 圧力損失水頭(m)、 D : 管径(m)、 g : 重力加速度(m/s^2)、 L : 管長(m)、 V : 管内平均流速(m/s)を表す。図-17から、上流管、下流管のエネルギー損失係数は0.05以下である。13:00頃には、上流管の損失係数が下流管の損失係数を上回った。これは、吸引部で何らかの事象が起こったことが伺える。なお、実験実施前に行った清水時の損失係数は上流管で0.005、下流管で0.02であった。今回の試験では、管が土砂中に潜行することがなかったため上流管の損失係数が小さいが、潜行した場合は大きくなる可能性があり注意が必要である。

また、吸引部エネルギー損失係数の算定には、以下の式を用いた。

$$f_B = h_B \frac{2g}{V^2} \quad (2)$$

ここで、 f_B : 吸引部エネルギー損失係数、 h_B : 吸引部の圧力損失水頭(m)を表す。図-18より、吸引部のエネルギー損失係数は、概ね1.6~1.7程度の値を示し、曲りによる損失である。また、土砂濃度の大きかったとみられる12:33頃では、損失係数が1.87と大きくなり、吸引部での土砂吸引による土砂濃度の上昇に伴って上昇したと考えられる。なお、実験実施前に行った清水時の損失係数は1.7~1.8程度を示した。試験の後半においては、排砂管が曲がったこと、吸引部が閉塞したことで損失係数が低下傾向となったと考えられる。

⑤ 排砂状況・河床形状・排砂量

試験の排砂前後の河床形状計測結果を図-19、図-20に

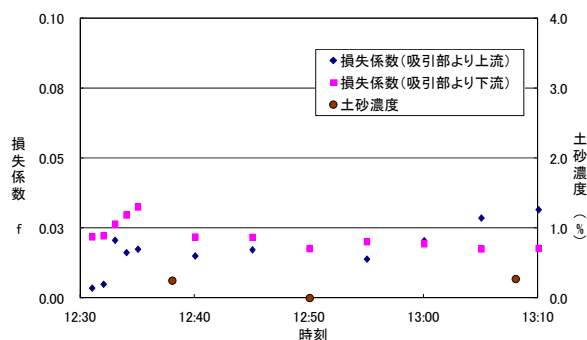


図-17 管路部のエネルギー損失係数及び土砂濃度の関係

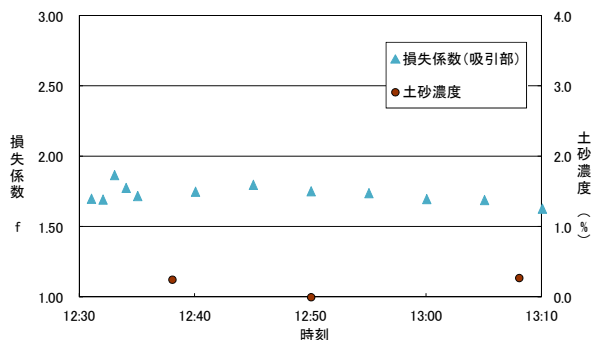


図-18 吸引部のエネルギー損失係数及び土砂濃度の関係

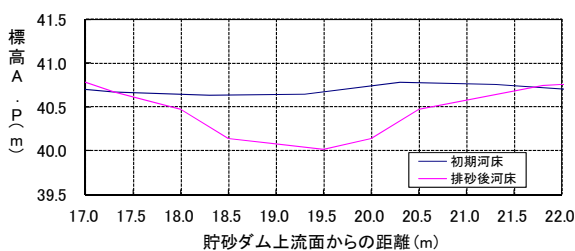


図-19 排砂前後の縦断河床形状 (ケース1)

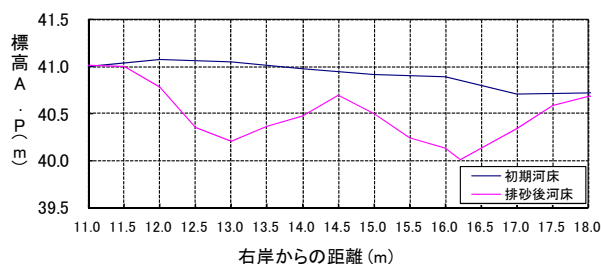


図-20 排砂前後の横断河床形状 (ケース1)

示す。堆砂は吸引部を中心に吸引され、頂部にすり鉢状のくぼ地が形成された。排砂により形成されたすり鉢は、おおそ直径5m程度、深さ0.8m程度であり、縦断図と横断図より算定した排出土砂量(空隙込み)は推定3.4m³であった。なお、図-20の右岸からの距離12m~14m付近のくぼみはケース2の結果を反映している。

図-21~図-24に試験前後の排砂状況の写真を示す。図-21、図-22からは、土砂の吸引が進み、排砂に伴い、す



図-21 試験開始前の吸引部の状況 (11/20 12:30)



11/20 13:21

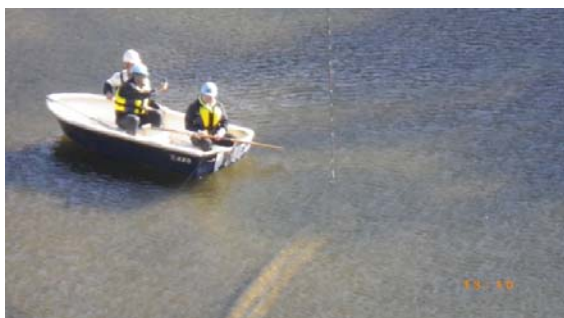


図-22 試験終了時の吸引部の状況 (11/20 13:10)



11/20 13:29

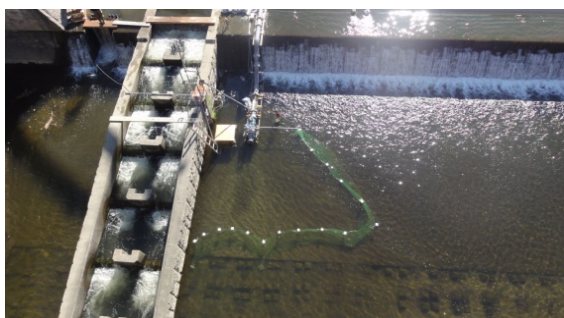


図-23 試験開始前の下流の状況 (11/20 10:16)



11/20 14:36

図-25 吸引部移動状況 (ケース1～ケース2)

潜行吸引式排砂管を用いて、貯水池の水位差のエネルギーを活用して自然堆砂を排砂できることが明らかとなった。

2) ケース2 (11/20 13:25～15:26)

ケース2は、ケース1による土砂の吸引・排砂停止の原因を特定することや土砂の吸引・排砂が停止した場合でも、吸引位置を迅速に変更できることによって柔軟な運用が可能かどうかという実用機能上の知見を得ることを主眼とし、貯砂ダムから上流約20m付近右岸側に吸引部を設置する予備試験として実施した。試験の条件は、ケース1と同様とした。図-25にケース1終了時(13:21)からケース2へ装置を移動(13:29)させ、ケース2を行った様子(14:36)を示す。吸引位置の変更は約9分程度で、堆砂面に吸引部を設置した直後に、土砂吸引・排砂



図-24 試験実施(ケース2)後の下流の状況(11/20 15:28)

り鉢が形成されている様子が判る。今回のケースでは、吸引部が土砂中に潜行することではなく、常に吸引部が土砂上にある状態で土砂吸引が進行した。潜行しなかったのは、徐々に吸引部を潜行させたことや塵芥止めの存在が要因として考えられる。また、図-23、図-24を見ると、ダム下流へ潜行吸引式排砂管によって排砂された土砂を確認することができ、比較的小さな水頭差においても、

再び開始された。このことから、吸引・排砂が停止した場合でも、吸引部を迅速に移動できれば吸引位置を変更することによって、多くの土砂を排出する運用も可能であることが明らかとなった。なお、ケース2においても吸引部が一定程度降下した後、土砂の吸引・排砂が停止した。このため、排砂により形成されたすり鉢状の頂点部においてエクマンバージを用いて堆砂を採取したところ、吸引口の大きさよりも大きな礫を採取することができ、本ケースにおいては大きな礫の存在が土砂の吸引・排砂を停止させたのではないかと考えられた。

ケース1及びケース2の試験からは、吸引部が一定程度下がるものの、土砂の吸引・排砂が停止してしまう原因としては、塵芥止めが潜行に対し、抵抗となったことや、吸引部底部に巨礫等があり、吸引部がその物体に支持されてしまったことで、土砂吸引・排砂が停止したのが原因と考えられた。

3) ケース3 (11/22 9:27~11:05)

ケース3は、ケース1及びケース2の試験における知見を踏まえ、貯砂ダムから上流約10m、右岸付近に吸引部を設置するケースとして実施した。また、排砂管長は15mとし、ケース1及び2の結果を踏まえ、吸引部の形状はケース1の形状から図-4の形状(塵芥止めを除去した形状)とし、ケース1で吸引部に追加した約50kgを除去して209kgで実施した。また、運用面での知見を得ることを目的として、ケース1とは異なり、試験開始時には下流バルブを全閉にし、管内に流水が流れていない状態で吸引部を堆砂面に設置した上で、バルブを全開として実施した。また、ケース1の知見も踏まえ、ラフタークレーンの吊り荷重を試験中は無荷重とした。

① 吸引部鉛直位置と吊り荷重

吸引部鉛直位置と吊り荷重の関係を図-26に示す。図-26から判るように、試験の初期から吸引部は全く吊らずに吸引管の自重で潜行させることとしたため、荷重計の値は試験開始と同時にほぼ0となった。吸引部鉛直位置は、初期河床を0としている。9:27に堆砂面に吸引部を設置した後は、吸引部鉛直位置が急激に下がり、約1.1m下がり、9:40頃に吸引部鉛直位置が下がらなくなった。

② 管内流速(流量)と吸引部深さ

管内流速と吸引部鉛直位置の計測結果を図-27に示す。

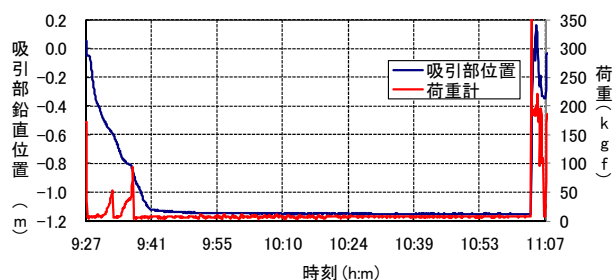


図-26 吸引部鉛直位置と吊り荷重の関係

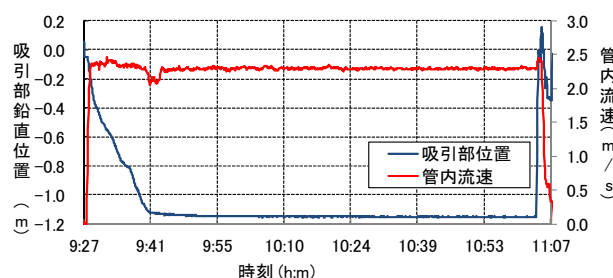


図-27 管内流速と吸引部鉛直位置の関係

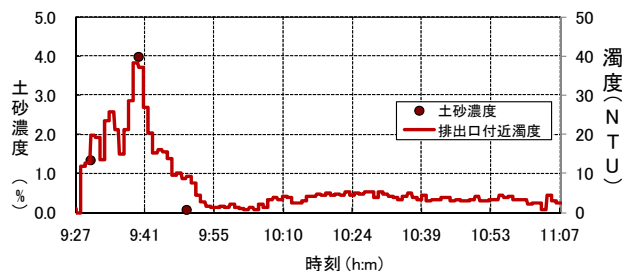


図-28 排砂口付近濁度と土砂濃度の関係

管内流速は約2.3m/s(約75L/s)程度で維持されるが、9:41頃まで低下傾向を示した。この間、吸引部は土砂中に徐々に潜行したが、全てが埋没することは無かった。堆砂面への追従性が小さかったことや繊維補強ポリ塩化ビニール樹脂管の屈とう性が要因として考えられる。また、実験開始から約15分前後で、管内流速が一時的に2.0m/sに急激に低下する現象がみられ、吸引・排砂は停止した。このとき、図-6の取水口では吸い込み渦が発生し、吸引部において何らかの閉塞が推察された。

③ 土砂濃度、下流濁度

図-28に図-6の排砂口下流に設置した濁度計の数値と排砂口から排出された水をサンプル採水し、分析した土砂濃度の結果を示す。

ケース1の経験も踏まえ、試験開始直後から土砂濃度が低下するまでの間、できるだけ土砂濃度を計測することとし、9:30頃、9:40頃、9:50頃に計測した。図-28を見ても判るとおり、濁度が高い場合に土砂濃度も高くなるという相関関係が見て取れた。また、9:40頃に採水した土砂濃度については図-28で判るとおり、約4%の土

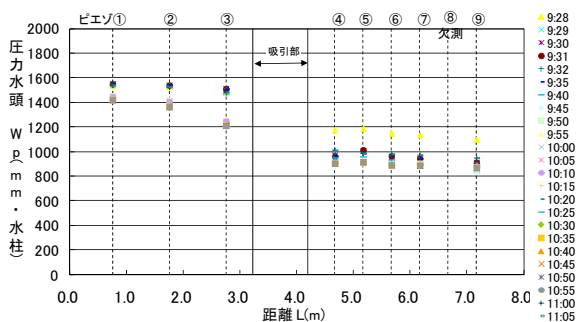


図-29 排砂管内のピエゾ水頭分布

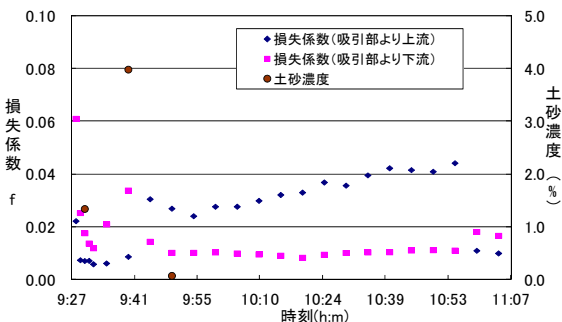


図-30 管路部のエネルギー損失係数及び土砂濃度の時間変化

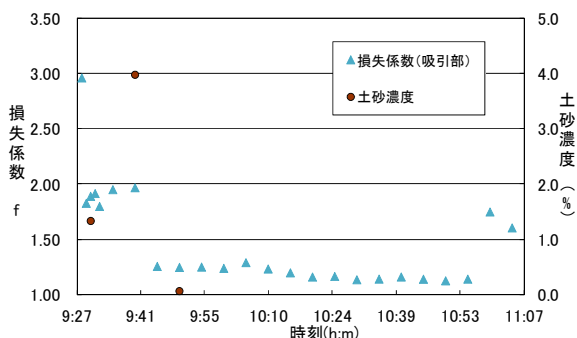


図-31 吸引部のエネルギー損失係数及び土砂濃度の時間変化

砂濃度が計測でき、この時の濁度の最大値が約 40NTU を示したことから、9:40 頃にこのケースの土砂濃度の最大値が現れたものと考えられた。

出水時に数千から数万 m^3 の土砂を排出することを想定すると、土砂供給設備の土砂濃度は 2~5%程度が必要と試算しており、試験の初期の放流において、目標とする土砂濃度が確認できた。

④ エネルギー損失

図-29 に排砂管の管軸に沿って計測した管内のピエゾ水頭の分布を示す。図-12 の①~⑨吸引部から上流の管の3箇所、下流の管の6箇所の上にピエゾ管を設置し、ピエゾ水頭分布を計測した。しかし、⑧のピエゾでの計測が欠測となった。

ケース 1 と同様、吸引部上流の管では底面に吸引口があり、堆砂上に管がある状態では吸引口から水を吸い込

むため、管内は土砂の通過が少なく、圧力の低下量は小さい。吸引部直下流では、吸引部を通過することで大きな圧力低下が認められ、その後の管内でも土砂の流下にとれない上流管と比較して大きな圧力低下を生じている。

体積土砂濃度と吸引部の上流管及び下流管、吸引部のピエゾ水頭の圧力低下勾配を用いて求めたエネルギー損失係数の関係を図-30、図-31 に示す。エネルギー損失係数の算定には、ケース 1 と同様の式を用いた。

図-30 より、上流管、下流管のエネルギー損失係数は概ね 0.05 以下であるが、試験の初期は下流管の損失係数が高いが、試験の後期においては上流管の損失係数が高い結果を得た。上流管については、土砂濃度が大きくなる 9:40 頃を境に、若干損失係数が増大した。これは、吸引部の潜行に伴って排砂管が曲がったこと、又は、吸引部において生じた閉塞に伴う増大と考えられる。一方、下流管については、9:40 頃に、損失係数が大きくなった。これは、土砂濃度が大きくなったことで、排砂管の損失係数も増大したものと考えられる。なお、上流管、下流管も試験初期においては、若干、損失係数が高い値を示した。これは、試験の初期にバルブを全開から一気に全開としたことによる管内流況の大きな変化によるものと考えられる。9:40 以降下流管で損失が小さいのは吸引部が閉塞したためと考えられる。なお、実験実施前におこなった清水時の損失係数は上流管で 0.01、下流管で 0.02 であった。なお、今回の試験でも、管が土砂中に潜行することがなかったため上流管の損失係数が小さいが、潜行した場合は大きくなる可能性があり注意が必要である。

また、体積土砂濃度と吸引部上下流の圧力低下から求めた吸引部のエネルギー損失係数の関係も図-31 に示す。吸引部における損失係数については土砂を多く吸引している時間においては、2.0 近くの損失係数となり、土砂吸引・排砂が停止してからは、1.1~1.2 程度となった。なお、実験実施前におこなった清水時の損失係数は 1.6~1.7 程度を示していた。この土砂吸引・排砂が停止してからの損失係数が 1.1~1.2 程度となった理由については、吸引部での何らかの閉塞に伴い、損失係数が小さくなったものと考えられる。

⑤ 排砂状況・河床形状・排砂量

試験の排砂前後の河床形状計測結果を図-32、図-33 に示す。また 9:33 と 9:42 の試験中の状況を図-34 に示す。堆砂面は吸引部を中心に土砂が吸引され、頂部にすり鉢状のくぼ地が形成されたことが判る。約 1.6m の水位差で、排砂により形成されたすり鉢は、おおよそ径が 3.5~

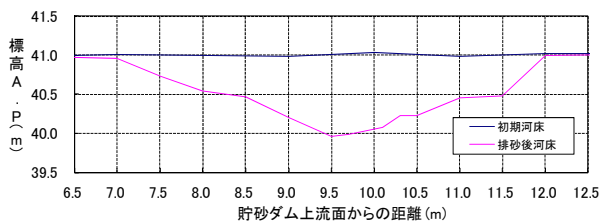


図-32 排砂前後の縦断河床形状 (ケース 3)

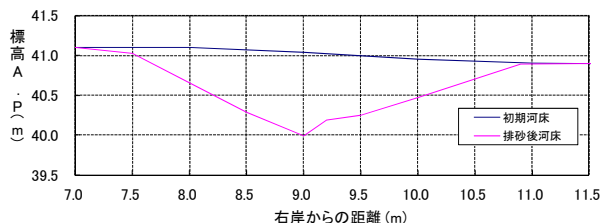


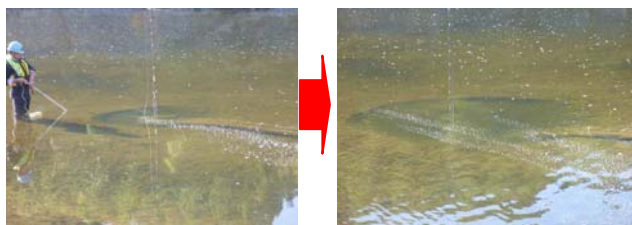
図-33 排砂前後の横断河床形状 (ケース 3)



図-37 試験実施中の下流河川の状況 (11/22 9:37)



図-38 試験実施後状況 (11/22 10:37)



試験実施直後 (9:33) 試験実施後 (9:42)
図-34 試験前後の吸引部の状況 (ケース 3)



図-35 試験実施中の状況 (11/22 9:37)



図-36 試験実施中の排出口付近の状況 (11/22 9:37)

5.0m、深さ 1.1m であり、縦断図と横断図より算定した排出土砂量 (空隙込み) は推定 5.5m³ であった。また、図-34 から判るとおり、試験中、吸引部からは土砂中に含まれていたとみられる空気が泡として浮かんだが、濁水



図-39 排砂口から排出された礫

の発生はほとんどみられなかった。一方、図-35、図-36 から排砂口付近では前述のとおり濁度は比較的高くなったものの、図-37 のダム下流約 20m 付近では、貯砂ダムへの流入量が 0.75m³/s に比べ、排水量が約 75L/s と 1/10 であったため、希釈され、目視では下流河川への濁水の大きな影響は確認されなかった。また、図-38 にケース 3 終了時の排出口付近の土砂の排出状況を示す。土砂の排出により、排出口下流は土砂で覆われ堆積している様子が判る。この排出された土砂から比較的大きな礫を抽出したものを図-39 に示す。この礫を調査したところ、比重については 1.58~1.85 程度で比較的小さいものの、吸引部の吸引径よりも大きい長径で 140mm の礫も排砂されたことが判った。

4) ケース4 (11/22 11:15~13:00)

ケース4は、ケース1からケース3による土砂の吸引・排砂停止の原因を特定することや土砂の吸引・排砂が停止した場合でも、吸引位置を迅速に変更できることによって柔軟な運用が可能かどうか、装置の起動の初期においてバルブを全開とすべきなのか、全閉とすべきなのかという実用機能上の知見を得ることを主眼とし、貯砂ダムから直上流の中心付近に吸引部を設置する予備試験として実施した。試験の条件は、ケース3と基本的には同様であるが、試験初期に、堆砂面に吸引部を設置する前にバルブを全開とし、管内に流水が流れている状態で、堆砂面に吸引部を設置し実施した。図-40 にケース3終了時(11:06)からケース4へ装置を移動(11:16)させ、ケース4を行った(12:23)様子を示す。吸引位置の変更は約10分程度で、堆砂面に設置後直ぐに、土砂の吸引・排砂が開始されたことから、土砂の吸引・排砂が停止した場合でも、迅速に吸引位置を変更する運用を行うことによって、より多くの堆砂が排出可能であることが判った。また、装置の起動の初期におけるバルブの全開、全閉の違いについては大きな違いが無いことが明らかとなった。また、ケース4においても吸引部が一定程度降下した後、土砂吸引・排砂が停止してしまった。

ケース1～4の土砂の排出量は推定で10.3m³となったが、どのケースも吸引部が一定の深度に到達すると、土砂吸引・排砂が停止してしまう現象がみられた。この原因を特定するため、現地実証試験の実施期間中に、試験実施位置周辺で、単管パイプを打ち込むなどして水中の堆砂中の性状調査を試みたが、特別な水中の堆砂を調査できる設備を有していなかったことから、調査には限界があり、試験期間中の堆砂調査は十分に行うことができず、土砂の吸引・排砂停止の原因を特定することはできなかった。

2.2.4 追跡調査

以上の現地実証試験の結果を受け、土砂の吸引・排砂が停止した原因を特定するため、追跡調査を行うこととした。具体的には、実証試験の後に、千葉県において日竹貯砂ダムの水位を低下させて堆砂を搬出する工事が予定されていたため、この工事に併せて追跡調査を行うこととした。12月初旬に千葉県高滝ダム管理事務所へのヒヤリングとケース3で実施した位置付近の堆積土砂について、図-41に示すような柱状サンプリングによる堆砂状況調査を実施した。ヒヤリングからは貯砂ダムでは2



11/22 11:06



11/22 11:18



11/22 12:23

図-40 吸引部移動状況



図-41 追跡調査(柱状サンプリング)の様子

年に1度水位を低下させて排砂工事を実施しており、概ね1m程度掘削していること、柱状サンプリングによる堆砂状況調査からは、図-42～図-45に示すとおり、概ね吸引部停止位置に厚さ10cm程度の葉の層が広く分布していることが判った。これらの位置関係を整理した図を図-45に示す。吸引停止位置、葉の層、掘削河床の高さがほぼ一致した。これらから掘削河床において葉が集積、



図-42 追跡調査時に発見した葉の層



図-43 追跡調査時に発見した葉の層 (拡大)



図-44 追跡調査時に発見した葉の層の例

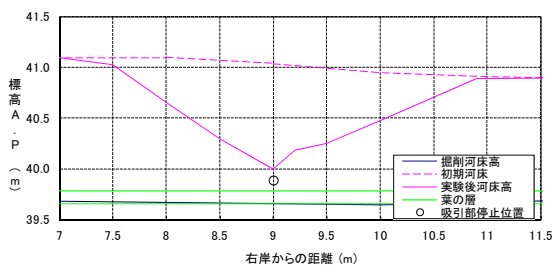


図-45 吸引部停止位置と追跡調査結果の比較 (横断面)

層が形成され、吸引部が層に到達し、吸引部が閉塞し、これが、土砂の吸引・排砂が停止した原因と推定した。また、柱状サンプリングから得られた表層土砂と図-46に示す葉の層における土砂(葉を除く)の粒度分布図を図-47に示す。表層の土砂は、現地実証試験前に高滝ダム管理事務所からヒヤリングした結果と同様の粒度分布が得られたが、葉の層における土砂については、表層の土砂に比べてシルト分が多く含まれていることが判った。



図-46 柱状調査から得られた葉の層を含む土砂

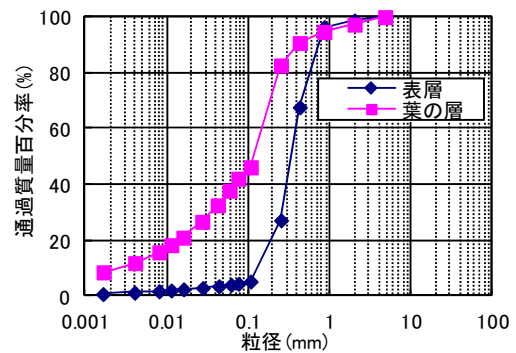


図-47 表層と葉の層の土砂の粒度分布(柱状サンプリング)

3. 流量調節設備の検討

土砂供給施設には、下流への土砂流量調節設備が必要になるが、通常の流水のみを対象とする設備と比較して、高濃度の土砂等が流下するため、土砂等の戸溝等への噛み込みや摩耗損傷等への対策が必要になる。24年度においては、既往の排砂設備に適用されている技術(排砂設備と土砂バイパス)について、文献等及びヒヤリングによって調査・整理を行い、本課題で検討している土砂供給施設に関しては、既存の土砂バイパスの事例よりは、排砂設備の事例が参考になると考えた。

25年度においては、2.1で示した室内実験施設において、表-3に示す量の塵芥模型を含めた形で図-4に示す形状での土砂排出試験を通じて、流量調節設備の検討も行った。実験は図-48に示すとおり、塵芥模型を人力によってできるだけ均等に土砂に混入するようにし投入した後、図-49に示すとおり、潜行吸引式排砂管を堆砂面に設置して行った。実験の結果は、これまでの土砂のみの実験と同様に土砂の吸引・排砂が進むものの、試験後には図-50に示すとおり、吸引部底部に塵芥模型が集積することが判った。また、一つのケースでは、放流設備としてバタフライバルブを設置したことから、図-51に示すとおり、吸引部の底部に集積した塵芥模型が一気に吸

表-3 投入した流木模型の条件

流木形状	流木長さ	投入量(本)		体積 (m ³)	土砂量(m ³) 空隙込み	流木密度
		埋設	表層			
角	20	80	10	0.0058	30.0	0.11%
	15	50		0.0024		
	10	250	30	0.0091		
丸	5	500	60	0.0091		
	20	20		0.0013		
	10	60		0.0019		
	5	120		0.0019		
合計		1080	100	0.0316		



図-51 バタフライバルブ設置位置の流木模型の閉塞状況



図-48 流木模型投入状況



図-49 室内実験実施前の状況



図-50 室内実験実施後の吸引部撤去後の状況

引されたことによってバタフライバルブに塵芥模型が引っ掛かり放流管の閉塞が起こってしまう現象が生じた。この実験を通じて、塵芥が集積している堆砂を土砂吸引する場合には、流量調節設備としては、スルースバルブを除く、バタフライ型のバルブを含むバルブ全般は設置

に適していないことが判った。引き続き新たな土砂供給施設における流量調節設備について、検討を進めることとする。

4. まとめ

本年度において得られた知見等は以下のとおりである。

① 室内試験から得られた知見等

- 1) 潜行吸引式排砂管の検討については、24年度の吸引部の形状から検討を進め、塵芥止めを除去し、吸引部底面にゴムシートを固定することで、堆砂への追従性を強化する形状に改良することができ、現時点での最適な形状を得た。
- 2) 室内試験の結果から、これまで確認してきた「潜行吸引式排砂管」の機能を改めて確認し、有効性を確認した。
- 3) 塵芥模型を含む土砂排出試験において、土砂・吸引すると、吸引部底部に塵芥模型が集積することが明らかとなり、集積した塵芥模型が一気に吸引されることで、バタフライ型のバルブでは管内閉塞を起こすことが確認され、放流設備の検討においては、スルース型のバルブを除くバルブ全般が適さないことが明らかとなった。

② 現地実証試験から得られた知見等

- 1) 約1.6mの水位差と比較的小さな水頭差でも、ケース1のように管径200mm、管長25mの排砂管を用いて、管内流速約2.3m/s(流量約75L/s)、40分間で約3.4m³の土砂を排出することができ、また、ケース3のように、管径200mm、管長約15mの排砂管を用いて、管内流速約2.3m/s(流量約75L/s)、15分間で約5.5m³の土砂(土砂濃度の最大4.0%)を排出することができた。このことから潜行吸引

式排砂管がダム貯水池内の自然堆砂に対する排砂技術として有効であることが確認された。また、排砂初期の土砂濃度は、概ね目標とする値が確認され、実用化のために参考となる排砂特性に関する情報が得られた。なお、潜行吸引式排砂管における土砂吸引力（例えば、水位差、バルブ開度など）と土砂特性との関係を整理することも今後必要と考えられる。

- 2) 潜行吸引式排砂管による吸引部付近での濁水の発生はほとんどなく、排砂にあたっては環境負荷の少ない技術であることが確認され、平水時での適用の可能性やダム下流への排砂手法についての検討が必要である。
- 3) 潜行吸引式排砂管の設置・撤去において大きな問題はなく、比較的簡便に行うことができた。今回はφ200mm、排砂管長25mにおいて排砂可能であることを確認したが、平水時において排砂可能とする面積を増やすことを考えるとさらなる管長の延長も検討できる。
- 4) 現地実証試験では大規模な室内試験では確認できない排砂管の挙動等の詳細を確認できた。実用化に向けた研究を進めていくうえで、現地実証試験は欠かせないことが判った。
- 5) 自然堆砂を対象とする場合、土砂の吸引が停止してしまう原因を特定するためには、事前の堆砂中の材料調査が必要であると考えられ、その技術開発も必要である。また、自然堆砂を対象とする場合、粘性土への対応も必要となると考えられる。
- 6) 塵芥止めを設置すると、吸引部の重量を重くしなければならぬことや、室内試験の知見も踏まえると土砂吸引の障害となることが考えられ、実用化に向けては、潜行吸引式排砂管に塵芥止めは設置はしない方が適切であると判断される。また、実用化には、さらなる軽量化が必要と考えられる。
- 7) ケース3からは、塵芥等の集積程度によって、吸引・排砂が停止する課題が明らかとなり、実用化を見据えながら、塵芥の密集度に応じた排砂管の適用範囲の明確化や、塵芥が密集していても潜行できるような更なる形状検討が必要である。
- 8) 室内試験からは、堆砂への追従性をある程度強化できる形状は得られたものの、現地実証試験においては、追従性をさらに強化することの必要性が確認された。このことから更なる追従性の高い形状検討が必要である。

- 9) 本装置の起動初期においては、バルブの全開と全閉で大きな違いは見られなかった。
- 10) 今回の現地実証試験においては、管内流量の計測は電磁流量計を用い、機械化、リアルタイムでの計測を可能としたが、吸引部鉛直位置については自記式の水位計を用いた計測でリアルタイムでの情報を取得できなかった。また、土砂濃度や管内圧力の計測は人力により行った。土砂濃度は、管内閉塞の可能性を評価する上で重要な指標であり、また、管内圧力は吸引部の閉塞を評価する上で重要な指標であることが明らかとなった。しかし、実用化に向けては現在の仕組みでは安全かつ確実に排砂管を運用できないため、設備が大規模となった場合でも、円滑に必要な計測情報を収集・集約できるよう、関係諸量の計測の機械化や計測値をリアルタイムで集約できる仕組みを構築することが重要であると考えられる。

謝辞

室内実験については、国土交通省国土技術政策総合研究所の所有する河川水理実験施設において行った。また、現地実証試験については、千葉県河川整備課、千葉県市原土木事務所、千葉県高滝ダム管理事務所、加茂土地改良区、養老川漁業協同組合の皆様にご多大なご協力をいただいた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 櫻井寿之・箱石憲昭：貯水池排砂のための潜行式吸引排砂管の開発，河川技術論文集，Vol. 15，pp. 441-446，2009.
- 2) 櫻井寿之・箱石憲昭：大規模実験による潜行吸引式排砂管の開発，河川技術論文集，Vol. 17，pp. 311-316，2011.
- 3) 櫻井寿之・箱石憲昭：管径 200mm の潜行吸引式排砂管を用いた排砂実験，土木学会第 67 回年次学術講演会，II，pp. 67-68，2012.
- 4) 宮川仁、櫻井寿之、箱石憲昭：貯水池のエネルギーを活用した排砂技術の開発，土木技術資料 56-2，2014.
- 5) 千葉県高滝ダムパンフレット
- 6) 千葉県河川整備課 HP
<http://www.pref.chiba.lg.jp/kasei/kawazukuri/yourou/documents/03siryou-2.pdf>

A STUDY ON THE DEVELOPMENT AND THE OPERATION METHOD OF THE SEDIMENT SUPPLY MEASURES FROM A DAM RESERVOIR CONSIDERING RIVER ENVIRONMENT

Abstract: The construction of a dam can interrupt the transport of sediment through the river. Decreased sediment supply downstream causes environmental problems related to the riverbed such as degradation, armoring, and fewer opportunities to renew the riverbed material. Furthermore, sedimentation causes a reduction in the reservoir storage capacity. Therefore, measures are required for sediment supply from the reservoir. In the past, sediment flushing with water level drawdown and sediment bypassing were developed and used. However, the conditions for applying these measures are restricted. The purposes of this study are to develop a new sediment supply facility without water level drawdown operation and to propose the operation methods for the facility in order to restore the downstream river environment.

In 2013, in order to obtain knowledge for the practical application of the burrowing type sediment removal suction pipe, we carried out the sediment discharge field test using the 200 mm diameter suction pipe at the actual dam located in the midstream of Yoro River at Chiba prefecture. As a result, we understood the hydraulic characteristics such as a relationship between velocity in the pipe and the sediment concentration, a water head energy loss of the pipe etc. It is confirmed that the burrowing type sediment removal suction pipe could be applied to remove non-cohesive debris-less sediment material. through the sediment discharge tests. We also examine an applicability to new sediment supply measures through the sediment discharge tests.

Key words: dam reservoir, countermeasures for sedimentation, burrowing type sediment removal suction pipe, field test