

矢作ダム排砂工法（水頭差を利用した吸引方式）の現地実験

国土交通省中部地方整備局 矢作ダム管理所
(株)建設技術研究所
(株)大林組 生産技術本部ダム技術部

梶田 達也 齊木 雅邦
村越 重紀 岩谷 栄林
正会員 ○北村 広志 宮入 斎

1. はじめに

一般にダムでは、100 年間に貯まると想定される土砂の量である堆砂容量を治水・利水容量とは別に確保しているが、矢作ダムを含む一部のダムでは、経過年数に対して、大洪水等に伴い計画を上回る早さの堆砂となっていることにより、治水・利水機能等への影響が懸念されている。このため、ダムの堆砂をより効率的で、安価に排砂できる技術の実用化が求められている。

国土交通省中部地方整備局では、矢作ダムの堆砂対策の一手法として「水頭差を利用した吸引工法」が検討され、その機能を確認するための現地実証実験を計画、民間企業等から広く新技術や工法を公募した。

この公募に対して、株式会社大林組は株式会社ダムドレと共同研究を進めている「移動式による吸引方式」により応募し、矢作ダム貯水池において、実機レベルのφ600mm大口径排砂管（延長L=47.0m）を使い、矢作ダム管理所と共同排砂実験を行った。

本報文は、現地実験および実験結果について報告するものである。

2. 矢作ダムの概要

矢作ダムは、矢作川の河口から約80kmに位置し、洪水調節、農業用水、工業用水、水道用水および発電を目的とする多目的ダムとして、昭和46年に建設された堤高100m、堤頂長323m、集水面積504.5km²、総貯水容量8,000万m³、計画堆砂容量1,500万m³のアーチ式コンクリートダムである。

矢作川流域の地質は傾家花崗岩類が大部分を占め、地表の花崗岩はマサ化し崩壊しやすい特徴を有している。貯水池内の全堆砂量は平成21年度時点で、計画堆積量1,500万m³に対する堆砂量の割合が約103%となった（図2）。

3. 排砂実験

3.1 実験の目的

国土交通省矢作ダム管理所では平成17年から、治水容量内の堆積土砂掘削による緊急対策を行う一方、将来にわたり、治水機能を維持するとともに、必要に応じ利水機能を回復、維持することを目的に排砂対策の検討を行ってきた。

このような中、堆砂対策の一手法として「水頭差を利用した吸引方式による排砂工法」について、矢作ダムへの適用性及び設備機能の確認と設計に必要な諸定数の推定を目的として現地実験を計画した。

キーワード：ダム、堆砂、水頭差、サイフォン、排砂、吸引工法

連絡先 〒108-8502 東京都港区南2-15-2 (株)大林組土木本部生産技術本部ダム技術部 TEL03-5769-1321



図1 矢作川流域図

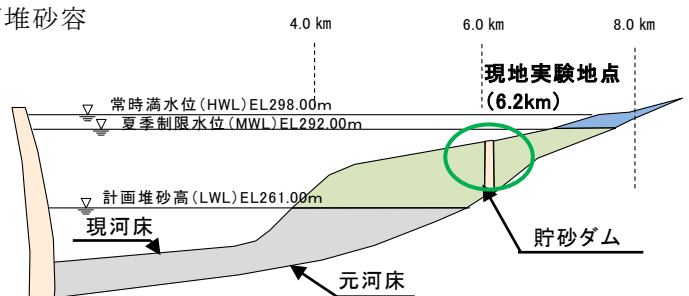


図2 矢作ダム貯水池縦断面図

3.2 移動式吸引方式による排砂工法

「水頭差を利用した吸引方式による排砂工法」は水位差を利用して、サイフォンの原理で水とともに吸引した土砂を、排砂管を通じて下流に排出するものであり、吸引部を予め貯水池に埋設する固定式と吸引箇所を移動する移動式がある。

この工法の利点は①動力に化石燃料等をほとんど使用しないことで運転コストが低い。②構造が簡単である。③排砂管内に流下を阻害するものがなく、ごみが詰まりにくい。などが挙げられる。これらの利点に加え、台船により任意の場所に移動できる施工の自由度や吸引部の上下移動による排砂能力の制御、補助掘削機による河床堆積物への対応能力など考慮して、実験には「移動式による吸引方式」で応募した。

3.3 実験位置

実験は、矢作ダム貯水池上流約6.2km地点の貯砂ダムにて実施した。実験位置を図3に示す。

3.4 実験期間

排砂実験は平成24年12月1日から平成25年1月10日の期間で実施した。また、実験用仮設備設置開始から撤去完了までの期間を過去の矢作ダムの貯水池運用実績から、河川内作業が可能な9月初旬から2月中旬に行った。

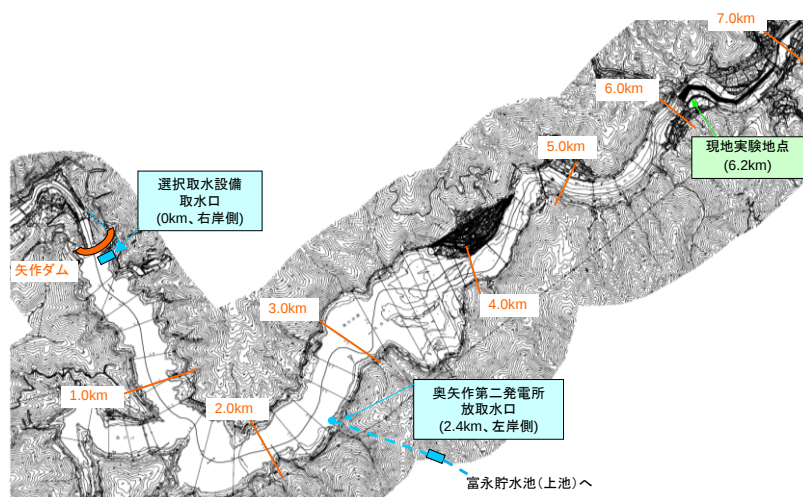


図3 実験位置図

3.5 実験施設

施設平面図を図4に、排砂管縦断図を図5に示す。また、実験施設を写真1～3に示す。

実験施設は、既設の貯砂ダムを利用して水頭差4.5mを設けた。また、矢作川出水時に対応するため、半川締切（河川の左岸側に実験施設を配置、右岸側を河川流下）で設置した。

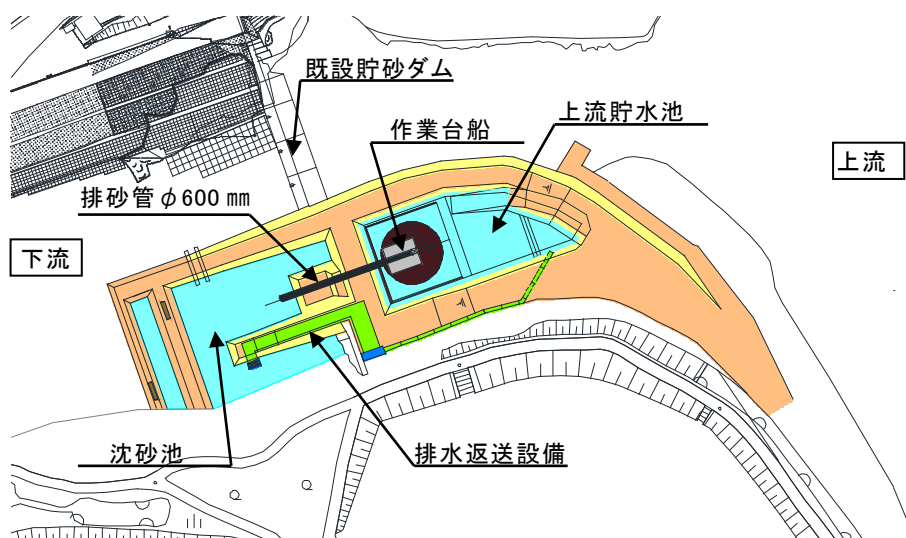


図4 実験施設平面図

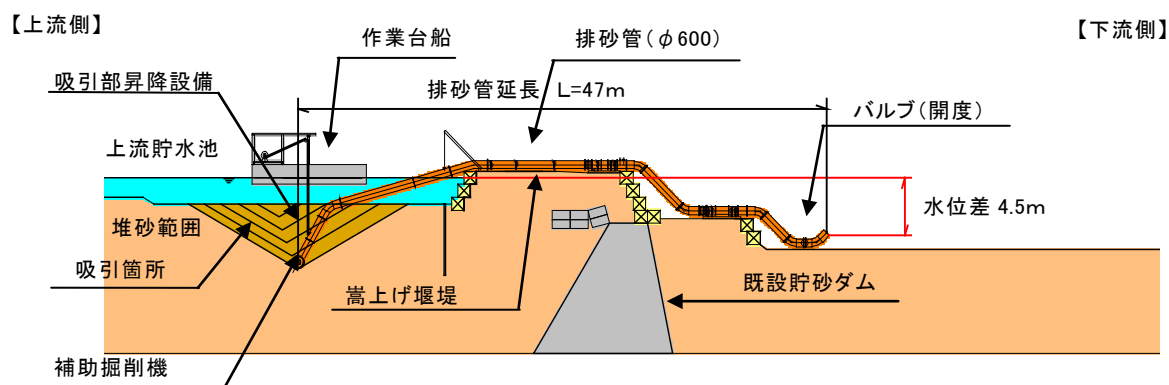


図5 排砂管縦断図



写真 1 実験施設全景



写真 2 台船部



写真 3 排砂管部

3.6 実験計画

(1) 実験ケース

実験は対象土砂、バルブ開度(管内流速)、補助掘削機の有無や吸引操作(オペレーション)に着目し、表1の5ケース計画した。

なお、ケース①では現況の河床堆積土砂を吸引し、ケース②～⑤では採取土砂に入れ替えて実施することとした。

表 1 実験ケース一覧表

実験ケース	吸引対象土砂	バルブ開度	実験目的
ケース①	現況河床堆積土砂	100%	・現況河床堆積土砂を吸引した時の吸引特性調査 ・補助掘削機の有無による影響確認
ケース②	採取土砂	100%	・採取土砂を吸引した時の吸引特性調査 ・補助掘削機の有無による影響確認
ケース③	採取土砂	100%	・オペレーションによる最適排砂濃度の確認 ・排砂濃度の違いによる吸引特性調査
ケース④	採取土砂	50,75,100%	・管内流速を変化させたときの吸引特性調査
ケース⑤	採取土砂(塵芥混入)	100%	・塵芥を混入させたときの吸引特性調査

(2) 実験土砂の粒度分布

排砂実験に使用した実験ケースごとの土砂粒度を図6に示す。現況河床堆積土砂のD50粒径は3mm程度、採取土砂のD50粒径は 1.9mm(ケース②～⑤の合成値)程度であり、採取土砂と比べ現況河床堆積土砂の方がやや大きい。

※粒度分布の整理にあたっては、混合比が小さく粒度分布に影響を与える 20cm 以上の礫は除外している。

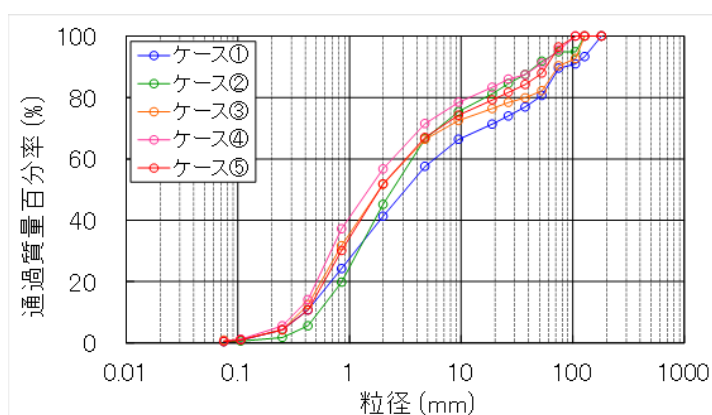


図 6 実験土砂粒度

吸引特性の把握及びオペレーション情報の収集を目的として、表2の計測計器を設置した。図7に観測計器配置図を示す。

また、管内排砂状況観測のため、アクリル管を2箇所配置し、目視観測した。

表 2 計測計器

計測目的	計測内容	計測機器	設置 個数
土砂濃度の把握	管内密度	γ線密度計	1
管内損失の把握	管内圧力	圧力計	8
	管内流量	超音波流量計	1
オペレーション情報の把握	吸引部位置 (排砂管角度)	圧力式水位計	1
		深度計	1
	補助掘削機圧力	油圧計	1
	補助掘削機回転数	回転計	1

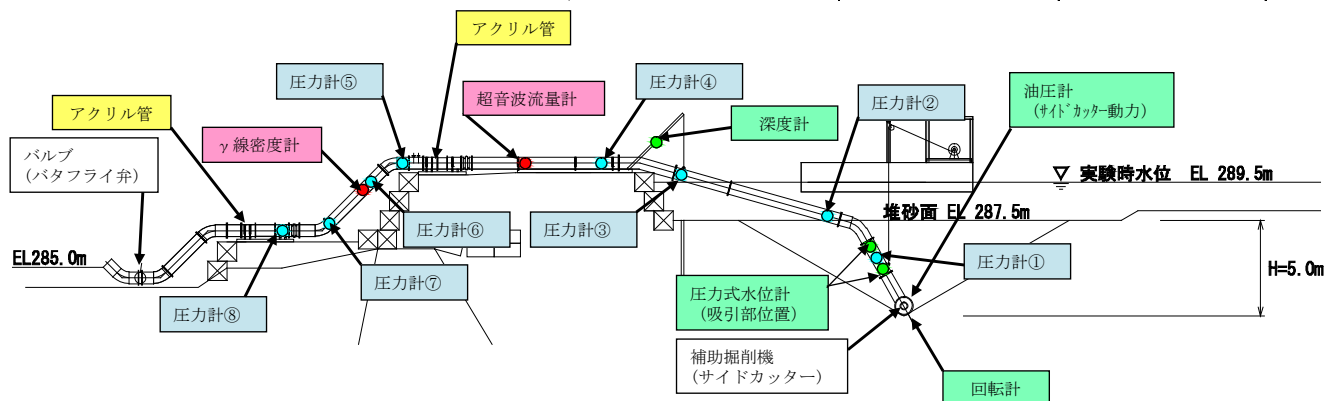


図 7 計測計器配置図

なお、管内密度の計測には γ 線密度計を選定したが、管径が $\phi 600\text{mm}$ であるのに対し、 γ 線密度計の計測可能な管径が最大 $\phi 400\text{mm}$ であったことから、 γ 線密度計を図8に示す位置に設置し、管底部と管側面部の2箇所ですべて計測してその平均値を用いることとした。また、管内の土砂が管底部に堆積することで生じる計測誤差を低減するよう、排砂管傾斜部に設置した。

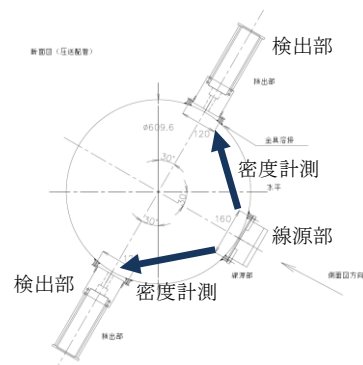


図 8 γ 線密度計設置断面図

4. 実験結果

4.1 排砂狀況

排砂は各ケースとも土砂の違いや塵芥の有無に関係なく吸引できた。

(1) 土砂の排砂

■沈砂池に排出された礫

いずれの実験ケースにおいても、排出された土砂は、排砂管直下から沈砂池末端にかけて分級されており、排砂管直下に最大30cm程度、概ね10～20cm程度の礫が認められた（写真4）。



写真 4 沈砂池に排出された礫の状況(ケース②)

■貯水池に残された礫

ケース①の現況河床堆積土砂の排砂では、掘削深度1.4m付近に1m程度の礫が多数確認された（写真5）。

また、ケース②、③では排砂面底部に10～40cm程度の礫が認められた（写真6）。ケース④、⑤では礫の残留はなかった。



写真 5 貯水池に残された礫(ケース①)



写真 6 排砂面底部に残された礫(ケース②)

(2) 沈木による吸引阻害の影響

河川に堆積する土砂には、さまざまな塵芥が混入する。その代表的なものは流木などが水中に沈んだ沈木である。今回の実験では、矢作ダム貯水池上流4.0km付近で調査した結果から、人為的に実験土砂に混入させる塵芥の種類や規模を設定した（写真7）。

塵芥（沈木）は図9に示す位置に投入し、排砂実験での吸引阻害の影響を調べた。

ケース⑤の試験では塵芥（沈木）による吸引阻害の影響はなく、長さ1m程度の沈木は問題なく排出できた（写真8）。



写真 7 投入した塵芥(沈木)

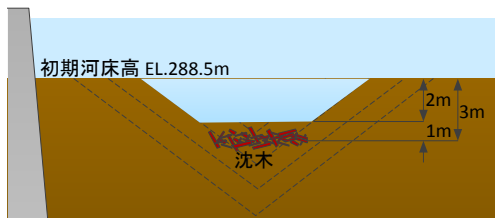


図 9 沈木投入位置



写真 8 排出された沈木

(3) 排砂面形状

実験後の排砂面形状を図10に示す。排砂形状はほぼ形の整った円錐形状を呈した（写真9）。

掘削斜面の勾配はケース①（現況河床堆積土砂）の場合で21.0～33.8°（平均26.0°）、ケース②で32.0～43.6°（平均36.2°）であった。

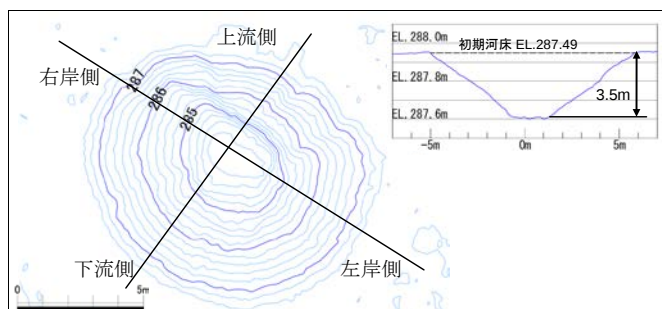


図 10 排砂面形状(ケース②)

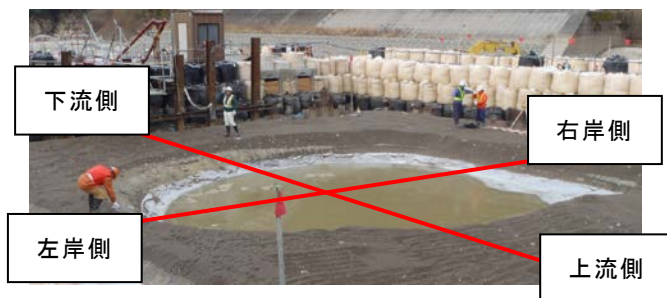


写真 9 排砂面状況(貯水池の水を抜いて撮影)

4.2 オペレーションによる影響

(1)オペレーション機構

排砂管径がφ600mmと今までに実績がなく、また、管径に対して水頭差が比較的小さいことから、大口径管の管内堆砂の制御が必要となる。また、現地の堆積土砂を吸引することから、粘性土や沈木、落ち葉、玉石などの障害物が存在しても排砂作業が行えるよう、以下の機構を実験設備に装備した（写真10）。

- ① 吸引部を台船に乗せ、任意の場所に移動できる。
- ② 吸引部を上下移動できる。
- ③ 吸引口先端に補助掘削機を取り付ける。
- ④ 補助掘削機のカッター回転数を制御できるとともに逆回転機能を設ける。

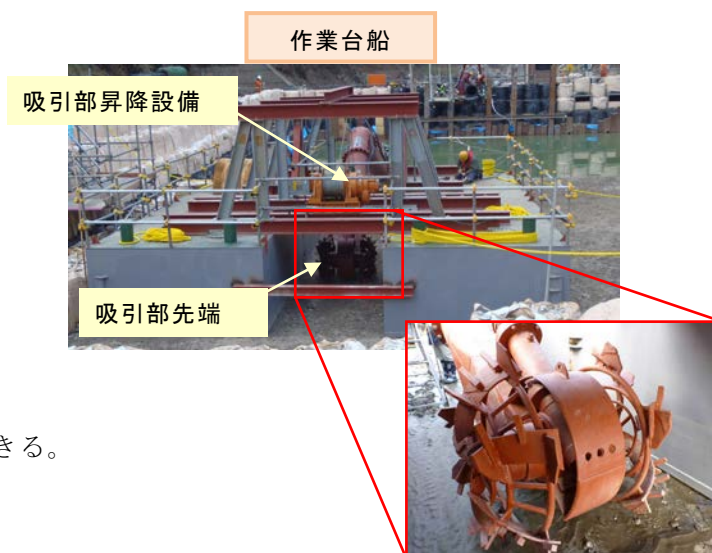


写真 10 台船設備と補助掘削機

(2)吸引部引上げ(管内フラッシュ)操作

土砂濃度の上昇により管内堆砂が発生し、管内流速の低下によりさらに堆砂が進行する状態となった時、吸引部を引上げ、清水を吸引して管内堆砂を流し去る操作（以降、管内フラッシュ操作と表現）を行った（図11、表3）。

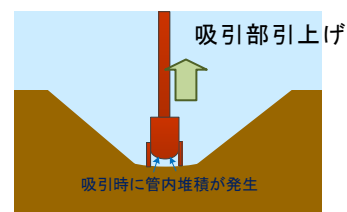
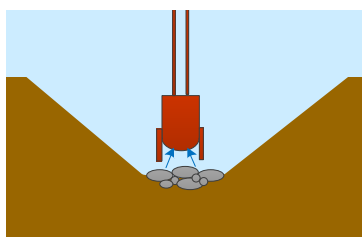


図 11 管内フラッシュ操作

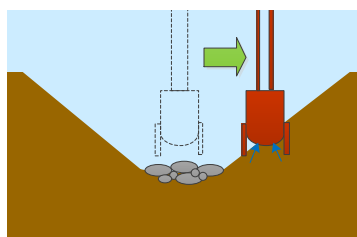
(3)吸引部移動操作

礫の集積による土砂濃度の低下や障害物による吸引部の下げ止まりが発生した場合、吸引部を引上げ、吸引地点を移動する操作を行った（図12、表4）。

①礫集積による土砂濃度低下・吸引部下げ止まり



②吸引部引上げ、吸引地点変更



③吸引再開

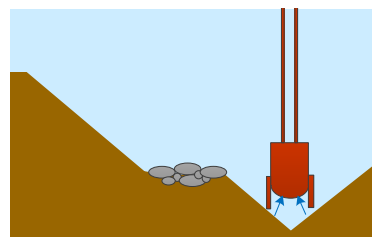


図 12 吸引部移動操作概念図

表 3 吸引部引上げ操作実績

実験ケース	吸引対象土砂	バルブ開度 (%)	吸引部引上げ実績		
			所要時間(s)	回数	1回当たり所要時間(s)
ケース①	現況河床堆積土砂	100	0	0	0
ケース②	採取土砂	100	153	1	153
ケース③-1	採取土砂	100	1,745	4	436
ケース③-2	採取土砂	100	1,024	8	128
ケース④-1	採取土砂	50,75	2,546	11	231
ケース④-2	採取土砂	100	2,714	9	302
ケース⑤	採取土砂(塵芥混入)	100	3,183	16	199

表 4 吸引部移動操作実績

実験ケース	吸引対象土砂	バルブ開度 (%)	吸引部移動実績		
			所要時間(s)	回数	1回当たり所要時間(s)
ケース①	現況河床堆積土砂	100	976	4	244
ケース②	採取土砂	100	571	5	114
ケース③-1	採取土砂	100	276	1	276
ケース③-2	採取土砂	100	589	4	147
ケース④-1	採取土砂	50,75	0	0	0
ケース④-2	採取土砂	100	404	2	202
ケース⑤	採取土砂(塵芥混入)	100	276	3	92

（注）上表の結果はケースごとの回数および時間を記録したものであるが、各ケースの試験目的に準じて実験内容を変えて実施しているため、実験設備の平均的な作業能力を表すものではない。

4.3 吸引特性の把握

(1) 平均土砂濃度

各ケースの管内平均土砂濃度と最大土砂濃度を表5に示す。

ここで、表における全平均は補助掘削機を使用し、吸引部を着底した状態のデータを使用している。

吸引開始から管内フラッシュ操作（管内に堆積した土砂を、吸引部を引き上げることで流下させる行為）するまでの期間（パターンA）と排砂

面底部に礫が集中して吸引効率が低下し、吸引位置を変更する前の期間（パターンB）にわけてそれぞれの平均土砂濃度を整理した（図13）。バルブ開度100%、通常の排砂作業で極力管内堆砂が発生しないよう操作した場合（ケース②、パターンA）の平均土砂濃度は2.7%を記録した（表5参照）。

表 5 実験ケース別管内平均土砂濃度と最大土砂濃度

実験ケース	バルブ開度 (%)	平均土砂濃度 (%) (補助動力稼働時)			最大土砂濃度 (%)	備考
		全平均	パターンA	パターンB		
ケース①	100	0.412	-	0.412	3.943	礫による吸引阻害が顕著
ケース②	100	1.295	2.728	0.578	6.923	バルブ開度100%、排砂作業モデルケース
ケース③-1	100	1.205	1.963	0.598	14.441	土砂濃度管理を目的としたオペレーション
ケース③-2	100	0.408	0.890	0.219	5.675	
ケース④-1	50	0.338	0.338	-	3.328	管内流速を変化させた場合の吸引特性
	75	0.574	0.574	-	2.033	
ケース④-2	100	1.260	1.560	0.732	8.618	
ケース⑤	100	1.517	2.025	0.249	12.308	管内堆砂発生を許容する操作を含む

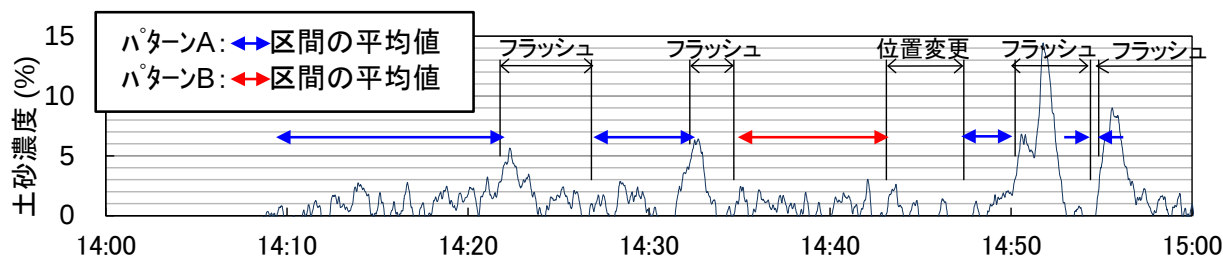


図 13 土砂濃度の推移

(2) 平均土砂濃度と管内流速

実験時の平均土砂濃度と管内流速の関係を図14に示す。バルブの開度調整により管内流速を変化させ、パターンAの状態と比較した。なお、清水時の管内流速はバルブ開度100%で4.04m/s、75%で3.03m/s、50%で2.10m/sであった。

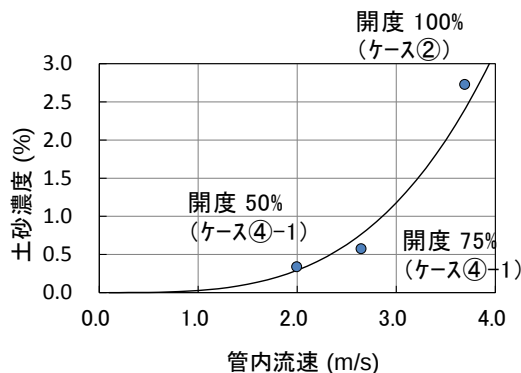


図 14 平均土砂濃度と管内流速の関係

(3) 管内堆砂開始土砂濃度

管内流速と管内に土砂が堆積し始めた時の土砂濃度の関係を図15に示す。実験値はDurandの式より算出した計算値とほぼ一致した。

■ 堆積開始流速の算出

$$V_L = F_L \sqrt{2gD(S_s - 1)} \quad \cdots \text{Durand の式}$$

V_L : 堆積開始流速 (m/s)

F_L : 限界堆積流速の無次元表示

D : 管径 (m)

S_s : スラリー中の固体と液体の密度比 (2.56)

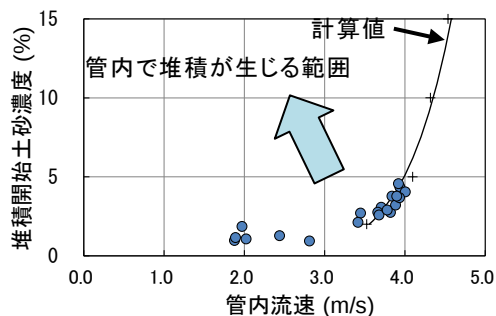
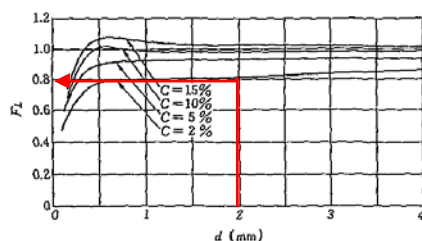


図 15 堆積開始土砂濃度と管内流速の関係

4.4 補助掘削機の影響

補助掘削機を使用した場合としない場合について、土砂濃度と管内流速の関係を図16に示す。

土砂濃度は管内流速の増加に伴い、どちらも上昇するが、補助掘削機を作動させた方が上昇の度合いが大きい。

また、ある程度掘削が進捗し、円錐形の排砂面が形成された方が、掘削開始時点の状態よりも土砂濃度の上昇が認められた。

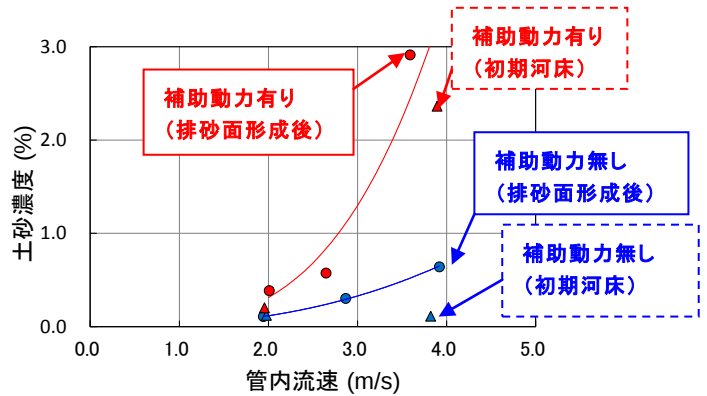


図 16 補助掘削機の有無による土砂濃度の変化

4.5 管内閉塞実験

サイフォン原理では水位差による位置エネルギーが土砂を吸引する力（一定の力）となるため、管内堆砂が一度発生すると、管内流速が低下し、ますます堆砂が進む。

通常は吸引作業を継続するため、管内フラッシュや吸引部移動などのオペレーションを行うが、この操作を行わなかった場合、管内の堆砂がどのようなになるか調査した。

結果、写真11のとおり、管断面の80～90%に堆砂したが、完全に閉塞することはなかった。しかし、排砂能力はなく少量の排水が認められた状態となった（写真12）。この際、サイフォン機能は維持された状態であり、吸引部を引上げ、清水を吸引すると徐々に管内流速が増加し、やがて内部の土砂を流し去ることができた。



写真 11 管内堆砂状況



写真 12 吐口排水状況

5. おわりに

今回の矢作ダム貯水池での実験において、実機規模のφ600mm排砂管を用い、水位差4.5mの条件で得られた結果は、当初、想定した能力とほとんど相違なく、実際の堆積土砂の吸引が可能であることが実証できた。また、各種吸引条件を変化させた時の吸引特性や補助掘削機や吸引操作の有用性も確認できた。

しかし、今後「水頭差を利用した吸引方式による排砂工法」を実用化していくためには、解決すべき課題もある。効率よく排砂できる管内流速と土砂濃度の設定、任意の土砂濃度で吸引できる機械操作の検討、オペレーションに反映できる土砂濃度の測定方法の開発など、今後、検討、技術開発していく必要がある。

さらに、実際のダム排砂施設として適用するためには、個々のダムの堆砂状態や排砂に係る諸条件に配慮した排砂システムの検討が必要である。すなわち、ダムの構造や貯水池の条件から、水位差をどのように確保するか、下流に排砂した土砂の利用方法など、運用に向けた事前の課題解決が不可欠である。

今回実験した「移動式による吸引工法」は、洪水時に使用するには設備能力が小さいことは否めない。しかし、河川維持流量を利用し、日常的に、定常的に、かつ、長期間に渡って排砂することで、化石燃料を使用しないことによる少ない運転コスト、構造が簡単であることなどから、結果として大量の土砂を安価に排砂することができる工法であると考えられる。

参考文献

- 1) 渡邊 守、田島 健：ダムにおける堆砂対策の現状と課題、水産工学、第46巻第2号
- 2) 国土交通省中部地方整備局矢作ダム管理所ホームページ<http://www.cbr.mlit.go.jp/yahagi/>