

水質を汚濁させない高揚程浚渫工法の開発

ダム取水口近傍で発電を止めることなく堆砂除去

(株)フジタ 土木本部 土木エンジニアリングセンター 機械部 ○稲見 悠太
服部 哲也
(株)河本組 河本 和雄

1. はじめに

ダム湖の水質を汚濁させずに水深 20 m 以上、陸上揚程 10m 以上の堆砂除去が可能な浚渫工法を開発した。本工法では、強力な真空発生装置と攪拌高濃度ポンプを併用することで湖底を乱さずに高揚程での連続的な堆砂除去を実現した。水質汚濁を発生させないという特長から、従来のダム浚渫工法とは異なり、ダムの発電運転を停止させることなく、取水口近傍で連続的に堆砂除去が可能である。また、河川の渇水期に限らず施工が可能のため、要求工期への適応性が高いなどの点で有用な工法である。これまでに 4 箇所での実証試験を通しその有効性を確認した。(写真-1)



写真-1 ダム湖における試験施工

2. 開発背景

ダム堤体の寿命は、適切な設計、施工管理および維持管理がなされていれば半永久的ともいえるが、ダムとしての機能を維持するには、堆砂への対応が重要である。会計検査院の平成 26 年度の調査によると、堆砂により、本来の治水機能を発揮できない恐れのあるダムが全国で 100 カ所以上ある¹⁾。(下線は引用) (図-1)。上記の会計検査の調査の対象外の国交省系以外のダムでも堆砂が利水利用の障害となっており、発電取水などの利水を止めずに取水口(取水設備)周辺の堆砂を除去する技術が望まれてきた。このようなニーズに対応するために水質汚濁を生じさせずに深い水深で適用できる

本工法を開発した。

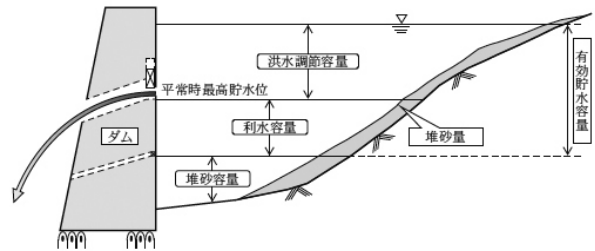


図-1 貯水池等の概念図¹⁾

3. 工法概要

3.1 工法の特長

本工法は、真空吸引による気流搬送と高濃度攪拌ポンプによるスラリー移送を併用し、ダム湖底の堆砂を回収するものである。一般的に真空吸引のみによる水の最大限界揚程は 10m である。これは、トリチェリの実験により知られている標準大気圧 (1013.25 hPa \approx 10.33 tf/m²) にバランスする水柱高が約 10m に相当するからであるが本工法では、真空経路の途中に独自開発の中継ポンプユニットを接続することでこの限界を超えた 20m 以上の高揚程を実現した。また、オーガで掘削した堆砂を真空吸引することで、掘削により生じた濁りを拡散させずに水質汚濁が発生しない堆砂除去も実現している(図-2)。

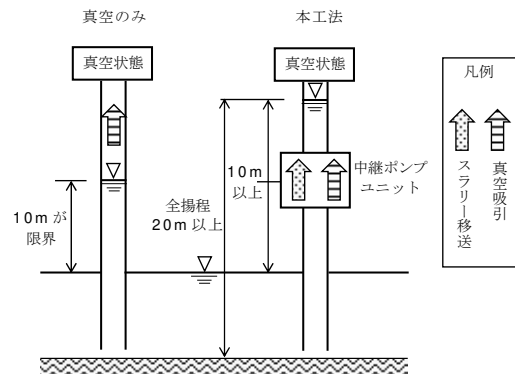


図-2 工法概要のイメージ

3.1 本工法の設備構成

本工法の設備は、ダム湖上設備と陸上設備からなり、図-3に設備の構成図を示す。堆砂は、これらの設備により、以下の4段階のフローにより除去される。①オーガ付吸引機により湖底を掘削し、②真空発生装置で生み出された真空吸引力によってダム湖内へ拡散することなく吸引する。吸引された堆砂物は第1中継ポンプユニットへと気流搬送される。③堆砂物は、第2中継ポンプユニットを中継スラリー移送と真空による気流搬送によって搬送され、陸上で回収される。④連続泥土回収タンクにより、真空吸引を中断させることなく堆砂物を回収し、陸上処理設備へ送る

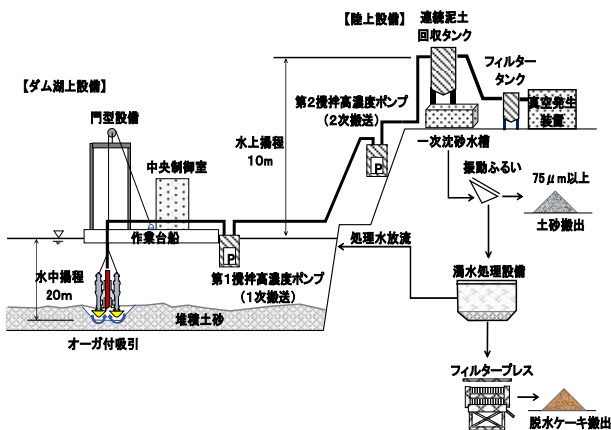


図-3 システム概要図

3.2 施工フロー

施工フロー図を図-4に示す。水上設備では堆砂の掘削と真空吸引およびスラリー移送が行われる。堆砂を吸引するオーガ付吸引機は、ダム湖に浮かぶ台船上に設置した門型設備から吊り下げられ、ウインチ操作によって昇降する。先ず、オーガ付吸引機を堆積土中へ50cm程度貫入させ、真空吸引しながらオーガを回転させて掘削する。次に、吸引された堆砂物は中継ポンプユニットを介して、湖面上に浮かべた搬送管を通り陸上の連続泥土回収タンクへ移送される。真空吸引とスラリー移送のバランス調整の役割を担う第1中継ポンプユニットは台船脇の水中に配置し、第2中継ポンプユニットは、陸上設備側に配置することで円滑な堆砂物搬送を行う。また、掘削箇所を移動する際には、台船からダム湖岸へ四方に張られたワイヤーをウインチで巻き取ることで台船を移動させる。以上の操作は台船上の中央制御室で行う。

陸上設備では真空の発生と回収した堆砂物の処理を行う。先ず、堆砂物は、連続泥土回収タンクへ送られ内部の2重構造により、輸送配管の真空は保ちながらも、大気圧下の一次沈砂水槽に集積される。次に、集積された堆砂物は振動ふるい(75µ

m)により細粒分と粗粒分に分級され、細粒分は、濁水処理設備(シックナー)で沈降処理した後、フィルタープレスによって脱水ケーキとなる。一方、粗粒分は仮置きした後にダンプトラックで搬出する。

また、堆砂物の処理設備は施工条件により上記と異なる方式も選択可能である。ダム湖岸に十分な用地を確保できる条件下では、沈砂池を造成して、自然沈降させた堆砂物を曝気・乾燥する方法も実証済みである。

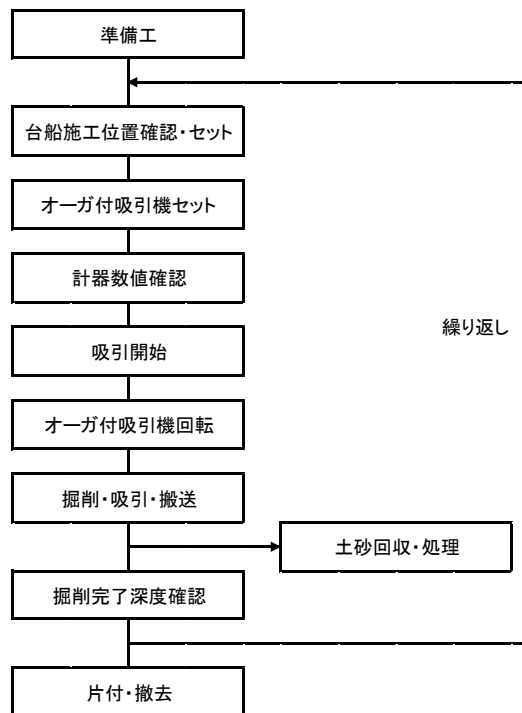


図-4 施工フロー図

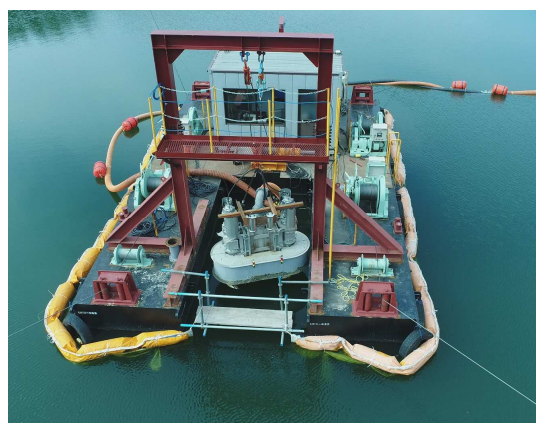


写真-2 作業台船全景

3.3 施工支援システム

中央制御室ではGNSSを活用したICT施工支援システムの採用により、施工の見える化と集中管理を行っている。事前に実施したダム湖のナロ

一マルチビーム測量により作成した、3次元地形(ヒートマップ形式で表示)上に台船の現在位置を表示させるので、台船の現在位置だけでなく湖底の地形も同時に直感的に判断できるようになっている。なお、台船の測位に用いるGNSSには、VRS(ネットワーク型RTK-GPSサービス)を利用することで精度向上を図っている。また、オーガ付吸引機の水中姿勢は、傾斜計やウインチのロードセル(荷重計)等の各種センサの数値及び水中カメラの映像を基に判断できる。さらに、船底にエコー測定器を設置することでリアルタイムに水深や湖底の起伏を把握することもできる。これらの情報を基に掘削を行い、施工データには掘削深度、台船座標、掘削ポイント座標、当日のダム水位等が記録されて、日々水位が変化する湖上においても、掘削した地点の正確な深さが施工中でも把握可能である。これらの正確な現況データを活用してベンチカット方式により一定の掘削深度を保って連続的に掘削できるなど、合理的な施工が可能である。施工支援システム各種モニタを写真-3に示す。

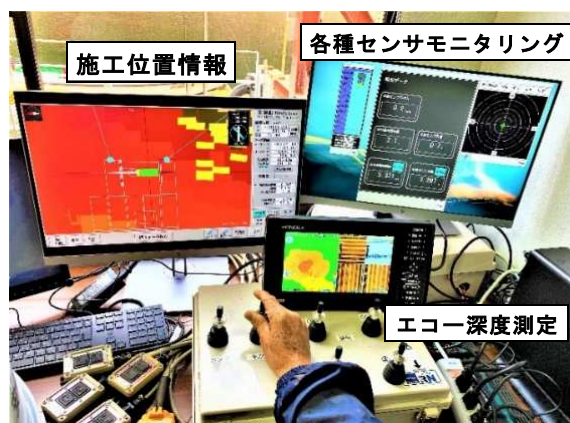


写真-3 ICT 施工支援システム各種モニタ

4. 開発の過程

本工法の技術開発は、2015年度より調査に着手し、考案した搬送方式の比較検証のために基礎実験を繰り返し実施した。工法設備の開発後は、能力検証を目的とし陸上実験を実施し、ダム湖上における現場実証試験により各設備の連携動作や施工能力を確認しつつ改良を重ねた。次に、開発の過程を述べる。

4.1 基礎実験(陸上試験)

考案した搬送方式の比較検証を目的として基礎実験を2016年度に行った。陸上に水と砂礫を溜めたタンクを設置し、盛土を行いその上に真空吸引管を設置することでダム湖を再現した。実験当初は吸引力のみで10m毎に区切ってピストン搬送するバキューム搬送方式を試行したが十分な搬送能

力を得られなかった。また、吸引部筒先にエアを強制注入し気泡とともに搬送するエアレーション方式や端部を大気へ開放し大風量の気流に乗せて搬送するエアリフト方式を試行した。これらの方式では筒先の形状や真空発生装置の出力増強や増設、搬送管径など様々な条件での試験を行ったが筒先の閉塞や吸引力不足により十分な成果を得ることはできなかった(図-5)。

初期搬送方法案に対する試験結果を踏まえ、真空発生装置による気流搬送と高濃度攪拌ポンプを搭載した中継ポンプユニットによるスラリー移送を併用するハイブリッド方式を提案した。2017年度から2018年度にかけて高濃度攪拌ポンプを内蔵した中継ポンプユニットと、閉塞防止と効率的な湖底の掘削のために吸引部筒先に高トルクオーガ2基を搭載したオーガ付吸引機の開発を行った(写真-4)。そして、2019年度の陸上試験では、真空限界を超えた揚程22mでの吸引において実用的な施工能力を確認した。

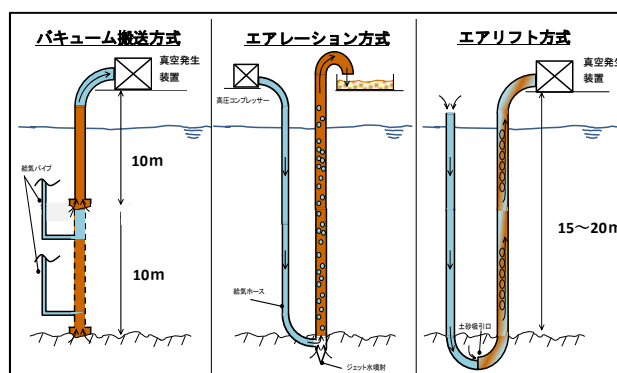


図-5 初期搬送システム案



写真-4 オーガ付吸引機と中継ポンプユニット

4.2 現場実証試験

陸上試験を経て2019年度から2021年度にかけて4箇所(ダム)において現場実証試験を行った。表-1にその一覧表を示す。ダム湖上に作業台船を浮べ施工設備を配置し、機械性能と工法確立のた

めのような検証を実施した。

表-1 現場実証試験一覧

ダム名称	Aダム	Bダム
事業主体	広島県	国土交通省中国地方整備局
場所	広島県広島市	広島県安芸高田市
試験期間	2020. 1~2	2020. 5~6
成果	全体機器の有効性検証 	作業能力の検証 
		
ダム名称	Cダム	Dダム
事業主体	電力系ダム	電力系ダム
場所	-	-
試験期間	2020. 11~12	2022. 1~2
成果	作業能力の改善 	実際の施工を想定した試験施工 
		

(1) Aダムにおける試験

実際のダム湖での技術検証と各機械設備の能力検証を目的として、2019年度にAダム(広島県管理)で実証試験を行った。真空発生装置とオーガ付吸引機、その他機械の一連の動作と施工能力が確認され、水質汚濁を発生させずに施工できると水深13.2mからの堆砂物回収ができることを確認した。含泥率は8.7%と高い値は得られなかったが、潜水士による事前の湖底堆積土砂層の調査(図-6)と施工により陸上で回収した土砂の比較から吸引物に対する堆積土砂と水の割合である含泥率と堆砂の性状との関係性などが把握できた。

また、問題点としてオーガ付吸引機の湖底への着地判断が難しいことが判明した。オーガ付吸引機の着地は、ソナーで把握した深度に対して、門型設備ウインチのロードセルの数値で判断したが、ウインチを操作すると一時的に大きな張力が掛かり、ロードセルの数値が激しく変動して着地判断と姿勢制御が困難であった。さらに、木根や枝などの固形物を吸引すると、配管内で閉塞を起こし、閉塞解除に時間を要することや真空発生装置が陸上にあることで台船上の中央制御室と連携が取りにくいことがわかった。土砂回収に伴う真空と堆砂の分離時においても、単体の回収タンクでは、分離時に一時的に真空状態を解除しなければならないので、2~3分毎の分離時に吸引の中断が生じるので掘削・吸引の連続性が著しく低く、さらに、吸引の中断が土砂の拡散に繋がり濁りの原因となるこ

ともわかった。

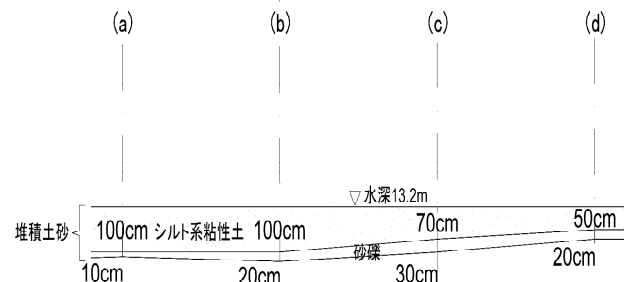


図-6 湖底堆積土砂層の調査結果

(2) Bダムにおける試験

大水深施工と土砂処理設備以外の施工設備を台船上へ設置する編成での施工検証を目的として、2020年度にBダム(国土交通省中国地方整備局管理)で実証試験を行った。前回からの改良により、①台船上への真空発生装置設置による施工性の向上、②オーガ吸引機への傾斜計設置による水中姿勢の可視化、③攪拌高濃度ポンプの大型化による移送力の向上、④ICT 施工支援システムの強化による中央管理室での一元管理の確立、⑤連続泥土回収タンクの採用による掘削・吸引の連続性向上を図った。連続泥土回収タンクは、接続された2基のタンク内部で複数の弁を電子的に制御し、2基のタンクが交互に堆砂物の排出を行うことにより、搬送配管側の真空環境を大気へ開放されることなく、堆砂物を分離できるため、吸引力を途切れさせることなく連続運転が可能になった。

試験の結果としては、水深19.1mからの堆砂物回収が確認できた。湖底堆積土砂は砂礫分が少なくシルト分が多かった為、濁りの拡散が懸念されたが、掘削で生じた濁りは拡散することなく吸引されたので水質汚濁は生じなかった。一方、問題点として、掘削・吸引の連続性が向上したことで濁水処理設備の能力が追い付かなくなったこと、連続泥土回収タンクの容量が足りないことなどが新たに判明した。

(3) Cダムにおける試験

施工連続性と新規設備の能力の検証として、2020年度にCダム(電力系)で実証試験を行った。更なる改良点は、①設置用の揚重機械や運搬機械の小型化のための真空発生装置の分割②連続泥土回収タンクの容量の大型化(0.6 m³×2基→5.0 m³×2基)による施工能力の向上(写真-6)であった。また、ダム湖の湖岸に広い仮設ヤードを確保出来たため、容量400 m³の沈砂池を2池造成し(写真-7)、連続施工で排出される多量の排泥の処理に対応できるようにしたことで1日を通しての施工サイクルが確保できた。



写真-6 大型連続泥土回収タンク

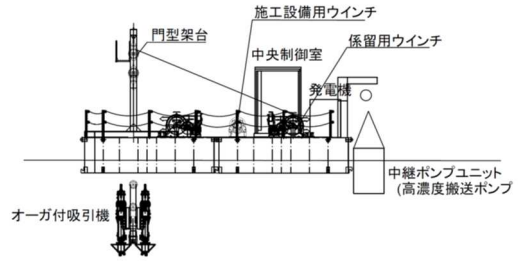


写真-7 湖岸沈砂池

(4) Dダムにおける試験

2021年度にDダム（電力系）で試験施工を行った。同ダムでは、取水口近くの堆砂除去が課題となっていたが、従来のバックホウ浚渫では対象箇所へのアクセス方法や浚渫時の濁りによる発電への影響が問題になっていた。そこで、その様な条件に適する本工法で試験施工を行うことになった。堤体直上流での施工なので、台船が接触して堤体ゲート設備等を損傷するのを避けるため台船上設備の大半を陸上に設置し、台船を従来から大幅に小型化（水上占有面積：220 m²⇒74 m²）し、取水設備近傍からの施工を可能とした（図-7）。また、陸上設備も従来はダム湖岸に設置していたが、今回は十分な広さが確保できなかったためにダム湖面から10m程高い場所に位置する市道1車線を一部分占有し、陸上ヤードとした（写真-8）。試験では、まず、ダム取水口から15m離れた位置で施工し水質汚濁が生じないことを確認した。次にダム取水口近傍の5mまで近づけて施工を行ったが、同様に施工により発電を止めることなく堆砂除去が可能であると実証できた。さらに、水上・陸上設備のコンパクト化を図れたことで、柔軟な施工計画が可能となり、様々な施工条件でも施工が可能な高い適用性が確認できた。

側面図



平面図

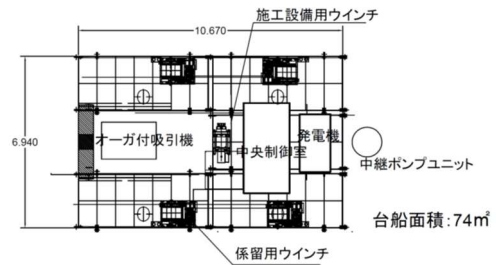


図-7 二級ダム作業台船図



写真-8 陸上ヤード 砂回収状況

5. 実証試験の成果と考察

5.1 実験データ

一連の実証試験により得られた実績データを表-2に示す。AダムとBダムでは、泥土回収タンクの問題から連続施工ができず、施工時間も総施工量も伸びなかったが、Cダムでは、大型の連続泥土回収タンクの開発と沈砂池を設けた土砂処理により処理能力、施工量が大幅に向上した。Dダムでは、現場条件から採用した機械式の土砂処理に制約され、施工能力は頭打ちになった。

一方で、施工能力は、一概に施工設備の能力により決まるではなく、堆砂の粒度分布、粘土分、シルト分、砂礫分の割合の影響も大きいことがわかった。含泥率のばらつきについても同様である。また、回収土砂量を増やすため、回収効率を示す含泥率を上げるという方法も検討したが、これは水の吸引量を減らすことになり、掘削・吸引の連続性及び濁りを含む泥水の拡散につながるため、現時点では採用しなかった。

表-2 各ダムで確認された実験データ

施工場所	Aダム	Bダム	Cダム	Dダム
総施工時間	35分	6時間55分	20時間45分	20時間5分
施工水深	13.2m	19.1m	6.3m	5.0m
水上揚程	5.0m	6.0m	8.0m	10.5m
施工方法	壺掘り	壺掘り	ベンチカット	ベンチカット
土砂処理方法	機械式 (50 t)	機械式 (100 t)	沈砂池 (400m ³ ×2)	機械式 (120 t)
総施工量	104m ³	784m ³	2164m ³	1746m ³
日換算施工量	549m ³ (※)	678m ³ (※)	626m ³	522m ³
回収土砂量	9m ³	63m ³	154m ³	126m ³
日当たり施工量	48m ³	54m ³	45m ³	38m ³
含泥率	8.7%	8.0%	8.1~32.4%	7.2~26.4%
濁り発生	なし	なし	なし	なし

※能力からの理論値

5.2 施工能力

実験データから整理した施工能力を表-3 に示す。各ダムにおける実証試験の結果を分析し、本工法の能力としてまとめたものである。施工水深の下限は、台船を水上に浮かべるために必要な喫水として 2m とした。施工能力は、日当たりの施工時間 6 時間として、除去した土砂分と水を合わせた体積数量で表現している。このうち 10~30% が土砂分である。浚渫土量は、掘削形状の実績値から算出しているがばらつきがあった。このばらつきは、堆砂の状況や設備条件によるものと考えられる。最大粒径は、中継ポンプユニットに内蔵した高濃度攪拌ポンプの仕様によるものである。

表-3 施工能力まとめ

施工水深 (m)	施工能力 (m ³ /日)	含泥率 (%)	浚渫土量 (m ³ /日)	最大粒径 (mm)
2~30	625	10~30	50~100	40

5.3 濁度の変化

ダム湖における浚渫作業において、作業時に発生する水質汚濁による河川環境や発電設備への影響には、十分な配慮が必要である。従来工法で用いられるポンプ浚渫船やグラブ浚渫船では、少なくとも 300 mg/l 程度以上の濁度が発生すると言われている。本工法による施工中における濁度変化の一例を図-8 に示す。測定は浸漬型の濁度計をオーガ付吸引機の直上 2m の位置に設置して行った。施工前の 8.8 mg/l を基準として最大で +4.8 mg/l (13.6 mg/l) であったことから施工中においても濁度に大きな変化はなく、ダム湖を濁さずに施工できていることがわかった。オーガ掘削機に取り付けた水中カメラ映像では、施工開始 10 分を経過した時点でも水中をクリアに映し、湖底の状況をはっきりと視認出来た。また、取水口近傍での測定も行ったが同様の結果だった。

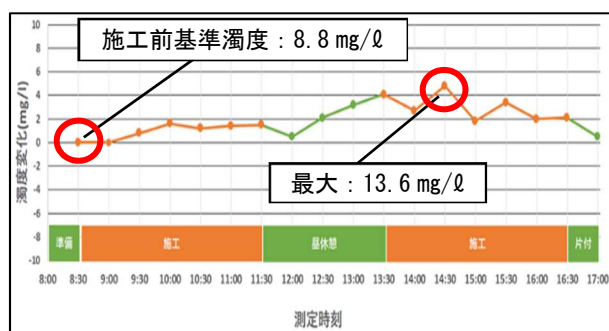


図-8 施工中における濁度の変化

6. 工法適用範囲の想定

本工法は、貯水池内に水質汚濁を拡散させないこと、水深 20m までの堆砂除去が可能であることという特長を有することから、以下のような場面での適用が考えられる。

- ・ダムのリニューアル工事で必要な局所的条件下
- ・堆砂で埋まった取水設備などの機能改善・回復
- ・貯水池の濁りが受け入れられない環境
- ・施工のための水位制限が困難な環境
- ・発電用水、農業用水等の利水取水をしながらの堆砂除去
- ・アオコ発生要因や重金属などが含まれた堆砂を貯水池に拡散させずに除去・回収

7. おわりに

本工法は、真空発生装置による気流搬送と高濃度攪拌ポンプによるスラリー移送を併用したハイブリッドシステムを採用したことで、高揚程が必要な取水口近傍において連続的堆砂除去が可能であること。また、掘削した堆砂は、発生した濁り水ごと吸引するので、濁水が拡散せず発電等の取水を止めずに堆砂除去が可能であることが従来工法には見られなかった特長である。これにより、近年、必要性が増しているダム堆砂の浚渫作業に新たな選択肢を提供することができたと考える。ただし、現状では、含泥率が、シルト質、砂質の割合などの堆砂の土質性状に影響されているので、土質性状のよらず安定的に含泥率を向上させていくことが課題ととらえている。本工法が、全国の多くのダム堆砂問題解決に役立ち、今後、ますます重要性が増す既設ダムの再生、長寿命化の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 会計検査院：平成 26 年度決算検査報告(10)ダムの維持について