

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：平成 23 年度～平成 27 年度

担当チーム：水工研究グループ（水理）

研究担当者：石神孝之、宮脇千晴、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を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、①「潜行吸引式排砂管の設計手法の検討」、②「土砂による磨耗・損傷に対応した流量調節設備の検討」、③「環境に配慮した土砂供給施設の運用方法の検討」の3つの検討項目を設定し研究を実施したものである。具体的には、①「潜行吸引式排砂管の設計手法の検討」では、水理模型実験を通じて、現場適用規模の潜行吸引式排砂管に適した材料・形状を検討し、現地実証試験用の吸引部の設計を行った。また、現場事務所と連携した現地実証試験を行い、現場の土砂への適応性、吸引能力、塵芥対応能力等を確認した上で、抽出された課題に対して、水理模型実験により対応策も検討した。また、②「土砂による磨耗・損傷に対応した流量調節設備の検討」では、潜行吸引式排砂管の下流に設置する流量調節設備について、土砂による磨耗・損傷に対応した形式を既存技術の活用も含めて検討した。さらに、③「環境に配慮した土砂供給施設の運用方法の検討」では、出水中にダムから土砂供給を行う際の施設操作方法（操作タイミングや放流量）と、下流の河床変化の関係を数値シミュレーションにより検討し、施設運用方法の検討を行った。

キーワード：ダム貯水池、堆砂対策、潜行吸引式排砂管、水理実験、現地実証試験、一次元河床変動計算

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・露岩化など河床環境の悪化が懸念されており、出水中にできるだけ自然に近い状態でダムから土砂を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厳しく、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の堆積土砂の適切な量と質（粒径）を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実施した。

第3期中長期計画期間におけるこれまでの本研究の主な検討の経緯は次のとおりである。

まず、第2期中期計画までの重点プロジェクト研究において、貯水池の上下流水位差によるエネルギーを活用したフレキシブル管を用いた排砂手法、いわゆる「潜行吸引式排砂管」と称する装置の開発の試みを開始、提案している¹⁾。「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て管折返し部の底面にシートを貼り、折返し部と上流部の管底面に穴を設けて土砂の吸引口としたものである（図-1）。そして、潜行吸引式排砂管を用いた場合の排砂運用のイメージを図-2に示す。本研究では図-2のように潜行吸引式排砂管を用いて、①装置を堆砂の表面に設置し、②装置下流のゲートを開くことにより、堆砂を吸引・放流する。堆砂はすり鉢状に崩れながら吸引され、吸引部は堆砂に潜行していく。吸引部が底面に達した後も折り返し部の管横面と上流部の管底面に設置された穴から土砂を吸引し続け、③最終的には再び堆砂の表面に吸引部が現れるという土砂吸引を考えているところである。

第2期中期計画期間における研究では、管径 60mm と

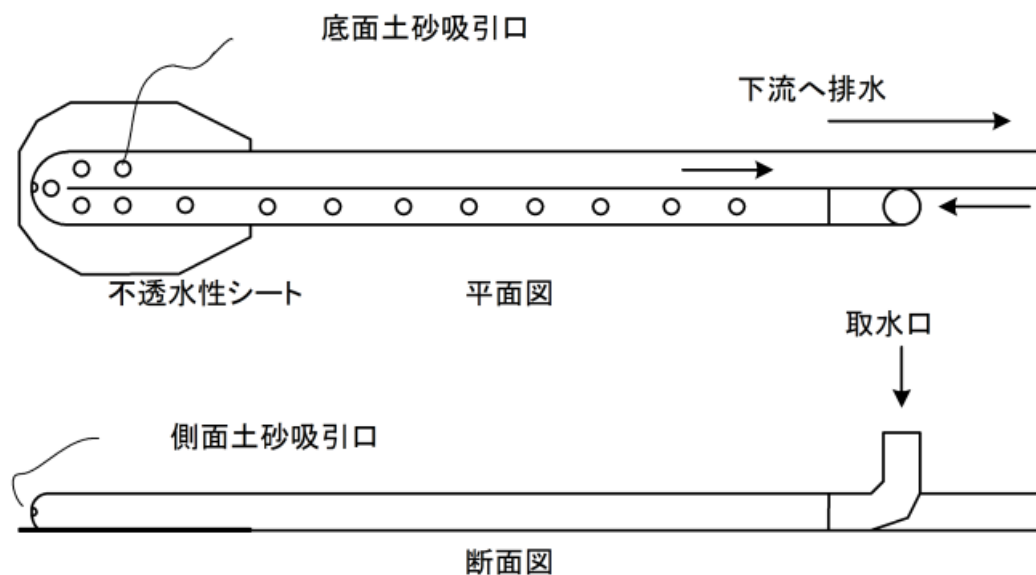


図-1 潜行吸引式排砂管の概要

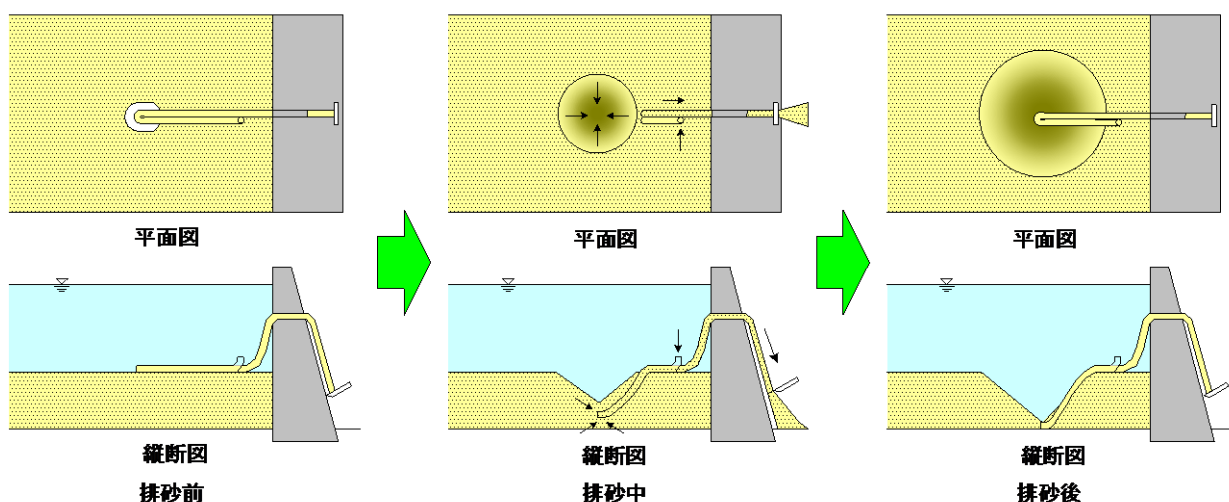


図-2 潜行吸引式排砂管の排砂イメージ

100mmの排砂管を用いた実験¹⁾により検討を行い、この検討を引き継いで、本中長期計画期間においても検討を行った。

以降、各検討項目に沿って、研究の詳細を記載する。

2. 潜行吸引式排砂管の設計手法の検討

2.1 室内実験による検討

2.1.1 原案形状実験 (平成23年度実験)²⁻⁵⁾

2.1.1.1 室内実験方法

平成23年度において実験に用いた装置の概要を図-3に示す。水槽は長さ7.5m、幅7.5m、深さ3.5m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200mm)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0.3～

0.6mと想定した場合、模型の縮尺は2/3～1/3程度に相当する。実験の手順は、はじめに水槽内に土砂を厚さ2mに整形した初期河床の上に排砂管を設置して、一定流量(70.6L/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。実験の土砂材料には、図-4に示すような粒度分布で、0.1mm～2mmの砂で構成される50%粒径が0.39mmの混合粒径砂を用いた。排砂管に用いた管材としては、堆砂面の変形に追従するための柔軟性を重視して表-1に示す2つを選定した。

2.1.3.2 室内実験結果

ケース1の排砂管の設置状況と排砂後(排水後)の状況

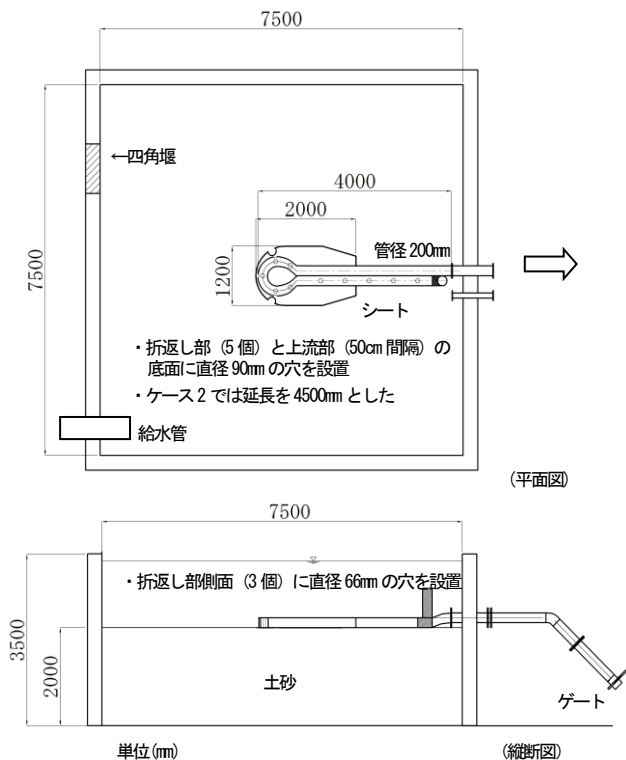


図-3 実験装置概要

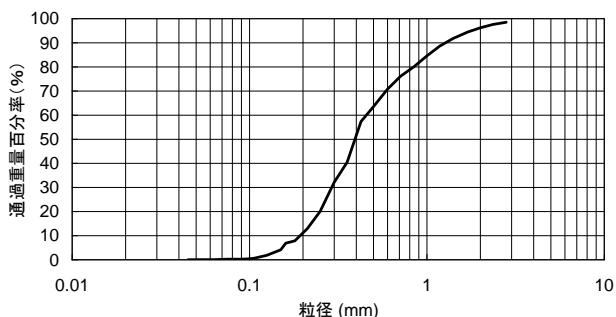


図-4 実験に用いた土砂の粒度分布

表-1 排砂管の管材

ケース	材質	質量 (g/m)	許容圧力 (MPa)	許容減圧力 (kPa)	許容曲げ半径 (mm)
ケース1	透明のポリ塩化ビニル樹脂	2,205	0.01	-6.0	200
ケース2	繊維補強ポリ塩化ビニル樹脂	2,740	0.02	-11.0	200

を図-5に、ケース2の排砂後の状況を図-6に、ケース2の排砂後の河床縦横断形状を図-7に、流量と土砂濃度の時系列の実験結果を図-8に示す。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。

ケース1では、排砂開始後、土砂を排出しながら管が潜行し約10分弱で管が水槽底面に到達した。その後、実験開始後約30分で、水のみが放流されるようになった。通水を止めて排水をしたところ、図-5のように、排砂管と水槽出口管との接合部で管が切断されていた。排砂が進行する過

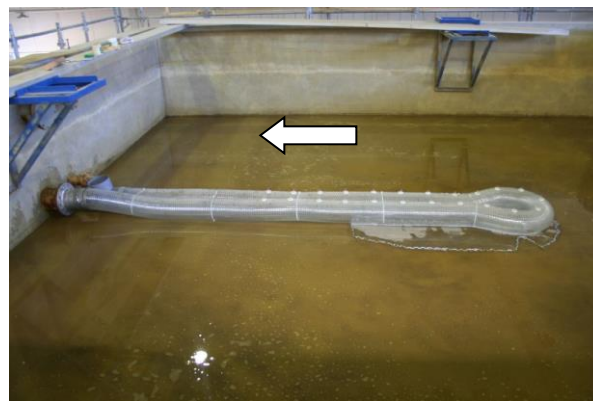


図-5 ケース1の排砂管設置と排砂後の状況



程で、排砂管の折返し部よりも下流の部分が徐々に土中に潜行し、接合部に引張力が作用したことが切断の原因と考えられた。

そこで、ケース2では、繊維補強された管材を用いるとともに、排砂管の下流部分が潜行しないように、管長の約1/3と約2/3の位置の2箇所をロープで吊って実験を行った。その結果、排砂開始後約18分で管が水槽底面に到達し、約120分で排砂がほぼ終了した。

図-7で確認できるように当初に想定したすり鉢型の堆砂形状が形成され、約23m³の土砂が排出された。図-8に示

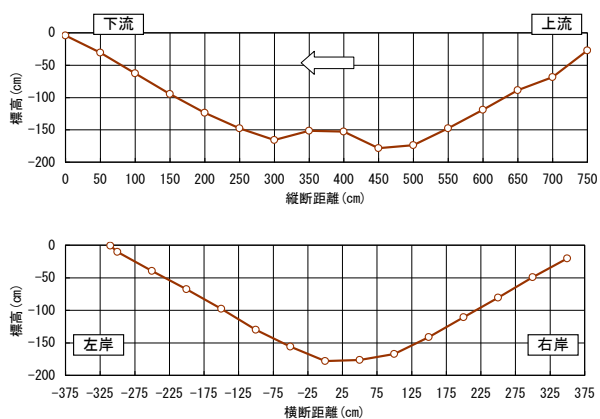
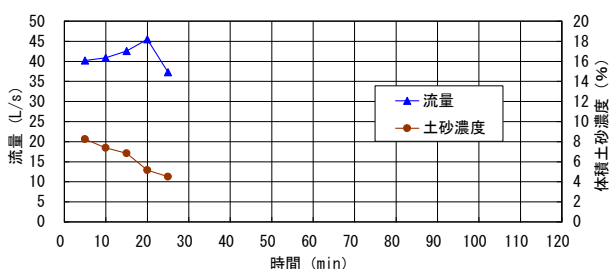
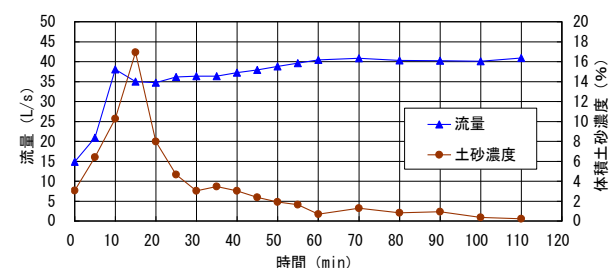


図-7 ケース2の排砂後の河床縦断・横断形状



a) ケース1の実験結果



b) ケース2の実験結果

図-8 流量と土砂濃度の実験結果の時系列

表-2 管径の異なる実験結果の概要

実験の管径	流量 (L/s)	管内流速 (m/s)	体積土砂濃度 (空隙無し) (最大値) (%)	体積土砂濃度 (空隙無し) (安定状態) (%)	排砂量 (空隙込) (m ³ /時)	管径600mmに換算した値		
						流量 (m ³ /s)	管内流速 (m/s)	排砂量 (空隙込) (m ³ /時)
60mm	3.3	1.17	23.3	4.5	0.20	1.05	3.70	63.2
100mm	12.2	1.55	11.3	3.0	1.79	1.07	3.80	158.0
200mm	40.0	1.27	17.0	3.0	12.60	0.62	2.20	196.4

した時系列では、既往の管径60mmと100mmの実験で確認されたのと同様な、管折返し部埋没後に土砂濃度が上昇し、着底すると濃度が低減していく傾向が認められた。

今回のケース2と既往の管径60mmと100mmの代表的なケースの実験結果の概要を表-2に示す。表中には、比較のために、各実験結果をFroudeの相似則を用いて管径600mmの場合の値に変換した値を記載した。このときの縮尺は管径60mmが1/10、100mmが1/6、200mmが1/3となる。ここで示した排砂量は、一連の実験が終了するまでの平均的な値で

ある。これより、管径が大きいほど、排砂量が大きくなる傾向がみられる。管径200mmについては、600mmに換算した場合の流速が小さく、他の管径と同様な流速にした場合には、さらに大きな排砂量になると推測される。ただし、これらの実験は、管径と堆砂厚の比が異なっており、一概に横並びで比較することが難しい面もあり、現地実証試験等での詳細な検討が必要とされた。平成23年度の検討の結果、得られた知見は次のとおりである。

- 1) 既往の検討よりも規模の大きな排砂管での排砂能力を確認することができた。
- 2) これまでの実験の範囲内では、管径が大きいほど、排砂量が多くなる傾向が認められた。
- 3) 排砂管の材料には強度が重要であることが確認できたが、堆砂面の変化に追従するための管の柔軟性と管の強度はトレードオフの関係にあるため、今後、材質や形状の検討を進めて、実用化につなげていくことが必要とされた。

2. 1. 2 吸引部形状等の検討 (平成24年度実験)

平成23年度の室内実験による検討において、管の柔軟性を重視して比較的軟らかい管材を用いて排砂管を製作していたが、管径200mmの実験において管が破断する問題が生じた。

そこで、後述する管径200mmの排砂管を用いて現地実証試験を行うにあたり、以下の改良を行った。①管材を強度の大きいものにする(ポリ塩化ビニル樹脂製のサクシオンホース、単位長さ当たり質量9,070g/m、許容圧力15.3m水柱、許容曲げ半径1050mm)。②管材の強度を高めた結果、柔軟性が低下するため、折返し部を図-9、図-10に示すような鉄製で比重の大きいものとした。③従来は堆砂面に追従するために折返し部にシートを設置していたが、折返し部上面に重り(鉄製122kg)を設置することでシートの機能を代用することとした。④塵芥による閉塞を防ぐために、直径6mm、長さ20cmの鉄筋棒を土砂の吸引口の直径10cmより小さい6cm強の間隔で折返し部底面に30本設置した。排砂管の土砂吸引口としては、室内実験の結果をもとに3~10%程度の土砂濃度が得られるように、折返し部底面に直径10cmの穴を7個、上流管底面に直径9cmの穴を50cm間隔で6個設置した。

平成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-11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後述する現地実証試験において確認した。しかし、吸引部の堆砂



a) 排砂管上流側から撮影



b) 排砂管底面

図-9 潜行吸引式排砂管の概要

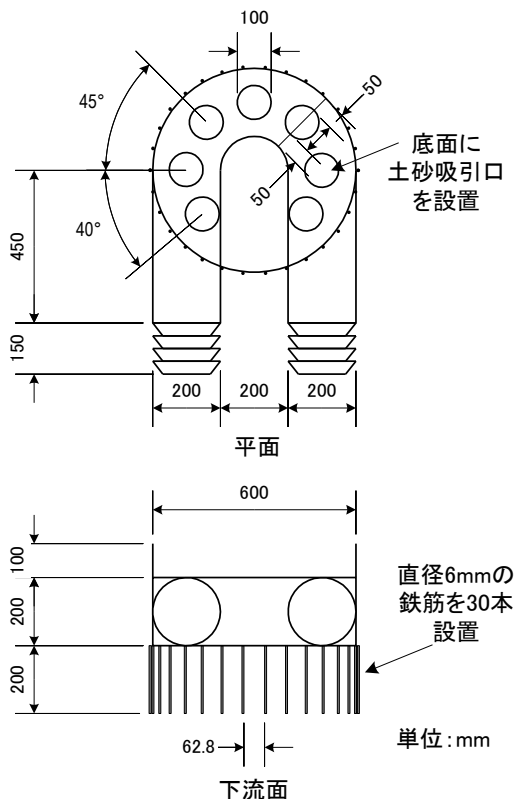
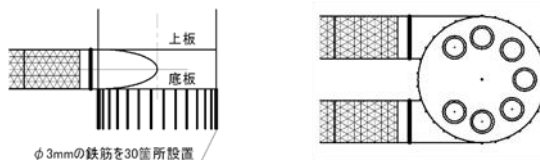


図-10 吸引部(折返し部)の形状

面への追従に関する課題も確認された。



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-11 平成24年度における改良形状

2. 1. 3 吸引部形状等の検討(平成25年度実験)

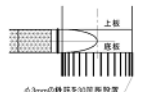
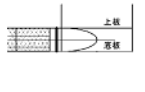
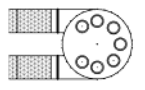
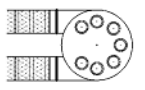
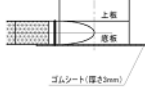
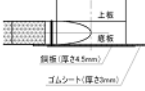
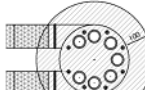
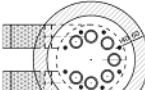
2. 1. 3. 1 室内実験方法

平成25年度においては、吸引部の堆砂面への追従に関する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-3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-3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は他ケースと比較するため平成24年度の形状で実施した。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。

2. 1. 1. 2 室内実験結果

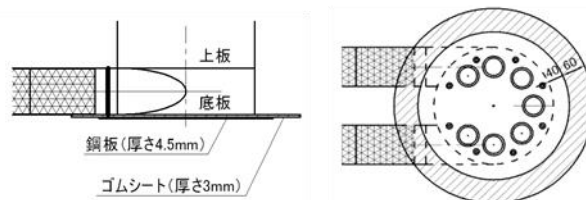
この4つの検討ケースについて、吸引部の堆砂面への追従性の程度を評価できるよう、吸引部の潜行速度と鉛直位置の時間変化を計測した結果を表-3、図-12に示す。なお、実験中、吸引部は上から吊らずに自重で潜行するようにしたが、水槽の深さが限られているため、-2.0m近く潜行した場合には吸引部が吊られる状態となるようワイヤーを設置した。図-12を見ると、ケース1及びびケース2は実験開始から20分程度で吸引部鉛直位置が1m程度さがった。他方、ケース3及びびケース4は、同時刻で1.5mを超えて潜行した。このことから、ゴムを設置した方が、堆砂面への追従性が向上することが判明した。また、ケース1とケース2を比較すると、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

表-3 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	0.136 cm/s	0.130 cm/s
	深さ0.5m~1.0mまで	0.023 cm/s	0.066 cm/s	
深さ1.0m~1.5mまで	0.017 cm/s	0.063 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	0.212 cm/s	0.156 cm/s
	深さ0.5m~1.0mまで	0.114 cm/s	0.234 cm/s	
深さ1.0m~1.5mまで	0.123 cm/s	0.178 cm/s		



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-13 平成25年度における検討最良形状(ケース4)

確認してきた「潜行吸引式排砂管」の機能の有効性を室内実験においても改めて確認できた。

2. 1. 4 塵芥対応能力の基礎的実験(平成26年度実験)⁶⁾

平成25年度までの検討では、実際の貯水池内の堆砂を含めて、ほとんど塵芥を含まず、粘着性のない砂礫については土砂吸引・排砂が可能であることを確認した。一方、平成25年度における自然堆砂に対する検討において、堆砂内部に存在する、塵芥層(密に沈降、集積した落葉が上部の堆砂により圧密されたと考えられた葉の層)による吸引停止現象が確認され、現形状での塵芥に対する適用の限界が明らかとなった。

2. 1. 4. 1 実験方法

そこで、平成26年度においては、現形状での排砂管の塵芥への対応能力を明らかとするための基礎的検討を行った。具体的には、水理実験施設内における実験水槽において、管径100mmの潜行吸引式排砂管による模型実験を実施して検討を行った。実験に用いた装置を図-14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100mm)を設置している。また、水頭差は、25年度に実施した現地実験時の1.6mを概ね確保した。水槽外の管には、流量計測のための電磁流量計と先端には流量調整が可能なゲートを設けた。また、放流先には沈砂池と、塵芥模型を容易に捕捉・計測できる塵芥採取箱を設置した。また、実験には管径100mmの排砂管(図-15)を用い、排砂管の潜行深度および傾斜角を計測できるように吸引部上部の4か所(図-15左写真の赤印の位置)には小型のメモリー式水位計(大起理工業製、ダ

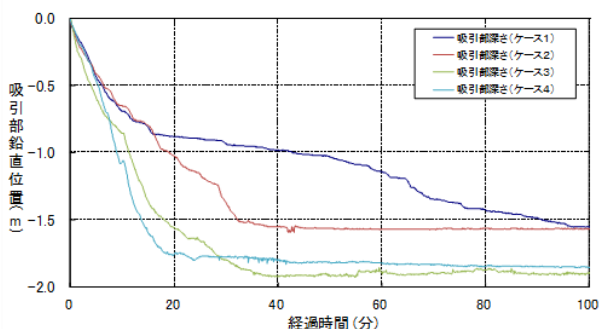


図-12 表-3の検討形状別の吸引部鉛直位置の時間変化

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-3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-13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

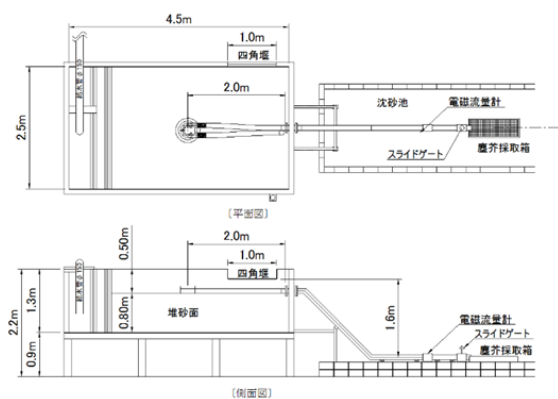


図-14 実験装置概要図



(直径300mm, 吸引口7個φ50mm, 重量30kg)

図-15 φ100mm模型吸引部



(ケミカルウッド10mm×10mm×50mm 比重1.1)

図-16 塵芥模型

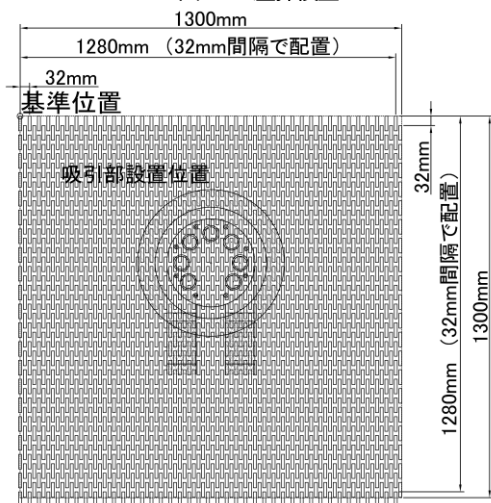


図-17 塵芥模型設置図 (ケース3の例、1764本)

イバー水位計)を設置した。また、塵芥層とみなす模型は、落葉は単体であれば吸引容易と考えられるが、現地実験では密に集積、圧密されていたこと、また、排砂管の塵芥への対応能力を定量的に示すことが必要であると考え、便宜的にケミカルウッド板(比重 1.1)を図-16 のように10mm×10mm×50mm の大きさに裁断して、作製した。

表-4 塵芥模型実験のケース一覧と実験結果

	塵芥模型専有面積率	塵芥模型使用本数	塵芥層設置位置	排砂の可否
ケース1	100%(1.0m×1.0m)	1950	河床-20cm	停止
ケース2	75%(1.0m×1.0m) (ケース1の塵芥露出部のみ)	1899	河床-20cm	成功
ケース3	50%(1.3m×1.3m)	1764	表層	停止
ケース4	50%(1.0m×1.0m)	992	河床-20cm	成功

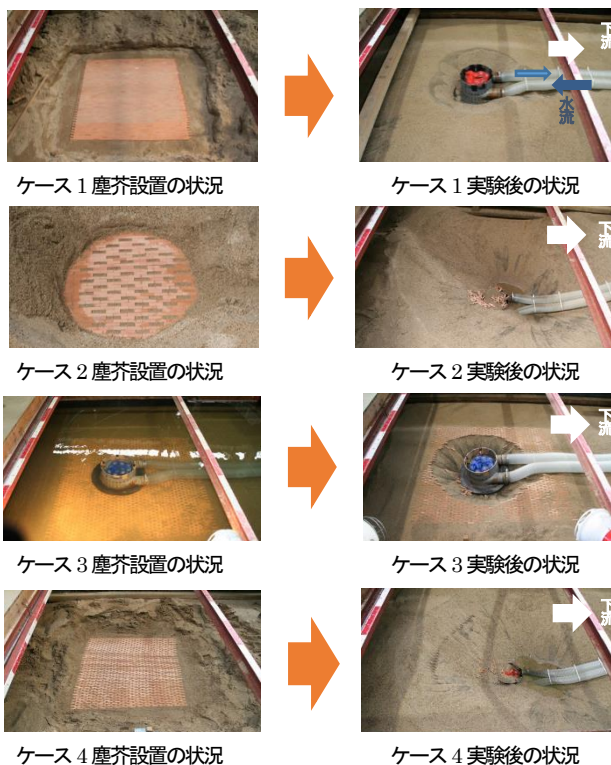


図-18 各ケースの塵芥模型設置状況と実験後の状況

実験の手順は、まず、初期河床作製のため、水槽内に土砂を厚さ 0.8mに整形する。その際、堆砂内に1層の塵芥模型を河床-20cm または表層に塵芥層として配置した(図-17は表層配置の例)。この後、排砂管を河床面に設置して、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ちながら、排砂管の下流端ゲートを開けて排砂を実施、管内流速、塵芥排出量、潜行深度、吸引部傾斜角度を調査した。なお、実験開始時には、正時にゲート開度が全開となるようゲート操作を行い、実験中は常に全開とした。また、土砂材料はこれまでの実験で使用した平均粒径 1.56mm の一様粒径珪砂を用いた。

2. 1. 4. 2 実験結果

実験ケースの一覧と結果を表-4、図-18、図-19に示す。実験ケースの設定では、まず、現地実験の結果を再現できるかという観点で河床-20cmの場所に1.0m×1.0mの面積に塵芥模型を全て敷き詰めて(専有面積率 100%と定義)検討した(ケース1)。その結果、吸引部が塵芥模型の設置位置で停止、塵芥模型は下流へ全く排出されず、水

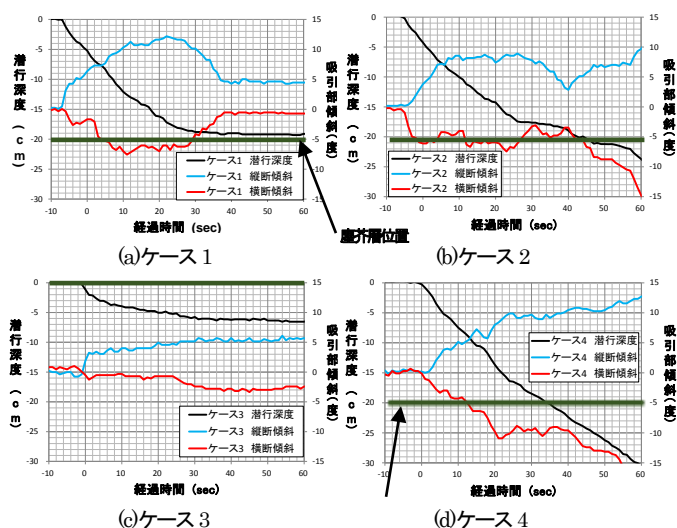


図-19 各ケースにおける潜行深度と吸引部傾斜の時間変化

流上流部の取水口では吸い込み渦が発生し、吸引口の閉塞が示唆され、現地実験結果と同様の現象が確認された。次に、排砂管の塵芥への対応能力を検討するため、ケース1の実験後の塵芥模型の露出箇所を専有面積率75%に減少させて埋戻し検討した(ケース2)。その結果、塵芥模型設置位置付近において潜行速度が低下(図-19(b))したが、吸引部は塵芥層を突破、潜行吸引排砂が継続して行われた。次に、表層に塵芥層が存在する場合の検討を行った(ケース3)。なお、塵芥設置の作業効率から専有面積率は50%とした。その結果、145本の塵芥模型が下流へ排出したものの、深度が7cm程度で排砂は停止し、吸引部下面は塵芥模型が鳥の巣状に密集していた。次に、河床-20cmに専有面積率を50%で検討を行った(ケース4)。その結果、吸引部は塵芥模型設置位置を突破、潜行吸引排砂が継続して行われた。

以上から、塵芥の密集度によって吸引能力に限界があること、同じ専有面積率(50%)でも潜行吸引排砂が可能な場合と不能となる場合があることがわかった。さらに、図-19の縦断傾斜と横断傾斜に着目すると、ケース4では塵芥層突入時の縦断傾斜は10度程度、横断傾斜は-10度程度に対し、ケース3では最大でも縦断傾斜は5度程度、横断傾斜は-4度程度となっており、吸引部を傾斜させれば塵芥への対応能力が高まることが示唆された。

①現地実証試験時の潜行吸引による排砂の停止現象を室内実験において再現でき、②塵芥の密集の程度によって現形状での排砂管での塵芥対応能力に限界があることが明らかとなり、③塵芥層突入時の傾斜角度によって、塵芥への対応能力が向上する可能性があることが示唆された。

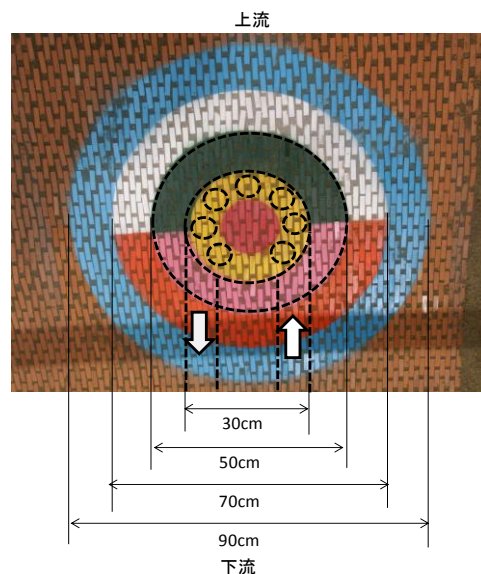


図-20 塵芥模型着色配置図

2. 1. 5 塵芥対応能力の基礎的実験(平成27年度実験)

平成27年度は、平成26年度に引き続き基礎的検討を実施し、潜行吸引式排砂管の吸引メカニズムを解明するため、潜行吸引式排砂管の吸引口の吸引特性を明らかにする室内実験と、塵芥の集積に対する対応能力を向上させる形状検討を行うための室内実験を行った。

2. 1. 5. 1 実験方法

実験方法は、平成26年度に行った基礎的検討において使用した実験施設を活用し、水理実験施設内の実験水槽において、管径100mmの潜行吸引式排砂管による模型実験と同一条件により引き続き実施して検討を行った。

実験の手順は、まず初期河床作製のため、水槽内に土砂を厚さ0.8mに整形する。その際、表層に塵芥層として配置した(図-17は配置例)。この後、潜行吸引式排砂管の吸引部に設置されている吸引口の吸引特性を明らかにするため、排砂管の設置位置を中心として、図-20に示すように、塵芥模型に着色した上で、排砂管を河床面に設置して、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ちながら、排砂管の下流端ゲートを開けて実験を開始し、管内流速、塵芥排出量、潜行深度、吸引部傾斜角度を調査した。なお、実験開始時には、正時にゲート開度が全開となるようゲート操作を行い、実験中は常に全開とした。また、土砂材料はこれまでの実験で使用した平均粒径1.56mmの一樣粒径珪砂を用いた。

2. 1. 5. 2 実験結果

実験は図-21、図-22に示した2形状でそれぞれ1ケースを実施した。実験ケースの設定では、塵芥の存在場所

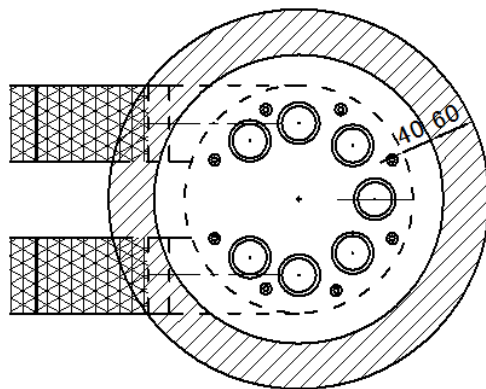
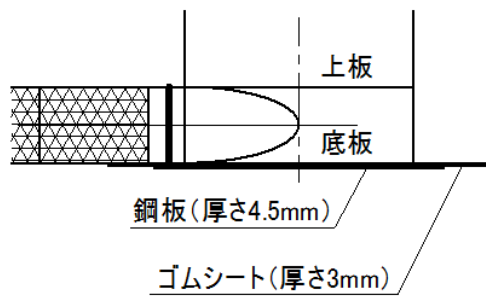


図-21 管径100mm模型吸引部 (吸引口7個, 管径50mm, 重量30kg)

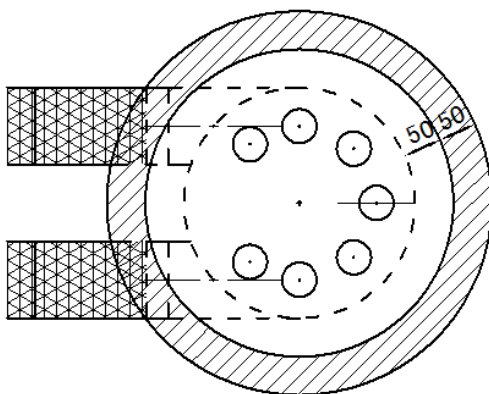
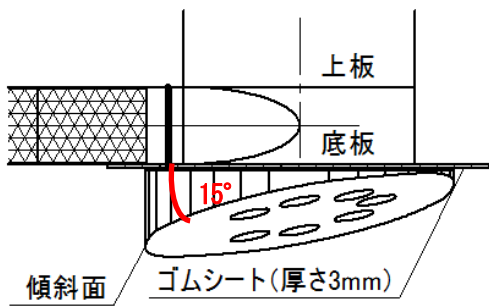


図-22 管径100mm模型吸引部 (改良形状)

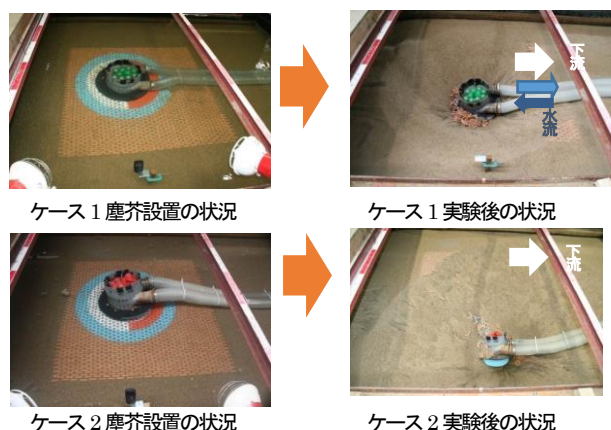
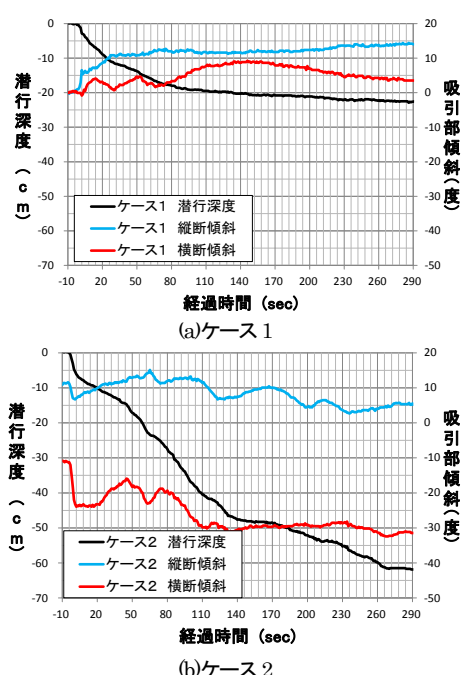


図-23 各ケースの塵芥模型設置状況と実験後の状況



注：縦断傾斜の+は上流側への傾き、横断傾斜の+は右岸側への傾きを示す。

図-24 潜行深度と吸引部傾斜の時間変化

ごとの吸引特性を把握すること、および、吸引部の傾斜によって塵芥への対応能力が高まるという昨年度の示唆された実験結果を踏まえ、表層に塵芥模型を敷き並べて再現性を確認することに着目して実施した。なお、塵芥設置の作業能率から過年度の条件と同様、専有面積率を50%とした。

まず、図-21のこれまでの検討形状における検討をケース1とした。過年度の実験において吸引部下面に塵芥模型が鳥の巣状に密集して吸引停止したケースである。この実験を再現し、吸引停止現象における塵芥の吸引状況を調査した。実験実施前後の結果を図-23の上段に示す。また、潜行吸引式排砂管の時間ごとの潜行深度と吸引部の上下流の傾斜の関係を図-24の上段に示す。また、

時間ごとの塵芥模型の着色ごとの排出状況を図-25に示す。

図-23～図-25から、塵芥模型の排出状況を見ると、ケース1では、吸引部の吸引孔を取り囲む赤や黒の吸引部底面の中央に配置していた塵芥模型はほとんど排出されず、通水終了まで残存した。実験後その状況を観察したところ、赤や黒の吸引部底面の中央に配置していた塵芥模型の下には周辺から集まった塵芥が層状、鳥の巣状に集まっていた。過年度の実験結果と同様に、吸引部底面に塵芥模型が密集し吸引停止したことや、吸引部の傾斜角度が左右岸において10度に満たないことも判り、過年度の実験を再現できたと考えられる。また、吸引部底面に存在した塵芥が吸引部を支持し、潜行できない状態となり、吸引能力が低下したことも考えられた。

次に、ケース2として、吸引力の向上を期待して、左岸上流側に傾け図-22は吸引部底面を15°傾斜させた形状とした。これは傾斜面は、平成26年度の実験結果から吸引部底面の吸引孔で最も吸引力が高いと考えられた左岸上流側を低くすることで、吸引力の高い吸引孔が河床面に追従しやすくなるようにしたものである。実験実施前後の結果を図-23の下段に示す。また、潜行吸引式排砂管の時間ごとの潜行深度と吸引部の上下流の傾斜の関係を図-24の下段に示す。また、時間ごとの塵芥模型の着色ごとの排出状況を図-26に示す。

図-23～図-24、図-26から吸引部底面に傾斜面を取り付けたことにより吸引部が上流左岸側に大きく傾いて潜行していることが確認できた。また、塵芥模型の排出状況を見ると、ケース2では、吸引部の吸引孔を取り囲む赤や黒の吸引部底面の中央に配置していた塵芥模型はほとんどすべて排出され、他の色についても概ね排出された。昨年度の実験と比べて潜行速度は塵芥なしの6割程度となったものの、吸引部底面に傾斜面を設けた形状(ケース2)では、塵芥占有率50%で排砂管が水槽底面(深さ80cm)まで到達し、吸引部の設置箇所周辺に存在していた塵芥は概ね排出されたことが判った。

また、図-25と図-26を比較すると、吸引部底面の中心部の塵芥が除去できるかどうか吸引性能の向上において必要となると考えられた。

以上から、過年度の実験結果も含め、吸引部底面が平坦な場合、塵芥の密集度が比較的高く吸引部の中心部に塵芥が存在していると、吸引部が塵芥に支持されてしまい、吸引能力が低下、吸引停止してしまうと考えられること、また、塵芥の密集度が比較的高い場合でも吸引部形状を傾斜させれば、塵芥による吸引部の支持はなくな

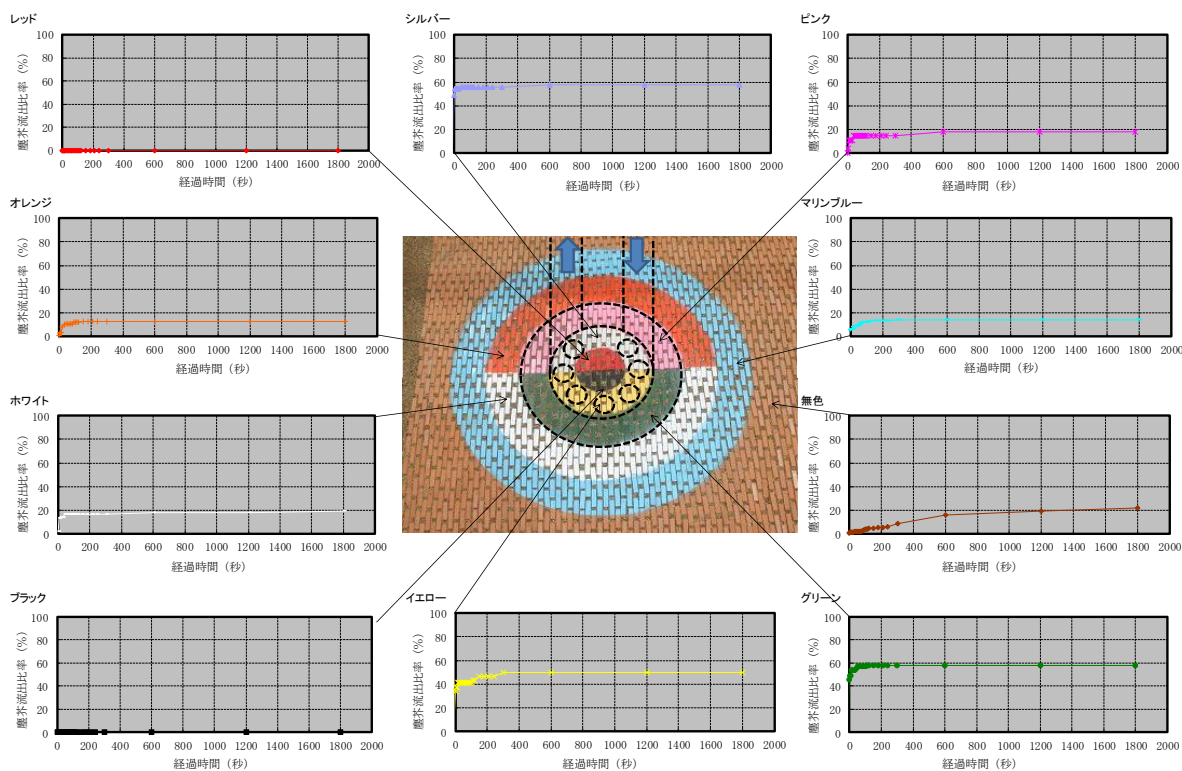


図-25 塵芥位置と塵芥流出比率の関係 (ケース 1)

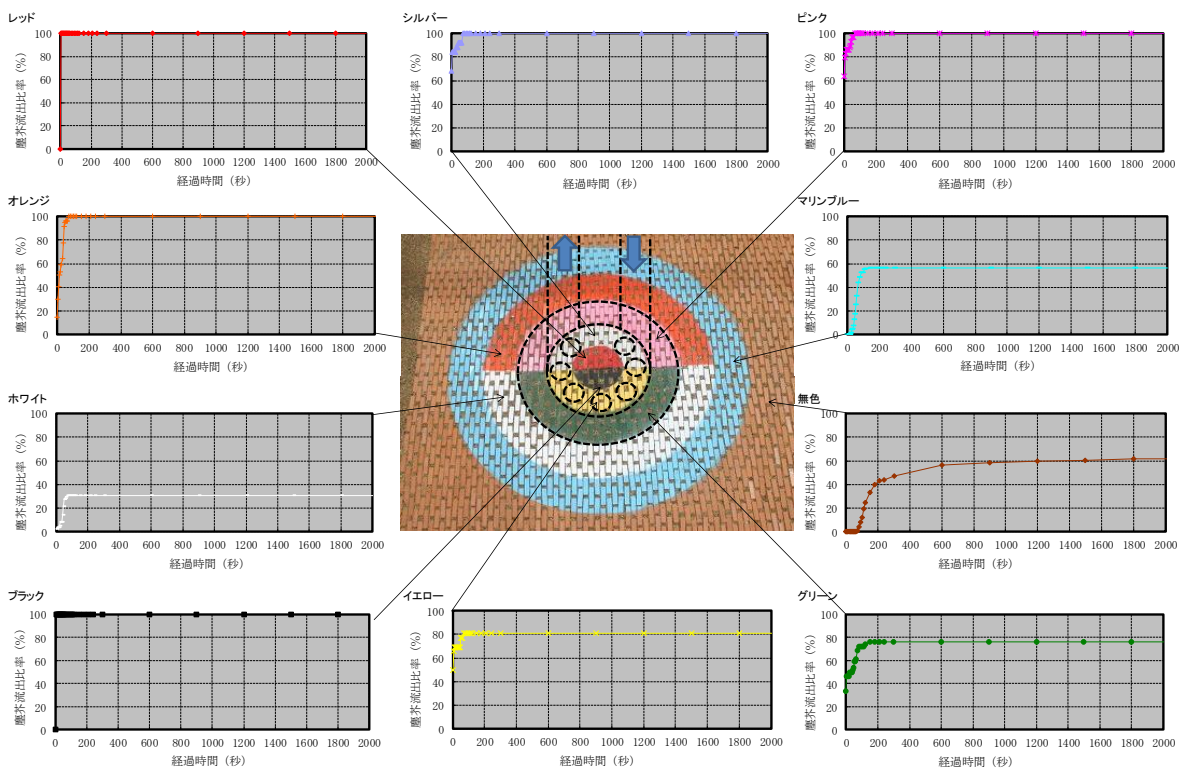


図-26 塵芥位置と塵芥流出比率の関係 (ケース 2)

り、塵芥への対応能力が向上されたと考えられる。さらに、塵芥層を速やかに突破できれば吸引部の底部に鳥の巣状に塵芥が集積し、吸引停止してしまうリスクは低く

なると考えられる。今後、吸引性能を向上させることで、早期に潜行させることができれば潜行吸引排砂管の塵芥への対応能力がさらに向上することが期待できる。今後、

水位差と吸引能力との関係も含めて土砂の吸引性能の向上を通じ、塵芥への対応能力を向上させる取組は必要と考える。

以上の視点をもって、吸引部形状のさらなる検討を行っていくことが実用化に向けて必要と考えられる。

2. 2 現地実証試験による検討

2. 2. 1 現地実証試験（平成 24 年度）⁷⁻¹¹⁾

2. 2. 1. 1 現地実証試験の準備

平成 24 年度の現地実証試験は、ヒル谷試験堰堤において、管径 200mm の排砂管を用いて 2012 年 7 月 8 日と 11 月 29 日～30 日の 2 回実施した。ヒル谷試験堰堤¹²⁾は、京都大学防災研究所流域災害研究センター穂高砂防観測所の施設で、神通川水系蒲田川上流足洗谷流域にあり、流量や流出土砂量を観測するための堰堤である。

排砂装置の実用化のためには、装置をどのように貯水池へ設置するかが重要になる。そこで、今後の設置方法検討の参考に、想定される実物（管径 300～600mm 程度）よりはやや小さい管径（200mm）ではあるが、今回の現地実証試験における準備状況を記載する。

実験サイトのヒル谷試験堰堤は、岐阜県高山市奥飛騨温泉郷の山地溪流にあり（図-27、図-28 参照）、平面形状は長さ 14m、幅 6.55m の長方形の貯水池である。堰堤の高さは下流の水叩きから天端まで 4.65m あり、貯水池の中には、排砂用の放流口（排砂門）の標高まで人頭大の巨礫を含む締め固まった土砂が上流から傾斜して堆積している。堰堤では、穂高砂防観測所によって毎年堆積した土砂の排除が行われているが、上述の締め固まった土砂については、排除されておらず、この上に流域から流出してくるフレッシュな土砂が堆積する。

過去の観測により、例年 7 月初旬には梅雨等の出水によって、貯水池内への土砂の堆積が記録されてきた。そこで、当初の計画では、自然に堆積した土砂を対象に排砂実験を行う予定であった。しかしながら、2012 年は出水が少なく、土砂の堆積がほとんどみとめられなかった。

そこで、7 月の試験では、ヒル谷の下流の河川で採取された砂利を、クレーンを用いて貯水池内に、堤体左岸側の放流口から水を抜いた状態で投入した（図-28 参照）。投入した土砂の粒度分布を図-29 に黒丸で示す。土砂は粘土・シルトをほとんど含まず、粒径 0.1～10mm 程度を主体とする砂利で構成され、30mm 程度の礫も少量含む。



図-27 ヒル谷試験堰堤（右岸側下流上方から撮影）

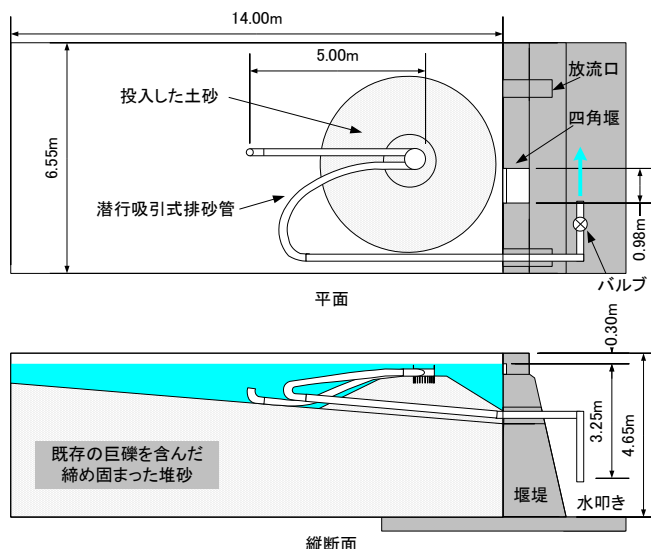


図-28 ヒル谷試験堰堤と実験装置の概要（2012 年 7 月）

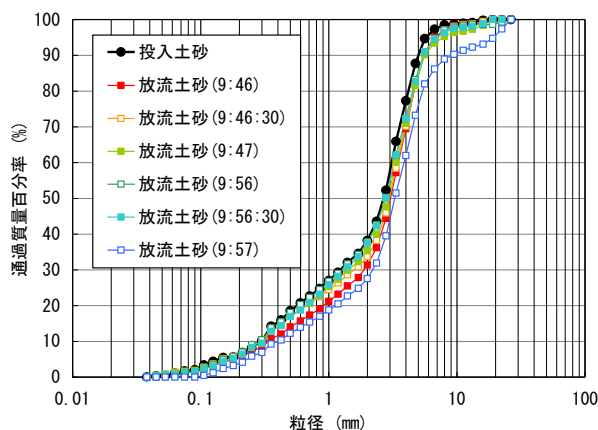


図-29 投入土砂及び放流土砂の粒度分布

30m³程度の土砂を投入し、堰堤付近に高さ 1.2m 程度の台地を形成させた（図-28 参照）。

2 回目の 11 月の試験では、7 月の試験よりも多くの土砂を排出することを狙って実施した。この時期でも堰堤の堆砂は少なかったため、締め固まった堆砂を 2m 弱掘削し、4cm メッシュのふるいで巨礫を除去した土砂を埋め戻し、さらにその上に、7 月に投入したのと同じ土砂

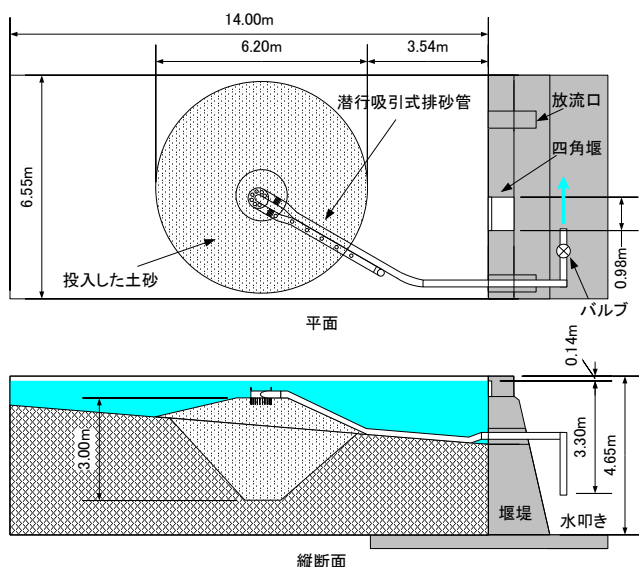


図-30 ヒル谷試験堰堤と実験装置の概要 (2012年11月)

を1m程度盛土した(図-30参照)。

排砂管、計測機器、その他機材等については、茨城県つくば市の土木研究所つくば中央研究所よりヒル谷試験堰堤まで運搬した。排砂管の重量は折返し部が約183kg(11月の試験では52.1kgの重りを加えた)、管路部が約80kgで、土砂を搬入したクレーンを用いて堰堤下流から貯水池内につり込んだ。堰堤には堤体の天端から1.8m程度下方を貫通する直径200mmの管が設置されており、排砂管の吐口側の管をこれに接続した。

排砂管の設置は、土砂の上に排砂管を置き、吐口管を接続すれば終了で、作業のうち設置のみに要した時間は30分程度であった。

排砂管の設置後、堰堤左岸側の放流口のゲートを閉めて湛水した。この際、排砂管の数点に排気口を設置し、管内の空気を抜きながら湛水を行った。

2. 2. 1. 2 試験・計測方法

排砂の現地実証試験では、排砂管と接続された堰堤を貫通しているパイプの下流端のバルブを全開にして排砂管を通じた放流を行った。堰堤への流入量が比較的小さかったため、放流によりある程度水位が下がったところでバルブを閉じ、水位を回復した後、再度バルブを全開にする操作を繰り返した。

計測を行った項目と計測方法を以下に示す。

- ① 貯水位: 小型のメモリ式水位計(大起理化学工業製、ダイバー水位計)と大気圧計によって貯水位の時間変化を記録した。
- ② 河床形状: 実験の前後で河床形状を測量した。

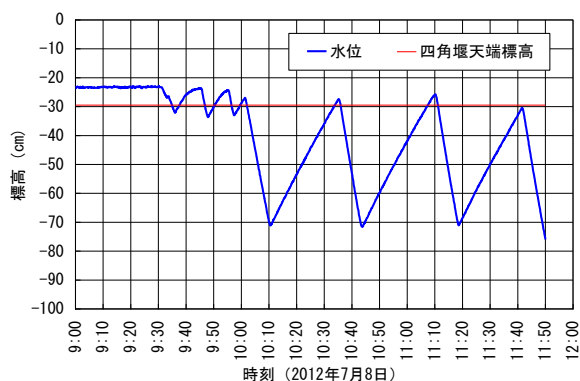


図-31 貯水位の時間変化(2012年7月)

(標高の基準は堰堤天端とした。以降の図も同様。)

- ③ 土砂濃度: 放流バルブの下流で放流水を採水して土砂濃度を計測した。
- ④ 排出土砂の粒度: ③で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。
- ⑤ 折返し部の鉛直位置: 折返し部上面の上流、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箇所に貯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た。
- ⑥ 管内圧力: 排砂管にピエゾ管を設置し放流水採水時の管内圧力分布を計測した。
- ⑦ 排砂状況: カメラとビデオカメラにより排砂状況を記録した。

2. 2. 1. 3 検討結果

1) 貯水位・流量・管内流速

7月の試験中の貯水位の計測結果を図-31に示す。最初の排砂は9:30から開始した。9:57までは水位が大きく低下しないうちにゲートを閉めて水位を回復して、3回の排砂を実施した。初回は、バルブを50%の開度まで開けたが、土砂の吸引量が少なかったため、2回目以降ではバルブを全開にした。10:00以降は、排砂管が水面より上に出る直前まで放流を続けた後、水位を回復する操作によって排砂を4回実施した。放流時間は、合計で57分であった。

10:00以降の水位回復時の水位上昇速度はほぼ一定であり、この速度と貯水池の湛水面積から流入量を算定すると、26.5L/sであった。また10:00以降の放流時の水位低下速度もほぼ一定であり、流入量を考慮して算定される放流量は、113.4L/sである。このとき、排砂管の管内流速は、3.61m/sとなる。

11月の試験中の貯水位の計測結果を図-32に示す。11月の試験では、2日間で11回の排砂を実施し、放流時間

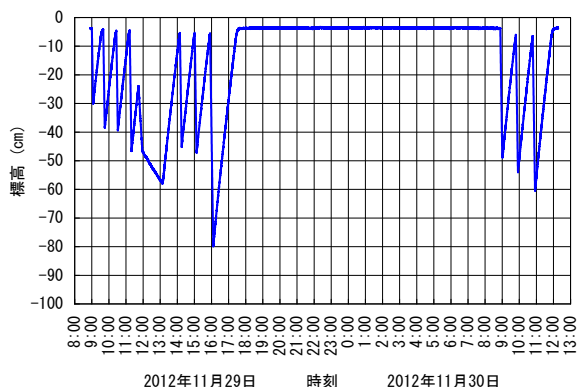


図-32 貯水位の時間変化 (2012年11月)



図-33 排砂前の状況 (右岸側下流から、2012年7月)



図-34 排砂中の堰堤下流の状況 (2012年7月)



図-35 排砂・排水後の状況 (右岸側下流から、2012年7月)

の合計は78分であった。水位変化から流入量と放流量を

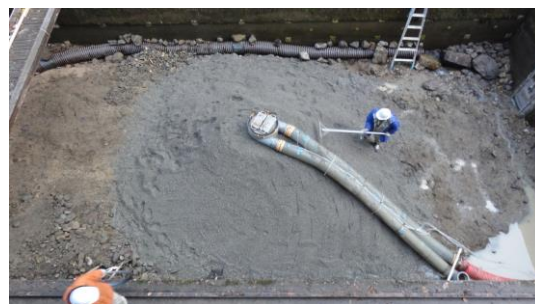


図-36 湛水・排砂前の状況 (上方から、2012年11月)

算定するとそれぞれ、13.6L/s、116L/sであり、このとき、排砂管の管内流速は、3.69m/sとなる。

2) 排砂状況・河床形状・排砂量

7月の試験の排砂前の状況を図-33に、排砂中の堰堤下流の状況を図-34に、排砂後の状況を図-35に示す。台地状の土砂は折返し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。

7月の試験では、排砂管が土砂中に潜行することはなく、常に管が土砂の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、管径と比較して土砂の厚さが小さかったこと、土砂が盛土形状であったことが要因として考えられる。

11月の試験の排砂前の状況を図-36に、排砂後の状況を図-37に示す。7月の試験より、ひとまわり大きなすり鉢状のくぼ地が形成された。

図-38に7月の試験の排砂前後の河床形状計測結果を示す。排砂により形成されたすり鉢は、おおそ直径3m、深さ1.0mであり、縦断面図と横断面図より算定した排出土砂量(空隙込み)は3.45m³であった。

図-39に11月の試験の排砂前後の河床形状計測結果を示す。排砂により形成されたすり鉢は、おおそ直径5m、深さ2.2mであり、測量結果から算定した排出土砂量(空隙込み)は17.4m³で7月の試験の5倍程度の土砂量であった。

3) 土砂濃度・放流土砂の粒度分布

図-40に7月の試験の貯水位の変化と放流水の採水を実施した時刻を、図-41に採水したサンプルを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。

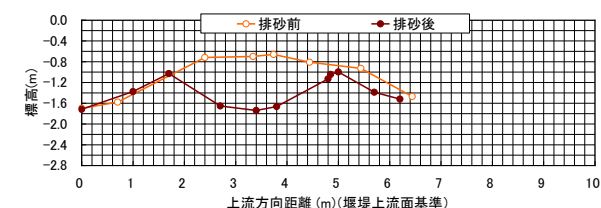
採水はバルブを全開にした2回目と3回目の放流時に各3回実施しており、図-41より2回目の方がやや大きな濃度を示しているが、3~6%の土砂濃度が得られた。

図-42に11月の試験で採水したサンプルを分析した土

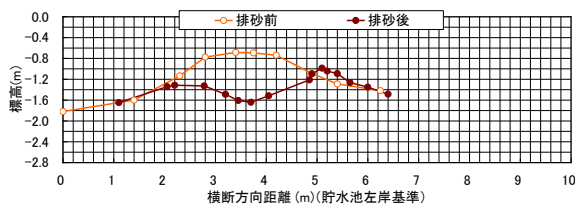
砂濃度の結果を示す。ここで、土砂濃度は、7月の試験と同様に算定しており、横軸の時間は排砂した時間のみを繋げて示した。排砂開始直後に4~5.5%の土砂濃度を示しているが、その後土砂濃度が低下する。その後は3回土砂濃度の上昇と低減がみられる。土砂濃度の増減については、3.5節に示す課題により、土砂濃度が減少したため、排砂管の位置の修正を3回実施しており、修正



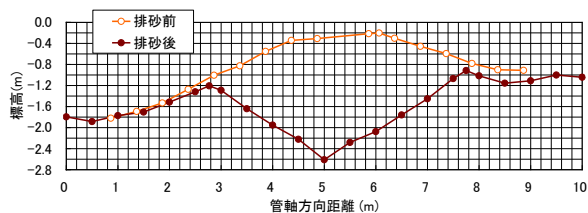
図-37 排砂・排水後の状況（上方から、2012年11月）



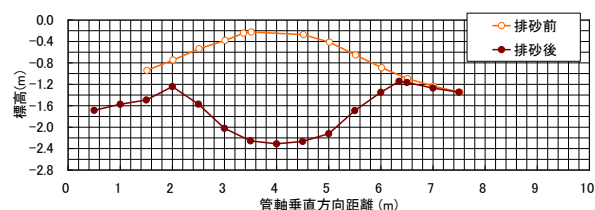
a) 河床縦断形状



b) 河床横断形状



a) 管軸方向縦断形状



b) 管軸垂直方向縦断形状

図-39 排砂前後の河床形状（2012年11月）

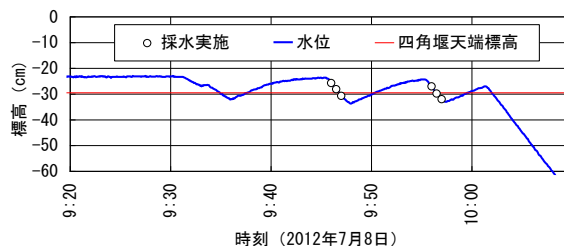


図-40 放流水の採水時刻（2012年7月）

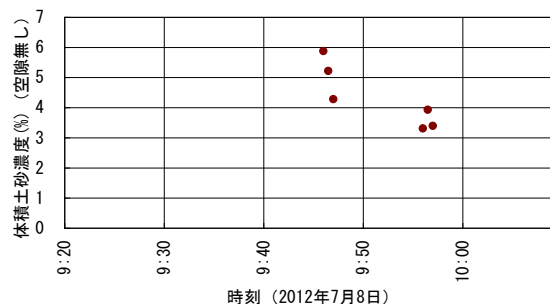


図-41 放流水の土砂濃度（2012年7月）

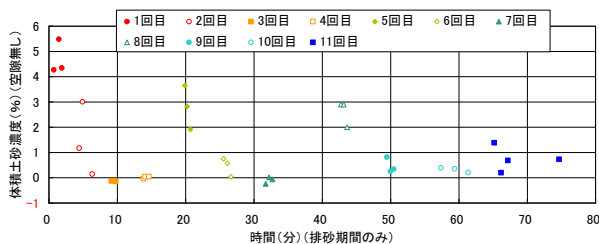


図-42 放流水の土砂濃度（2012年11月）

後に土砂濃度が上昇しその後低減したものである。

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。

排砂時の放流量、排砂時間、排砂量から、空隙率を0.4として平均的な土砂濃度を算定すると、7月の試験で0.6%、11月の試験で1.9%であった。

採水したサンプルに含まれた土砂の粒度分布について、7月の試験の結果を図-29に、11月の試験の結果を図-43に示す。図-29より、放流された土砂は投入した土砂より若干粗めになっているが、ほぼ投入土砂と同様な粒度であった。サンプルの中には、最大のもので長径38mmの礫が含まれていた。図-43では、全体的に投入土砂と同様な粒度であるが、終盤の粒度はやや小さくなっている。これは、掘削して埋め戻した粒度の小さい土砂を吸引したためと考えられる。

4) エネルギー損失

図-44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の一例を示す。折返し部から上流の管の4箇

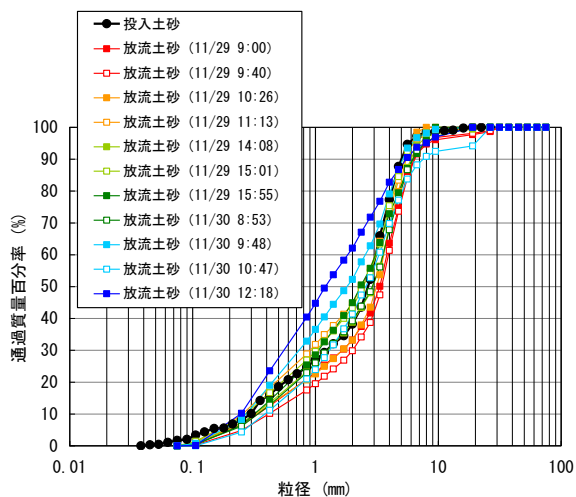


図-43 投入土砂及び放流土砂の粒度分布

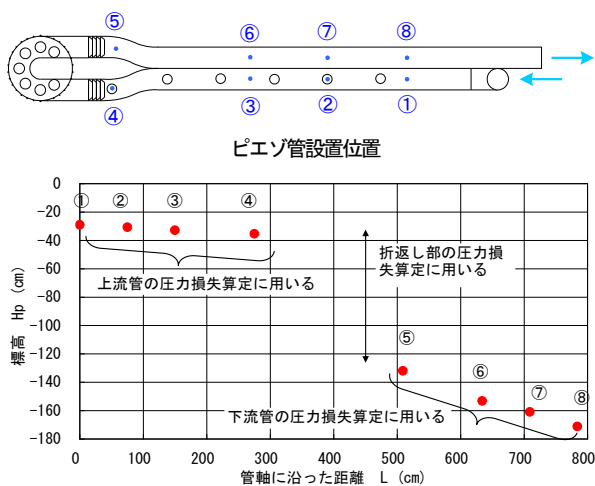


図-44 排砂管内のピエゾ水頭分布の例

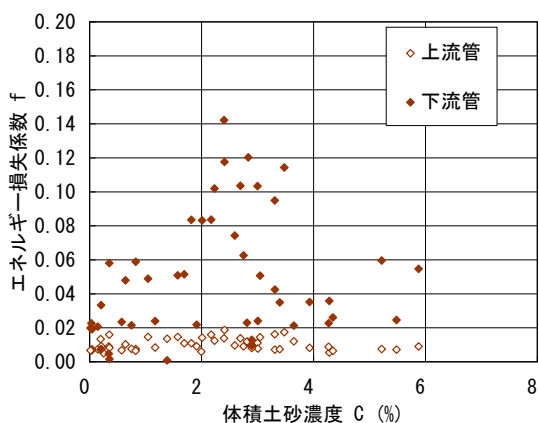


図-45 体積土砂濃度とエネルギー損失係数の関係

所、下流の管の4箇所の上にピエゾ管を設置し、放流水を採取した時点のピエゾ水頭分布を計測した。

折返し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。折返し部

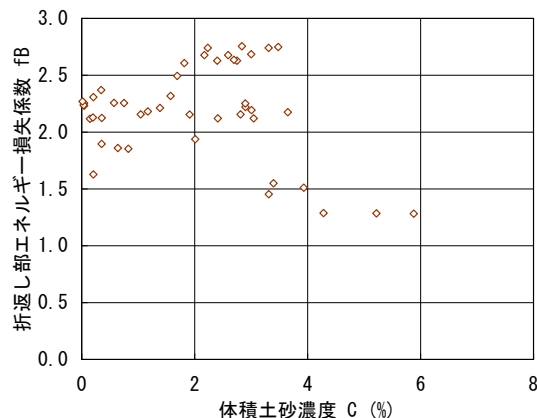


図-46 体積土砂濃度と折返し部エネルギー損失係数の関係

直下流では、折返し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まない上流管と比較して大きな圧力低下を生じている。

折返し部の上流及び下流のピエゾ水頭の圧力低下勾配(図-44 参照)を用いて求めた体積土砂濃度とエネルギー損失係数の関係を図-45に示す。図には7月と11月の試験結果をプロットしている。エネルギー損失係数の算定には、以下の式を用いた。

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

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-45より、上流管のエネルギー損失係数は概ね0.02以下である。下流管については、上流管よりかなり大きく、ばらつきも大きい。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。

折返し部上下流の圧力低下(図-44 参照)から求めた体積土砂濃度と折返し部のエネルギー損失係数の関係を図-46に示す。折返し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 : 折返し部エネルギー損失係数、 h_B : 折返し部の圧力損失水頭(m)を表す。

図-46より、折返し部のエネルギー損失係数は、1.2~2.8程度の値を示している。

2. 2. 1. 4 試験でみとめられた課題

7月の試験では、排砂管の下流側の管を途中で貯水池

の右岸方向へ大きく曲げて配置したため、排砂が進むにつれて排砂管にねじれが生じた（図-35でも折返し部の傾きが確認できる）。排砂の後半では、折返し部の傾きにより、底部の吸引口から水を吸い込んでしまい、土砂の



図-47 折返し部の浮き上がり（2012年11月）



a) 排砂前（2012年6月27日）



b) 排砂直後（2012年7月8日）



c) 排砂後1日経過（2012年7月9日）

図-48 堰堤直下流の川の状況（2012年7月）

吸引力が低下して土砂吸引量が少なくなっていた。

11月の試験でもある程度土砂の吸引が進むと、折返し部が浮き上がり（図-47参照）、土砂濃度が小さくなった。排砂管を持ち上げて、再度土砂上に設置すると、土砂濃度が大きくなったが、またしばらくすると折返し部底面と土砂の間に隙間ができ、濃度が小さくなった。

折返し部のねじれや浮き上がりには、土砂が盛土形状になっていたことも要因と考えられるが、堆砂面に多少の凹凸があっても、堆砂面への追従性を確保することが望ましく、今後の課題と考えられる。

2. 2. 1. 5 下流の川の状況

平成24年度の試験では、排砂した下流の川の状況について詳細な調査を実施していないが、図-48に示す排砂前、排砂直後、後日の堰堤直下流の川の写真から、簡単に状況を記載する。排砂前の下流の川は小さな溪流で、河床は数cm～人頭大の礫と石を主体とした材料から構成されていた。排砂直後には、排砂前には無かった砂の材料で、河床の大部分が覆われる状況となり、大きな石が砂から顔を出している状態であった。排砂後1日経過すると、河床を覆っていた砂はほとんど流失し、流水に晒される領域は、ほぼ排砂前の河床の状態にもどり、兩岸の一部に砂が残っている状況になっていた。

2. 2. 1. 6 現地実証試験（平成24年度）まとめ

岐阜県高山市の山地溪流に設置された小規模なヒル谷試験堰堤（京都大学穂高砂防観測所）において、管径200mmの潜行吸引式排砂管の現地排砂実験を実施した。その結果得られた知見を以下に示す。

- 1) 約3mの水位差で、1回目の試験で113L/sの流量を用いて52分間で3.45m³の土砂を排出でき、2回目の試験で116L/sの流量を用いて78分間で17.4m³の土砂を排出できた。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。
- 2) 排砂管の設置・撤去については大きな問題はなく、比較的簡便に行うことができた。
- 3) 堆砂への追従性が不足している課題があきらかになった。
- 4) 既存の排砂施設の流量調節設備のゲート構成と摩耗対策を整理し、水位差を利用した土砂供給施設への適用性を検討した。

2. 2. 2 現地実証試験（平成25年度）¹³⁾⁻¹⁵⁾

2. 2. 2. 1 現地実証試験の準備

平成24年度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。

高滝ダム^{16)・17)}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、千葉県河川整備部、千葉県市原土木事務所、高滝ダム管理事務所にて現地実証試験の内容をご説明、打診し、趣旨に賛同、現地実証試験の実施についてご理解をいただいた。また、平成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。

これらの手続きを終えて、千葉県から河川の一時使用及び貯砂ダムの施設借用の許可をいただき、実験を実施できる運びとなった。

次に、数回にわたり日竹貯砂ダム周辺を事前に現地調査を行い、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、

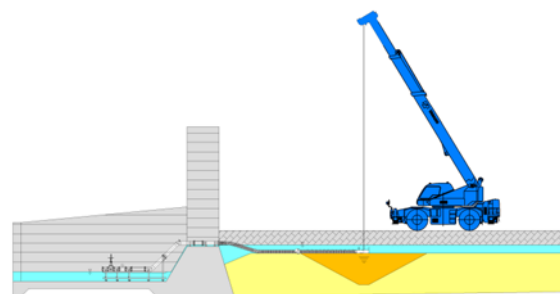


図-49 試験装置全体図

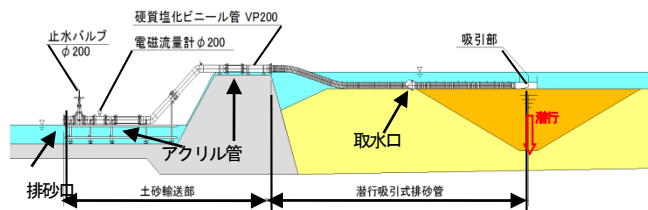


図-50 試験装置詳細図

構造等に関する情報や、試験サイトへ安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、平成25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以上の検討を行い、平成25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-49、図-50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



図-51 潜行吸引式排砂管設置状況(11/19)



図-52 潜行吸引式排砂管設置状況(11/19)



図-53 潜行吸引式排砂管設置状況(11/19)

置の設置手順は、図-50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-51～図-53に潜行吸引式排砂管の設置状況を示す。

2. 2. 2. 2 試験・計測方法

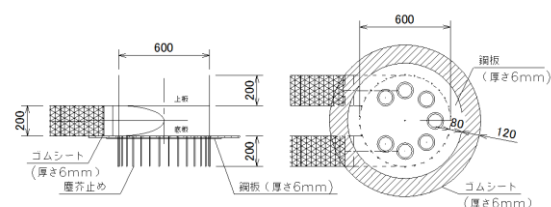
試験は表-5に示す4ケースを実施した。貯砂ダムにおける試験時の全景を図-54に示す。2. 2. 1で設置した装置において、吸引部を水中で吊った状態から、堆砂面に設置することで試験を開始することとした。また、2013年

表-5 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	下流バルブ全開	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-54 日竹貯砂ダム(試験時に左岸側から撮影)



排砂管吸引部(左:側面、右:底面)

図-55 潜行吸引式排砂管吸引部形状(ケース1)

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-55の形状で実施し、ケース3及びケース4については、平成24年度の室内実験におけるケース4の形状(図-13)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

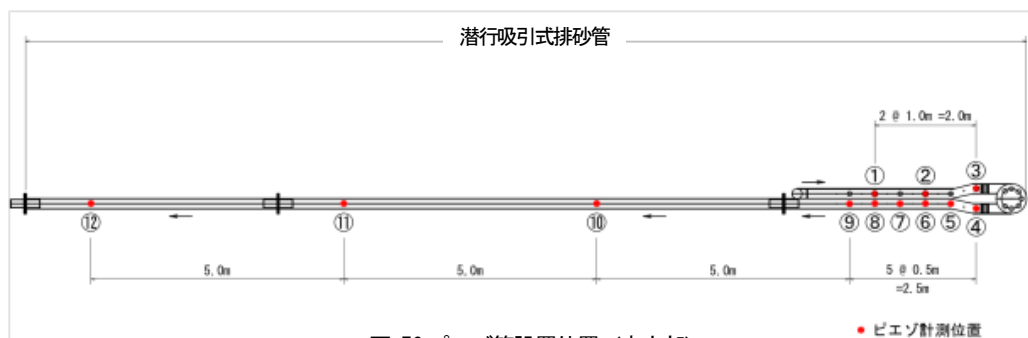


図-56 ピエゾ管設置位置 (赤点部)

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-56 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。
- 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. 2. 3 検討結果

表-5 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、平成24年度の実証試験と同様に塵芥止めを設置する図-55 に示す形状で実施した。一方、平成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、平成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ぎりぎり吊り、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-57 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-58 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。

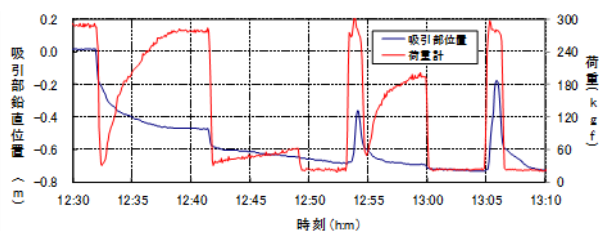


図-57 吸引部鉛直位置と吊り荷重の関係

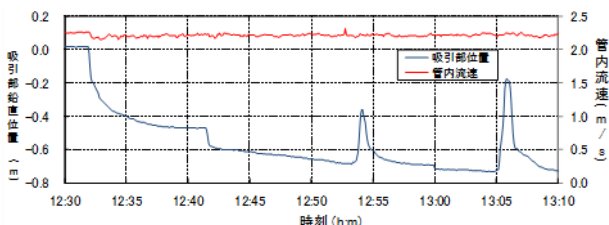


図-58 管内流速と吸引部鉛直位置の関係

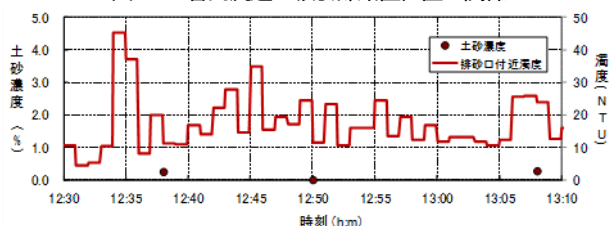


図-59 排砂口付近濁度と土砂濃度の関係

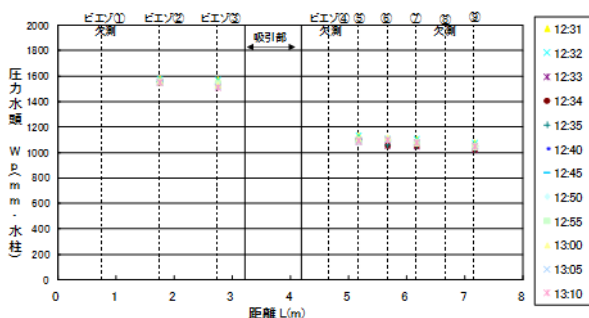


図-60 排砂管内のピエゾ水頭分布

②土砂濃度、下流濁度

図-59 に図-50 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-59 からも判るとおり、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% 未満となってしまった。一方、濁度計の数値を見ると、12:35 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。

③エネルギー損失

図-60 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-56 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-61、図-62 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/s²)、 L : 管長 (m)、 V : 管内平均流速 (m/s) を表す。図-61 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-62 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

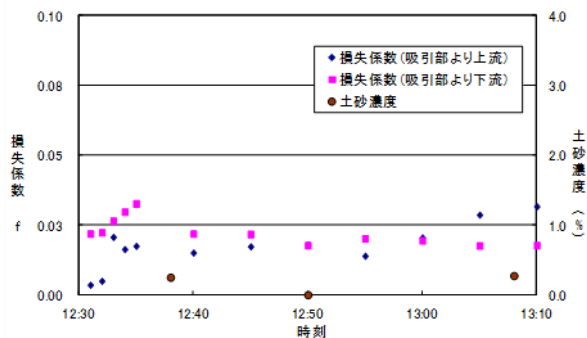


図-61 管路部のエネルギー損失係数及び土砂濃度の関係

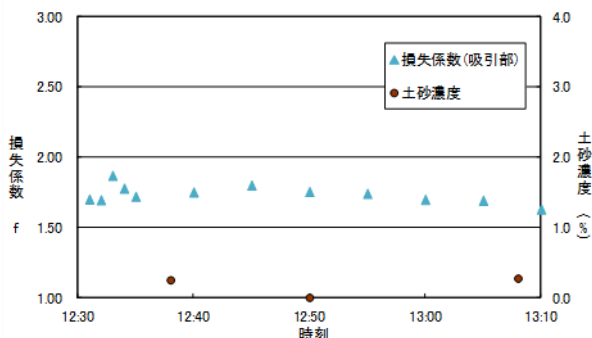


図-62 吸引部のエネルギー損失係数及び土砂濃度の関係

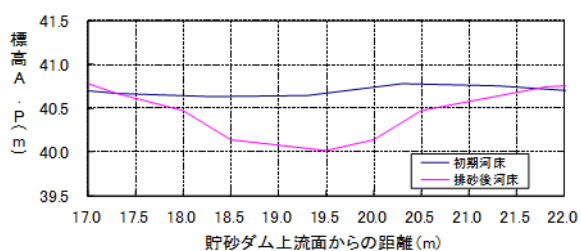


図-63 排砂前後の縦断河床形状 (ケース 1)

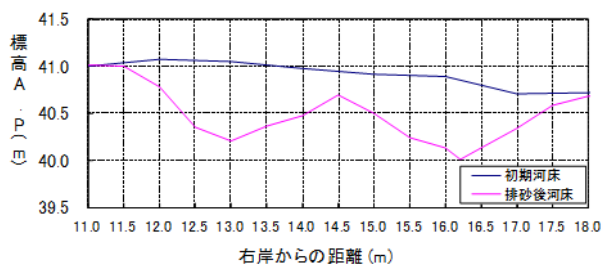


図-64 排砂前後の横断河床形状 (ケース 1)

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。

④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-63、図-64に示す。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、



図-65 試験開始前の吸引部の状況 (11/20 12:30)

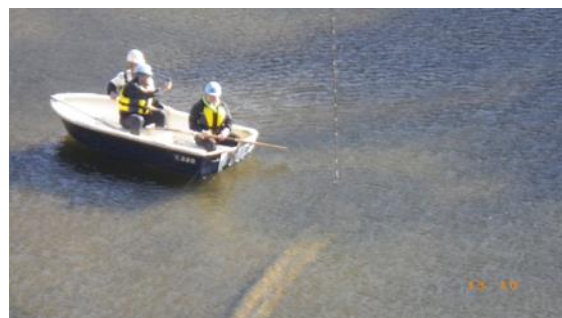


図-66 試験終了時の吸引部の状況 (11/20 13:10)



図-67 試験開始前の下流の状況 (11/20 10:16)



図-68 試験実施(ケース2)後の下流の状況 (11/20 15:28)

おおよそ直径5m程度、深さ0.8m程度であり、縦断面と横断面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-64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-65~図-68に試験前後の排砂状況の写真を示す。図-65、図-66からは、土砂の吸引が進み、排砂に伴い、す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が存在が要因として考えられる。また、**図-67**、**図-68**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、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-69**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-13**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



11/20 13:21



11/20 13:29



11/20 14:36

図-69 吸引部移動状況(ケース1~ケース2)

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-70**に示す。**図-70**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-71**に示す。

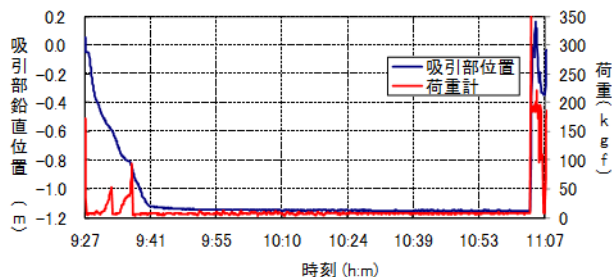


図-70 吸引部鉛直位置と吊り荷重の関係

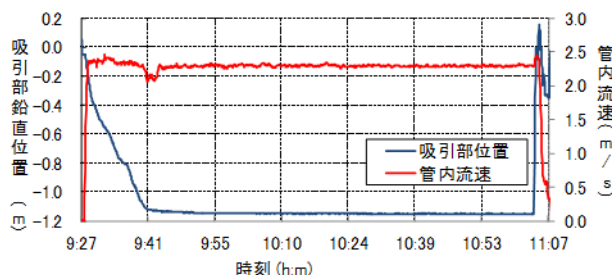


図-71 管内流速と吸引部鉛直位置の関係

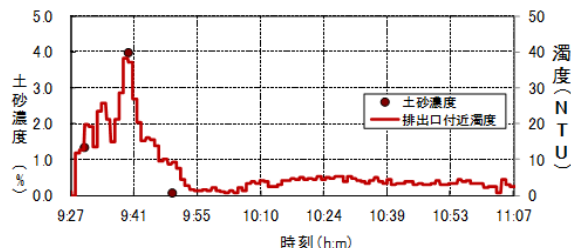


図-72 排砂口付近濁度と土砂濃度の関係

管内流速は約 2.3m/s (流量約 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-50 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-72 に図-50 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-72 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-72 で判るとおり、約 4%の土砂濃度が計測でき、この時の濁度の最大値が約 40NTU を

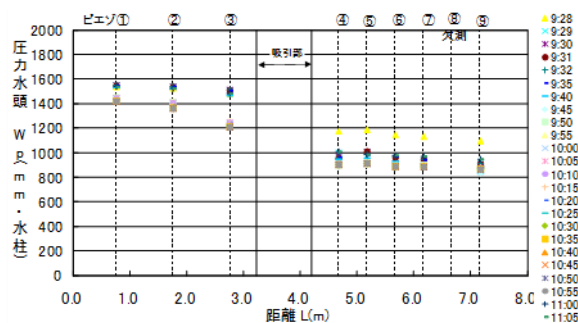


図-73 排砂管内のピエゾ水頭分布

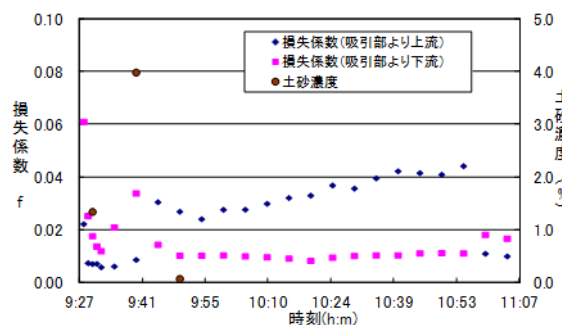


図-74 上下流管のエネルギー損失係数と土砂濃度の時間変化

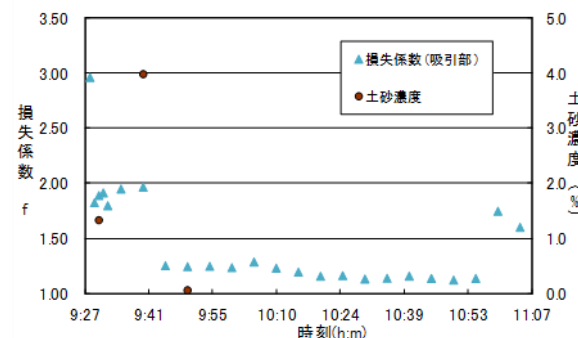


図-75 吸引部のエネルギー損失係数と土砂濃度の時間変化

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 m³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-73 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-56 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、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とともに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-74、図-75 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-74 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閉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-75 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-76、図-77 に示す。また9:33 と9:42 の試験中の状況を図-78 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3.5~5.0m、深さ1.1m であり、縦断面図と横断面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-78 から判るとおり、試験中、吸引部からは土砂中含

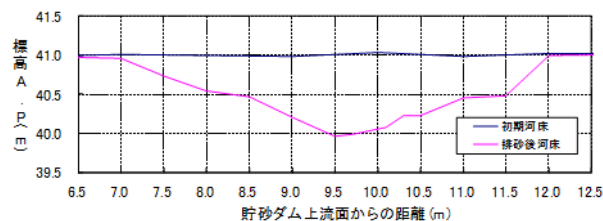


図-76 排砂前後の縦断河床形状(ケース3)

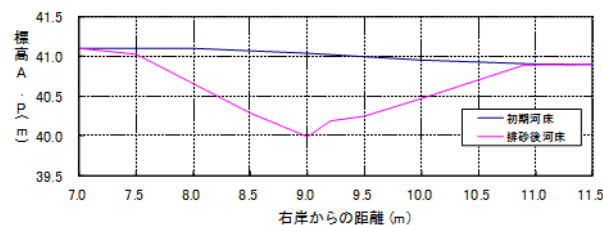


図-77 排砂前後の横断河床形状(ケース3)



試験実施直後(9:33)

試験実施後(9:42)

図-78 試験前後の吸引部の状況(ケース3)



図-79 試験実施中の状況(11/22 9:37)

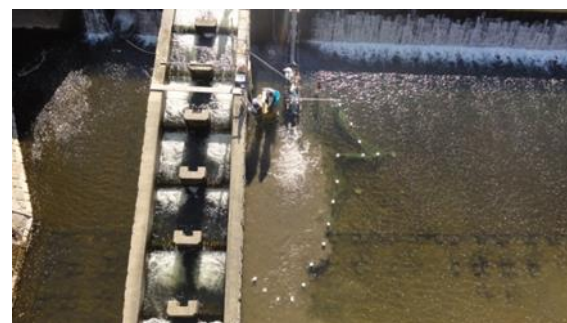


図-80 試験実施中の排出口付近の状況(11/22 9:37)

まれていたとみられる空気が泡として浮かんだが、濁水の発生はほとんどみられなかった。一方、図-79、図-80 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-81 のダム下流約20m 付近では、貯砂ダム



図-81 試験実施中の下流河川の状況 (11/22 9:37)



図-82 試験実施後状況 (11/22 10:37)



図-83 排砂口から排出された礫

への流入量が $0.75\text{m}^3/\text{s}$ に比べ、排水量が約 $75\text{L}/\text{s}$ 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-82 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-83 に示す。この礫を調査したところ、比重については $1.58\sim 1.85$ 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-84 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 10.3m^3 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. 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-85 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-86~図-89 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-89 に示す。吸引停止位置、葉の層、掘削河床の高さが



11/22 11:06



11/22 11:18



11/22 12:23

図-84 吸引部移動状況



図-85 追跡調査（柱状サンプリング）の様子

ほぼ一致した。これらから掘削河床において葉が集積層が形成され、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-90に示す葉の層における土砂（葉を除く）の粒度分布図を図-91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



図-86 追跡調査時に発見した葉の層



図-87 追跡調査時に発見した葉の層（拡大）



図-88 追跡調査時に発見した葉の層の例

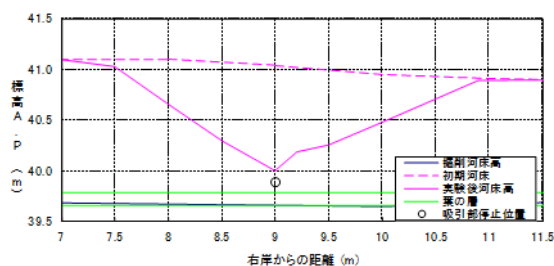


図-89 吸引部停止位置と追跡調査結果の比較（横断面）

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。

2. 2. 2. 5 現地実証試験（平成25年度）まとめ

塵芥や粘性土を多少含む実際のダム堆砂を対象とした、管径200mmの潜行吸引式排砂管による現地排砂実験から得られた知見等は次のとおりである。

- 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、



図-90 柱状調査から得られた葉の層を含む土砂

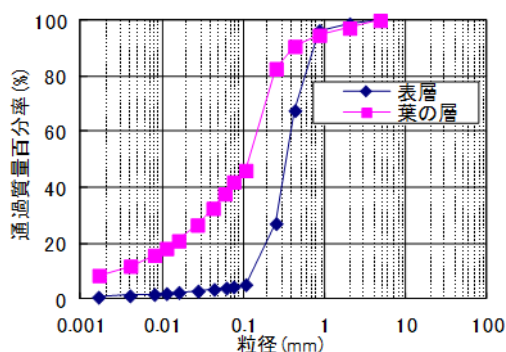


図-91 表層と葉の層の土砂の粒度分布(柱状サンプリング)

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。今回は管径 200mm、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ないことや、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、堆砂への追従性の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圧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的確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。

2. 2. 3 現地実証試験 (平成 26 年度) ¹⁸⁾⁻¹⁹⁾

2. 2. 3. 1 現地実証試験の準備

現地実証試験は平成 25 年度と同様に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 2014 年 11 月 24 日～11 月 30 日の間に管径 300mm 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、平成 25 年度と同様に関係者との合意形成を行った。

平成 25 年度と比べ、規模の大きな実験を行うことから、事前調査として、数回にわたり日竹貯砂ダム周辺の現地調査等を行った上で、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。

まず、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、試験サイトへ安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現地調査により行った。

平成 25 年度の試験により十分土砂の吸引が可能と考えられ、施設規模が大きくなることから、事前調査では、日竹貯砂ダムにおける河道内状況及び搬入路の状況について確認を行った。

河道内の状況把握のために、貯砂ダム上流側（貯砂ダムから 5m 間隔で上流 30m の範囲）の水深を計測した。

図-92 には貯砂ダム上流 15m 地点での横断測量図の例を示す。また、横断測量の結果を踏まえた平面図を図-93 に示す。また、高滝ダム管理事務所のヒヤリングから得られた、平成 25 年度に実施した排砂工事直後の河床形状も図-92 に示す。これら調査から、水深は概ね 1.0m 以内であり、部分的に 1.0m を越える箇所が存在している。また、平成 25 年度貯砂ダム維持浚渫直後の河床から概ね 1.0～1.5m 程度の土砂が堆積していることを確認した。

搬入路となる貯砂ダム右岸側へのアクセス路は、図-94 の示すように、草木が繁茂しており、運搬車両の通行が困難となっていた。また、実験準備及び実験時に使用するラフタークレーンの配置箇所を予定した貯砂ダム右岸側は図-95 に示すとおりであり、15cm 程度の厚さで土砂が堆積していることを確認した。

以上から、平成 25 年度の管径 200mm の試験の経験を踏まえながらも、貯砂ダムに十分な落差があること、貯砂ダムへの重機のアクセスは容易であること、また、水深が数十センチ程度の場所もあるなど実験時の河床計測などの作業を効率的に行える環境となっていたことから、現地排砂実験場所に選定することとし、除草や土砂の撤去などの実験場整備を行った上で実験計画を立案することとした。

排砂装置の実用化のためには、装置をどのように貯水池へ設置し、管理・運用するかが重要になる。そこで、

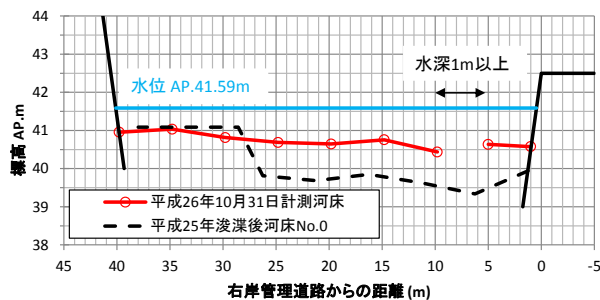


図-92 河床横断図例（貯砂ダム上流15m地点）

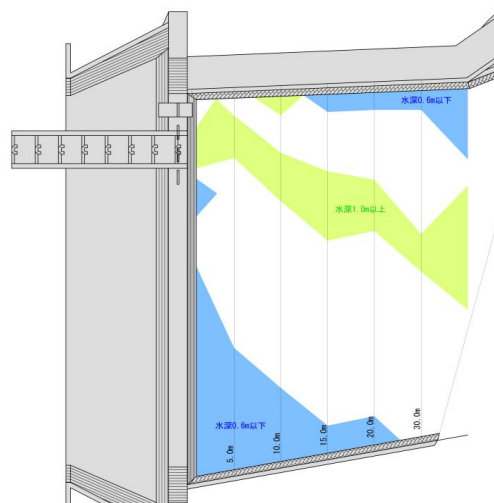


図-93 貯砂ダムの水深分布



図-94 搬入路の状況

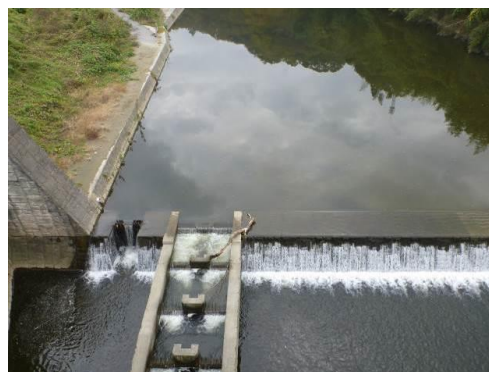


図-95 貯砂ダム右岸の状況

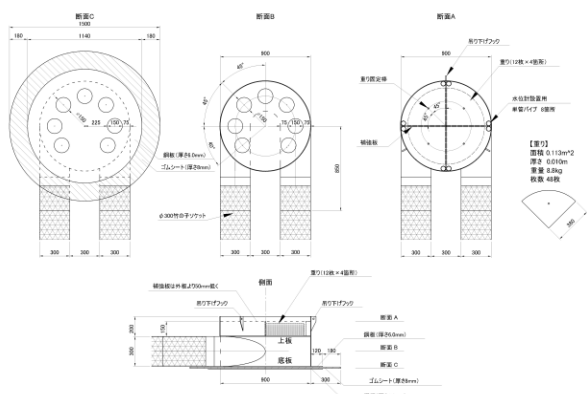


図-96 吸引部形状 (φ300mm)

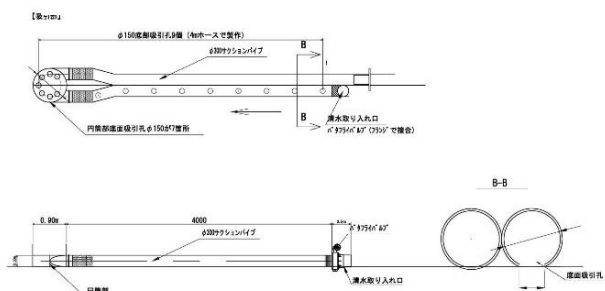


図-97 実験時排砂管全体形状 (φ300mm)



図-98 吸引部写真 (φ300mm)

想定される実物 (管径 300~600mm 程度) に近づけた今回の現地排砂実験における実施計画の立案、準備状況を記載する。

現地の状況を踏まえ、現地実証試験のための実施計画 (排砂管の設計及び実験計測計画) を検討した。具体的には、平成 25 年度に実施した管径 200mm の実験形状を図-96~図-98 に示すとおり、相似形で製作し、実験することとした。また、図-99~図-101 に示すとおり、貯砂ダ

ム上流部の吸引部を 25t ラフタークレーンにより吊り下げながら堆砂面に設置して実験を実施するとともに、貯砂ダムを削孔することができないことからサイフォンを形成させて、ダム下流への排砂を行う型式とし、実験計測機器として、アクリル管、電磁流量計、ゲートバルブ等を設置する実施計画を検討した。この上で、吸引位置を選定することとし、今回の現地実証試験では、管路長 (20m と 28m) をパラメータとして、吸引位置 4 地点で実験を行うこととした。なお、調査地点の選定にあたっては、以下の事項に留意して地点を選定した。

- 河道内の作業性及び安全性を考慮して、水深 1.0m 以内の箇所とする
- ラフタークレーンにより吸引部を安全に操作可能な範囲とする
- 河床形状を評価するため、各ケースの排砂面が重複しない箇所とする

試験時に吸引部やサクシオンホースにより、25t ラフタークレーンに作用する重量を想定しながら、実験ヤードの水深も踏まえて、図-102 に示す 4 地点を選定した。

以上の検討を基に関係機材を現場へ設置することとした。排砂管、計測機器、その他機材等については、茨城県つくば市の土木研究所つくば中央研究所より貯砂ダムまでトラック 3 台で運搬した。なお、管径 300mm の吸引部の重量は 700kg、管路部となるサクシオンホースが 1 本 4m で約 60kg であった。これらを 25t ラフタークレーンにより貯砂ダム右岸側から貯水池内につり込んだ。装置の設置手順は、まず、図-100 に示す土砂輸送部 (硬質塩化ビニール管、電磁流量計 (管内流速計測)、止水バルブ (流量調整)、アクリル管 (管内流況確認) で構成) を貯砂ダムに固定した後、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 15.5kg/m、許容圧力 0.1MPa、許容曲げ半径 2400mm で構成)) を土砂輸送部に連結した。この後、25t ラフタークレーンで吸引部を少し吊り、水中に配置した上で、徐々に排砂管全体の管内を満水にした後、土砂輸送部も充水し、貯砂ダムの天端は、真空ポンプにより排気口から空気を抜いて管内を満水にし、ダム頂部の管を真空に近い状態とし、下流端のバルブを一気に全開にして、サイフォンを形成させて、装置全体を実験可能な状態に設置した。

潜行吸引式排砂管の設置時間は半日程度で、比較的簡便に設置することができた。なお、11 月 27 日には、図-103~図-104 に示すように、出水があり、危険作業となる可能性があったことから、作業を中止した。また、試験終了後においても吸引部をスムーズに回収できる等の

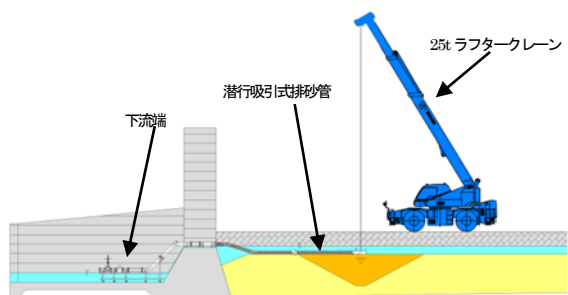


図-99 排砂実験時装置全体図



図-103 試験準備途中の出水状況（排砂管下流）

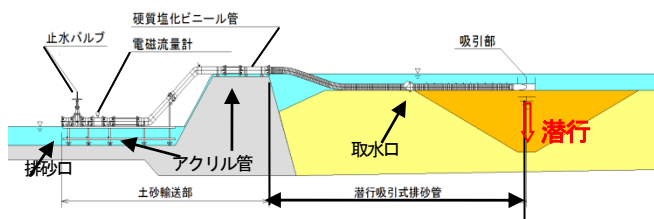


図-100 排砂実験装置全体図（φ300mm）



図-104 試験準備途中の出水状況（貯砂ダム天端）

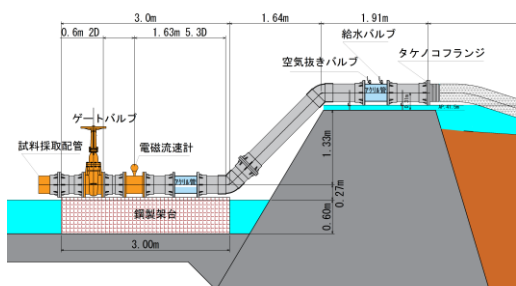


図-101 実験装置詳細図（下流端部）



図-105 試験準備中の排砂管の状況

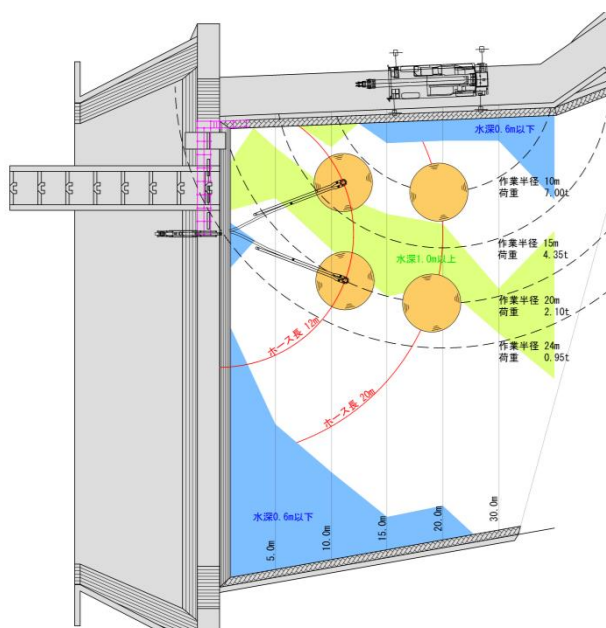


図-102 吸引計画地点

構造とするため、25t ラフタークレーンと吸引部は常にワイヤーロープに繋げた状態とした。この状態において、試験のための関係機材の設置が完了した。図-105 に試験準備中の排砂管の設置状況を示す。

2. 2. 3. 2 試験・計測方法

排砂管における水理特性等を把握するための計測項目と計測方法を表-6 に示すとともに、具体的には以下のとおりである。まず、これらの項目を計測するための関係機器の設置を行った。

①管内圧力：図-106 に示す位置で排砂管にピエゾ管を

表-6 計測項目と計測機器、計測頻度、計測方法

項目	計測機器	計測頻度	計測方法
圧力調査	水位計	1回/秒	排砂管にピエゾ管、改良式水位計を設置し、管内圧力分布を計測LPCIに記録
流量調査	電磁流量計	1回/秒	排砂管下流の電磁流量計において計測
排砂管鉛直位置	水位計	1回/秒	吸引部上面の上流、下流、左岸側、右岸側の4箇所に小型メモリ式水位計を設置し、平均値で算出
排砂管荷重調査	ロードセル	1回/秒	25tラフタークレーンに吊り下げ部にロードセルを配置計測
上下流水位差	水位計	1回/秒	貯砂ダム上下流に小型のメモリ式水位計を設置し計測
流況調査	水中カメラ、ビデオ	連続撮影	アクリル部、吸引部、吐口部をカメラ、ビデオで撮影
流砂量調査	メスシリンダー	適時	放流バルブの下流で放流水を採水して水と砂をメスシリンダーで計測
濁度調査	濁度計	1回/秒	放流管下流に濁度計を設置し、濁度 (NTU) を計測
河床変動調査	レベル	2測線/回	実験前後で縦断方向、横断方向にレベルを用いて河床形状を直接計測
土砂粒度分布	-	1回/場所	実験前後に、吸引部設置位置周辺で柱状採取しふるい分け試験により求めた。
ダム流入量	-	1回/1時間	千果泉へのヒヤリング(上流での流量観測)

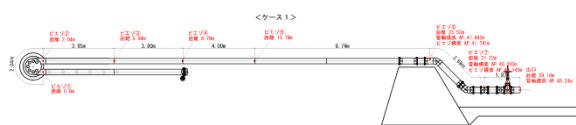


図-106 圧力計測 (ピエゾ) 位置

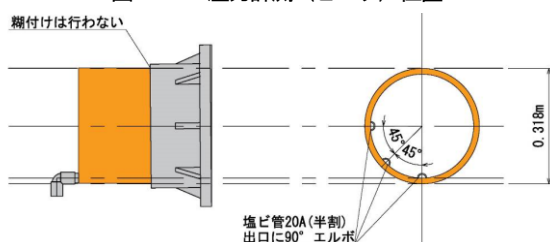


図-107 土砂濃度算出用の試料採取配管

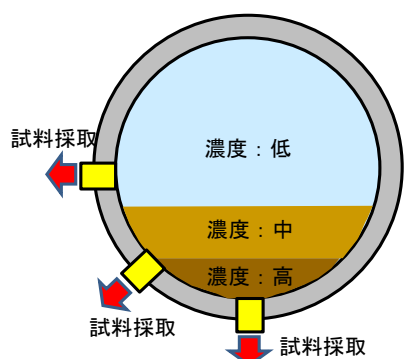


図-108 土砂濃度計測のイメージ

表-7 試料採取箇所の断面積

	表層	中層	底層
断面比	0.50	0.41	0.09
断面積(mm ²)	35,343	29,021	6,321

設置し、管内圧力分布を計測することとした。

- 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することとした。
- 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箇所に上下流水位の計測に用いたのと同様の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吊荷重：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。
- ⑤上下流水位：小型のメモリ式水位計（大起理化学工業製、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。
- ⑥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。
- ⑦土砂濃度：放流バルブの下流で放流水を適時に採水して土砂濃度を計測した。管径 200mm の試験では、人力による直接放流水を採取して土砂濃度を計測できたが、管径 300mm の実験規模となると、管内流量が多く、直接の採取が安全上困難となるため、採水方法としては図-107～図-108、表-7 に示すように排砂管出口部に上層、中層、下層の3箇所の試料採取用配管から採水を行い試料サンプルから断面積比率を考慮して平均化したものを土砂濃度とした。具体的には、まず、3箇所で採取試料の水と土砂の混在比率を求め、得られた土砂濃度を3層の断面積比率を考慮し求めることとした。土砂濃度の算出方法は次のとおりである。
 1. 採取試料は、水と土砂の混在比率を求め、土砂濃度とした。
 2. 3箇所で得られた土砂濃度は、表層、中層、底層の断面積比率を考慮し、平均化した (表-3 参照)。
 3. 2. で得られた濃度を土砂濃度とした。
- 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 下流と下流河道に濁度計を図-109 に示すように魚道終端と下流河道に設置し、濁度 (NTU) を計測した。
- ⑨河床形状：実験前後の縦断方向、横断方向の河床形状を測量した。
- ⑩土砂の粒度：実験前の河床を対象に、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、排砂管の実用規模は、今回の検討規模以上となると考えられる。実用化のためには、各種の計測項目特に排砂管に直接関係する水理量等を的確にリアルタイムで把握していくことが運用上求められると考えられる。



図-109 濁度計設置、計測状況（魚道終端、下流河道）

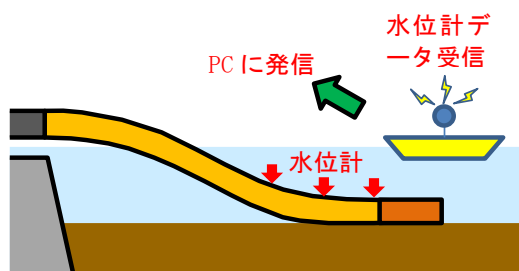


図-110 リアルタイムデータ収集の仕組みのイメージ

表-8 実験ケース

実験ケース	排砂管長	実施日	時間	排砂管径	実施位置
Case 1	28m	H26.11.28	10:00~10:57	φ 300mm	貯砂ダム中央上流20m地点
Case 2	28m	H26.11.28	11:30~12:20	φ 300mm	貯砂ダム右岸上流20m地点
Case 3	20m	H26.11.29	10:00~11:09	φ 300mm	貯砂ダム右岸上流12m地点
Case 4	20m	H26.11.29	13:27~15:27	φ 300mm	貯砂ダム中央上流12m地点

平成25年度の管径200mmの実験では、リアルタイムで水量等を把握できず、試験実施中は排砂管の挙動等の解析が不可能となっていた。このため、今回の管径300mmでの試験では、圧力計測および排砂管鉛直位置等の排砂管に直接関係する水量等の計測については、図-110に示すように貯砂ダム上流に浮かべたゴムボートに有線により情報を集約した上で、ゴムボートから無線LANを用いて右岸のヤードへ情報を送信、パソコン上で排砂管の挙動等が一目で監視できる仕組みを構築することとした。

2. 2. 3. 3 検討結果

以上の経緯によって試験を実施できる環境を整え、現地実証試験を実施した。実験は吸引部を25tラフタークレーンで吊り上げ、下流端のバルブを全開として実験を開始した。実験ケースは表-8に示すとおりである。

以下、それぞれのケースから得られた知見を報告する。なお、今回の試験では、排砂管の水理特性に関する知見を得ることを目的として、実験開始直前に、吸引部を河床に着底しないように水中に配置して、清水時の管内水量を計測した上で、ラフタークレーンにより吸引部を吊り下ろし、堆砂に着床させ、吊り荷重が無荷重となつ

た時点を開始時刻として排砂実験を実施した。

(1) ケース1 (11/28 10:00~10:57 流入量1.32m³/s)
 ケース1は、排砂管長28m、吸引部を貯砂ダムから上流約20mの右岸側に設置するケースとして実施した。

①吸引部鉛直位置と吊荷重

図-111に吸引部鉛直位置と吊荷重の関係を示す。実験中は吊荷重を概ね0kgとし、試験開始（吸引部着底）直後、急激に吸引部が潜行したが、10:05頃において潜行速度が遅くなるものの一定の速度で潜行は継続した。実験終了時の11:00頃には約1.5m程度まで潜行した。

②吸引部鉛直位置と管内流速

図-112に吸引部鉛直位置と管内流速の関係を示す。吸引部が急激に潜行した実験初期の10:05頃には吸引部の降下速度が低減し2.2m/s程度まで下がったが、管内流速が2.4m/s程度まで回復している、10:20頃には降下速度が高くなり、管内流速が再度2.2m/s程度まで低下するといったことが見受けられ、管内の土砂流下の状況によって流速が変化しているとも考えられる。なお、清水時の平均管内流速は2.45m/sであった。

③土砂濃度と管内流速

図-113に管内流速と土砂濃度の時系列変化の関係を示す。ここでは前述の手法により土砂濃度を計測したが、実験直後に管底部を流下する土砂により試料採取用配管が閉塞し、底層での採取が困難となった。また、10:10頃には中層も同様に閉塞が生じて採取困難となった。このため、試料採取方法が時間により異なるが、土砂濃度の変化の傾向のみに着目すると、10:05頃の管内流速が低減する時間において、低層は欠測しているが、土砂の濃度が2%程度となり、概ね土砂濃度が上昇すると管内流速も低下していることが伺える。このことから、管内流速と土砂濃度は相関関係を有していると考えられる。この層別の土砂濃度の計測方法によって、土砂濃度の変化傾向を把握できたが、巨礫の計測や底層部に土砂の層が堆積した場合なども含めて、土砂濃度の計測手法の開発が必要であると考えられる。

④エネルギー損失

試験で得られた管内圧力及び管内流速からサクションホースの摩擦損失係数及び吸引部の曲り損失係数を算定し、得られた損失係数の時系列変化を図-114に示す。なお、吸引部より下流の管路部のエネルギー損失係数の算定には、以下の式を用いた。

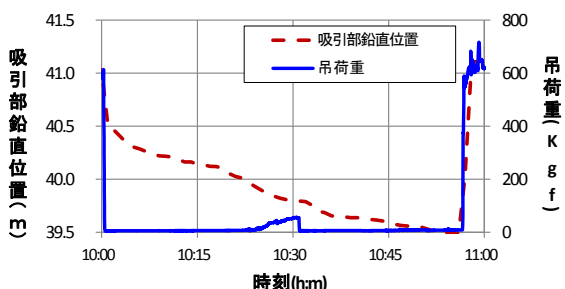


図-111 吸引部鉛直位置と吊荷重の関係(ケース1)

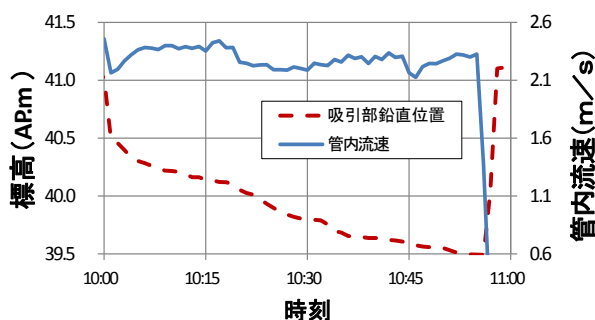


図-112 吸引部鉛直位置と管内流速の関係(ケース1)

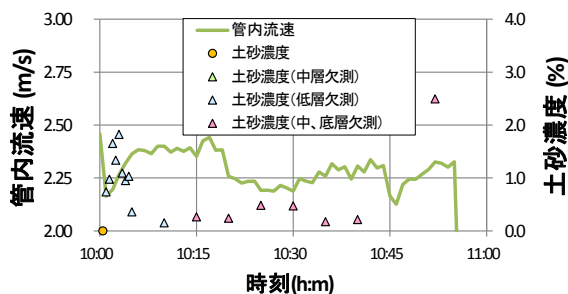


図-113 管内流速と土砂濃度の関係(ケース1)

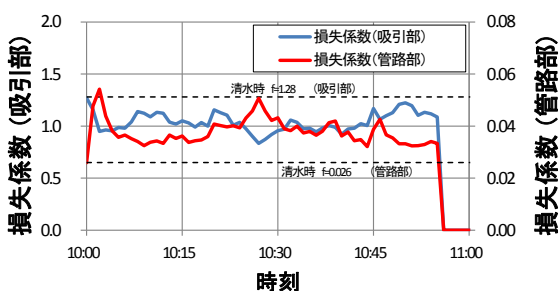


図-114 吸引部と管路部の損失係数(ケース1)

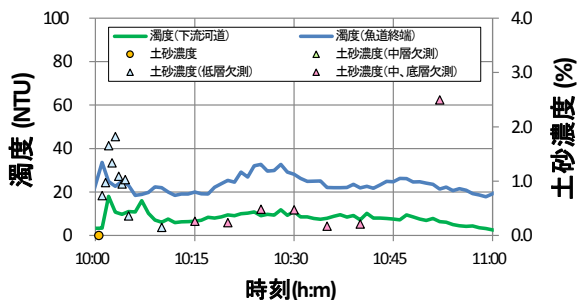


図-115 下流濁度と土砂濃度の関係(ケース1)

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

ここで、 f : 吸引部下流の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。

また、吸引部における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 : 吸引部の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。

実験前の清水時の摩擦損失係数 f と曲り損失係数 f_B の平均値は $f=0.026$ 、 $f_B=1.28$ であった。排砂実験時は、 f が清水時に対し排砂時の損失係数が上昇する傾向となったのに対し、 f_B は反対に低下する傾向を示し、吸引部の水理特性のさらなる調査が必要であると考えられた。

⑤下流濁度

図-115に下流濁度と土砂濃度の関係を示す。土砂濃度が高くなると下流濁度も上昇し、下流河道においても希釈されていることが判る。

⑥河床形状、排砂量、河床状況、流況

実験前後の河床形状計測結果を図-116、図-117に示す。直径4m、深さ1.0m程度の排砂面が形成され、この排砂面形状からを求めると排砂量(空隙込み)で $8.3m^3$ であった。また、図-118に実験時に水中カメラを用いて吸引部付近の河床を撮影した結果を示す。排砂とともに吸引部付近には礫や沈木が集積している様子を示している。また、図-119には、実験中の天端付近の亚克力管の状況を示す。土砂が継続的に流下する流況が確認された。

以上ケース1においては、礫や沈木の集積による吸引阻害等は生じなかったと考えられる。

(2)ケース2 (11/28 11:30~12:20 流入量 $1.32m^3/s$)

ケース2は排砂管長を28mとし、吸引部を貯砂ダムから上流に約20mの河道中央付近に配置して実験を行った。

①吸引部鉛直位置と吊荷重

図-120に吸引部鉛直位置と吊荷重の関係を示す。実験中は吊荷重を概ね0kgとし、試験開始(吸引部着底)直後、ケース1と同様に、急激に吸引部が潜行したが、11:40頃において潜行速度が遅くなるものの一定の速度で潜行は継続した。実験終了時の12:20頃には約1.1m程度まで潜行した。

②吸引部鉛直位置と管内流速

図-121に吸引部鉛直位置と管内流速の関係を示す。吸

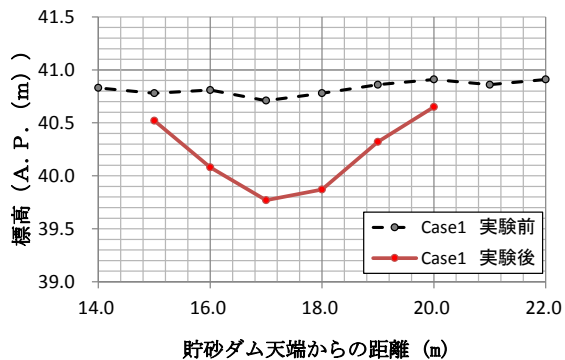


図-116 実験前後の縦断河床形状 (ケース 1)

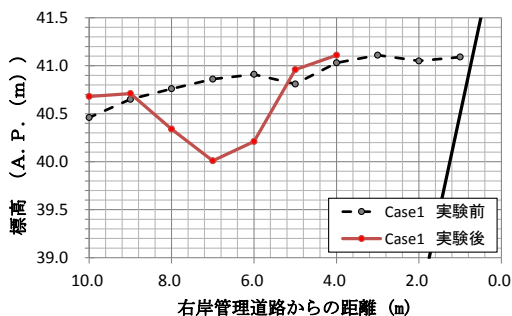


図-117 実験前後の横断河床形状 (ケース 1)



図-118 実験中の吸引部周辺土砂の状況 (ケース 1)

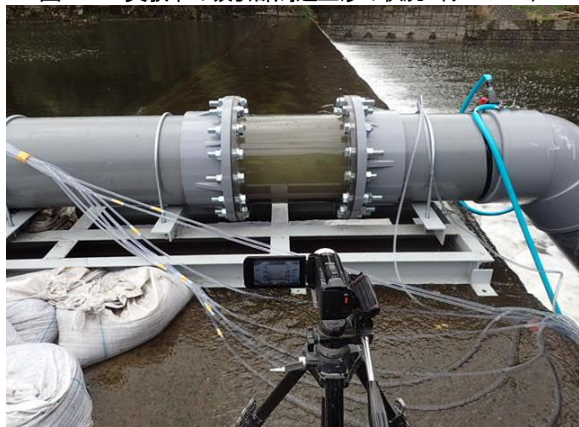


図-119 天端アクリル管での流況 (ケース 1)

引部が急激に潜行した実験初期においては管内流速が 2.3m/s 程度まで下がった後に、11:40 頃に 2.4m/s 程度ま

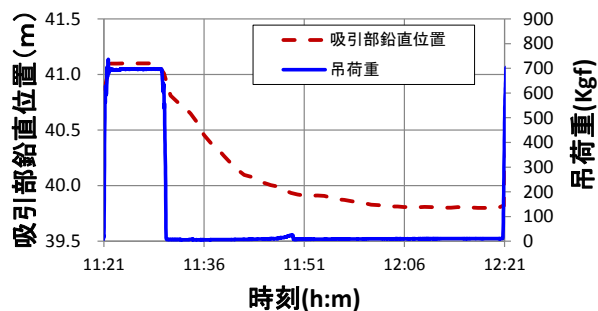


図-120 吸引部鉛直位置と吊荷重の関係 (ケース 2)

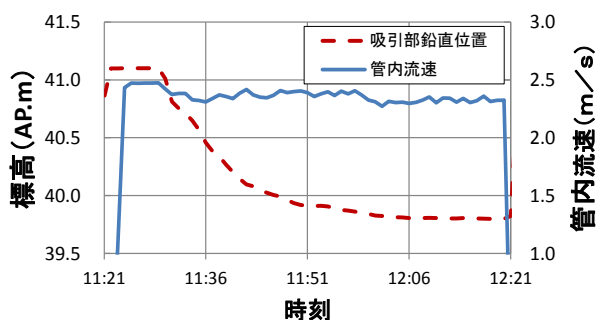


図-121 吸引部鉛直位置と管内流速の関係 (ケース 2)

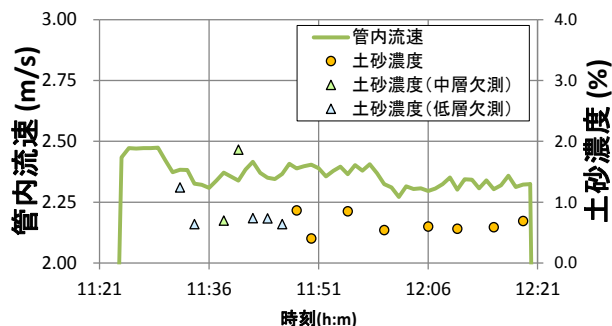


図-122 管内流速と土砂濃度の関係 (ケース 2)

で回復、12:00 頃に再度 2.3m/s 程度まで下がる動きとなっている。また、ケース 1 と同様に降下速度が高くなると、管内流速が低下する現象も見受けられ、管内の土砂流下の状況によって流速が変化していると考えられる。なお、11:21～11:30 までの清水時の平均管内流速は 2.45m/s であった。

③土砂濃度と管内流速

図-122 に管内流速と土砂濃度の時系列変化の関係を示す。土砂濃度の計測においては、ケース 1 と同様の手法で試料を採取したが、ケース 1 と同様に、管の底部を流下する土砂により試料採取用配管の閉塞、底層

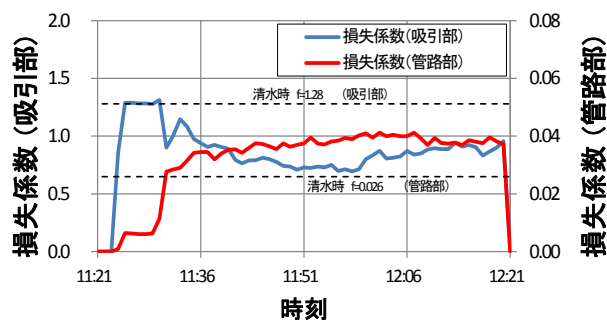


図-123 吸引部と管路部の損失係数(ケース2)

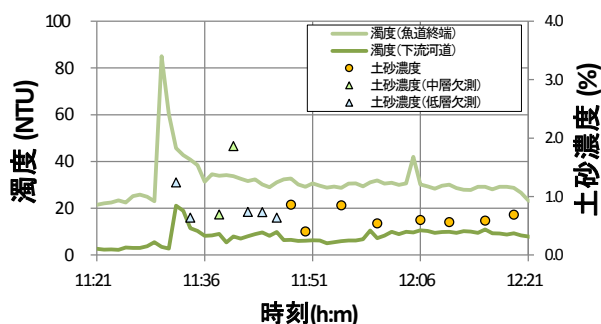


図-124 下流濁度と土砂濃度の関係(ケース2)

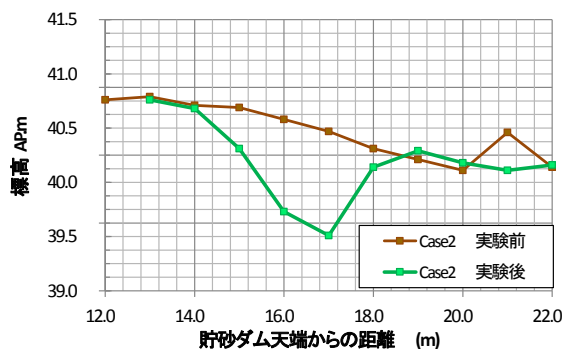


図-125 実験前後の縦断河床形状(ケース2)

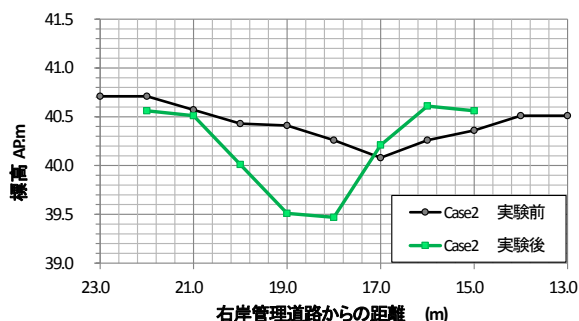


図-126 実験前後の横断河床形状(ケース2)

及び中層で採取ができない状況が生じた。そのため、11:50頃からポリ塩化ビニール瓶により試料採取用配

管付近の3か所で直接試料を採取する手法に切り替えた。

吸引部着底後の流速は、排砂に伴う流速の低下が見られる。また、試料採取方法が時間により異なるため、土砂濃度の変化の傾向のみに着目して評価すると、概ね土砂濃度の急上昇したとき管内流速も急低下していることがわかる。

④エネルギー損失

実験で得られた管内圧力及び管内流速からサクシオンホースの摩擦損失係数及び吸引部の曲り損失係数を算定した。損失係数の算定はケース1と同様に算出した。

得られた損失係数の時系列変化を図-123に示す。清水時の摩擦損失係数 f と曲り損失係数 f_b それぞれの平均値をとると、 $f=0.026$ 、 $f_b=1.28$ となるが、ケース1と同様に f の場合、清水時に対し排砂時の損失係数が上昇する傾向となり、 f_b の場合は、低下する傾向を有する。この要因については調査・検討を行う必要があると考えている。

⑤下流濁度

図-124に下流濁度と土砂濃度の関係を示す。今回の場合、試料の採取が異なっていることから、評価は難しい。また、魚道終端での濁度が上昇すると下流濁度も上昇しており、下流河道において希釈されていることが判る。

⑥河床形状、排砂量、河床状況、排砂後の状況

実験前後の河床形状計測結果を図-125～図-126に示す。ケース2では直径6m、深さ1.1m程度の排砂面が形成され、同様に排砂量、平均土砂濃度を求めるとそれぞれ4.0m³、0.8%となる。また、図-127、図-128にケース1およびケース2の実験直後の放流口下流の状況を示す。排出された土砂には砂分だけではなく、礫も含まれ、様々な粒径土砂が放流されたことがわかる。

(3) ケース3 (11/29 10:00～11:09 流入量1.01m³/s)

ケース3は、排砂管長20mとし、吸引部を貯砂ダムから上流に約12mの右岸側に配置して実験を行った。なお、吸引部の操作方法はケース1の方法と同様とした。

①吸引部鉛直位置と管内流速

図-129に吸引部鉛直位置と吊荷重の関係を示す。実験中は吊荷重を概ね0kgとしていたが、10:05ごろに、吸引部の潜行速度が鈍化する現象が起こったが、数分後に再び潜行を始めるものの、10:15ごろに、再び潜行が停止し、10:30ごろに、約GL-1.0mでまでに潜行が停止



図-127 排砂実験後の放流口下流の状況 (ケース2)



図-128 排砂された土砂 (ケース2)

した。このため、実験中に吸引部付近の河床を棒により直接河床を突いて確認を行ったところ、潜行が停止した原因は、固結した粘性土が存在によるものと考えられた。このため、以降、吸引を継続しても状況が変化しないと想定されたため、吸引部を約1m左岸側に移動させ吸引を再開した。再開後は、吸引阻害等もなく吸引を継続でき、ケース3終了直前の吸引部位置はGL-1.7m程度となった。この結果から、固結した粘性土と思われる存在は局所的なものであったと想定される。

②吸引部鉛直位置と管内流速

図-130に吸引部鉛直位置と管内流速の関係を示す。今回のケースの場合、ケース1とケース2に比べ、10:30ごろまでは流速の低減率が低く概ね2.5m/s付近の流速となっている。吸引位置を動かした後は流量の低減がみられた。清水時に比べて、流速の低下がみられなかった場合は、潜行が円滑に行われていないと考えられ、潜行が円滑に行われれば、管内流速が低下するといったことが見受けられ、管内の土砂流下の状況によって流速が変化しているとも考えられる。

③土砂濃度と管内流速

図-131に土砂濃度と管内流速の関係を示す。ケース3では、ケース1、ケース2と同様の方法では試料採取用配管が閉塞してしまうことから、全試料での採取方法を採用(任意の位置で直接サンプル採取)している。ケー

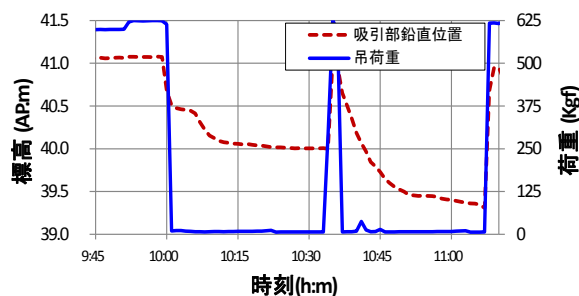


図-129 吸引部鉛直位置と吊荷重の関係 (ケース3)

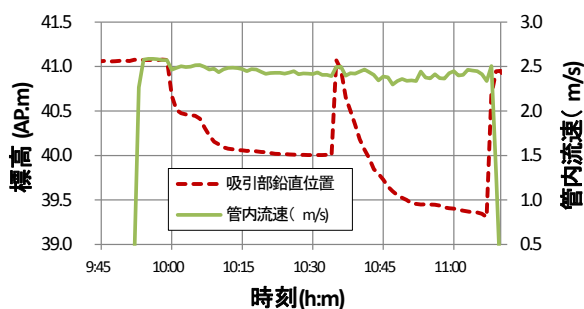


図-130 吸引部鉛直位置と管内流速の関係(ケース3)

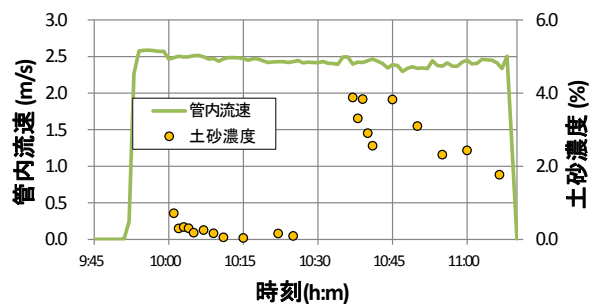


図-131 管内流速と土砂濃度の関係 (ケース3)

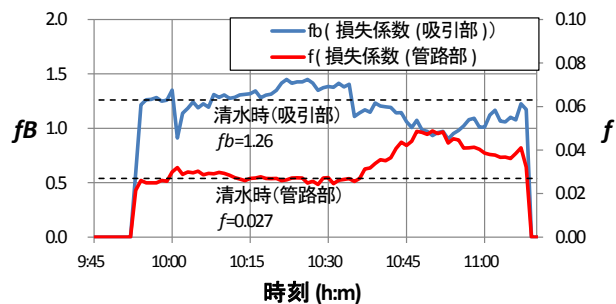


図-132 吸引部と管路部の損失係数(ケース3)

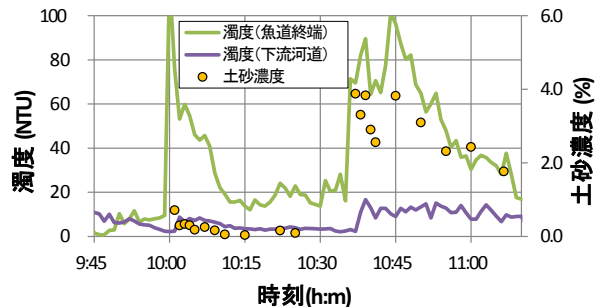


図-133 下流濁度と土砂濃度の関係(ケース3)

ス3前半では、潜行が停止したこともあり、土砂濃度は0.5%未満で推移している。ケース3後半の吸引地点を移動した後では、最大約4%まで濃度が上昇し、管内流速も低下している。

④エネルギー損失

ケース1およびケース2と同様に、実験で得られた管内圧力及び管内流速からサクシオンホースの摩擦損失係数及び吸引部の曲り損失係数を算定した。損失係数の時系列変化を図-132に示す。清水時の損失係数は、 $f=0.027$ 、 $f_B=1.26$ となり、サクシオンホース長の変化による管内損失への影響はほとんど見られなかった。ケース3の前半(吸引部が潜行を停止)では、ほとんど吸引が出来なかったため、吸引部着底直後を除いて清水時の損失係数とほぼ変化していない。一方、継続して潜行したケース3後半では、ケース1と同様に排砂に伴い f は上昇し、 f_B は低下する傾向を有していることを確認した。

⑤下流濁度

図-133に下流濁度と土砂濃度の関係を示す。ケース3の前半では、土砂濃度の上昇はみられなかったが、魚道終端での濁度は急激に上昇した。一方、ケース3の後半では土砂濃度の上昇に伴い、魚道終端の濁度も上昇しており、前半においては、粒径の細かい成分が流出したため、採水による土砂濃度の計測では値は大きくならなかったものと考えられる。また、魚道終端の土砂濃度が高くなると下流濁度も上昇しており、相関がみられるとともに、下流河道においても希釈されていることが判る

⑥河床形状、排砂量、河床状況、流況

実験前後の河床計測結果を図-134～図-135に示す。ケース3では直径3m、深さ1.3mの排砂面が形成され、排砂量は12.2m³、平均土砂濃度は1.7%であった。

図-136にケース3の後半時の河床撮影結果を示す。ケース3の後半では、堆積土砂は砂分であり、急激に砂分が吸引されている様子が確認できる。また、図-137に示すとおり、後半では連続的に土砂が排砂された。

(4) ケース4 (11/29 13:27～15:27 流入量1.49m³/s)

ケース4は、排砂管長20mとし、吸引部を貯砂ダムから上流に約12mの河道中央部に配置したケースにおいて実施した。ケース4(13:27～)では、本実験を通して最長の2時間の吸引を行った。

①吸引部鉛直位置と吊荷重

図-138に吸引部鉛直位置と吊荷重の関係を示す。実験中は吊荷重を0kgとし、試験開始(吸引部着底)直後、急激に吸引部が潜行して試験終了まで潜行速度が徐々に低下していくものの、潜行は継続した。実験終了時の

15:30頃には約2.0m程度まで潜行した。

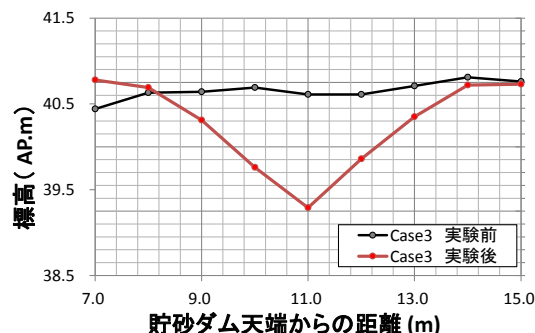


図-134 実験前後の縦断河床形状 (ケース3)

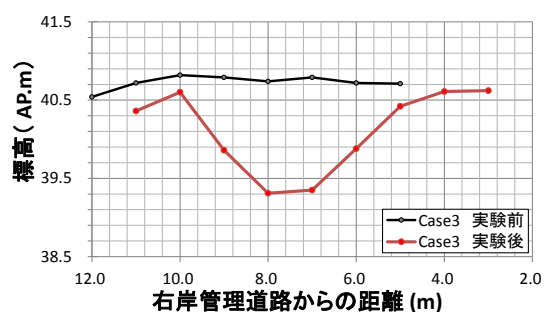


図-135 実験前後の横断河床形状 (ケース3)



図-136 吸引部土砂吸引状況 (ケース3)



図-137 天端アクリル管での流況 (ケース3)

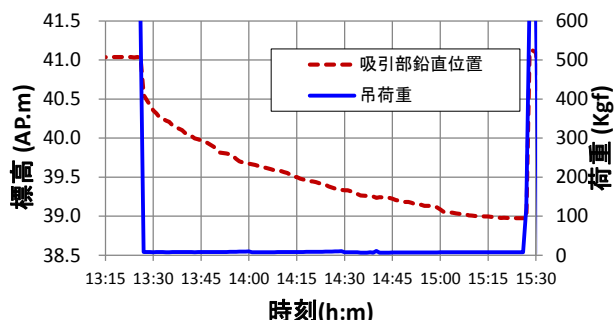


図-138 吸引部鉛直位置と吊荷重の関係 (ケース4)

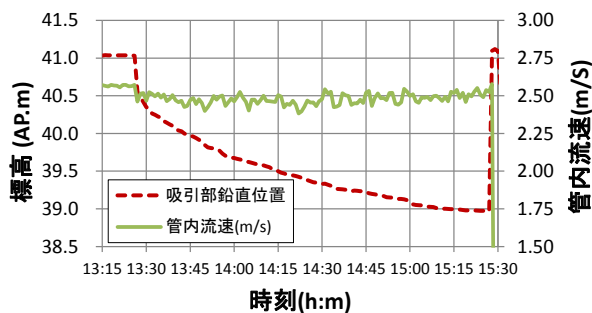


図-139 吸引部鉛直位置と管内流速の関係 (ケース4)

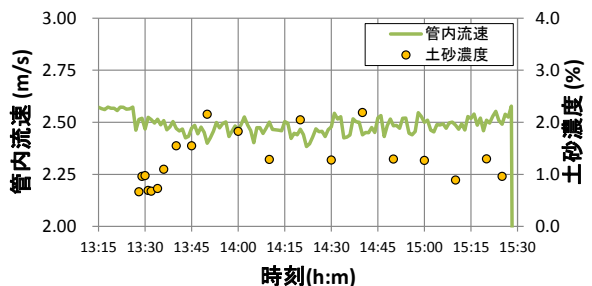


図-140 管内流速と土砂濃度の関係 (ケース4)

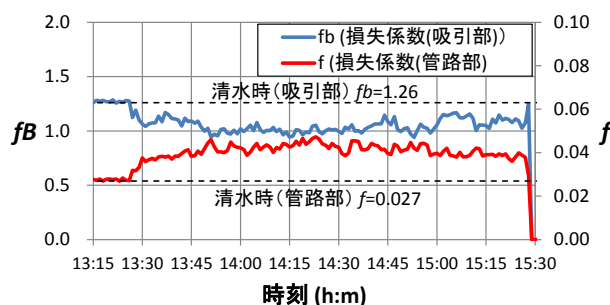


図-141 吸引部と管路部の損失係数 (ケース4)

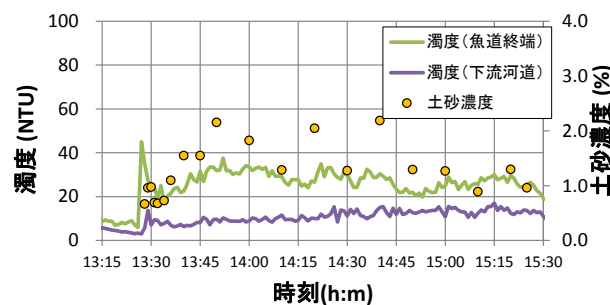


図-142 下流濁度と土砂濃度の関係 (ケース4)

②吸引部鉛直位置と管内流速

図-139 に吸引部鉛直位置と管内流速の関係を示す。このケースについては、吸引部の潜行が継続しており、管内流速が概ね 2.5m/s を下回る状態を保って実験が終了した。

③土砂濃度と管内流速

図-140 に土砂濃度と管内流速の関係を示す。ケース4では、最大土砂濃度が低いものの、概ね1~2%で安定している。排砂時の管内流速は、清水時の流速 2.57m/s に対し、約 95%まで低減していることがわかる。土砂濃度と管内流速に関係性が見受けられる。

④エネルギー損失

実験で得られた管内圧力及び管内流速からサクシオンホースの摩擦損失係数及び吸引部の曲り損失係数を算定した。損失係数の時系列変化を図-141 に示す。ケース4でも、他のケースと同様に排砂に伴い f は上昇し、 f_b は低下する傾向を有していることを確認した。

⑤下流濁度

図-142 に下流濁度と土砂濃度の関係を示す。土砂濃度が高くなると下流濁度も上昇し、下流河道において希釈されていることが判る。

⑥河床形状、排砂量、河床状況

実験前後の河床計測結果を図-143~図-144 に示す。ケース4では直径 3.5m、深さ 1.7m の排砂面が形成され、排砂量 21.3m³、平均土砂濃度が 1.7%となった。図-145 にケース4の河床撮影結果を示す。この図から、礫(写真から数 cm 程度と想定される)が吸引部に吸い込まれている状況が確認された。このことから、管径 300mm の排砂管においては、数 cm 程度の礫は問題なく吸引できると言える。また、図-146 に示すとおり、実験中は連続的に土砂が排砂された。

(4) 潜行吸引式排砂管の運用・管理面の検討

平成 25 年度の現地実証試験において、初めて管内流量の計測として機械化、リアルタイムでの計測を可能とする電磁流量計を用いたが、他の計測項目は、機械化できず、例えば、吸引部鉛直位置は自記式水位計を用い、管内圧力はマンメーター板による計測を行い、リアルタイムでの水量等の情報の取得ができなかった。この水中に潜行した吸引部の挙動等が連続的にリアルタイムで把握できないことによって、実験時に概ねの排砂量の推定さえも把握することができず、実験終了後において分析せざるを得ない状況であった。また、吸引部の閉塞を評価する上で重要な指標となる管内圧力についてもマンメーターによる計測としていたことから、土砂濃度が

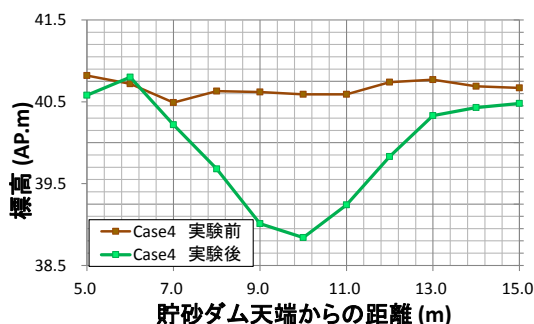


図-143 実験前後の縦断河床形状 (ケース4)

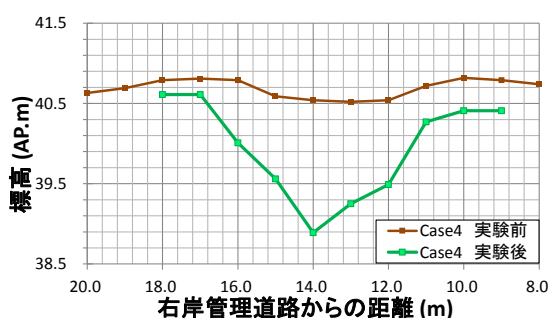


図-144 実験前後の横断河床形状 (ケース4)



図-145 吸引部土砂・礫吸引状況 (ケース4)



図-146 天端アクリル管での流況 (ケース4)

様々に変化する中で管内圧力を密に計測することが困難な状況となっており、排砂管の詳細な状況を実施時に把握することが困難となっていた。このため、平成25年度

において、今後、実用化の検討にあたっては、設備が大規模となった場合でも、安全かつ的確に円滑に必要な計測情報をリアルタイムで収集・集約でき、関係諸量の計測の機械化による自動化、その計測値を集約して、排砂管の挙動等を把握していく仕組みを構築することが重要であることを指摘した。

潜行吸引式排砂管の実用規模は、今回の実証試験規模(管径 300mm)以上となると考えられ、この装置を実際のダムへ適用しようと考えた場合、排砂時における潜行吸引式排砂管の挙動がリアルタイムで的確に把握され、洪水に対する排砂量も管理、運用されていくことが実用化のためには求められると考えられる。このためには、潜行吸引式排砂管における各種の水理量等が的確にリアルタイムで把握する仕組みの構築が不可欠であると考えられる。

このため、管径 300mm での試験では、流砂量以外の排砂管に直接関係する項目について、図-147 に示すとおり、貯砂ダム上流にゴムボートを浮かべ、有線により情報を集約し、ゴムボートから無線 LAN を用いて、右岸のヤードへ情報を送信、パソコン上で排砂管の挙動等が一目で監視できる仕組みを構築した。また、図-148、図-149 に排砂管に直接関係するデータをリアルタイムでパソコン上において表示できるシステムを構築した。これにより、実験時に水中に潜行する吸引部等の排砂管の挙動等が一目で確認できるようになり、スムーズに実験を行うことができた。また、図-150 にケース1の水理量等の情報を一画面上でアニメーションや動画を用いてわかりやすく表示できる画面を構築した。これを活用すれば、土砂の流下状況、潜行吸引式排砂管の挙動等を同時に確認、監視・分析が容易となる。このようなシステムの構築は、実用化に向けて有用であると考えられる。

なお、土砂濃度については、排砂にあたって管内閉塞の可能性や下流濁度への影響を評価する上でも重要な指標であるが、リアルタイムでの計測を可能とする手法を構築することができなかったため、今回の試験では人力による計測を行わざるを得なかった、引き続き検討していく必要がある。

2. 2. 3. 4 現地実証試験 (平成26年度) まとめ

塵芥や粘性土を多少含む実際のダム堆砂を対象とした、管径 300mm の潜行吸引式排砂管による現地排砂実験から得られた知見等は次のとおりである。

- 1) 約 1.6m と比較的小さな落差条件下でも、貯砂ダム上流約 20m 地点の堆砂を潜行吸引式排砂管を用いれば、水頭差エネルギーだけで連続的に貯砂ダム下流

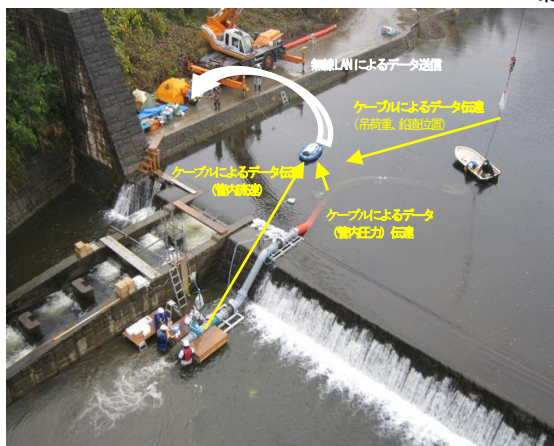


図-147 リアルタイムデータ収集状況

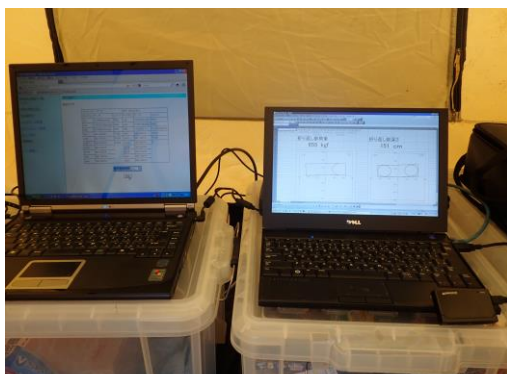


図-148 リアルタイムデータ表示状況

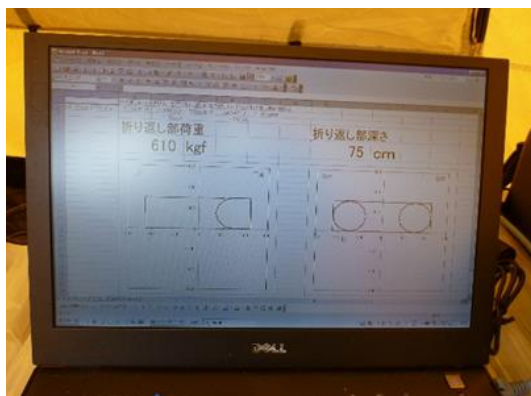


図-149 リアルタイムデータ表示状況 (吸引部傾き等)



図-150 排砂管情報を一元化画面

～排砂(土砂供給)でき、排出された土砂も吸引部の長径で吸引口の大きさの礫を排砂することも確認し、(図-151～図-153) また、排砂された土砂のサンプルを図-154に示す。ケース1～ケース4の管径

300mm(吸引口の径は150mm)の実験では、長径で150mm以下の礫や砂は吸引ができた。潜行吸引式排砂管の有効性が確認できた。

- 2) 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。
- 3) 排砂時の管内流速と土砂濃度には相関関係があるといった実用化に向けて参考となる潜行吸引式排砂管の複雑な水理特性の特徴を明らかにした。
- 3) 潜行吸引式排砂管の現場での設置・撤去において大きな問題はなく、比較的簡便に現地実証試験を行うことができた。
- 4) 潜行吸引式排砂管における各種水量等を円滑、安全、的確にリアルタイムで把握できる仕組みを検討・構築するとともに、その計測情報を一つの画面に一元化、一目でわかりやすく表示し、潜行吸引式排砂管の水量等をリアルタイムで監視・分析できる、実用化に向けて有用な仕組みを検討・構築した。
- 5) H25 現地試験(管径200mm)では、葉の層や礫の存在などにより深度を確保できず、吸引が停止してしまうケースが複数ケース見られたが、今回の試験(管径300)では、1ケースを除いて、概ね問題なく連続的に吸引・排砂を行うことが出来た。これは、排砂管の規模を大きくしたことにより吸引力が増大したことや堆積土砂の粘性土の含有率が小さかったことなどから安定して排砂できたケースが多かったものと考えられる。

なお、4ケースとも図-155に示すような実験前に吸引部の設置箇所において柱状サンプリング調査を行っており、採取結果の例を図-156、図-157に示すとともに、その結果を柱状表示したものを図-158に示す。表層は8割が砂をしめるものの、深い位置では、粘性の多い土砂も含まれていることが判った。また、吸引開始直後に固結した粘性土と思われる存在により、潜行が停止、吸引不能となったケース3では、潜行停止位置(GL.-1.0m付近)には粘性土を含む砂の堆積層が確認され、これが吸引不能となった原因であると推察され、粘性土砂への対応も今後検討していくことが必要であると考えられる。

2. 3 潜行吸引式排砂管の設計手法の検討まとめ

ここでは、水理模型実験を通じて、現場適用規模の潜行吸引式排砂管に適した材料・形状を検討し、現地



図-151 実験時排砂状況 (ケース4)



図-152 実験時排砂状況 (ケース4)



図-153 実験後排砂状況



図-154 排砂土砂のサンプリング結果



図-155 試験前 柱状サンプリング調査の状況

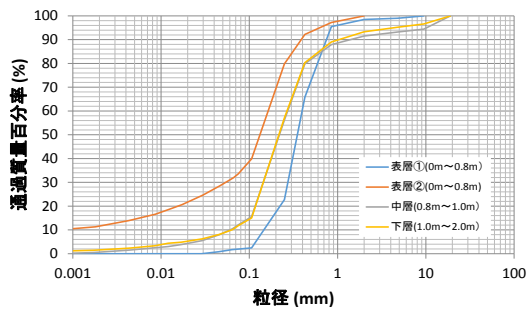


図-156 柱状サンプリング結果 (ケース1)

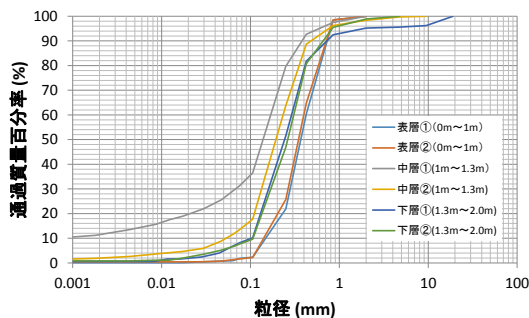


図-157 柱状サンプリング結果 (ケース3)

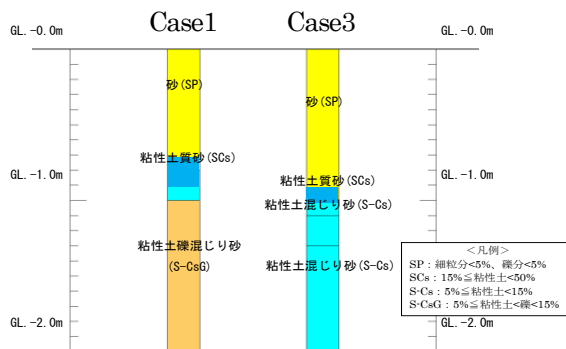


図-158 柱状サンプリング調査から得た堆砂性状

実証試験用の吸引部の設計を行い、現地実証試験を行い、現場の土砂への適応性、吸引能力、塵芥対応能力等を確認し、吸引部の有効性と塵芥に関する課題等が明らかとなり、課題に対して、水理模型実験により吸引部を傾斜させる形状を検討し、当該形状の塵芥対応能力が向上したことを確認した。しかしながら土砂吸引能力の向上の確認はできておらず、ひきつづき最適形状を検討していく必要があると考える。

3. 磨耗・損傷に対応した流量調節設備の検討

ここでは、既存技術の活用も含めて、ダムからの土砂供給施設に適した流量調節設備を提案することを目標とし、潜行吸引式排砂管の下流に設置する流量調節設備について、土砂による磨耗・損傷に対応した形式を既存技術の活用も含めて検討した。

3. 1 流量調節設備の既往技術の適用性の検討

土砂供給施設には流量調節設備が必要になると考えられるが、通常の流水のみを対象とする設備と比較して、高濃度の土砂が流下するため、土砂の戸溝等への噛み込みや磨耗損傷等への対策が必要になると考えられる。そこで、平成23年度および平成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について、文献等^{20)~26)}及びヒヤリングによって調査を行った。

調査結果を表-9に示す。水位差を利用して土砂を吸引する形式の技術は、まだ実用化されておらず、既存の排砂施設は比較的大規模な排砂設備と土砂バイパス施設が挙げられる。

土砂バイパス施設では、流入部にゲート施設が設置され、作用水頭もそれほど大きくないため、ゲートの構成や基本的な構造については、通常のものとは大きな違いはないが、底部の保護が実施されている。

排砂設備では、堤体に設置され作用水頭が大きいこと（流速が大きい）から、通常の流水用の設備とは異なる工夫がされている。具体的には、確実に止水と保守点検を行うために、ひとつの水路に3つのゲートが設置されている。また、戸溝の損傷を防ぐために、保護枠の設置及びナローズロット形式のゲートが採用されている。また、維持管理を考慮して、各部分の特性に応じたライニングが採用されている。

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られる。ただし、排砂管の管径から、ゲート規模は0.3m×0.3m~1m×1m程度の小規模なものになることが想定されるため、今後規模の相違も考慮して、土砂供給施設に適した流量調節設備を検討していく必要がある。

3. 2 流量調節設備のゲート型式の検討

平成25年度においては、前述した室内実験において、表-10に示す塵芥模型を土砂と混合させて、図-13に示す形状での排砂実験を通じて流量調節設備の検討も行った。具体的には、実験は図-159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投入した後、図-160に示すとおり、潜行吸引式排砂管を堆砂

表-9 既存の排砂施設のゲート設備と磨耗対策

ダム名	管理者	施設区分	施設概要	ゲート設備	磨耗対策
出し平ダム	関西電力	排砂設備	水位低下して排砂設備から開水路流で土砂を排出	<ul style="list-style-type: none"> 幅5m×高さ5m×2条 1条につき、以下の3つのゲートを有する 上流ゲート(スライドゲート、保守点検機能) 中間ゲート(ローラーゲート、流水・流砂遮断機能) 下流ゲート(ラジアルゲート、止水機能、緊急遮断機能) 	<ul style="list-style-type: none"> 排砂路の底部と側部を鋼材によりライニング 中間ゲートに、脚(戸溝保護枠)、脚スロット、スロット内の掃流装置を設置
宇奈月ダム	国土交通省北陸地方整備局	排砂設備	水位低下して排砂設備から開水路流で土砂を排出	<ul style="list-style-type: none"> 幅5m×高さ6m×2条 1条につき、以下の3つのゲートを有する 止水ゲート(高圧スライドゲート、幅5m×高さ9.927m、止水機能) 調節ゲート(ナローズロット型高圧スライドゲート、幅5m×高さ6m、土砂流の調節放流・遮断機能) 副ゲート(ナローズロット型高圧スライドゲート、幅5m×高さ6.2m、調節ゲートの代替機能) 	<ul style="list-style-type: none"> ゲートより上流は100年耐用を想定してステンレス材でライニング ゲートより下流は30年耐用を想定して鋼材でライニング 堤外開水路は石材で保護 止水ゲート底部の水密ゴムを二重化 止水ゲート戸溝に掃流装置を設置 調節ゲート、副ゲートは上流側ゴム水密
旭ダム	関西電力	土砂バイパス	流入土砂全部を対象に下流へバイパス	ローラーゲート1門	<ul style="list-style-type: none"> トンネルの呑口から10mは鋼材でライニング トンネルの補修にシリカコンクリート使用
美和ダム	国土交通省中部地方整備局	土砂バイパス	ウォッシュロードを対象に下流へバイパス	<ul style="list-style-type: none"> 分流堰に主ゲート2門(5m×10.4m) 分流堰に副ゲート1門(7.5m×11.4m) 流入部にローラーゲート1門 	トンネルインバート部10cm、側壁部5cmコンクリートを増厚
松川ダム	長野県	土砂バイパス	浮遊砂とウォッシュロードを対象に下流へバイパス(建設中)	<ul style="list-style-type: none"> 分流堰に主ゲート1門(4.9m×9.6m) 分流堰に副ゲート1門(5m×9.9m) 流入部にローラーゲート1門 	トンネルインバート部20cmコンクリートを増厚
小洪ダム	国土交通省中部地方整備局	土砂バイパス	掃流砂、浮遊砂、ウォッシュロードを対象に下流へバイパス(建設中)	<ul style="list-style-type: none"> クレスト予備ゲート2門 オリフィス予備ゲート2門 主ゲート2門 	呑口部底部の保護に鋼板入りのゴムプレートを設置

表-10 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) 空腔込み	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-159 流木模型投入状況



図-162 バタフライバルブ設置位置の流木模型の閉塞状況

吸引部の底部に集積した塵芥模型が一気に吸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生じていた。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、バタフライ型のようなバルブは設置に適していないことが明らかとなった。

3. 3 摩耗・損傷に適応していくため装置の検討

潜行吸引式排砂管は土砂を吸引部において吸引し、管路を通じてダム下流へ供給する装置であるため、土砂による磨耗・損傷を受ける。このことから、施設全体として磨耗・損傷に対応していくことが求められる。

そこで平成27年度は、土砂による磨耗・損傷に施設全体として対応していくため、潜行吸引式排砂管の下流に設置する流量調節設備において磨耗・損傷の程度を推定可能とする仕組みを構築することを目指し、管路中の通過土砂量（土砂濃度）をリアルタイムで把握可能とする仕組みの構築に向けた基礎的検討を行った。

3. 3. 1 実験方法

実験装置を図-163、図-164に示す。流量は超音波流量計を用いて、時間変化を連続的に計測する。また、流砂量は、土砂濃度2%程度以上の分析能力を目標とし、管径100mmの管路で排砂管下流の一部区間をアクリル管路として当該区間における土砂流下状況が把握できるようにするとともに、アクリル管両端部をフレキシブルな構造とし、アクリル管路区間の重量を市販のロードセルによりリアルタイムでの計測可能とする装置を製作した。また、実験を進めるにあたって、アクリル管内を満水にした上で0~15%程度の土砂濃度にあたる土砂量をアクリル管上部に載せて管内土砂濃度と荷重計値との相関を調査し、図-165の検定曲線を作成した。また、実験にあたって管末端部で流水と土砂を一括して24回程度直接採取し、この結果と比較することにより土砂濃度の計測精度の確認を行った。



図-160 室内実験実施前の状況



図-161 室内実験実施後の吸引部撤去後の状況

面に設置して行った。実験の結果、土砂のみの実験に比べ、吸引性能は低下しつつも土砂の吸引・排砂は進んだが、試験後には図-161に示すとおり、吸引部底部に塵芥模型が集積する現象が生じ、放流設備としてバタフライバルブを設置していたことから、図-162に示すとおり、

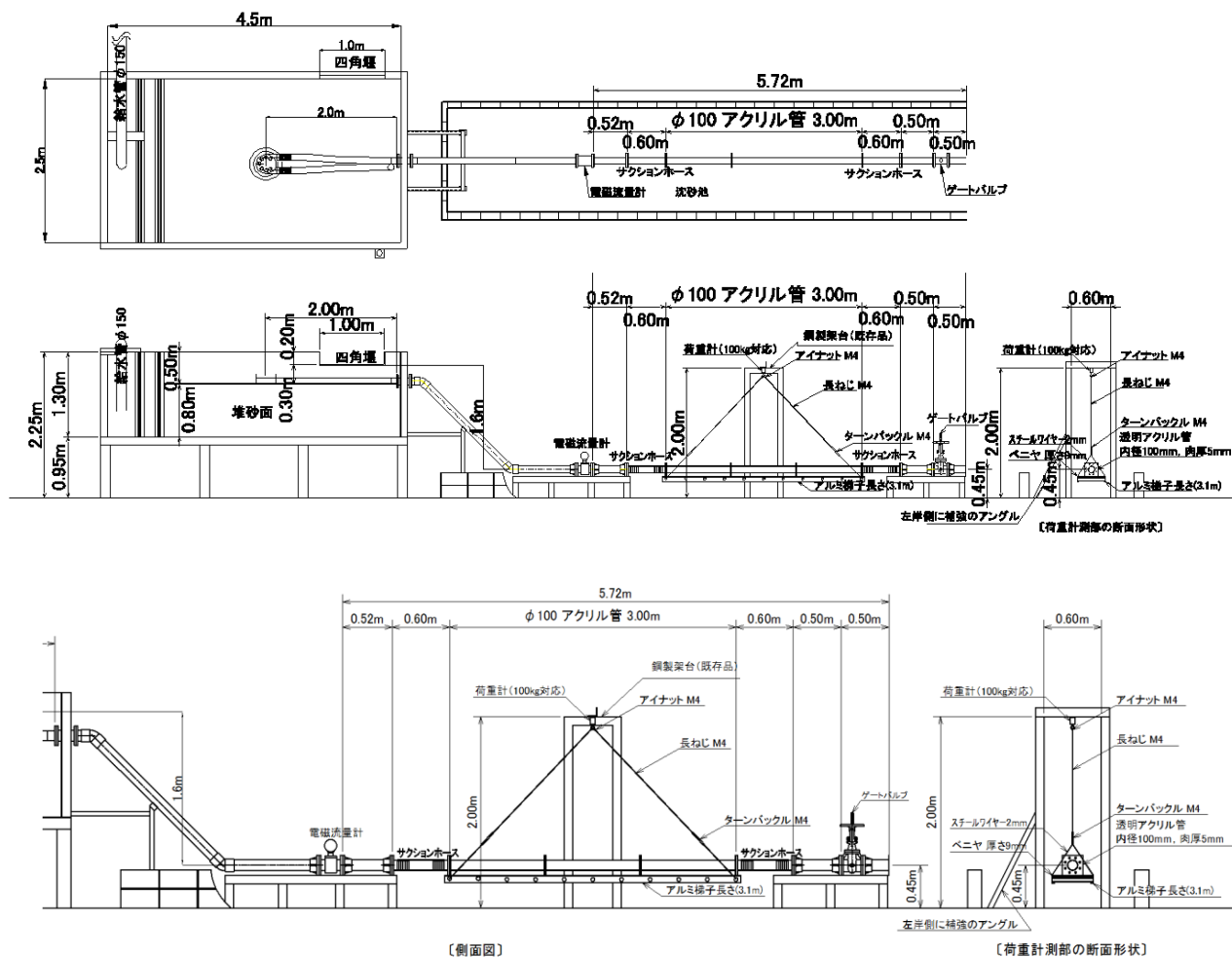


図-164 実験装置概要図

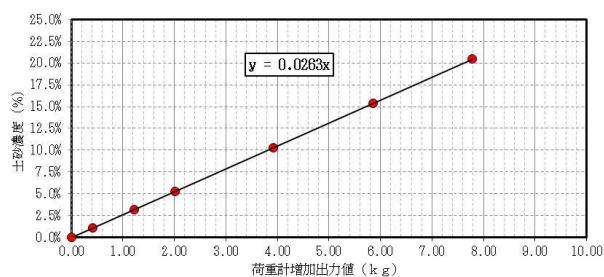


図-165 過重計出力値と土砂濃度の関係 (検定直線)

また、アクリル管内の土砂移動・堆積状況を撮影し、管内の土砂堆積状況を観察した。

3. 3. 2 実験結果

実験は吸引部を管径 100mm の潜行吸引式排砂管とストレート管の 2 形状により 3 ケース実施した。実験結果を図-166～図-168 に示す。以降、それぞれのケースについての結果を示す。

(1) ケース 1

ケース 1 は、上流側に潜行吸引式排砂管を設置した上

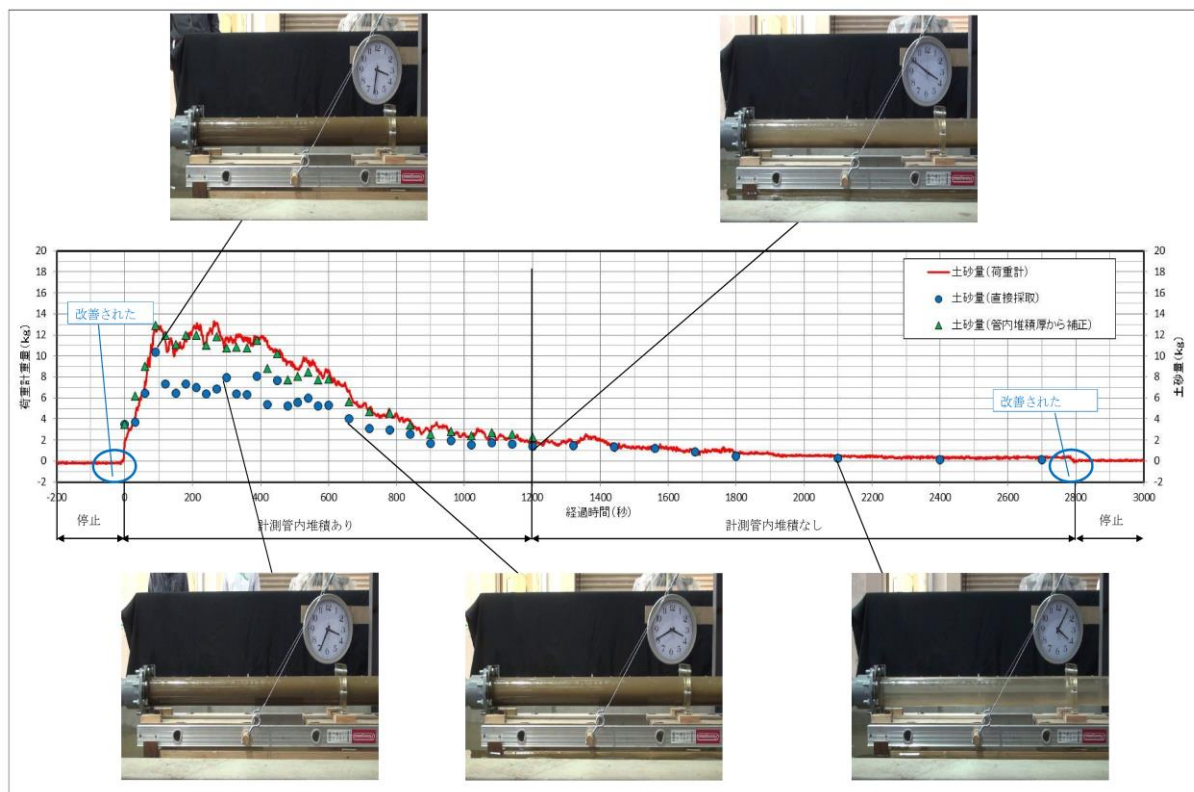


図-166 ケース1における実験時の荷重計値と採取土砂重量の時間変化の関係

で排砂することによって、今回構築した装置が潜行吸引式排砂管を用いた場合における土砂濃度計測が可能かという装置の有用可能性について検討する目的で実施した。実験結果を図-166に示す。実験の結果、

- ①荷重計による計測値と管堆積時には層重量を補正してあげることによって計算した計測値には十分な相関が見られ、重量によるリアルタイムでの土砂濃度の把握は可能であると考えられる。
- ②最大土砂濃度として存在濃度 (C_w) は 14%程度、吐出し濃度 (C_p) は 9%程度が観察された。
- ③ C_w と C_p の差異は、堆積厚で表現されると考えられた。
- ④土砂濃度計測対象区間では、高濃度の場合、2 cm 程度の停止層が観察された。

以上から、本装置は有用となる可能性が考えられた。

(2) ケース 2

土砂濃度が高くなると、ある値以上においては管閉塞を誘因し、施設機能に大きな障害を与える。このため、実用化に向けては連続的にかつ安定した土砂濃度の計測が求められる。そこで、本装置の計測限界を検討することとし、土砂濃度の極限並びに停止状況の再現を試みることにした。実験ではストレート管を採用し、吸引は管内の状況を見ながら人為による貫入操作を繰り返して実

施した。実験結果を図-167に示す。実験の結果、管内土砂濃度を人為操作により段階的に変化させて閉塞限界を知ることは、困難であったが、閉塞に至る過程及び閉塞は再現できた。閉塞過程としては、吸引する土砂量を増加させることに伴い管内には堆積層厚が形成された。目視では、4 cm 付近から流量の低下が顕著になり、この状況が継続してしまうと閉塞に至ると考えられた。本実験では、土砂濃度が 20~25% が継続した場合、管閉塞が生じるものと考えられた。

(3) ケース 3

ケース 1 における潜行吸引式排砂管の運用においては、土砂濃度が比較的高くなるとアクリル管内に堆積層が存在することで、リアルタイムでの流下土砂濃度の計測が難しい面が分かった。このことから、ケース 1 の条件に加え、ケース 1 で土砂濃度上昇時に観察されたアクリル管内の土砂停止層部を、固定床 (インバート) とした管形状として、より高濃度におけるリアルタイム計測の可能性について検討した。

実験結果を図-168に示す。実験の結果、インバート部の設置により、ケース 1 で管底に観察された堆積層は見られなくなり、土砂濃度として C_w と C_p の差異が小さくなった。高い濃度における放流量時には 3% 程度の低下があり、土砂濃度 (C_w) で 14% 程度、土砂濃度 (C_p) で 9% 程度が観察された。

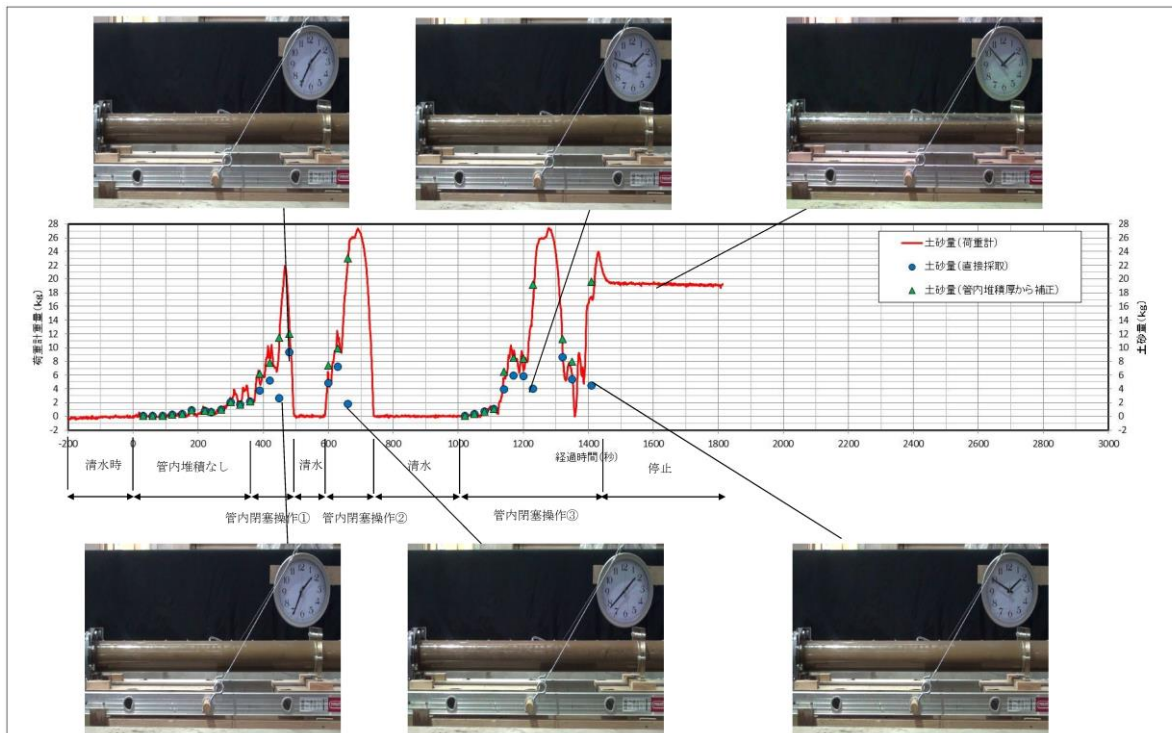


図-167 ケース2における実験時の荷重計値と採取土砂重量の時間変化の関係

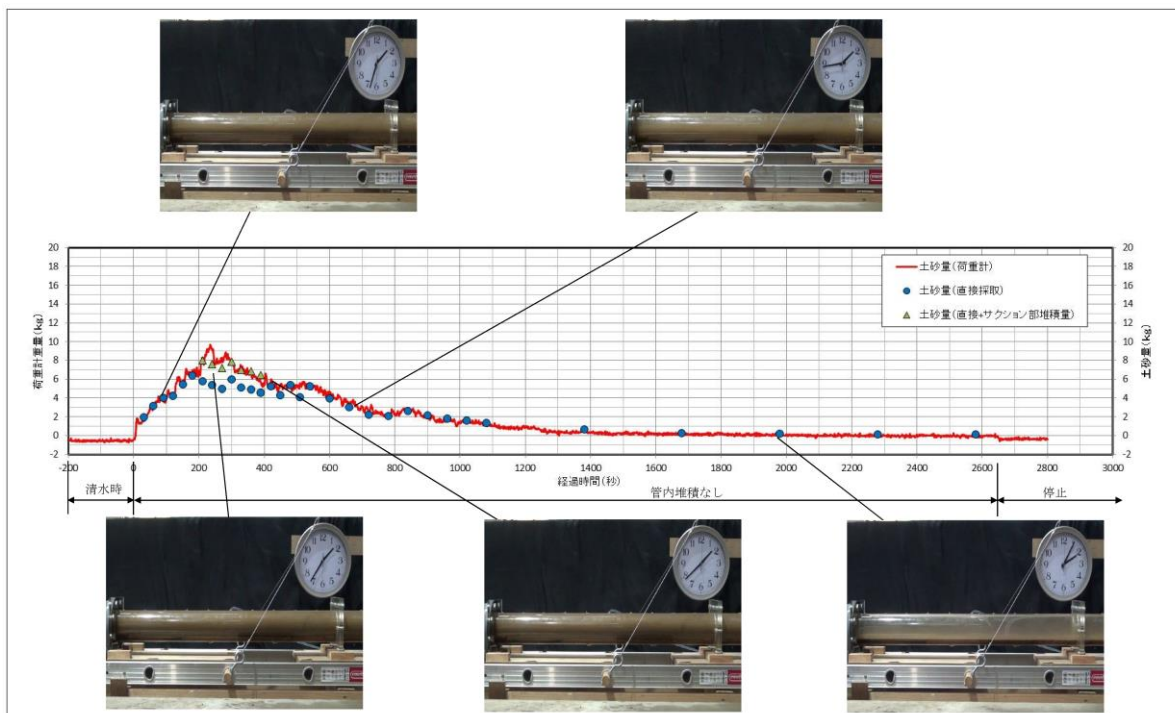


図-168 ケース3における実験時の荷重計値と採取土砂重量の時間変化の関係

p) で10%程度と計測されたことから、今回採用した2 c m程度のインバートによる機能の低下はほぼないと考

えられ、インバートを設置することにより潜行吸引式排砂管運用時における土砂濃度の計測装置として有用な装

置となる可能性を明らかにした。

3. 4 流量調節設備の検討まとめ

本検討では、潜行吸引式排砂管の下流に設置する流量調節設備について、土砂による摩耗・損傷に対応した形式を既存技術の活用も含めて検討した。その結果、既存技術における摩耗・損傷に対応した形式を整理し、また、バタフライバルブ等の型式は放流設備として適さないことが明らかとなった。また、土砂による磨耗・損傷に施設全体として対応していくため、潜行吸引式排砂管下流において設置する流量調節設備において、管路中の通過土砂量（土砂濃度）をリアルタイムで把握する仕組みの検討も行い、次のような知見を得た。

- ①土砂濃度の変化と管重量の変化に相関があり、リアルタイムで管内の土砂通過量の推定の可能性を明らかにした。
- ②土砂濃度が 20%程度となった場合には管閉塞を起こす可能性があり、排砂管の運用において留意すべき土砂濃度が明らかとなった。
- ③計測部分にインパートを設けることで、より高い土砂濃度の計測が可能となることが判った。

この仕組みが実用化されれば、施設の磨耗損傷の程度を把握するための保守、点検や運用時の管閉塞回避にも役立つものと考えられる。さらに、吸引部における吸引性能の評価や下流への排出土砂量の管理といった場面への活用も考えられる。今後も実用化に向け有用な仕組みとしていく検討が必要である。

4. 環境に配慮した土砂供給施設の運用方法の検討²⁷⁾

ダムからの下流河川への土砂供給は、下流河川の河床環境に変化を与え、魚類などの水生生物の生育・生息環境に影響を与える。ここでは、出水中にダムから土砂供給を行う際の施設操作方法（操作タイミングや放流量）と、下流の河床変化の関係を数値シミュレーションにより検討し、施設運用方法の検討を行った。

4. 1 計算条件の検討

前中期計画期間には、出水時の潜行吸引式排砂管を用いた場合の運用方法に関する概略的検討を行ったが、この際には、どのように潜行吸引式排砂管をダムに配置し、運用するのかといった具体的な検討はされていなかった²⁸⁾。

そこで、本検討では、平成23年度以降、現地実証試験等も通じ、これまでの水理実験から得られた知見によって潜行吸引式排砂管によるダム下流への土砂供給の可能性が高まってきている状況や実際のダム貯水池の規模を考慮して実用的な規模として考えられる管径600mmの潜行吸引式排砂管を想定し、出水時での潜行吸引式排砂管の操作

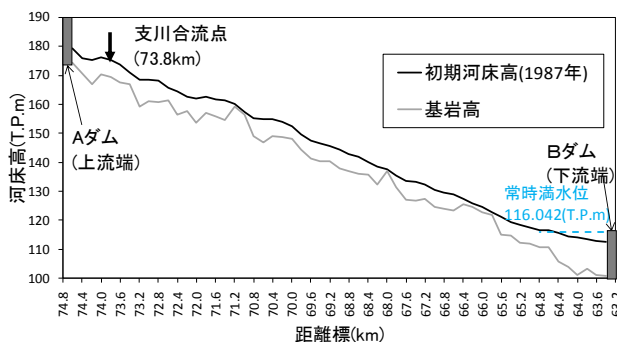


図-169 モデル区間における河床高と基岩高

方法（操作タイミングや放流量）の違いによる量や質による土砂供給がダム下流の河床環境への影響について、水理チームにて開発された次元不定流河床変動計算プログラムを用いて次元河床変動計算による数値シミュレーションを通じた感度分析により、施設の運用方法の方向性を検討した。具体的には、実際のダムを有する河川を対象とし、この河川での出水および洪水調節運用の実績データをベースに、土砂供給条件として実験等から得られている潜行吸引式排砂管の排砂特性を考慮した上で、出水時の土砂供給条件の違いによる次元河床変動計算結果からダム下流の河床環境への影響を概略的に検討した。対象河道は実際のダムが設置されているA川を選定した。図-169にモデル区間における河床高と基岩高を示す。初期河床の河道勾配は概ね1/120～1/280である。モデル区間の本川上流端と本川下流端には、それぞれAダム、Bダムが存在する。支川は区間内に主要な支川が3つ存在するが、本検討では流域面積が最大である1支川から他の2支川からの流入を含めた3支川の合計流入量が流入し、本川に合流するものとした（支川合流点は図-169を参照）。また、本川上流端からの土砂供給の影響を把握するため、支川からの土砂供給はなく水のみが流入するものとした。本川における流入ハイドログラフは、1987年から2003年までの17年間においてAダムより1つ上流にあるCダムへの流入量が100m³/s以上の期間における、Aダム運用実績の放流量から設定した。支川からの流入ハイドログラフは、Cダムへの流入量に、Cダム流域面積に対する支川流域面積の比を掛け算出した。

また数値計算における土砂供給時の土砂濃度と運用方針については、ダムからの土砂供給施設として管径600mmの潜行吸引式排砂管4系統を想定して設定した。

本検討で対象とした計算ケースは、本川・支川から給砂を行わない無給砂条件の1ケースに、供給土砂として材料1～3の3種類を設定しそれぞれの供給土砂に対して供給

表-11 潜行吸引式排砂管の諸元

排砂管の系統数	4
管内流速 v (m/s)	2
管径 R (m)	0.6
管断面積 A (m ²)	0.283
4系統総排出量 $Q_{ws(水+土砂)}$ (m ³ /s)	2.261

表-12 土砂濃度と土砂供給量との関係

土砂濃度(体積土砂濃度で、空隙を含まない土粒子実体積に対する濃度)	5%	10%	20%
土砂供給量 Q_{sed} (m ³ /s)	0.113	0.226	0.453
計算期間(17年間：土砂供給時間約1250時間)の総土砂供給量(m ³) (空隙)	約51万	約102万	約203万

表-13 想定した本川からの土砂供給運用方針

運用方針	運用のタイミング	供給土砂の種類
4系統同時に土砂供給	A ダムからの放流量(モデル区間上流端からの流入水量)が100m ³ /s 以上で土砂供給	材料1(砂主体)、 材料2(材料1と3とを半量ずつ混合)、 材料3(礫主体)の3種類 (粒度分布については図3-2参照)

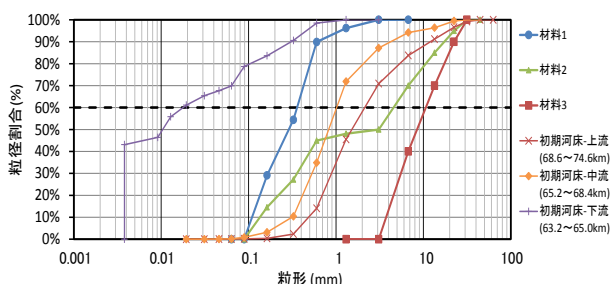


図-170 供給土砂・初期河床の粒度分布曲線

時の土砂濃度を5%、10%、20%の3通りに変化させた9ケースを加えた、全10ケースである。表-11に潜行吸引式排砂管の諸元を、表-12に計算条件とする土砂濃度と土砂供給量との関係を、表-13に本川からの土砂供給運用方針を、図-170に供給土砂・初期河床の粒度分布曲線を示す。

潜行吸引式排砂管からの土砂供給の諸条件の設定根拠としている土砂濃度については、今後の潜行吸引式排砂管の吸引性能の向上に関する検討により設定することになるが、これまでの水理実験の結果から管内閉塞が生じる可能性が少ないと考えられる空隙率なしで20%以下に設定した。また、潜行吸引式排砂管はダム上下流の水位差に応じて水・土砂の総排出量に変化するが、今回簡単のためダム上下流の水位差が一定であると仮定し潜行吸引式排砂管からの排出量を一定値2.261m³/sに設定した。

供給材料には、砂を主体として含む材料1、材料1と3を半量ずつ混合した材料2、礫を主体として含む材料3を利用することとした(土の分類は主に河川工学の分野で用いら

れる分類によるものとし、0.074mm未満を粘土・シルト、0.074mm以上2mm未満を砂、2mm以上を礫とした)。材料1の粒度分布は、A川上流のダム貯水池に堆積する土砂のうちシルト分を除く0.163mmから3.082mmの粒径の割合から設定した。材料3については、A川上流のダム貯水池の堆積土砂には礫が少なくその割合から設定することが困難であるため、6.72mm、13.44mm、22.44mm、31.52mmの配分が4:3:2:1となるような仮想材料を想定した。

4.2 計算結果

(1) 供給土砂材料の違いによる河床高への影響

本検討で対象としたケースのうち代表的なものとして、無給砂の場合と濃度20%で土砂供給を行った場合の供給土砂材料ごとの一次元河床変動計算の比較結果を図-171に示す。比較により次のことが分かった。

- ・無給砂のケースでは、67km地点より上流側では河床低下が生じている。一方で、同地点より下流側では河床上昇が生じている。
- ・材料1供給のケースは材料3供給のケースに比べ、68km地点より上流では河床上昇が小さく、同地点より下流では河床上昇が大きい。また、材料1供給のケースでは、上流端において無給砂のケースに近い侵食が生じた。また、材料2供給のケースは、材料1供給、材料3供給の中間的な河床上昇となる。
- ・材料3供給のケースは、67km地点前後より下流において、無給砂のケースよりもわずかに(0.1~0.3m程度)河床が低くなる。これは、礫供給過多となり、上流側において礫が初期河床を覆い、河床表面にあった砂が流下しづらくなったため生じたと考えられる。
- ・71kmより上流側の河床変動量を見ると、材料1、材料2、材料3と材料中の礫が多くなるにつれて河床変動量が正方向に増加していることがわかる。このことから、砂に対し礫の河床上昇への影響が大きいことが確認できる。
- ・治水上の観点から考えると、材料3供給時のように上流端の河床高が大きく上昇することは望ましくないと考えられる。環境上の観点から考えると、材料1供給時のように上流端の河床高が大きく下がり基岩が露出するような状態も望ましくないと考えられる。このことから、砂、礫の割合を適切に調整した砂礫を混合した土砂を供給することが、ダムからの土砂供給施設における運用方針として重要な視点であると考えられる。

(2) 供給土砂の粒径や土砂濃度の違いによる河床表面の粒径等への影響

図-172～図-174に、無給砂のケースと各供給土砂材料の土砂濃度を変えた各ケースの河床表面の代表粒径 D_{60} の比較を示す。また、図-175～図-179に、初期河床、無給砂のケースの最終時点の河床表面の粒度分布を示す(75 μ m未満を粘土・シルト、75 μ m以上2mm未満を砂、2mm以上を礫とした)。図より次のことが分かった。

- ・ 図-172の材料1供給のケースでは、上流端～73kmの区間において土砂濃度5%、10%のケースの代表粒径が土砂濃度20%のケースを下回る箇所が見られる。これは、過剰洗掘による基岩露出に伴って起こったものと考えられる。また、73km～70.8kmでだいに代表粒径が安定し、70.6kmより下流においては代表粒径がほぼ一定となっている。そして、70.6kmより下流では、土砂濃度を高くする程、河床表面の代表粒径が供給土砂(材料1)の代表粒径に近くなっていることが分かる。
- ・ 図-173の材料2供給のケースでは、材料3供給のケース(図-174)同様に上流から下流に向かい代表粒径がゆるやかに下降していく傾向が見られる。また、土砂濃度5%の場合、土砂濃度10%・20%に比べ、河床表面の代表粒径が大きく低下している傾向が見られる。
- ・ 図-174の材料3供給を行うケースでは、上流端での河床表面代表粒径が材料3の代表粒径10.7mmに比べ若干大きくなり、下流端に向かうにつれ河床表面の代表粒径がゆるやかに低下していく傾向が見られる。また土砂濃度を変えた場合でも、河床表面代表粒径にあまり差異がないことが分かる。

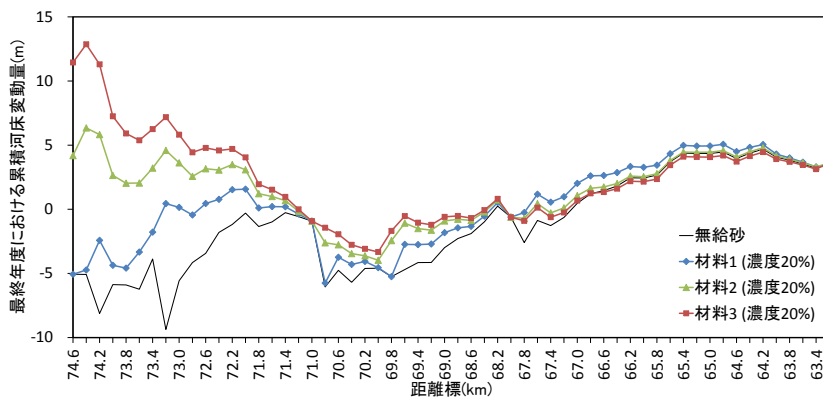


図-171 河床変動量の比較 (土砂濃度20%のケースの比較)

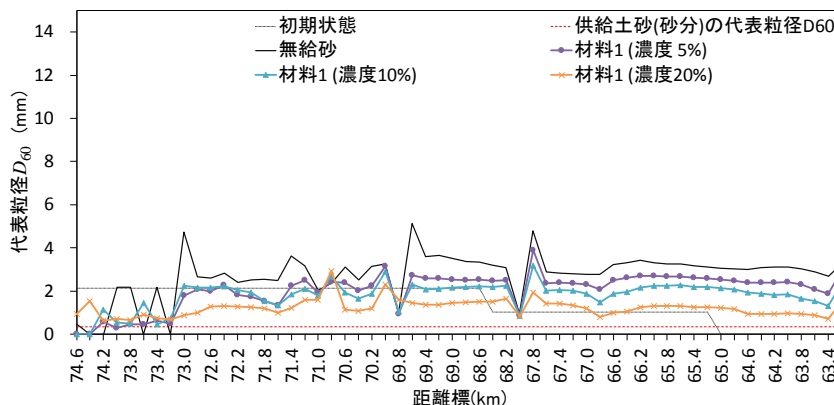


図-172 材料1供給ケースでの河床表面代表粒径 D_{60} の比較

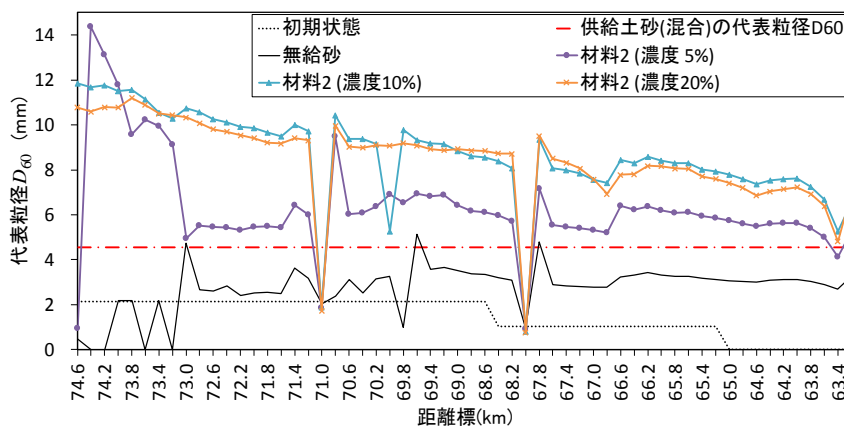


図-173 材料2供給ケースでの河床表面代表粒径 D_{60} の比較

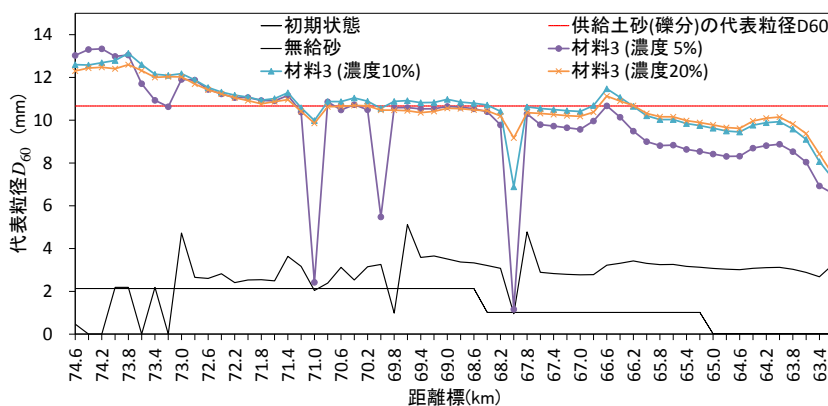


図-174 材料3供給ケースでの河床表面代表粒径 D_{60} の比較

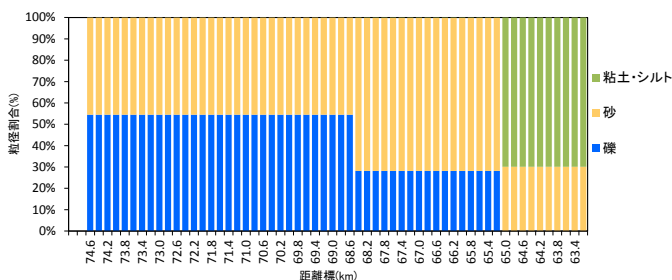


図-175 初期河床の表面粒度分布

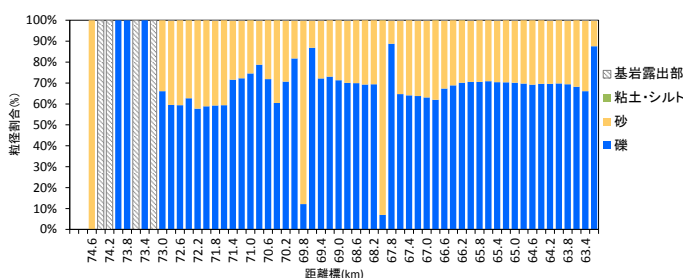


図-176 無給砂のケースでの河床表面粒度分布

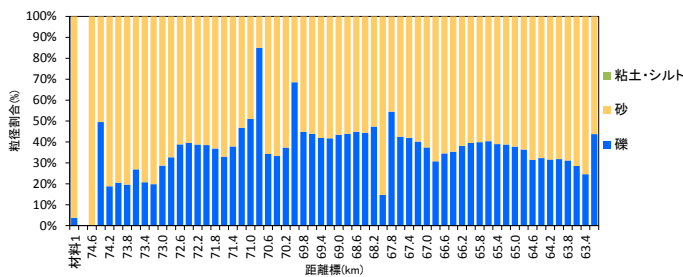


図-177 材料1（濃度20%）供給ケースでの河床表面粒度分布
（左端は供給材料の粒度分布）

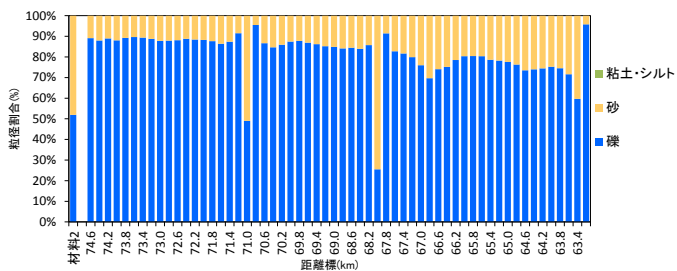


図-178 材料2（濃度20%）供給ケースでの河床表面粒度分布
（左端は供給材料の粒度分布）

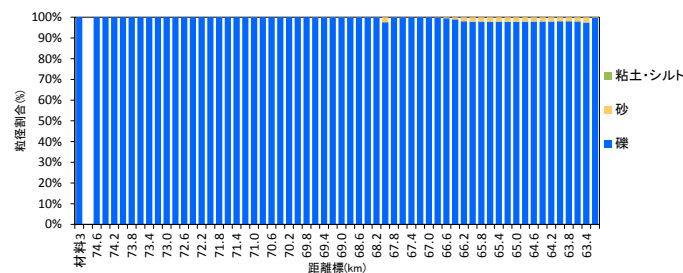


図-179 材料3（濃度20%）供給ケースでの河床表面粒度分布
（左端は供給材料の粒度分布）

・図-175～図-179の通り、供給材料の粒度分布を変えると、

代表粒径だけでなく河床表面粒度分布も供給土砂の粒度分布に影響を受けることが確認できる。

以上の結果から、土砂をある程度以上の濃度で供給する場合、河床表面の代表粒径は、土砂濃度によらず供給土砂の粒度分布によって決まる傾向があると考えられる。これらを踏まえ、環境上（例えば生息地の多様性の維持という点で）望ましいと考えられる河床表面の代表粒径の目標値を管理指標として設定できる場合は、砂・礫の割合を適切に調整した砂礫を混合した土砂を供給することが、ダムからの土砂供給施設における運用方針として重要な視点となると考えられる。

4.3 土砂供給施設の運用方法の検討まとめ

本検討では、潜行吸引式排砂管を運用した場合を想定し、出水時の当該施設からの土砂供給条件の違いによるダム下流の河床環境への影響について、一次元河床変動計算を通じて概略的に検討した。

本検討の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 潜行吸引式排砂管の管径管径600mmの排砂管4系統、供給土砂濃度5%～20%、供給土砂粒径約0.16mm～30mmを想定した数値計算の結果から、この規模の排砂管により土砂供給を行った場合、ダム下流の河床環境に変化が生じることが確認できた。
- (2) 砂（材料1）供給のケースは礫（材料3）供給のケースに比べ、上流では河床上昇効果が小さく、下流では河床上昇効果が大きい傾向が確認できた。また砂礫混合（材料2）供給のケースは、砂供給と礫供給の中間的な河床変動量となることが確認できた。
- (3) ある程度以上の濃度で土砂供給を行う場合、河床表面の代表粒径は、土砂濃度によらず供給土砂の粒度分布によって決まる傾向があることが確認できた。
- (4) 以上の結果から、砂、礫の割合を適切に調整した砂礫を混合した土砂を供給することが、ダムからの土砂供給施設における運用方針として重要な視点であると考えられる。

本検討では、潜行吸引式排砂管による運用によって検討できる規模の検討も想定し、今後の研究開発の期待も込めて管径600mm潜行吸引式排砂管を想定して検討した。下流河川への土砂供給により環境を回復・維持するための環境に配慮したダムからの土砂供給施設の運用方法を含めた仕組みづくり（出水中にダムから土砂供給を行う際の施設操作方法（操作タイミング、放流量、土砂粒径を管理））について検討することは潜行吸引式排砂管の実用化に向けては必須である

と考えられ、以上で行ったような、本検討の取組をさらに進め、良好な河川とするための土砂供給のあり方とそれに基づく将来予測や影響評価と、その精度向上が重要となると考えられる。

当該河川に適用する場合でも適正な量と質を供給するための分級コストや施設配置の詳細検討も今後の課題となり、さらなる検討が必要となると考えられる。

5. おわりに(研究の成果と今後の課題)²⁹⁾

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を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、①「潜行吸引式排砂管の設計手法の検討」、②「土砂による磨耗・損傷に対応した流量調節設備の検討」、③「環境に配慮した土砂供給施設の運用方法の検討」の3つの検討項目を設定し研究を実施したものである。

①「潜行吸引式排砂管の設計手法の検討」としては、まず、より実際の装置に近い規模の排砂特性を把握するために管径 200mm の排砂管を用いた実験による検討を実施し、既往の検討よりも規模の大きな排砂管を用いて排砂能力を確認することができた。ここでは、管径が大きいほど、排砂量が多くなる傾向が認められた。また、排砂管の材料には強度が重要であることが確認できたが、堆砂面の変化に追随するための管の柔軟性と管の強度はトレードオフの関係にあるため、材質や形状の検討を進めて、実用化につなげていくことが必要であることを確認した。

次に、潜行吸引式排砂管の設計手法の検討として、排砂管の実用化に向けた知見を得るために、管径 200mm の排砂管を用いて、実際の小規模堰堤において、排砂の現地実証試験を実施した。その結果、排砂管の設置・撤去については大きな問題はなく、比較的簡便に行うことができた。土砂濃度や管内圧力分布などの実用化のために

参考となる排砂特性に関する知見が得られたが、排砂管の土砂吸引部の堆砂への追従に関する課題を確認した。その後、以上の知見を基に、排砂管の土砂吸引部の堆砂への追従に関する課題に対応するため「潜行吸引式排砂管」形状を改良し、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、自然堆砂が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、吸引口付近に塵芥等が集積することに伴う土砂吸引の停止現象が確認されたこと、吸引部先端に追加したスクリーンは土砂への追従性の阻害要因となってしまうこと、実用化に向けては現場での運用が容易となる仕組みの構築が必要であることなどの課題も明らかとした。さらに、以上の知見から、吸引部付近に塵芥等が集積することによる土砂の吸引停止の課題について室内実験による基礎的な検討を行うとともに、吸引部が傾斜した場合には塵芥への対応能力が向上する可能性が確認された。また、実用化規模に近い管径 300mm の排砂管を用いた現地実証試験を実際のダム貯水池内において実施し、改めて潜行吸引式排砂管の有効性を確認した。この際には、現場での実運用が可能な仕組みに近づけるための工夫として、リアルタイムにおいて水量などの情報を一元集約し、実験状況を常に監視できるシステムを構築するなどの実用化を念頭に置いた管理・運用システムの検討も行った。なお、土砂濃度をリアルタイムで自動計測する技術開発の必要性や環境に配慮した土砂供給施設の運用方法の検討につなげる運用のあり方など研究の新たな方向性を見出すことができた。

②「土砂による磨耗・損傷に対応した流量調節設備の検討」としては、また、潜行吸引式排砂管に適した流量調節設備について、既存の土砂バイパス等に用いられている排砂ゲート等の諸元を整理した。また、土砂による磨耗・損傷に対応した流量調節設備の検討として、水理模型実験による流量調節設備にはバタフライバルブ型式は土砂や塵芥等の閉塞が生じやすいため不向きな型式であることが判明するなど、実用化に向けた有用な知見を得た。また、土砂による磨耗・損傷に対応した流量調節設備の検討として、実用化に向けて必要となる管内の磨耗・損傷程度を推定していくための管内中の土砂濃度をリアルタイムで監視・管理する仕組みの基礎的検討を行い、その有効性を確認した。

③「環境に配慮した土砂供給施設の運用方法の検討」としては、実際の河川における河床データや出水履歴等を用いて、管径 600mm の潜行吸引式排砂管を出水中にお

いて運用した場合を仮定した運用方法の違いによるダム下流の河床環境への影響について一次元河床変動計算を通じて概略的な検討を行った。その結果、今後の研究開発による部分も多いが、潜行吸引式排砂管による土砂供給が、ダム下流への河床環境に変化をもたらす可能性を確認でき、潜行吸引式排砂管が将来有効な土砂供給技術となる可能性を確認することができた。

以上、第3期中長期計画における研究開発を通じて、潜行吸引式排砂管が、新たな土砂供給技術となる可能性を明らかにすることができ、実用化に向けて大きな道筋をつけることができたものと考えている。

なお、平成25年7月には、平成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、平成26年8月には、その後に改良を重ねた現在の検討形状とほぼ同様の形状が特許登録された(特許第5599069号)。

本中長期計画における研究では、実用化を見据えた管径300mm潜行吸引式排砂管による現地堆砂を対象とした現地実証実験を行うことで潜行吸引式排砂管の有効性が確認されるなど、新たな土砂供給施設に向けた技術開発を深化させることができたと考えている。

しかしながら、ダム貯水池を対象とした効率的で効果的な排砂技術として、潜行吸引式排砂管を適用していくためには、本中長期計画における検討を通じて、今後の潜行吸引式排砂管の実用化のためには次のような検討が引き続き必要であると考えている。

- ・塵芥等前処理システムの開発

平成25年度の検討では、堆砂内の葉の層や礫の存在により、吸引・排砂が停止する現象が確認されており、堆砂内に含まれる吸引・排砂を困難とする塵芥や巨礫等の物体に対処する前処理システムの構築が必要である。

- ・潜行吸引式排砂管の吸引性能の向上

約10年にわたる検討では「土砂を下流へ供給できる新たな仕組みの構築」という視点で検討してきたが、今後は「下流に必要な土砂を効率的に供給できる仕組みの全体の構築」という視点で検討を進めることが必要と考える。このため、土砂吸引を効率的に行える形状及び諸元の検討や柔軟に土砂供給できる適切な流量調節設備の検討などを通じて吸引性能の向上を図る必要がある。

- ・潜行吸引式排砂管による土砂供給技術の実用化

この他に、潜行吸引式排砂管の磨耗損傷への対応を含めたダムの現場条件毎に適した潜行吸引式排砂管の

規模の検討や円滑な運用を可能とする施設全体の仕組みの検討が必要である。このためには、実際のダム貯水池を対象として、実用化規模での実験を行うための流域関係者との合意形成を前提とした現場事務所と連携した検討による現場への適応性、土砂吸引・供給能力、塵芥対応能力、既存技術と比較した効率性等を確認・検討して、本技術をダム管理の現場レベルで適用できる技術としていく必要がある。

- ・実用化を前提とした運用手法の検討

前述の技術の確立が前提となるが、本技術が実用化された際に、土砂供給による下流河川への環境負荷を可能な限り少なくしていける運用手法の検討が必要である。

おわりに、貯水位を低下させずにダム堆積土砂を適切な量と質を制御しつつ、ダム下流へ供給可能な土砂供給技術の確立に向けて、今後も着実に検討を進めていくことが重要であり、引き続き関係各位のご協力を賜れば幸いです。

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、平成24年度の現地実証試験については、実験サイトを利用させていただき、排砂現地実証試験にご協力いただいた京都大学防災研究所流域災害研究センターの藤田正治教授、堤大三准教授、宮田秀介助教、穂高砂防観測所の皆様、試験に際してご助言をいただいた電源開発株式会社の前田修一氏に謝意を表します。

また、平成25年度、平成26年度の現地実証試験については、千葉県河川整備課、千葉市原土木事務所、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) T. Sakurai, N. Hakoishi, Burrowing-type sediment removal suction pipe for a sediment supply from reservoirs, Dams and Reservoirs under changing Challenges "79th Annual Meeting of ICOLD 2011", pp. 371-378, 2011.
- 3) 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.
- 4) T. Sakurai, N. Hakoishi : Hydraulic Characteristics of the Burrowing Type Sediment Removal Suction Pipe, International Symposium on DAMS FOR A CHANGING WORLD -Need for Knowledge Transfer across the Generations & the World, pp. 281, 2012.
- 5) 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.
- 6) 宮川仁、宮脇千晴、石神孝之、箱石憲昭: 潜行吸引式排砂管の塵芥への対応能力に関する基礎的検討、土木学会第 70 回年次学術概要集、II、pp. 11~12、2015.
- 7) 箱石憲昭, 櫻井寿之: 貯水池の長寿命化のための堆砂対策技術の開発、土木技術資料、No. 55 No. 1、pp. 28-31、2013.
- 8) 櫻井寿之、箱石憲昭: 潜行吸引式排砂管の現地排砂実験、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 69, No. 4、pp. 1075-1080、2013.
- 9) Miyakawa, M., Hakoishi, N. & Sakurai, T. (2014) : Development of the Sediment Removal Suction Pipe by Laboratory and Field Experiments, Dams and Reservoirs under changing Challenges "82th Annual Meeting of ICOLD 2014", pp. V-15-V-24, International Commission on Large Dams, Bali, Indonesia.
- 10) 宮川仁, 箱石憲昭, 櫻井寿之: 室内実験と現地実験による潜行吸引式排砂管の開発、大ダム、No. 230、pp. 38-44、2015.
- 11) 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.
- 12) 藤田正治・澤田豊明・水山高久: 山地小流域における土砂動態のモニタリング手法、京都大学防災研究所年報、第 46 号 B, pp. 213-224, 2003
- 13) 宮川仁、宮脇千晴、櫻井寿之、箱石憲昭: 潜行吸引式排砂管によるダム貯水池内における排砂実験、土木学会第 69 回年次学術概要集、II-186, pp. 371~372、2014.
- 14) 宮川仁、宮脇千晴、櫻井寿之、箱石憲昭: 潜行吸引式排砂管によるダム貯水池内の排砂実験、土木学会環境水理部会研究集会 2014.
- 15) 箱石憲昭、宮川仁: 潜行吸引式排砂管の現地実験、ダム技術、No. 337、pp. 21~35、2014.
- 16) 千葉県高滝ダムパンフレット
- 17) 千葉県河川整備課 HP
<http://www.pref.chiba.lg.jp/kasei/kawazukuri/yourou/documents/03siryou-2.pdf>
- 18) 宮川仁、宮脇千晴、櫻井寿之、石神孝之、箱石憲昭: 潜行吸引式排砂管の現地排砂実験による実用化に向けた検討、河川技術論文集、Vol. 21、pp. 189~194、2015.
- 19) Miyakawa, M, Hakoishi, N., Ishigami, T & Sakurai, T. (2015): Development of the Sediment Removal Suction Pipe for Practical Use、International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Zurich, Switzerland.
- 20) 石橋毅: ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究、土木学会論文報告集、第 334 号、pp. 103-112, 1983. 6
- 21) 竹林征三・高須修二: 日本における排砂設備の歴史と設計法、大ダム、No. 152, pp. 55-62, 1995. 6
- 22) 北村匡・斎藤俊三・中川毅志・堤雄生: 宇奈月ダム排砂設備の構造について、ダム技術、No. 132, pp. 45-51, 1997. 9
- 23) 森本浩: 旭ダムバイパス排砂システムの運用実績と効果について、大ダム、No. 167, pp. 46-51, 1999. 4
- 24) (社) 日本大ダム会議技術委員会排砂対策分科会: 技術委員会分科会報告-ダム排砂対策の現状と課題一、大ダム、No. 176, pp. 56- 57, 2001. 7
- 25) 柏井条介: 宇奈月ダムの洪水吐き・排砂設備の水理設計、取水と制水、No. 44, pp. 133-140, 2002. 9
- 26) (社) 日本大ダム会議技術委員会土砂管理分科会: 土砂管理分科会報告-貯水池の土砂動態と土砂制御工法一、大ダム、No. 212, pp. 10-129, 2010. 7
- 27) 山下遼、宮川仁、櫻井寿之、宮脇千晴、石神孝之: ダムからの土砂供給の量と質が下流河川に与える影響の基礎的検討、土木学会第 71 回年次学術概要集、2016.
- 28) 櫻井寿之、箱石憲昭: 堆砂対策と流砂の連続性を達成するための土砂供給施設の運用に関する考察、土木学会第 66 回年次学術概要集、pp. 135~136、2011.
- 29) 榎村康史、金銅将史、宮川仁、石神孝之: ダムの再開発や堆砂対策に関する土木研究所における研究、ダム技術、No. 350、pp. 21~27、2015.

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

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : River and Dam Hydraulic Engineering
Research Team (Hydraulic Engineering
Research Group)

Author : ISHIGAMI Takayuki

MIYAWAKI Chiharu

SAKURAI Toshiyuki

MIYAKAWA Masashi

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 this study, we examined a design method of the “burrowing type sediment removal suction pipe method”, using the water head energy differential between the upstream and downstream areas of a dam. We examined a flow control equipment that corresponds to the wear or damage caused by sediment. And we examined a operation for the environment in the sediment supply facilities.

Key words : dam reservoir, countermeasures for sedimentation, burrowing type sediment removal suction pipe, hydraulic model test ,field test ,numerical simulation of one-dimensional river-bed variation.