

## 14.5 貯水池下流供給土砂の高精度制御に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：水工研究グループ（河川・ダム水理）

研究担当者：箱石憲昭、宮脇千晴、海野仁、福島雅紀、櫻井寿之

### 【要旨】

貯水池下流河川の土砂環境保全のため、ダム貯水池において土砂量、質を制御する方法が求められているが、土砂フラッシングやバイパスなどの従来の堆砂対策手法では、操作条件や堆砂条件、土砂流入条件の影響を大きく受けるため、土砂量と質を高精度に制御することが困難である。本研究では、貯水池下流河川の環境保全と貯水池の持続的な利用を可能にすることを目的に、ダム放流量に応じて設定される下流河川への粒径別土砂供給を精度よく実施する方法を開発する。

21年度は、実際の置土侵食現象の把握及び侵食予測法の検証データを得ることを目的に小渋ダム下流における置土侵食の現地観測を実施した。土砂吸引施設については、20年度に考案した潜行式吸引排砂管について、小規模模型及び中規模模型を用いた実験により排砂特性を検討した。湖内輸送については、輸送管を傾斜させた場合の損失係数の知見を得るための実験と湖内輸送の動力に期待している逆転ポンプの実験を実施した。

その結果、置土侵食の現地観測によって、複数回の出水による侵食状況の変化を把握し、湾曲による侵食の定性的な特性についての知見が得られた。潜行式吸引排砂管については、小規模実験において、想定通りの排砂が可能であることを確認し、流量と土砂の粒径が排砂特性に与える影響を把握するとともに、中規模実験において土砂吸引が不安定になる等の新たな課題を把握した。土砂の傾斜輸送管について、エネルギー損失の特性を把握した。逆転ポンプの基本的な給水機能を把握した。

キーワード：ダム貯水池、堆砂対策、置土、潜行式吸引排砂管、湖内輸送管

### 1. はじめに

貯水池下流河川の土砂環境保全のため、ダム貯水池において土砂量と質を制御する方法が求められているが、土砂フラッシングやバイパスなどの従来の堆砂対策手法では、操作条件や堆砂条件、土砂流入条件の影響を大きく受けるため、土砂量、質の高精度の制御が困難である。

そこで、本研究では、貯水池下流河川の環境保全と貯水池の持続的な利用を可能にすることを目的に、ダム放流量に応じて設定される下流河川への粒径別土砂供給を精度よく実施する方法の開発を目標としている。

21年度は、小渋ダム下流における置土侵食の現地観測、潜行式吸引排砂管についての小規模模型及び中規模模型を用いた実験、輸送管を傾斜させた場合の損失係数の知見を得るための実験、湖内輸送の動力に期待している逆転ポンプの実験を実施しており、得られた知見を報告する。

### 2. 小渋ダム下流置土の現地観測

#### 2.1 観測対象

観測対象としたのは、長野県下伊那郡の一級河川天竜川の支川小渋川に昭和 44 年に竣工した小渋ダムの下流河川である。小渋ダムでは有効貯水容量の減少に対処するとともに土砂の連続性を確保するため、土砂バイパストンネルの設置等の事業が計画・実施されている。近年、施設完成後の影響を把握するために、試験的にダム下流河川への置土が実施されている。

本観測では 2009 年に実施された置土を対象として、2009年6月～7月にかけての置土侵食状況を調査した。

対象としたのは、小渋ダムから約 1.1km 下流の河道内右岸側の距離標 3.8k～3.9k に設置された置土である。なお、距離標は天竜川との合流点を始点とした上流への距離を表す。例えば、3.8k は合流点から 3.8km 地点を表し、以降の断面位置の表記についてもこれを用いる（図-2.1 参照）。置土の長さは 110m、幅は 15m、高さは 3m、法面勾配は 1：1.0 であり、設置完了時の土砂量は約 4,500m<sup>3</sup>であった。

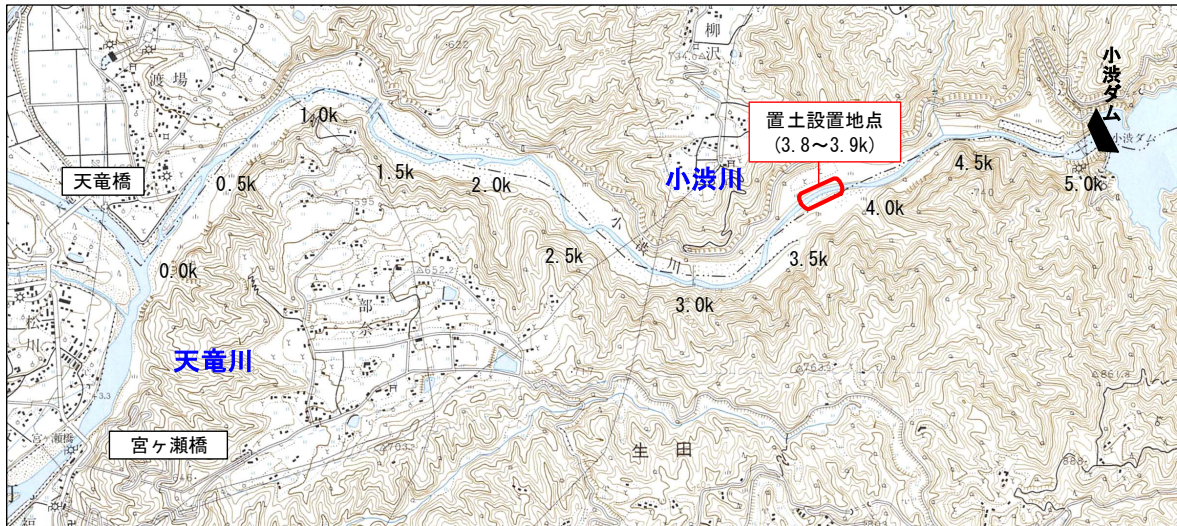


図-2.1 調査対象範囲



図-2.2 置土の空中写真  
(上：置土侵食前、下：置土侵食後)

## 2.2 観測方法

観測項目はダムの流入量・放流量、置土上流・中央・下流の水位、河床横断地形、置土材料特性、置土侵食状況の観察である。なお、ダムの流入量・放流量、置土上流の水位、河床横断地形の一部については、国土交通省中部地方整備局天竜川ダム統合管理事務所から情報提供いただいた。以下に、主な観測項目の概要を示す。

### 2.2.1 置土材料調査

置土の3箇所（上流部、中央部、下流部）から試料を採取し、粒度分布、含水率、密度を調査した。なお、現場の湿潤密度は水置換法により測定した。

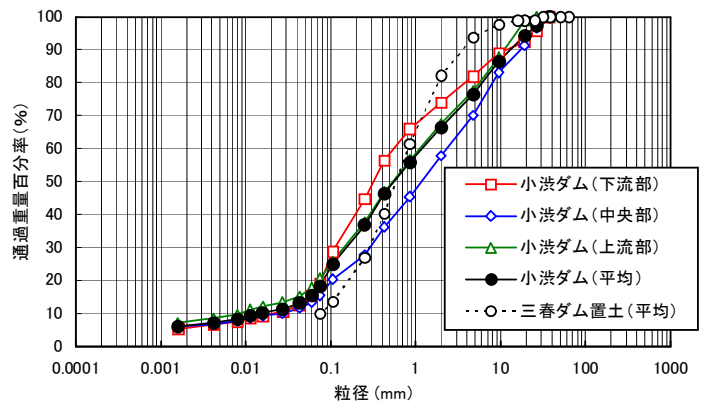


図-2.3 置土材料の粒度分布

表-2.1 置土材料の分析結果

土砂採取位置	含水率 (%)	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	現場の湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	空隙率 (%)
上流部	7.7	2.699	1.95	32.8
中央部	5.4	2.695	1.97	30.6
下流部	8.7	2.687	1.93	34.1
平均	7.3	2.694	1.95	32.5

注) 現場の湿潤密度は水置換法により測定した。

### 2.2.2 水位調査

置土設置地点周辺の河川水位の変化を把握するため、連続観測機器による水位調査を行った。調査地点は置土上流（4.05k 左岸）、置土中央（3.85k 左岸）、置土下流（3.6k 右岸）の3地点であり、大気圧補正用として陸上部（3.6k 付近）にも水位計を設置した。水位は自記式の水位計（Onset 社製ホボ U20）を用いて、10分間隔で連続観測を行った。

### 2.2.3 置土侵食状況調査

侵食状況を観測する際の目安とするため、置土天端平面上にグリッドを設置した。グリッドは、流程方向

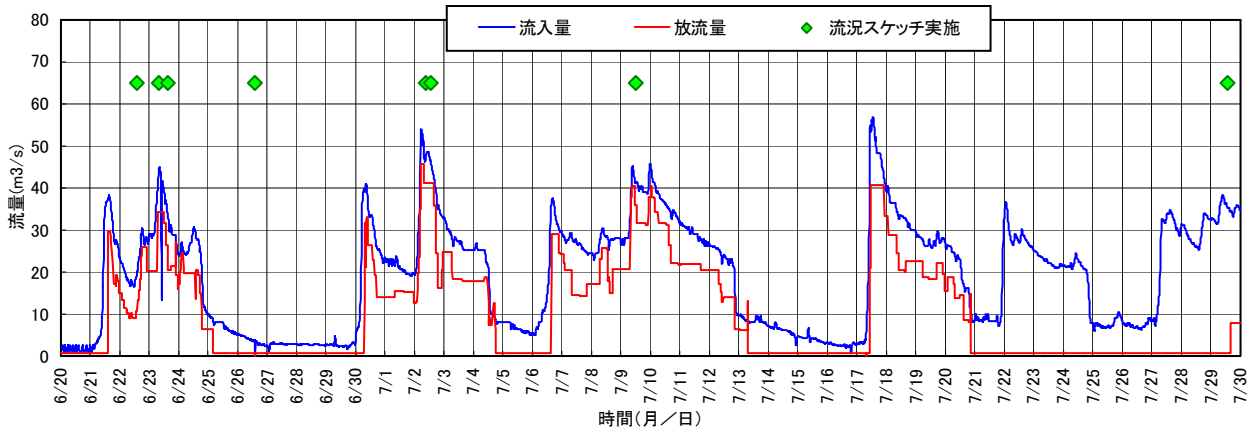


図-2.4 小渋ダム流入量及び放流量の時系列

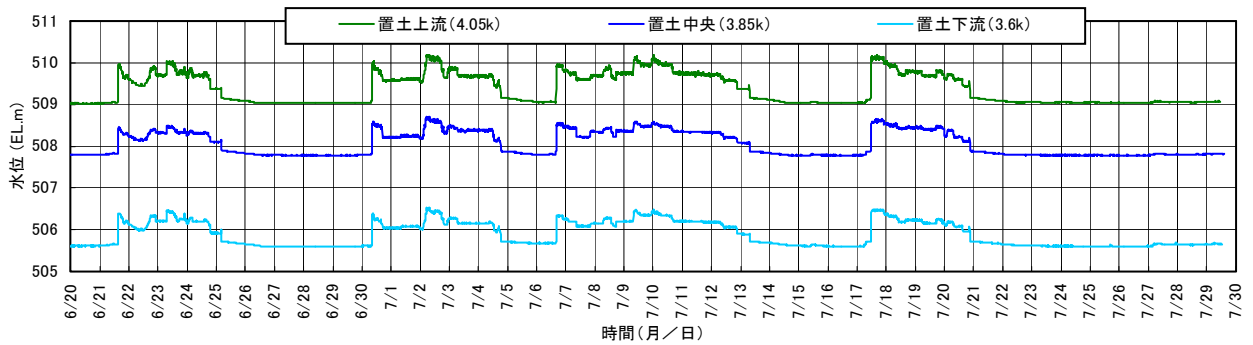


図-2.5 水位の時系列

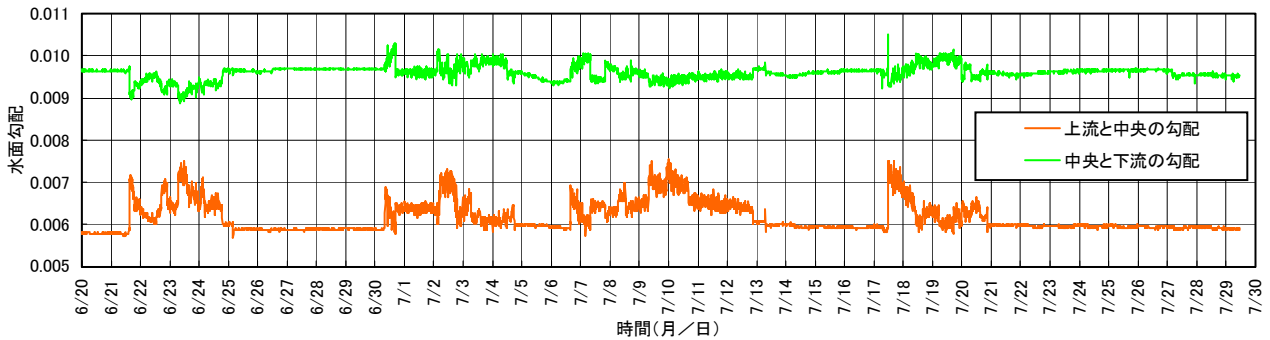


図-2.6 水面勾配の時系列

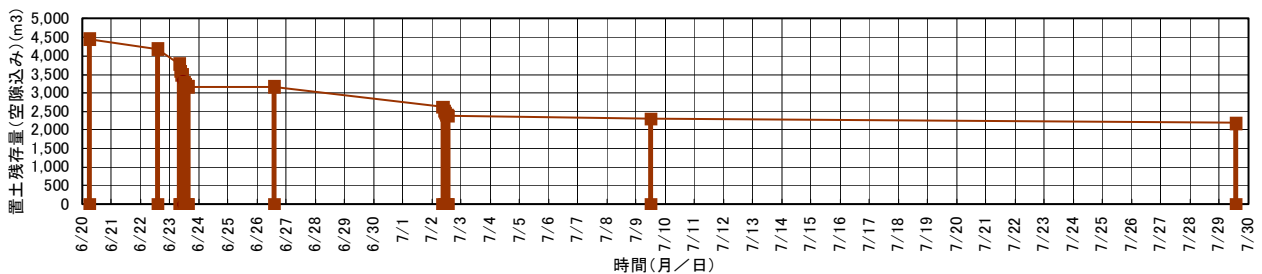


図-2.7 置土残存量

に5m間隔で110m、横断方向に3m間隔で15mの範囲に、ライン引き用の石灰を用いて設置した(図-2.2参照)。また、グリッドの交点部に上端を赤く塗装した杭を設置し、さらに横断方向には、赤い杭と赤い杭の間の中

心に白く塗装した杭を設置した。

出水時のダム放流による置土形状の変化を把握するため、侵食状況のスケッチ及び写真・ビデオ撮影を行った。

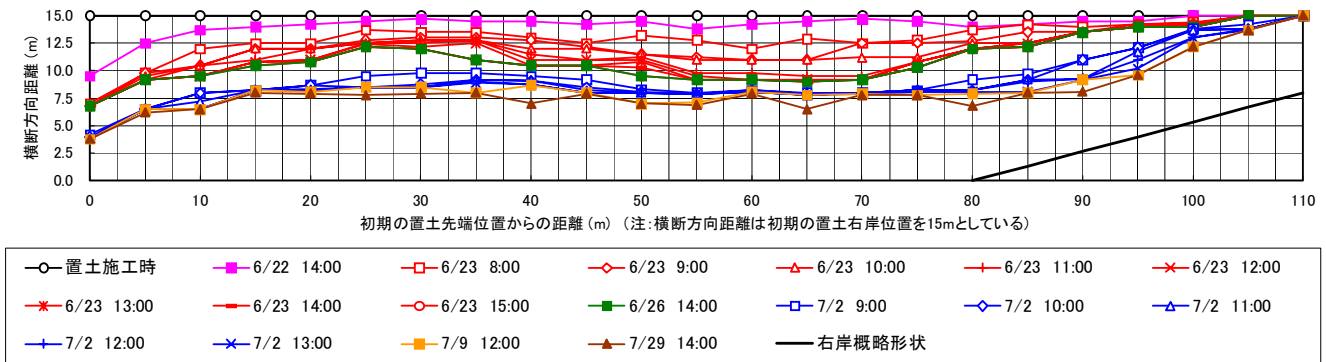


図-2.8 置土侵食状況のスケッチ

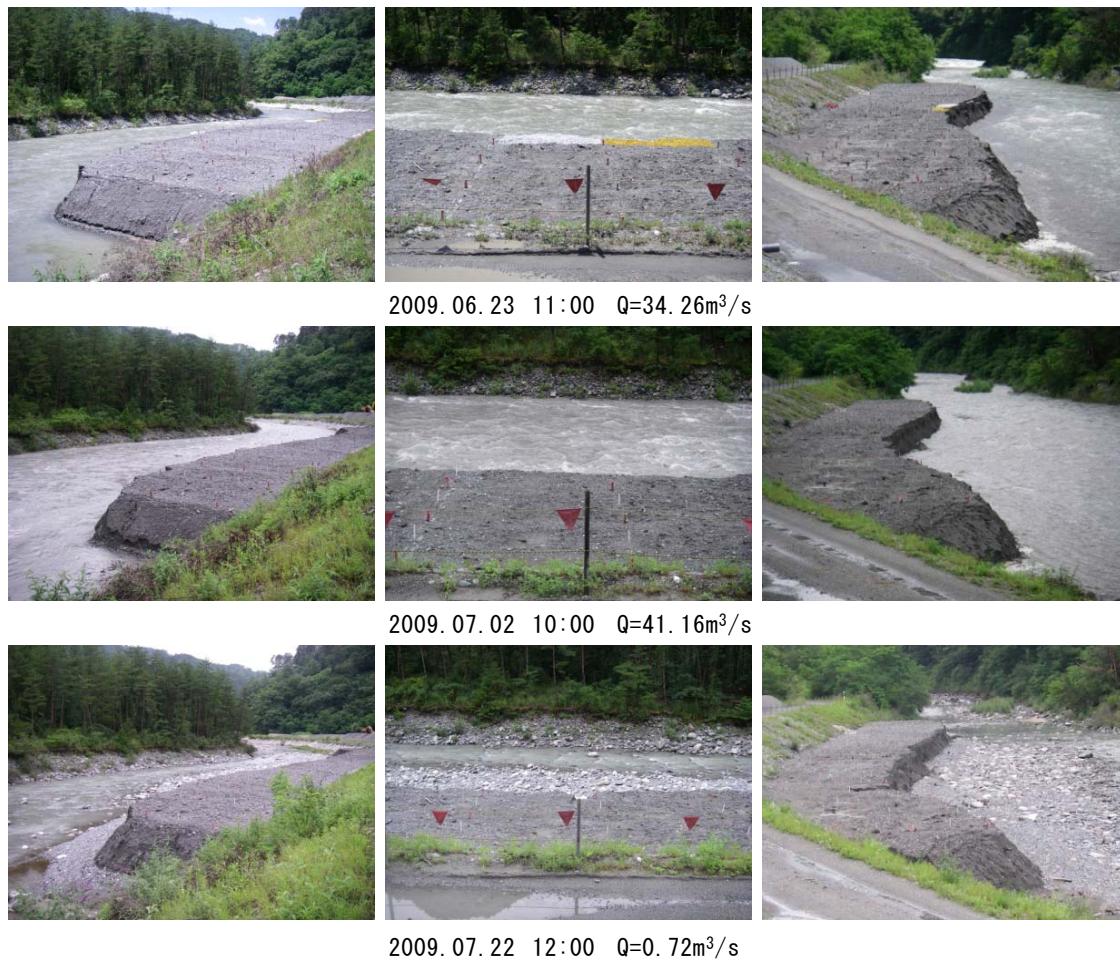


図-2.9 置土侵食状況 (左：上流から、中：右岸から、右：下流から)

スケッチについては、出水時（日中のみ）に、置土形状の変化を右岸の管理用道路上から観察し、置土天端平面の縁辺部の形状を1時間間隔で記録した。

写真撮影については、デジタルカメラを置土上流側、中央部、下流側の3箇所に設置し、定点撮影を行った。撮影は、平成21年6月23日から7月22日までの期間中、30分間隔で撮影した（日中のみ）。

ビデオ撮影については、出水時の侵食状況スケッチ時に、ビデオカメラにより置土からの土砂の流出状況等の撮影を行った。

#### 2.2.4 河床横断地形調査

河床横断地形については、2009年5月下旬に置土設置前から設置中にかけて3.6k~4.0kの8断面について行い、同じ断面について観測終了後にも測量を行った。

## 2.3 観測結果

### 2.3.1 置土材料調査結果

置土材料の粒度分布を図-2.3に、その他の分析結果を表-2.1に示す。小渋ダムの置土は、50%粒径が0.5mm程度、最大粒径は40mm程度で砂礫が主体であり、シルト以下の成分が18%程度を占めている。図-2.3には以前に観測を行った三春ダムの置土材料の粒度分布についても示しているが、平均値と比較すると、三春ダムの方が均等であり、小渋ダムの方が粒度分布の広がりやや大きい。空隙率については、ばらつきは小さく、平均的には32.5%となっている。

### 2.3.2 流量と水位の調査結果

ダムの流入量及び放流量の時系列を図-2.4に示す。また、置土上流・中央・下流の水位の時系列を図-2.5に示す。小渋ダムでは洪水調節において、梅雨期(6/10~7/20)と台風期(7/20~10/5)が設定されており、それぞれEL.592m、EL.604.8mの制限水位が設定されている。平成21年の梅雨期には、大きな出水はなく、6月後半から7月までの観測期間では、ピーク流入量が40m<sup>3</sup>/s弱~50m<sup>3</sup>/s強で期間が4日~8日程度の小規模な出水が6回程度生じた。小渋ダムの洪水調節開始流量は200m<sup>3</sup>/sであるため、7/20までは流入量をやや下回る流量で放流されており、7/21からは、貯留して貯水量を増加させるため維持流量0.72m<sup>3</sup>/sの一定量放流とされている。置土の侵食が生じたと考えられる出水は6/21~7/21までの4回である。

水位については、概ね放流量の増減と同様な変動を示している。各地点の水位の最小値と最大値の差は、置土上流、置土中央、置土下流で1.18m、0.94m、0.94mで1m前後の水位変動が生じていた。水位から求められる水面勾配を図-2.6に示す。このとき、上流水位計と中央水位計の距離を213m、中央水位計と下流水位計の距離を226mとした。これより、常時は、上流と中央の水面勾配は0.006弱(1/170程度)、中央と下流の間では0.0097程度(1/103程度)となっている。流量増加時には、上流と中央の間の勾配は大きくなっており、置土による堰上げが生じているものと推測される。中央と下流の間の勾配については、最初の出水では減少しているが、その後の出水では増加する場合もある。

### 2.3.3 置土侵食状況調査結果

図-2.2に、侵食後の置土の空中写真を、図-2.7に置土の残存量の時間変化を、図-2.8に侵食状況のスケッチを、図-2.9に侵食状況の写真を示す。図-2.7の置土残存量は図-2.8に示したスケッチから算定した量

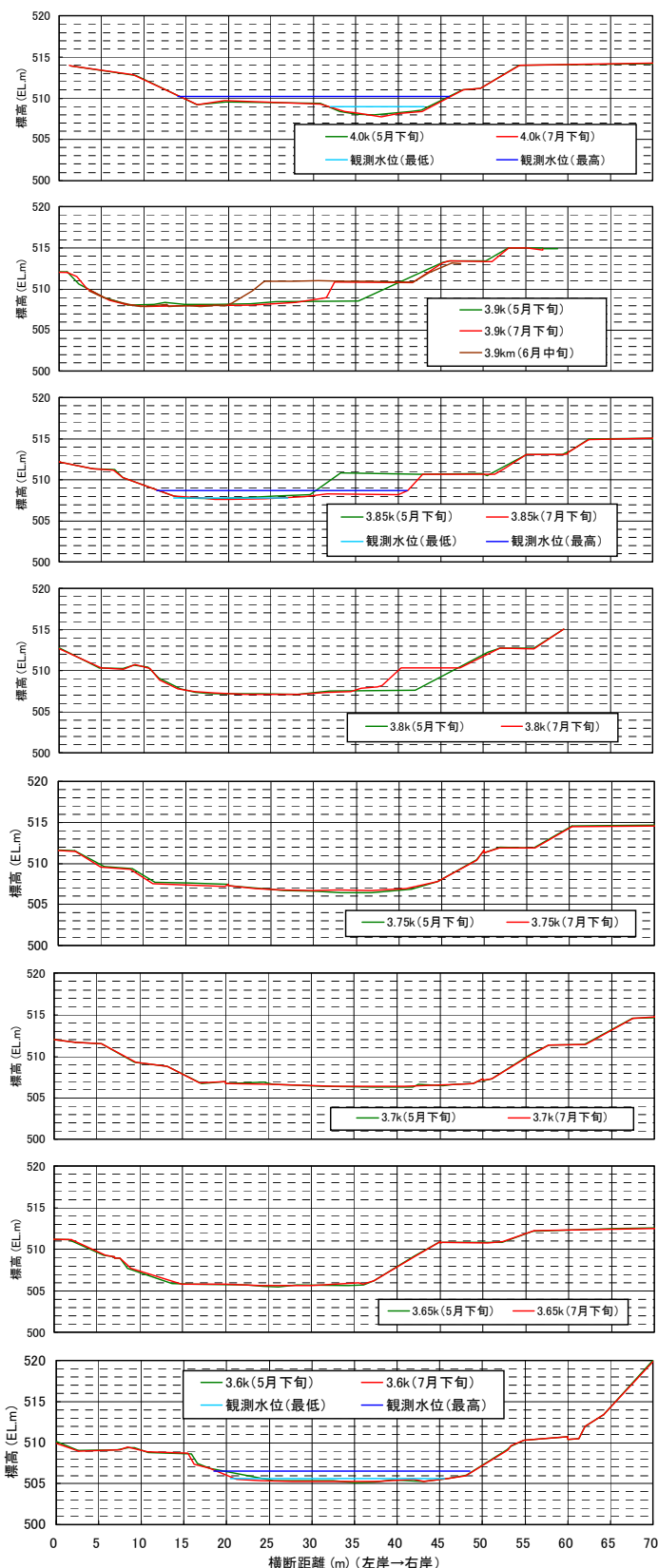


図-2.10 河床横断形状の調査結果

であり、最初の出水で30%弱が流失し、2回目の出水でさらに20%程度が流失したと考えられる。3回目及び4回目の出水では、数%程度しか減少していない。

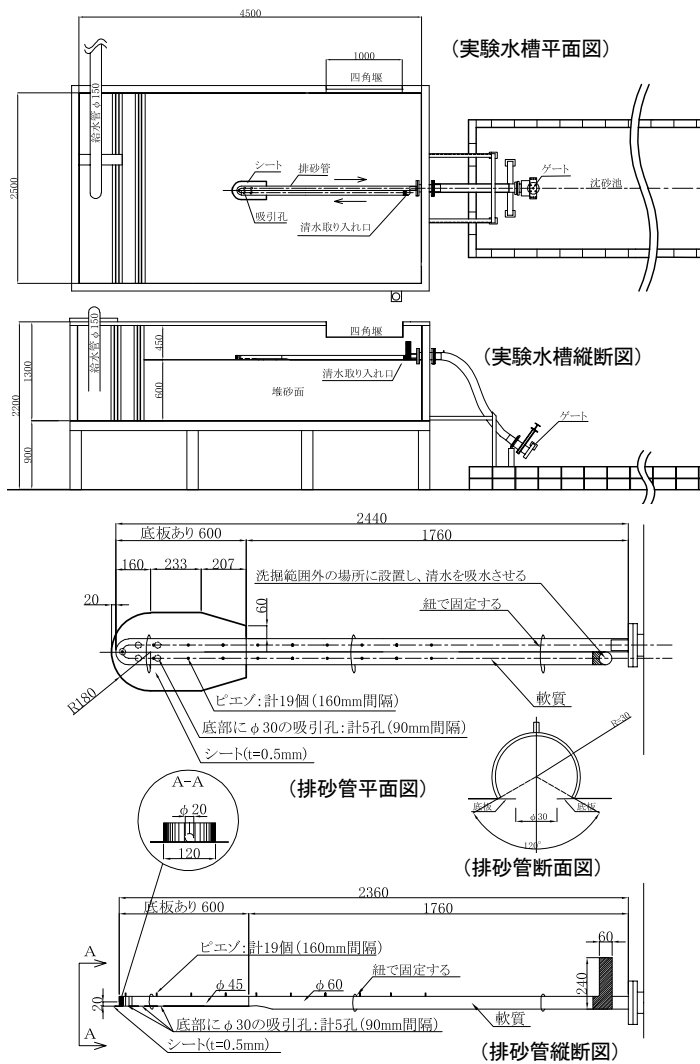


図-3.1 小規模模型概要

全体の侵食量は概ね初期の置土量の 50%程度であり、そのほとんどが初期の2回の出水で侵食されている。

図-2.8をみると、最初の出水では、全体的に幅方向に侵食されているが、先端から40~70mの中央部の側岸侵食が卓越している。2回目の出水によって、1回目に残った上流部に側岸侵食が生じて、図-2.2からもわかるように、先端から70m程度まではほぼ等幅になっている。3回目以降の出水ではあまり形状が変化していない。また、全体を通して左に湾曲している置土の終端部はあまり侵食されていない。

### 2.3.4 河床横断地形調査結果

図-2.10に河床横断形状の調査結果を示す。2009年の5月下旬に1回目の測量を実施している。基本的に置土設置前の測量結果であるが、断面3.85kのみは置土設置後の測量となった。断面3.9kについては、6月中旬に置土設置後の測量を行った。水位計が設置されている断面については、水位観測値の最大値と最小値



(排砂管全景)



(排砂管吸引部裏面)



(排砂管吸引部下流から)



(実験水槽概要)

図-3.2 小規模模型写真

の水面を合わせて示している。

図-2.10より、置土設置位置にあたる3.9k、3.85k、3.8kでは侵食後には置土の左端の裾部分の横断勾配が緩くなっており、上部は急勾配となっている。また、置土部分を除いた河床形状は、若干の堆積が見られる箇所もあるが、ほとんど変化しておらず、侵食された土砂はほとんどが3.6k地点より下流へ流送されたと考えられる。

## 3. 潜行式吸引排砂管の検討

### 3.1 検討の概要

本検討では、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の開発を試みている。これまでに民間企業との共同研究により、堆砂面上に底面を切り欠いたフレキシブル管を設置し、管の周辺にシートを展開する方法(シート排砂)<sup>3.1)</sup>を開発してきたが、いくつか課題があり、これを克服するために平成20年度までに「潜行式吸引排砂管」を考案した<sup>3.2)</sup>。

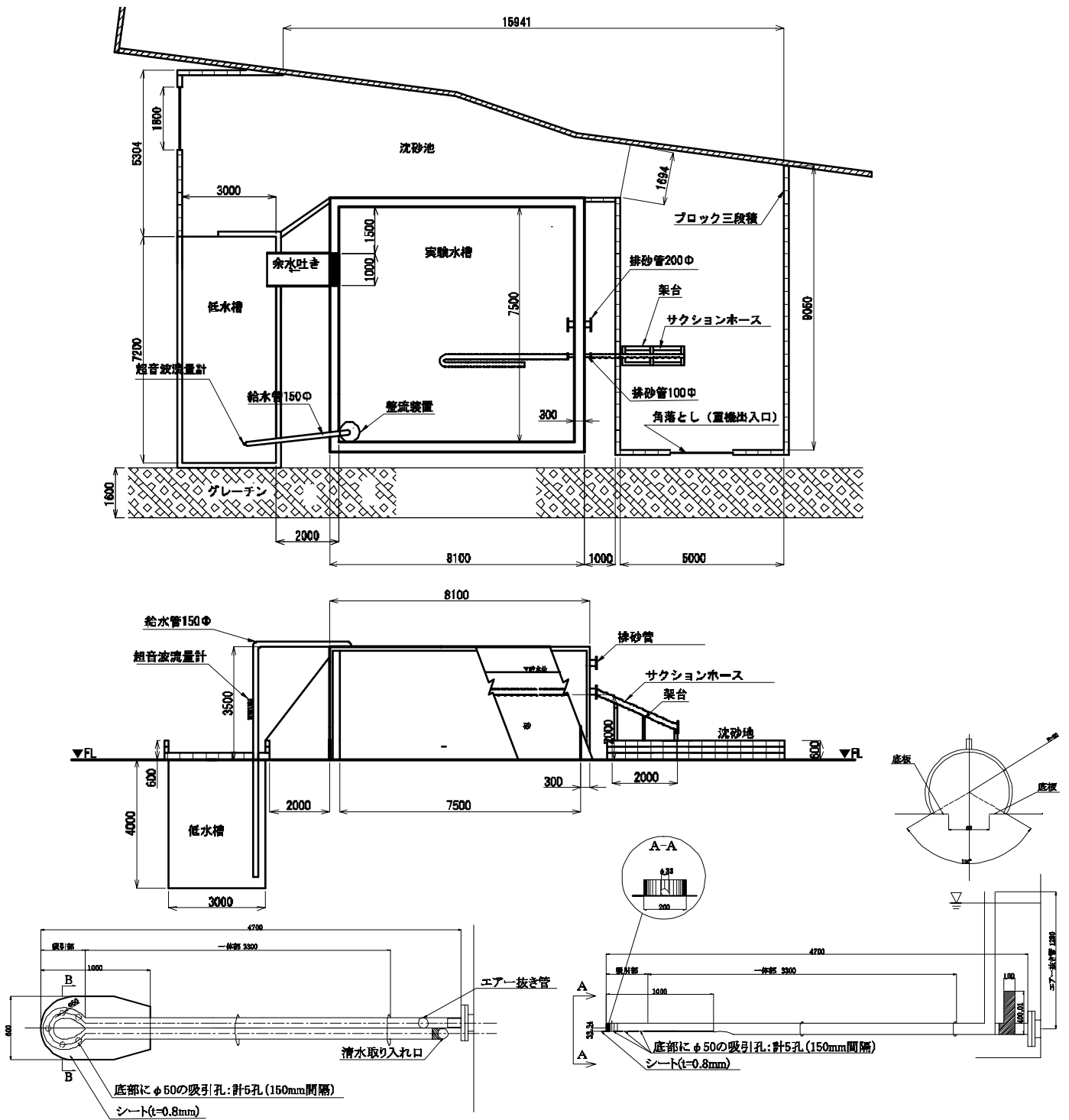


図-3.3 中規模模型概要

「潜行式吸引排砂管」とは、フレキシブル管をU字形として一方を取水口とし、折り曲げた湾曲部の底面を切り欠いてシートを貼り底面に穴を設けて土砂の吸引口とするものである。この手法について、小規模模型と中規模模型を用いた実験によって排砂特性を検討した結果を報告する。

### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 小規模模型実験

実験に用いた模型概要を図-3.1、3.2に示す。実験水槽は、長さ4.5m、幅2.5m、深さ1.3mであり、水位を維持するための余水吐きおよび排砂を行うための管(内径60.5mm)を設置している。水槽外の管の先端には

流量調整が可能なゲートを設けている。実際に用いる管径を 0.5~1.0m と想定した場合、模型の縮尺は 1/16.5~1/8.3 程度に相当する。

実験の手順は、始めに水槽内に土砂を厚さ 60cm に整形した初期河床の上に排砂管を設置して、一定流量 (45L/s) を給水し余水吐きからの越流によって水位を保つ。その後、排砂管の下流端のゲートを開けて排砂を実施して、水槽内の水位、排砂管内の圧力、流砂量、流況等の調査を行った。

実験の土砂材料には一様粒径珪砂を用いた。粒径を 3 種類、ゲート開度を 3 種類として、その組み合わせで 9 ケースの実験を行った。実験条件を結果の概要と合わせて表-3.1 に示す。

### 3.2.2 中規模模型実験

実験に用いた模型概要を図-3.3、3.4 に示す。実験水槽は、鉄筋コンクリート製で長さ 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 100mm)を設置している。水槽外の管の先端には流量調整が可能なゲートを設けている。実際に用いる管径を 0.5~1.0m と想定した場合、模型の縮尺は 1/5~1/10 に相当する。

実験の手順は、始めに水槽内に土砂を厚さ 200cm に整形した初期河床の上に排砂管を設置して、一定流量 (約 47L/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混合粒径砂を用いており、その粒度分布を図-3.5 に示す。図-3.5 には、購入した土砂からサンプリングした 3 つの試料の分析結果とその平均を示した。これより、試料によるばらつきはほとんど無く、50%粒径は 0.39mm で 0.1mm から 2mm の砂で構成されている。

実験は中規模模型における排砂の可能性を検討する目的で実施したため、固定した実験条件ではなく、排砂状況に応じて、適宜、ゲート開度の調整や開閉、管を人為的に振動させる等の行為を行った。

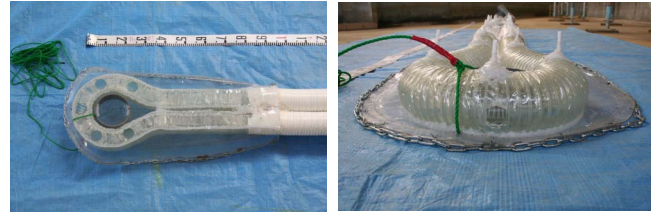
## 3.3 実験結果

### 3.3.1 小規模模型実験結果

排砂管から放流された流量と土砂濃度の時系列の実験結果を図-3.6、3.7 に示す。図-3.7 は図-3.6 の初期の 40 分について拡大した図である。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



(排砂管全景)



(排砂管吸引部裏面)

(排砂管吸引部下流側)



(実験水槽出口側)



(実験水槽余水吐き)

図-3.4 中規模模型写真

は含んでいない。流量については、どのケースも実験開始直後を除いて清水のみの場合の流量よりも小さな値を示しており、初期に流量が減少し、その後上昇している。土砂濃度については、初期に増加して減少した後、一定値を保つ期間があり、その後減少している。土砂濃度が 1%以下に低減する時間は、ゲート開度 24% で 20 分程度、18% で 30 分程度、12% で 50 分程度であり、同じゲート開度でも粒径が小さい方が排砂に時間を要している。

一例としてケース 1-1 の時系列を図-3.8 に示す。図中には排砂管の折返し部につけた紐により折返し部の位置を確認して求めた埋没時間と水槽の底に達する



表-3.1 実験条件及び結果の概要

ケース名	実験条件					実験結果概要						
	土砂材料平均粒径 (mm)	ゲート開度 (%)	流量 (清水時) (L/s)	管内流速 (円形断面) (m/s)	通水時間 (分)	管折返し部埋没時間 (分)	管折返し部着底時間 (分)	排出土砂量 (空隙込み) (m <sup>3</sup> )	空隙率 (%)	排出土砂量 (空隙無し) (m <sup>3</sup> )	体積土砂濃度 (最大値) (%)	体積土砂濃度 (着底後安定状態) (%)
1-1	1.56	24	3.32	1.17	80	2.0	4.0	0.49	44.4	0.27	18.9	8.9
1-2		18	3.05	1.08	150	3.0	6.5	0.52	44.5	0.29	11.4	5.4
1-3		12 <sup>*</sup>	2.50	0.88	120	-	6.0 <sup>**</sup>	0.47	44.7	0.26	9.7	3.0
2-1	0.89	24	3.32	1.17	150	1.5	2.5	0.50	44.0	0.28	23.3	4.5
2-2		18	3.05	1.08	150	1.5	3.5	0.57	43.8	0.32	22.2	3.7
2-3		12	2.50	0.88	120	4.5	10.0	0.43	44.7	0.24	13.5	5.1
3-1	0.36	24	3.32	1.17	150	4.5	6.0	0.53	44.8	0.29	32.4	5.3
3-2		18	3.05	1.08	150	3.5	5.0	0.73	46.3	0.39	26.2	5.5
3-3		12	2.50	0.88	180	11.0	15.0	0.48	46.3	0.26	13.2	4.6

\* 初期はゲート開度を18%とし、管が埋没後に12%に設定した。

\*\* 埋没してから6分後に着底。

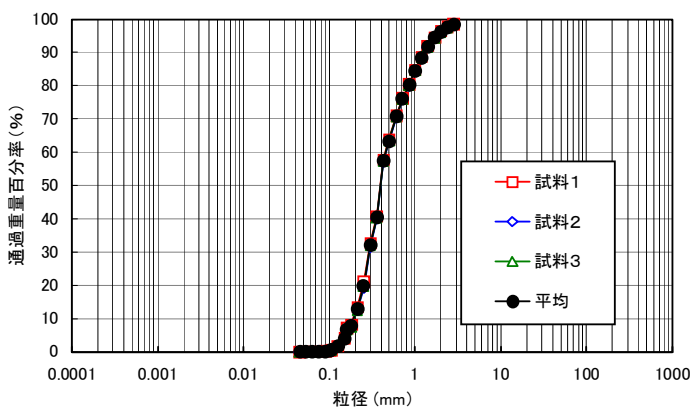


図-3.5 中規模実験に用いた土砂の粒度分布

(着底) 時間についても示した。各ケースについても表-3.1 に時間を記載した。図-3.8 より、管折返し部が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る。埋没してから着底するまでは折返し部の底部の穴と側部の穴の双方から土砂を吸い込むため濃度が大きくなっていると考えられるが、この時の濃度の最大値(表-3.1 参照)は、粒径が小さいほど大きく、20~30%とかなり大きい値であり、管路内の流れの安定性が若干懸念される。着底後は底部からの土砂の吸い込みが減少して土砂濃度が下がると考えられる。着底後に土被りがある程度厚い期間は比較的安定した濃度(表-3.1 参照)で排砂されており、このときの濃度は 3~9%の値であるが、流量や粒径の影響は認めにくい。土砂濃度が大きくなると流量が減少しており、土砂の増加によって管内のエネルギー損失が増加していることがわかる。他のケースについても上記の傾向はケース 1-1 と同様であった。

図-3.9 に排砂後に水位を下げた状態の堆砂形状を、図-3.10 に排砂後の河床縦断形状を示す。これより、排砂管からの排砂によってすり鉢状の形状が形成され

ていることがわかる。当初の想定では、洗掘深が 0.55m、砂の水中安息角を 30° と仮定してすり鉢の半径を 0.95m と算定し、これらから排出土砂量(すり鉢の容積)を 0.52m<sup>3</sup> と見込んでいた。表-3.1 に示した排出土砂量(空隙込み)の値は概ねこの値に近く想定通りの土砂排出が可能であった。図-3.9 及び図-3.10 から粒径が小さい場合は、すり鉢が流下方向に若干伸びた形状になる傾向が認められる。

### 3.3.2 中規模模型実験結果

実験結果のゲート開度と流量、排砂量、体積土砂濃度の時間変化を図-3.11 に示す。

土砂濃度のピークは、実験開始 43 分後に、ゲート開度 25%の時に約 9.3%となった。実験開始 105 分後に排砂管が水槽の底に達し排砂量の減少がみられた。

なお、330 分程度までは、排砂管内に空気溜まりが発生し、ゲート開度を小さくして空気抜きをする作業を繰り返す必要があった。これは、初期の堆砂形状を整形する際に、土砂中の空気が十分に抜けていないことにより、土砂の吸引口から土砂中の空気を吸い込んだことが原因と考えられる。実際の堆砂では、水中で砂礫が流送されて堆積する場合には、空気の混入はほとんどないと考えられる。しかしながら、有機物の分解によるガスの発生や、土砂崩れなどによる堆積などでは、空気が土砂中に存在する可能性もあり、空気抜きの対策を考えておく必要がある。

330 分以降では、特に空気溜まりの問題も見られないにもかかわらず、土砂濃度が極端に薄くなり、ほとんど土砂が排出されなくなった(水は放流されている)。この原因として、下記の①、②などの理由を考えたが、特定はできなかった：①土砂中の塵芥が吸引口を閉塞 ②土砂中で吸引口の周りに空間ができて、土砂のアーチアクションで空間が維持され、空間の壁面に作用する吸引力では土砂が吸い込めなくなった。そこで、実

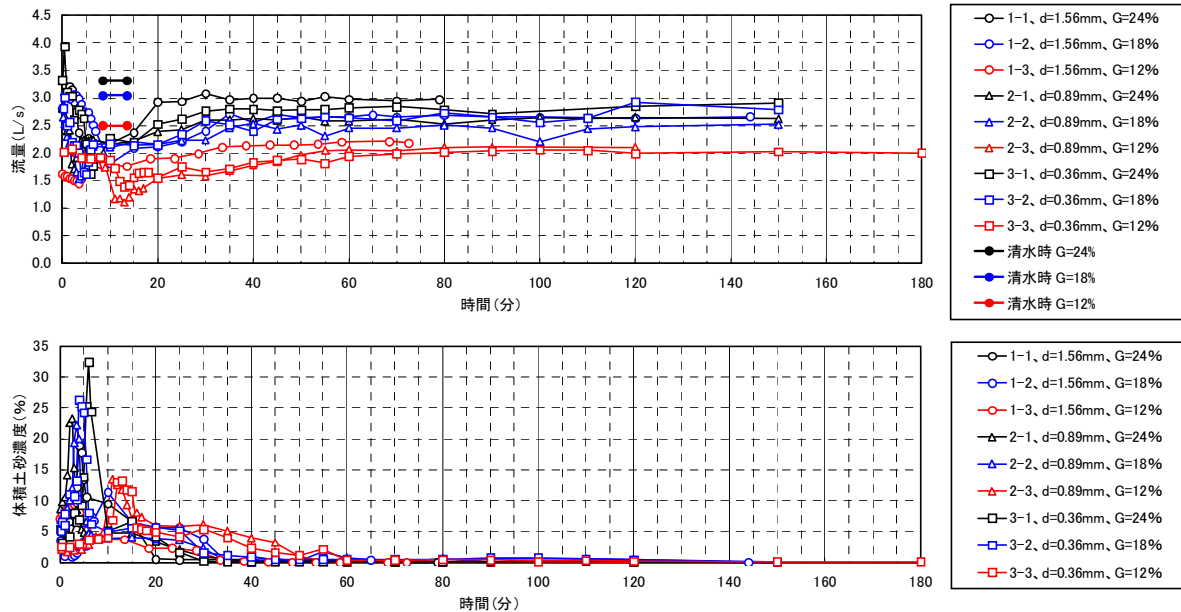


図-3.6 流量と体積土砂濃度の時系列 (1)

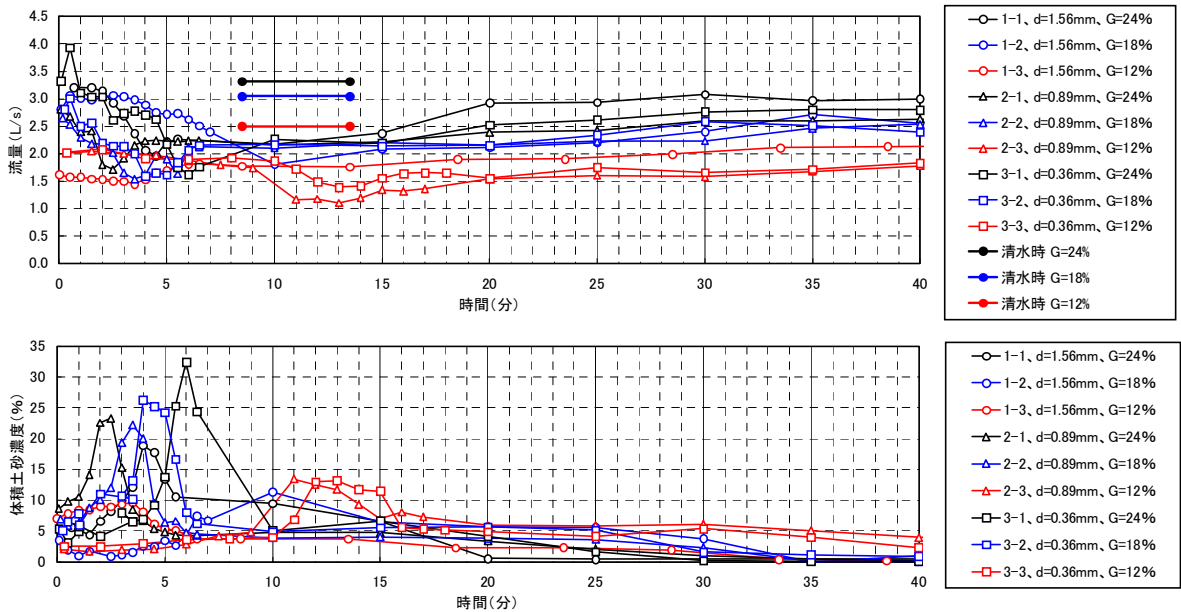


図-3.7 流量と体積土砂濃度の時系列 (2)

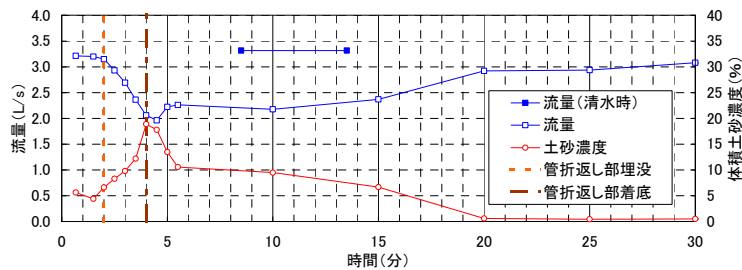


図-3.8 ケース 1-1 の流量と体積濃度の時系列

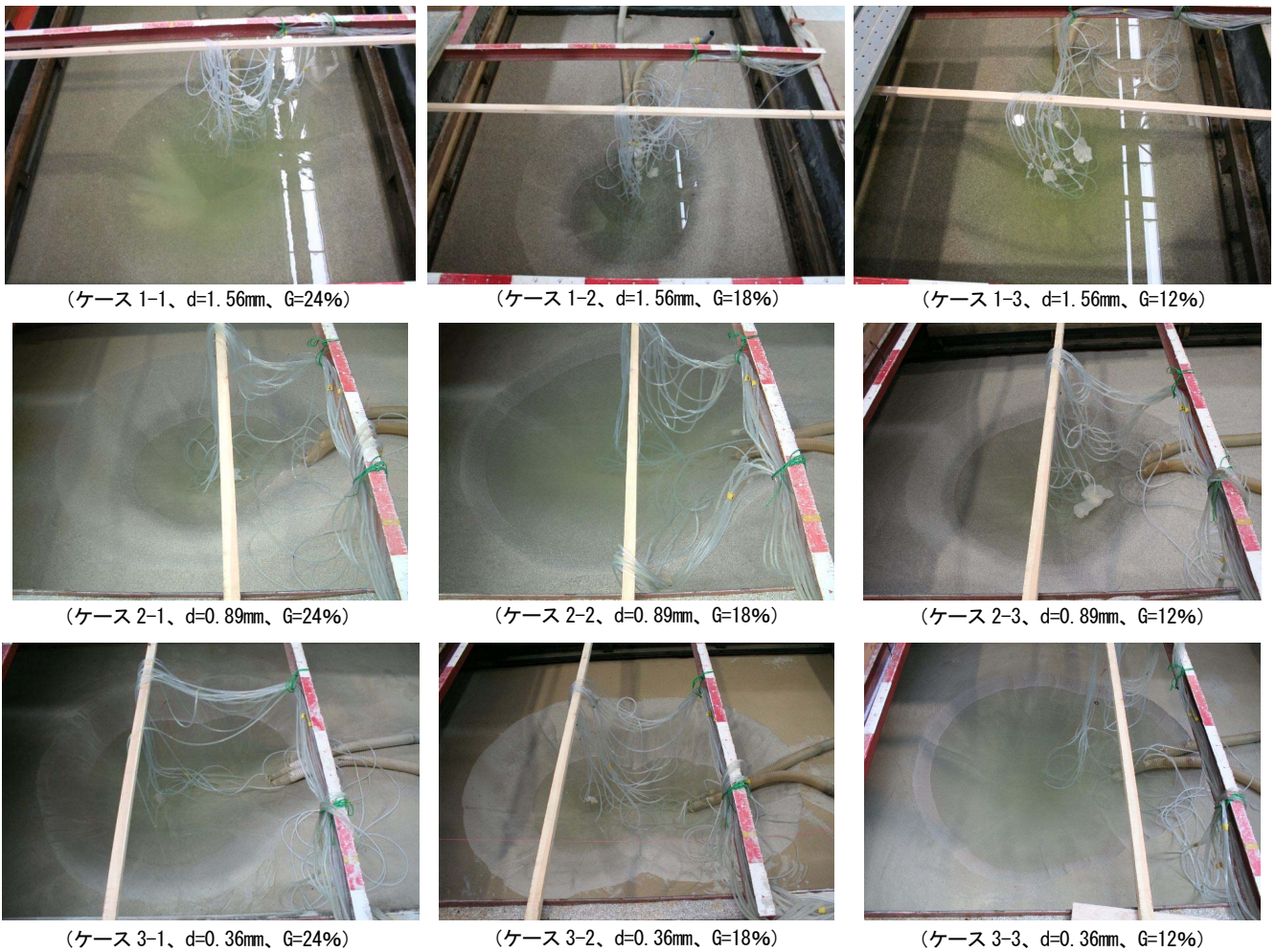


図-3.10 排砂後の堆砂形状

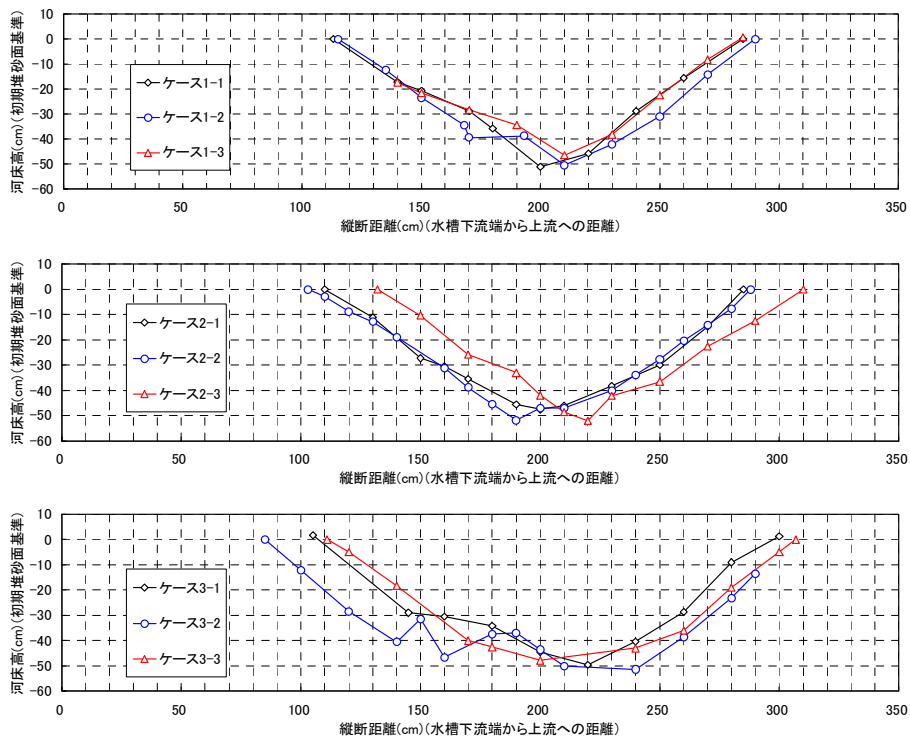


図-3.10 排砂後の河床縦断形状

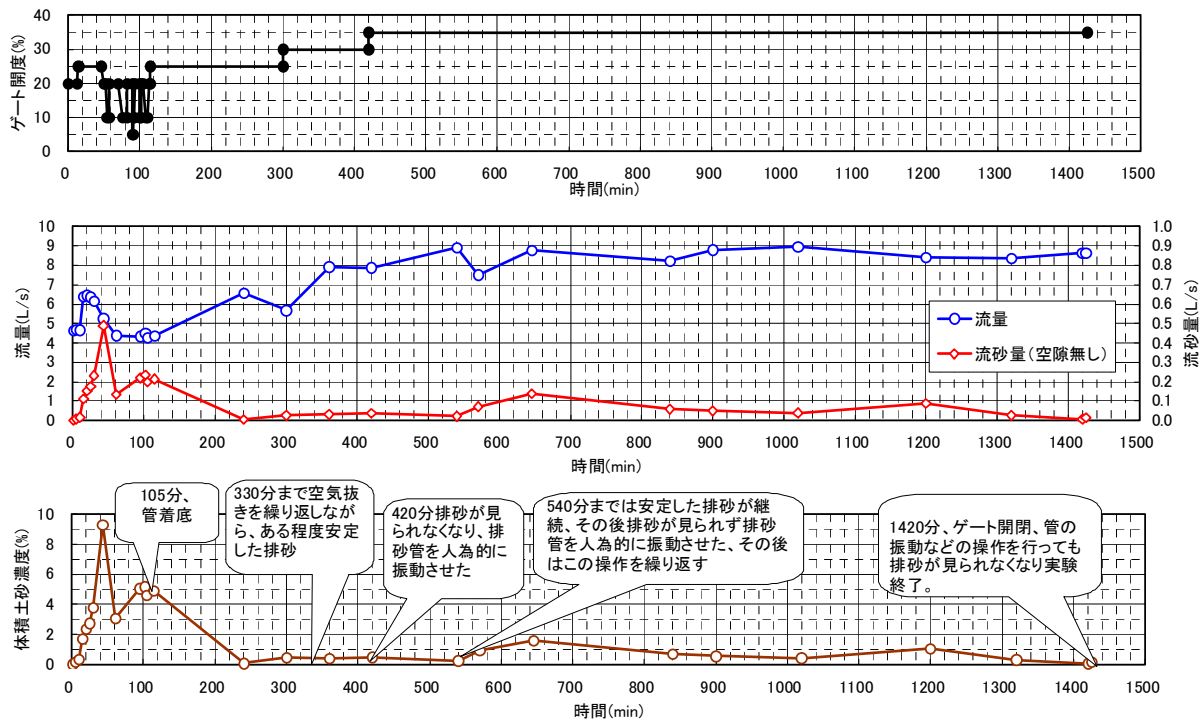


図-3.11 中規模模型排砂実験の結果（流量、流砂量、体積土砂濃度）



図-3.12 排砂後の堆砂状況（中規模実験）

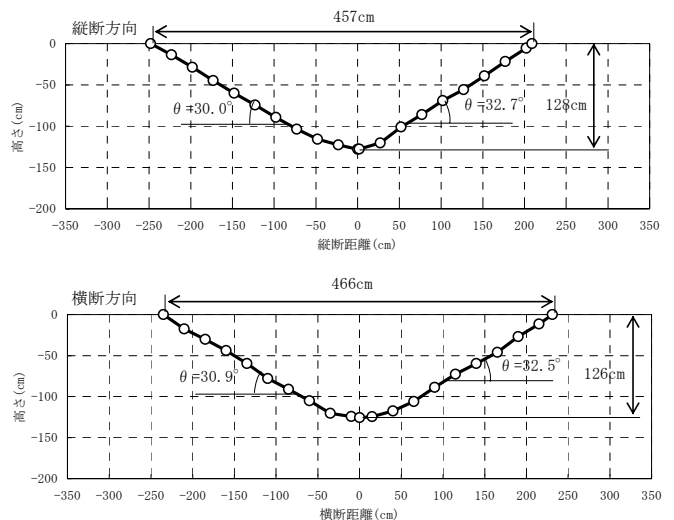


図-3.13 排砂後の河床形状（中規模実験）

験では、折返し部に付けた紐を用いて、管を上下に動かして振動を与えてみた。その結果、振動を与えた後、しばらく排砂が再開されたが、また土砂濃度が小さくなり、再度振動を与えるという作業を繰り返した。最終的には、振動を与えても、ほとんど土砂が出なくなり、1425 分後に実験を終了した。

図-3.12 に排砂後に水位を下げた状態の堆砂形状を、図-3.13 に排砂後の河床形状を示す。これより、排出後の形状は小規模実験と同様に、すり鉢状になっており、排砂量（空隙込み）は約 7.1m<sup>3</sup>であった。当

初の想定では、すり鉢の深さを 1.9m 程度と想定していたが、実験結果は 1.3m 弱であり、吸引部の上方に 0.6m 程度の土被りがあるにもかかわらず、土砂が吸引できなかった。当初想定した排砂後のすり鉢形状の容量は 21.6m<sup>3</sup>であり、実験結果は 33% 程度の排出であった。

中規模実験により、小規模実験では得られなかった新たな課題が確認された。

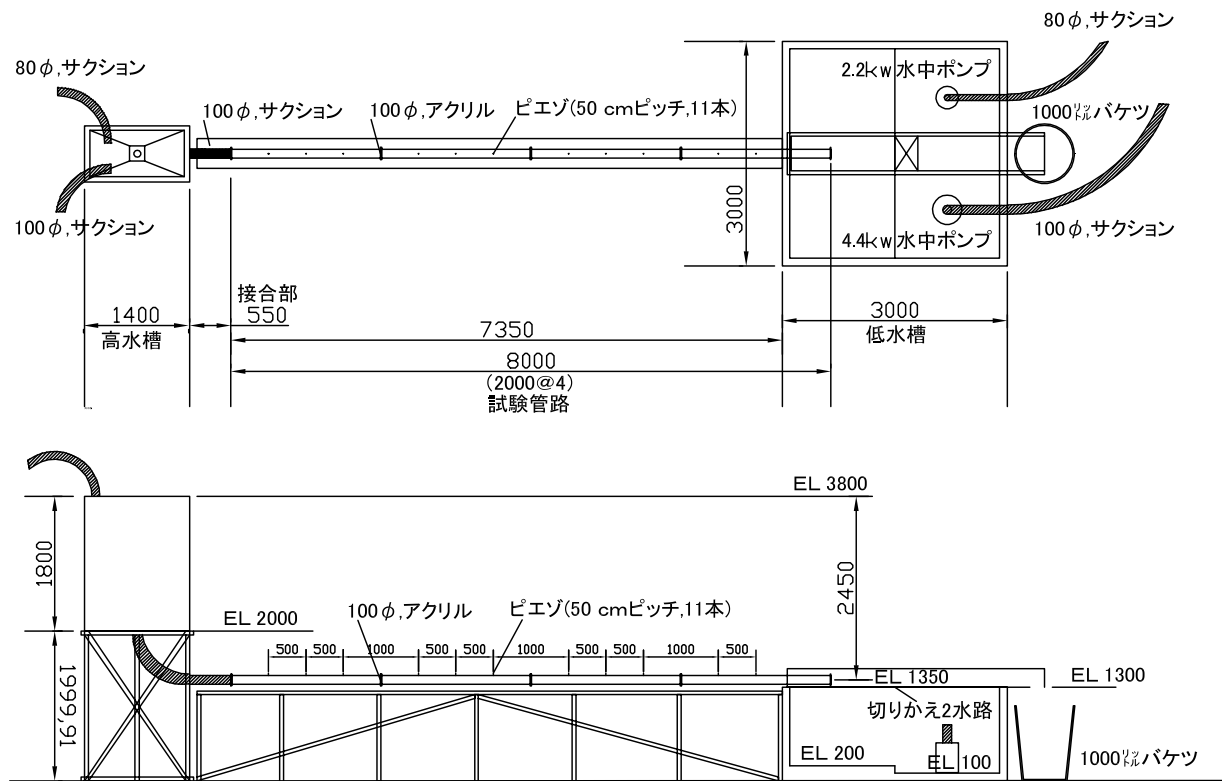


図-4.1 φ100 傾斜輸送管実験装置

単位(mm)

#### 4. 湖内輸送時に関する検討

##### 4.1 H21 年度実施内容

H20 年度には湖内輸送管設計に必要となる砂スラリーでの損失係数等について水理模型実験によって、管径の異なる水平輸送管の知見が得られた。H21 年度は、更なる損失係数の低下を考え、輸送管を傾斜させた場合の損失係数について知見を求めるために、損失係数の実験とこの湖内輸送管の動力に期待している逆転ポンプの水理機能についても水理実験を実施した

##### 4.2 実験方法

###### 4.2.1 傾斜輸送管の検討

実験では、砂スラリーでの流動特性を把握するために、砂の粒径 D50 (mm)、砂の体積濃度 C (%) 及び管内流速 Vw (m/s) の違いと圧力損失の関係について調査するとともに、管内流況を把握した。また、傾斜管における管径 d の損失係数等への影響を調査するために、d=0.03m, 0.10m, 0.20m の3種類の実験を実施した。図-4.1 に実験装置 (d=0.10m) を、表-4.1 に実験ケースを示す。実験は、濁水水槽で表-1 に示すケースの濁水を用いて、サンドポンプにより上流側水槽に送水して、循環させて行った。安定した状態になった後、

表-4.1 実験ケース

Case	管径(m)	C(%)	実験珪砂	D50(mm)	Vw(m/s)
a	0.03	0~0.34	4号	1.03	1~3
b		0~0.08	6号	0.348	1~3
c	0.1	0~0.70	4号	1.03	1~3
d		0~1.32	6号	0.348	1~3
e	0.2	0~0.20	4号	1.03	1~3
f		0~0.57	6号	0.348	1~3

ピエゾでの圧力を測定した。なお、圧力測定前後と途中の3回採水して、流量と土砂量を測定し、体積土砂濃度 C を算定した。各ケースとも、清水から実験を開始し、土砂を投入して土砂濃度を上げ、繰返し実施した。流速はバルブにより調節した。

###### 4.2.2 逆転ポンプの検討

湖内輸送の動力源として、利水放流の流れにポンプユニットの水車を設置してその水車の回転力を湖内輸送管に設置した水車に伝達するために水車同士を連結した逆転ポンプによるための基本的な水理機能について調査する。このため、図-4.2 に示すように陸上ポンプの水車部分を連結して利水放流を模した給水側水車にポンプにより給水して、この水車に連結した水車を回して湖内輸送側を水槽から水を排水するものである。実験は、ポンプにより水を給水して水車を回転さ

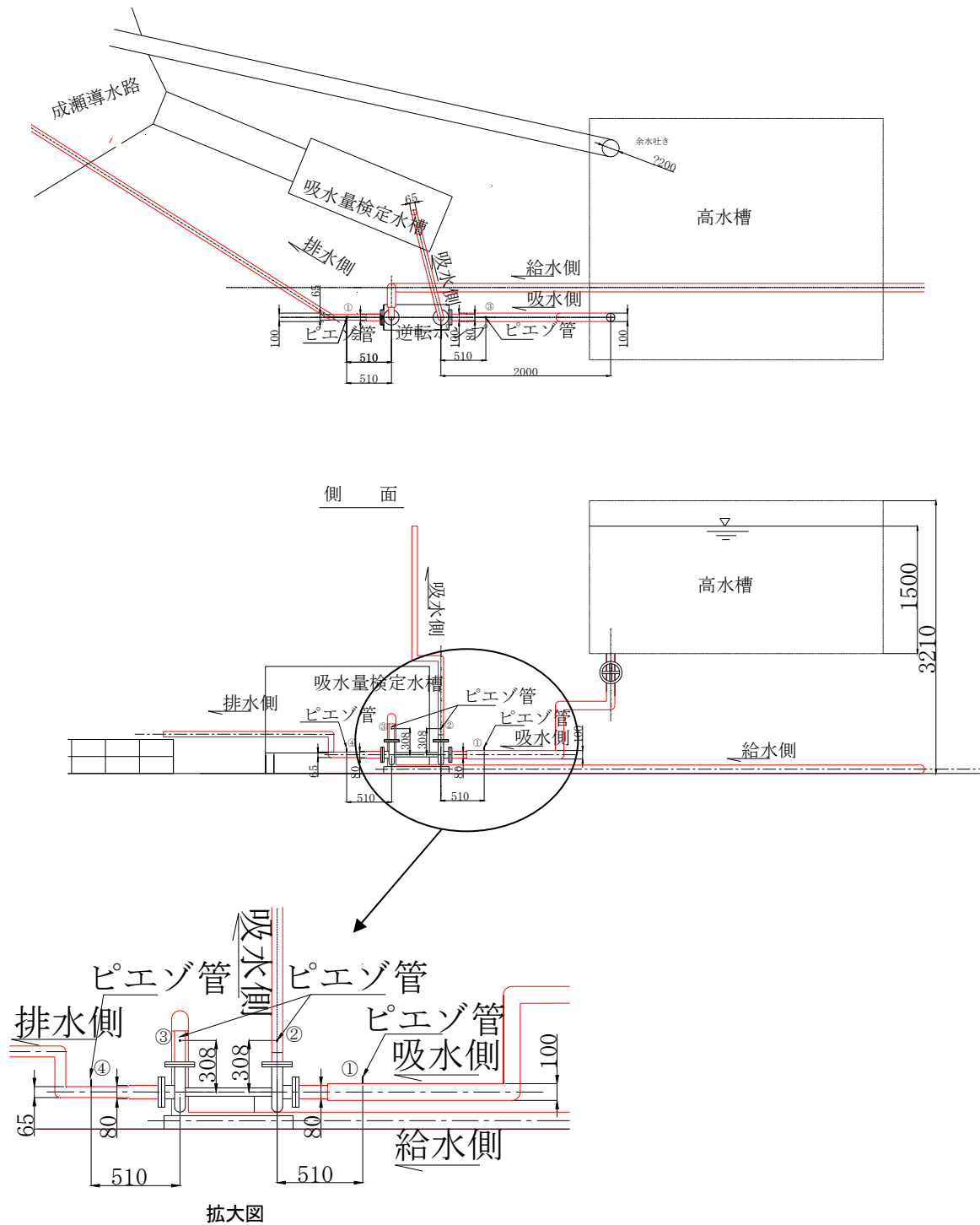


図-4.2 逆転ポンプ実験概要図

せ、連結した水車を回転させた場合に水槽より排水された流量と各水車の上下流の圧力を調査した。

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 傾斜輸送管の検討結果

##### ①管内流況

管内流況は、 $d=0.10\text{m}$  では写真-4.1 に示すように流況 A (土粒子が均一に動く)、流況 B (底層付近の土粒子の一部が周期的に停止する)、流況 C (明確な堆積層の上に土粒子が動いている) の 3 つが観測された。また、流況 C の条件は管内平均流速  $V_w$  よりも  $D_{50}$  から計算される沈降速度が大きくなる場合に観測されている。

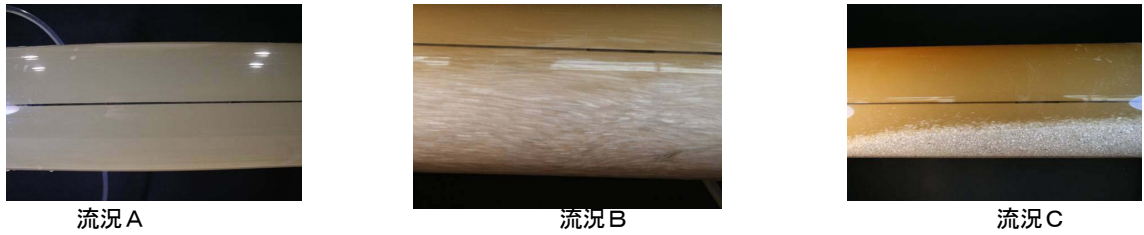


写真-4.1 管内流況

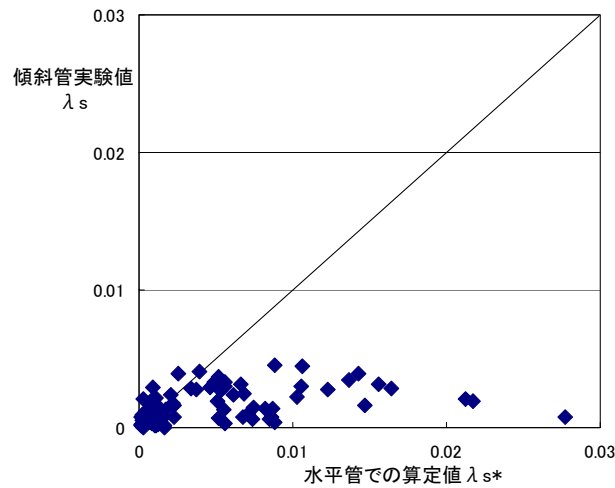


図-4.3 水平管との比較

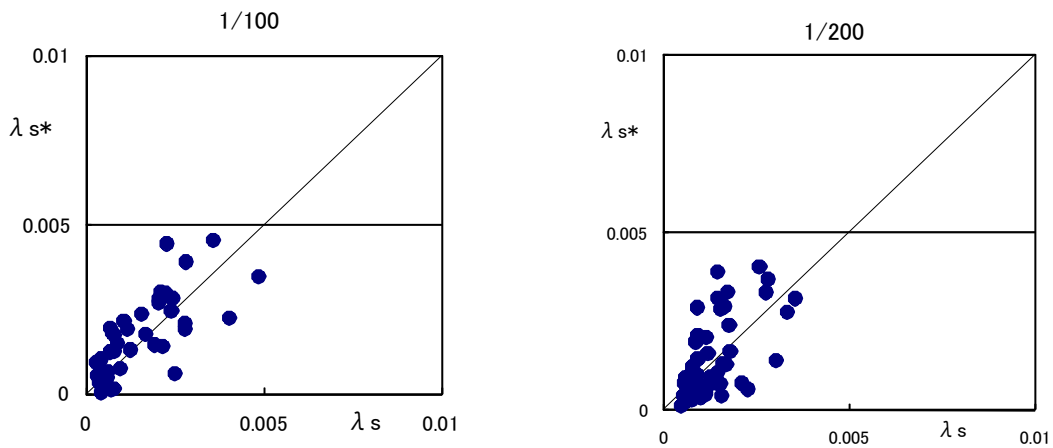


図-4.4 解析結果

また、管径が大きくなるに従って、土砂濃度が同じでも、流況 B、C の範囲が大きくなっている。以下では、流況 A となったケースについて整理した。

②損失係数

砂スラリーによる圧力損失  $\Delta P$  は①単一流体と考えた場合と②二相流とした場合が考えられているが、砂スラリーでよく用いられている次式に示す二相流について整理する。

$$\Delta P = \Delta P_w + \Delta P_s \tag{4.1}$$

$$\Delta P_w = \lambda_w \cdot V_w^2 / 2g \cdot (L/D) \gamma_w,$$

$$\Delta P_s = \lambda_s \cdot V^2 / 2g \cdot (L/d) \gamma_w$$

ここに、 $\Delta P_w$ : 水による圧力損失,  $\lambda_w$ : 水による損失係数,  $\Delta P_s$ : 砂による圧力損失,  $\lambda_s$ : 砂による損失係数,  $\lambda_1$ : 損失係数,  $V_w$ : 管内流速 (m/s),  $L$ : 管路長 (m),  $D$ : 管路径 (=0.03m),  $g$ : 重力加速度 (=9.8m/s<sup>2</sup>),  $\gamma_s$ : 砂の比重 (=2.6),  $C$ : 体積濃度 (%),  $\gamma_w$ : 水の比重 (=1)

給水流量 Qin(L/s)	吸出流量 Qout(L/s)	作用圧力				流量効率 Qout/Qin
		給水上流	給水下流	吸出上流	吸出下流	
5.1	4.36	1.32	0.53	1.90	1.70	85.6%
7.1	6.50	2.19	0.57	2.05	1.60	91.5%
10.1	9.70	4.19	0.67	2.41	1.37	96.1%
15.1	14.46	6.16	0.93	3.13	0.87	95.8%

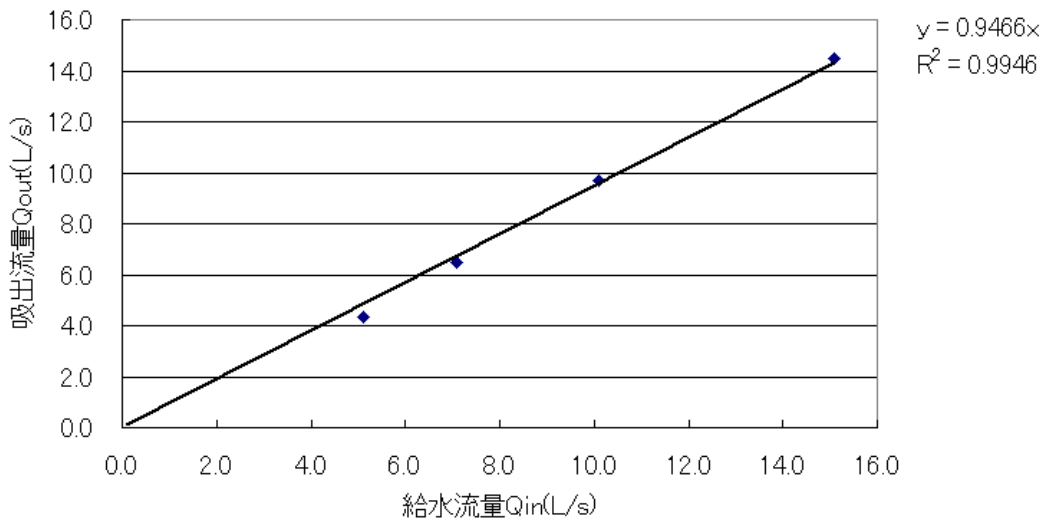


図-4.5 逆転ポンプ検討結果

また、水平管における砂による損失係数算定式<sup>4.1)</sup>は、式(4.2)で表される。

$$\lambda_{s*} = 10^{-1.844} \cdot C^{0.2644} \cdot Fr^{-0.3097} \cdot (D50/d)^{0.22222} \quad (4.2)$$

ここで、横軸に式(4.2)で得られた算定値 $\lambda_{s*}$ と傾斜管実験値 $\lambda_s$ の関係を図-4.3に示した。傾斜管での実験値は、水平管での算定値より、かなり小さめになっているのがわかる。

次に、各傾斜管毎に、砂による損失水頭 $\lambda_s$ を、無次元量 $Fr, C, (D50/d)$ を用いて、多変数解析結果を図-4.4に示す。また、その関係を(4.3)式に示す。

$$\begin{aligned} 1/100: \quad & \lambda_{s*} = 10^{-0.97} \cdot C^{0.29} \cdot Fr^{-1.73} \cdot (D50/d)^{0.52} \\ 1/200: \quad & \lambda_{s*} = 10^{-1.35} \cdot C^{0.094} \cdot Fr^{-0.99} \cdot (D50/d)^{0.54} \end{aligned} \quad (4.3)$$

ややばらつきは大きいですが、上式から各傾斜管毎の砂による損失係数 $\lambda_s$ の算定が可能となる。

#### 4.3.2 逆転ポンプの検討結果

連結した水車を回転させた場合に水槽より排水された流量と各水車の上下流の圧力を調査した。調査結果を表-4.2に示す。

給水流量が小さい領域では、流量効率は落ちるが、逆転ポンプでは、給水流量の約95%程度の能力が得られている。

今後は、逆転ポンプにおける土砂輸送時の状況実験を実施する。

### 5. まとめ

小渋ダムの下流置き土現地観測によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 昨年度までの三春ダムの観測（最大流量 $20\text{m}^3/\text{s}$ ）では、置土がほぼ天端まで浸かる状態の侵食の情報を得ていたが、小渋ダム下流の置土について、最大放流量 $45\text{m}^3/\text{s}$ で、最高水位が置土天端高の半分にも満たない条件で侵食される状況を捉えた。
- 2) 複数回の出水による侵食状況を把握し、同規模の出水では、初期の出水ほど侵食量が多いことを確認した。
- 3) 湾曲による置土侵食の定性的な特性についても知見が得られた。

今後は、これまでに得られた観測データを取りまとめて、侵食予測手法や置土計画手法の検討を実施していきたい。



潜行式吸引排砂管について、小規模模型と中規模模型を用いた実験によって得られた知見を以下に示す。

- 4) 小規模模型実験において、潜行式吸引排砂管によってほぼ想定通りの排砂が可能であることを確認した。
- 5) 小規模模型実験において、潜行式吸引排砂管が、吸引部の埋没（土砂濃度：小）、吸引部の土砂中の潜行（土砂濃度：大）、吸引部着底後（土砂濃度：中）といった排砂過程であることを確認した。
- 6) 小規模模型実験において、流量と土砂の粒径が排砂特性に与える影響を把握した。
- 7) 中規模模型実験において、吸引部の埋没、吸引部の土砂中の潜行から着底までの排砂が可能であることを確認した。
- 8) 中規模模型実験において、空気混入の問題、吸引部着底後の土砂吸引が不安定になることなどの新たな課題を把握した。

今後は、管軸に沿ったエネルギー損失等についての検討を行うとともに、新たに把握した課題を解決するための改良を行い、実用化に向けて鋭意研究を進めていきたい。

湖内輸送管設計に必要となる砂スラリーでの損失係数等について水理模型実験によって、管径の異なる傾斜輸送管の検討と湖内輸送の動力源ともなる逆転ポンプの水理実験を行った結果、得られた知見を以下に示す。

- 9) 水平輸送管と同様に傾斜輸送管でも、管径を大きくするにしたがって、管内流況は流況 A（土粒子が均一に動く）の領域が小さくなり、流況 C（明確な堆積層の上を土粒子が動く）領域が大きくなっている。
- 10) 実験範囲内での管内流況 A 領域での砂による損失水頭を管径、フルード数、砂の堆積濃度、砂の平均粒径と管径の比の無次元量との関係を確認した。
- 11) 逆転ポンプにおいて、休止流量が小さい場合を除いて、給水流量の 95% 程度の能力が得られている。

今後は、最適な輸送速度と管径と平均粒径の関係を調査し、湖内輸送管設計に資する損失係数の調査を実施するとともに、この湖内輸送を行うためのエネルギーとして考えている逆転ポンプの水理機能について土砂輸送時を含む詳細な調査をするつもりである。

## 謝辞

小渋ダムの置土観測データの一部については、国土交通省中部地方整備局天竜川ダム統合管理事務所から提供していただいた。ここに記して、謝意を表します。

## 参考文献

3. 1) 櫻井寿之, 柏井条介, 久保康夫: シートとパイプを用いた排砂装置, 土木技術資料, Vol. 48 No. 12, pp. 30-35, 2006.
3. 2) 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.
4. 1) 宮脇千晴, 箱石憲昭, 櫻井寿之: 「砂スラリー輸送管における管径と損失係数」、土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集、2009（投稿中）

## A STUDY ON THE SEDIMENT SUPPLY MEASURES FROM A RESERVOIR CONSIDERING CONTROL OF A SEDIMENT DISCHARGE AND GRAIN SIZES

**Abstract:** Recently, in order to conserve an environment of river bed and sediment transport downstream of the reservoir, a control of quality and quantity of sediment discharge from a reservoir is required. However, it is extremely difficult to control them accurately by the conventional measures such as sediment bypassing and flushing, because they are greatly affected by the operational conditions, situation of a sedimentation and inflow conditions. Then, this study aims to develop sediment supply measures that are able to control sediment discharge and grain sizes with high accuracy according to the outflow discharge.

In 2009, in order to understand the erosion phenomena of resettled sediment and to propose the prediction methods for erosion rate of it, field observation of resettled sediment erosion in downstream of Koshiyama dam was carried out. Sediment discharge characteristics of the burrowing type sediment removal suction pipe were investigated by physical model tests using a small size model and a medium size model. In addition, energy loss of inclined sediment transport pipe was examined by physical model tests. And a pump system using the differential water head energy was tested by simple physical model.

As a result, erosion phenomenon of resettled sediment during four small floods was observed. From the observed data, some erosion characteristics were understood. Small size model of the burrowing type sediment removal suction pipe could remove the sediment up to our expectations. However, medium size model of the sediment removal suction pipe could not remove sediment stably. We have to improve the suction pipe system in the future. The relationships between energy loss and parameters: pipe diameter, sediment particle size, sediment concentration and water velocity of inclined sediment transport pipe were understood. The basic water supply function of the pump system using the differential water head energy was also understood.

**Key words:** dam reservoir, countermeasures for sedimentation, sediment resettlement, burrowing type sediment removal suction pipe, sediment transport pipe in the reservoir