

ダム堆砂分別吸引アタッチメントの開発

大成建設(株) 正会員 ○新井 博之
正会員 佐野 和幸

1. 概要

ダムにおける堆砂対策は、貯水容量を長期に亘って確保し、ダムの長寿命化を図るための重要な課題である。これまで筆者らは、(国研) 土木研究所と大成建設(株)で行う「吸引工法によるダムからの土砂供給(排砂)技術に関する共同研究(2016年～2020年)」に参画し、土木研究所が研究開発するダム上下流水位差による自然エネルギーを活用した土砂管理技術である潜行吸引式排砂管(以下排砂管)を用いた土砂供給技術の実用化に向けた検討を行ってきた¹⁾。共同研究の概要を図-1に示す。そして自然堆砂中から沈木・巨石・塵芥等の異物を取り除き、排砂管で排砂可能な粒径に分別した土砂のみを集積して一時ストックする前処理技術の開発を進め、簡単・コンパクトな機械装置で効率的な前処理作業が行え、汎用バックホウに装着できるダム堆砂分別吸引アタッチメント「T-A Dredger®」を開発した。

2. 開発経緯と要件

(1) 開発経緯

貯水池内の自然堆砂中に存在する沈木・巨礫・塵芥等の吸引困難な異物は、大成建設(株)が保有するシャフト式水中作業機 T-iROBO UW®等の活用による水中施工技術によって前処理作業が可能である。T-iROBO UW の概要を図-2に示す。汎用型バックホウがベースとなっているため、用途に応じて水中作業機のアタッチメントを交換することで様々な作業に適用できる利点がある。各種アタッチメントによるダム堆砂内異物処理作業のイメージを図-3に示す。なお図中のツインヘッド型沈木切削アタッチメントは、本共同研究で新たに開発



図-1 吸引工法による土砂供給(排砂)技術に関する共同研究概要

キーワード：ダム貯水池、堆砂、潜行吸引式排砂管、水中施工技術、T-iROBO UW、ポンプ浸漬

連絡先：〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル 大成建設(株) 土木技術部 ダム技術室 TEL03-5381-5282

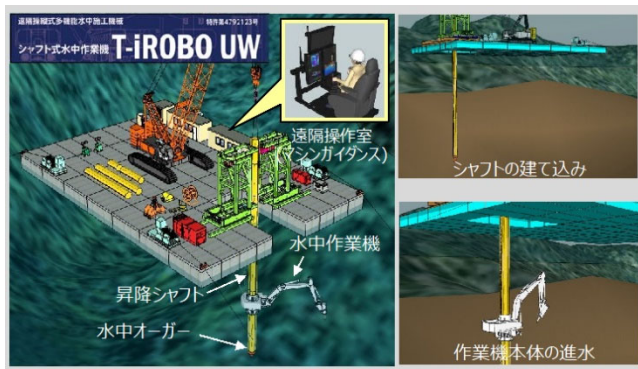


図-2 T-iROBO UW の概要



図-3 各種アタッチメントによる作業イメージ

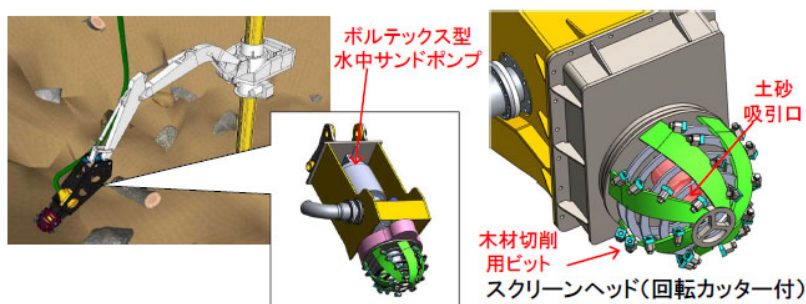


図-4 プロトタイプモデルの構造

表-1 プロトタイプモデルの機械仕様

ポンプ出力	26 kW
電圧	220 V
周波数	60 Hz
吸引・吐出口径	150 mm (6 インチ)
最大揚物径	100 mm (スクリーン対角)
揚程	17 m
流量	2 m ³ /min (最大 3.7 m ³ /min)
定格回転数	10～60 rpm (可変)
定格出力トルク	2620 Nm
重量	約 1,600 kg

したアタッチメントである²⁾。このように堆砂中の比較的大規模な異物は、アタッチメントを使用して分別作業を行うことで除去可能となるが、排砂管の実用化には吸引排砂可能な土砂粒径にさらに分別する必要があった。このため、水中の自然堆砂を直接分別吸引して湖内輸送できるポンプ浚渫タイプのアタッチメントを新たに開発することになった。

(2) 開発要件と手順

新たなアタッチメントの開発では、土砂粒径を分別できるスクリーン機構を有した上で、T-iROBO UW で適用可能な水深 50m からでも浚渫揚砂可能なポンプ性能を有しかつ水中作業機に搭載可能な重量 (2.5t 以内) に収めることが開発要件となり、難易度が高い。このため、まず小型サイズのプロトタイプモデルで設計と試作を行い、現場実験等により仕様・構造・性能を確認するとともに機械仕様や構造面での課題を抽出する。そして実装モデルでの改良設計と改良アタッチメントの製作及び性能試験を行い、課題の改善状況と実用ベースの作業能力を確認し、実ダムにおける実証試験で検証する開発手順とした。

3. プロトタイプモデルによる検討

(1) 構造検討・試作

プロトタイプモデルでは、堆砂をほぐしながら吸引できるスクリーンヘッドによって最大径を 100 mm に選別できる条件とし、アタッチメントに搭載するポンプは汎用リース品である口径 150 mm (6 インチ)、出力 26kW、吐出量 2.0m³/分のボルテックス型水中サンドポンプを選定し、アタッチメントの目標能力を吸引土砂濃度 10%、浚渫能力 30m³/h に設定した。プロトタイプモデルの構造を図-4、機械仕様を表-1 に示す。アタッチメントの吸引部先端のスクリーンは回転式とし、スクリーンメッシュで礫と木材等の長尺物を選別する。またスクリーンドラム表面に取り付けたツインヘッド型沈木切削アタッチメントに使用したビットを回転カッターとし、吸引中に沈木等に当たっても切削により土砂吸引に支障がないようにした。

(2) 現場実験の概要

試作したプロトタイプモデルにおけるスクリーンの有効性及び連続運転による土砂濃度（体積濃度）を確認するため、長野県片桐ダム貯水池内の堆積土砂をポンプ吸引して上流沈砂池まで輸送（輸送距離 100m，実揚程 2m）する現場実験を行った（図-5）。なおこの実験では、水中作業機の代用機として、水深 3m 程度までの水際作業可能な水陸両用バックホウを使用した（図-6）。また土木研究所が水理実験で用いている流量・土砂濃度計測装置³⁾を使用し、リアルタイムに管内の流量と圧力，土砂濃度の計測監視を行った。



図-5 プロトタイプモデル現場実験概要



図-6 水陸両用バックホウ



揚砂土の粒度分布		
粒径(mm)	区分	%
19.0<Φ<75.0	粗礫	11.9
4.25<Φ<19.0	中礫	31.6
2.0<Φ<4.25	細礫	24.8
Φ<2.0	砂分	31.7

図-7 揚砂土の粒度状況



(砂分沈殿)



(粗礫噛み込み)

図-8 配管閉塞状況

(3) プロトタイプモデルの現場実験結果と課題

浚渫前の貯水池水際の堆砂粒度は、表層部では粒径 5 mm 以下の砂分が 80% 以上で比較的細かい材料であったが、深部や表層が洗われた部分では 20 mm 以上の粗礫材が 40% 程度あり、最大粒径も 150 mm 程度であった。一方、沈砂池に揚砂した土砂の粒度は、ポンプ先端のスクリーンにより概ね 75 mm 以上の礫と木材を除去しながら高濃を分別度の土砂吸引できることを確認し、スクリーンの有効性を確認できた。揚砂土の粒度状況を図-7 に示す。また実験では配管閉塞をしないよう流速が管理流速 3.0m/s（限界沈殿流速 $V=2.63\text{m/s}$ ）を下回った場合、清水を吸って流速を維持させるようアーム操作をオペレータが実施していたため、土砂濃度が安定しない時間が多かったものの、良好な連続運転時では土砂濃度 10% 程度、浚渫能力 $25\text{m}^3/\text{h}$ 程度（プロトタイプモデル目標性能の 80%）を確認できた。

しかし、揚砂時の土砂濃度急増による流速低下による配管閉塞や粗礫（75 mm 程度）の噛み込みによる配管閉塞が数回発生し（図-8）、①吸引粒径と配管径のバランス，②流速低下に対するポンプ能力，③揚砂時の土砂濃度管理が課題として抽出された。

4. 改良アタッチメントの検討

(1) 改良検討

プロトタイプモデルの現場実験における課題を踏まえて改良点を検討し、実装モデルでは以下の 4 項目について機械仕様の変更および構造改良を行った。

a) スクリーン開口幅とポンプ口径の見直し（粗礫噛み込み閉塞の防止）

ポンプおよび配管口径 150 mm（6 インチ）に対してスクリーン開口幅が 100 mm としていたことが、粗礫の噛み込みによる閉塞の原因と考えられたため、ポンプ口径を 200 mm（8 インチ）に拡大し、スクリーン開口幅は 60 mm に縮小変更した。

b) ポンプ能力の増強（砂分沈殿閉塞の防止）

揚砂時の土砂濃度増加に伴う配管抵抗増によって管内流速が低下し、限界沈殿流速を下回ると配管閉塞を起こす。このためポンプ出力を増強して流速低下要因を減らすこととし、口径 200 mm，出力 55kW，吐出量 6.0m³/分の水中攪乱型サンドポンプ（変更前：出力 26kw，吐出量 2.0m³/分）に機械仕様を変更した。

c) 清水供給機構の追加（土砂濃度の抑制）

実験では土砂濃度の急増による配管閉塞を完全に排除できない問題があった。これを解決するため、揚砂時の配管が閉塞しないよう常に清水を一定量供給できる構造として、二重管式吸引管を考案した（図-9）。これにより、上部から取り込んだ清水を外管と内管の間から吸引先吸引バランスを調整する機能として、高濃度土砂水の吸引口となる先端開口度を可変できる構造にした。

d) 回転式スクリーンへの切削チップ設置（土砂濃度の制御）

実験ではオペレータから水中の土砂吸引状況が見えないことから、高濃度土砂水の吸引過多による配管閉塞が危惧されたため、オペレータが流量と土砂濃度を確認しながらアームを上下させて土砂吸引量を抑えていた。このため土砂濃度が安定しないこと、浚渫効率が低下することに課題があった。これを解決するため、回転式スクリーンドラムに取り付けていた沈木切削ビットをすくい角のある切削チップに変更（図-10）し、堆砂を切削・切り崩しながらスクリーンドラムの回転数によって、土砂掻き込み量を調整して吸引土砂の供給量を制御できる構造にした。土砂濃度の抑制・制御機構による土砂濃度管理のイメージを図-11 に示す。

(2) 性能確認実験の概要

アタッチメント製作工場内の試験水槽を使用し、改良アタッチメントで水槽内の土砂を吸引、土砂スラリーを配管輸送（配管延長 150m）後に水槽へ戻して循環させる方法によって性能確認実験を行い、土砂濃度の制御状況と土砂吸引能力の確認を行った。改良アタッチメントの性能確認実験平面図を図-12 に示す。

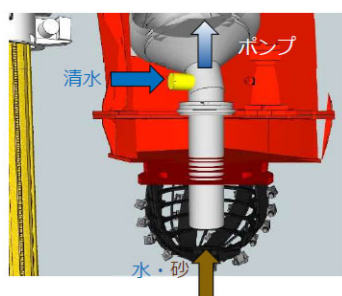


図-9 二重管による清水吸引機構

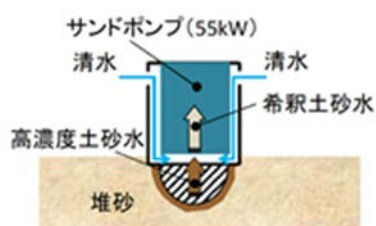


図-10 回転式スクリーンドラムと切削チップ



図-11 改良後の土砂濃度管理のイメージ

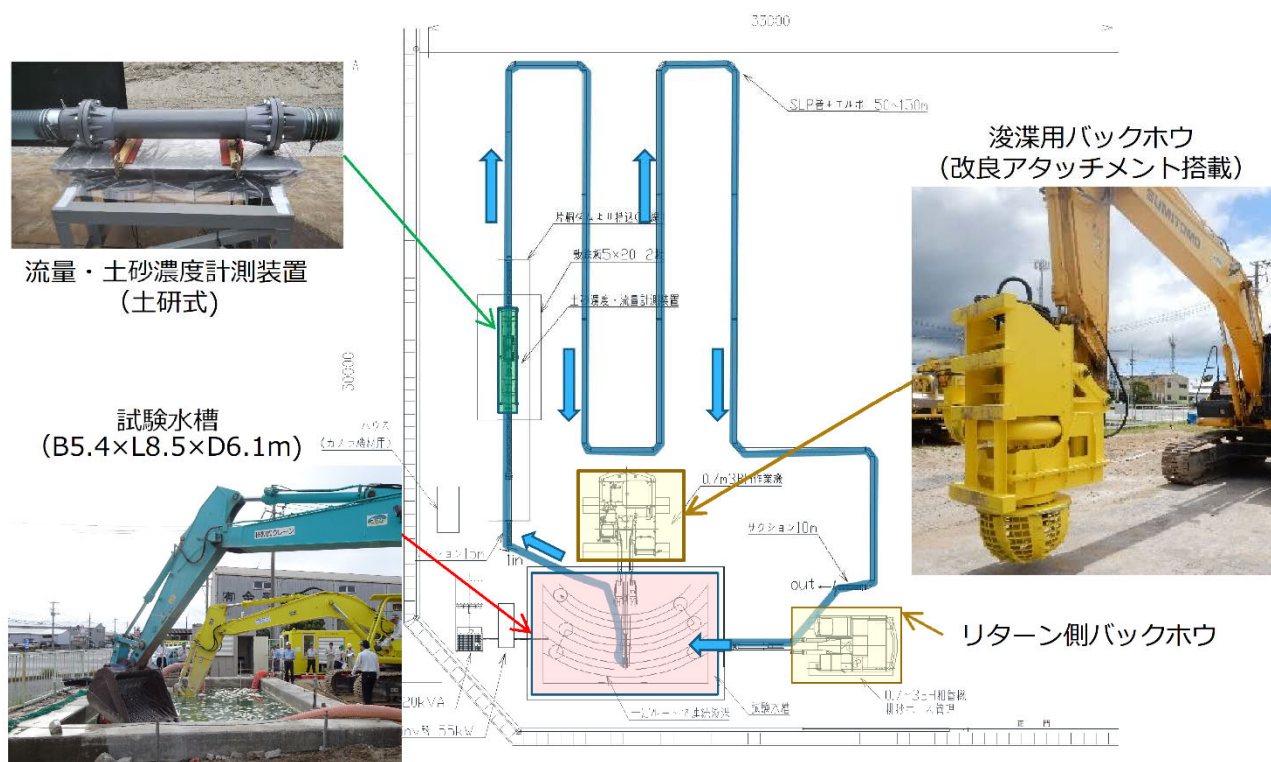


図-12 改良アタッチメントの性能確認実験平面図

(3) 改良アタッチメント性能確認実験結果

先端開口度を 3 水準 (46,62,80%), スクリーン回転数を 3 水準 (20,40,60rpm) とし, 清水と土砂スラリーにおけるポンプ流量と圧力, 土砂濃度を計測した. 実験結果を表-2 に示す.

先端開口度を絞れば, 吸引流速が上がり土砂濃度が増加すると想定していたが, 結果は同一回転数で比較すると開口度を絞ることで逆に土砂濃度が低下し, 流量は増加している. これは開口度を絞ることで, 二重管による清水供給量を増加させる効果の方が大きくなり, 土砂濃度を低下させたと考えられた. 一方, スクリーン回転数を上げれば, 土砂の掻き込み量が増加して土砂濃度が比例的に上昇すると想定していたが, 40rpm 以上では遠心力で掻き込み量が減少し, 濃度が逆に小さくなる傾向となった.

次に流量・土砂濃度の経時変化について, 先端開口度 80%・ケーシング回転数 20rpm 時のポンプ圧力と流量・土砂濃度の履歴図を図-13 に示す. 土砂濃度は 10%程度で安定していることを示しており, 土砂濃度抑制機構の効果が表れた結果となった.

また今回導入した清水吸引機構の効果を検証するため, 清水取込口を鉄板で塞いで土砂濃度の経時変化を比較した. 流量・土砂濃度履歴結果を図-14 に示す. 清水吸引機構の無い場合, 濃度が徐々に高くなり 20%程度に達して配管閉塞する恐れがあったため, 実験を途中で中断打ち切りにした. 一方で清水吸引機構がある場合は多少の上下はあるものの 7~8%程度でほぼ一定となっており, 清水吸引機構の効果が示された.

5. 堆砂分別吸引アタッチメントの現場実証試験

(1) 実証試験概要

ダム堆砂処理に特化して開発した堆砂分別吸引アタッチメントの実用性を確認するため, 天竜川水系美和ダム貯水池内の堆砂土砂をポンプ吸引し, 湖内輸送 500mを圧送する現場実証試験を行った. 実証試験の概要を図-15 に示す.

表-2 改良アタッチメントの性能確認実験結果

先端開口度 (%)			42% (6B 相当)			62% (7B 相当)			80% (8B 相当)		
回転数 (rpm)			20	40	60	20	40	60	20	40	60
流体	清水	流量 (m³/min)	9.55	9.59	9.53	9.44	9.44	9.48	9.57	9.54	9.57
		圧力 (MPa)	0.078	0.078	0.080	0.077	0.076	0.075	0.077	0.077	0.079
		負荷電流 (A)	101	102	103	100	98	99	97	97	103
	土砂スラリー	流量 (m³/min)	9.13	8.92	8.69	8.38	8.27	8.55	8.71	8.59	8.39
		土砂濃度 (%)	6.8	7.6	9.0	10.3	10.7	8.5	10.7	11.4	11.0
		浚渫量 (m³/h)	62.4	67.8	78.0	86.4	88.8	72.6	93.0	98.4	92.4
		圧力 (MPa)	0.096	0.096	0.101	0.111	0.112	0.106	0.107	0.110	0.111
		負荷電流 (A)	120	131	136	126	137	133	131	141	142

※1 外形管は9B (先端開口度 100%) ※2 流量・土砂濃度値は連続運転時の平均値
 ※2 ポンプ定格電流値は 102A、表黄色枠はオーバーロード

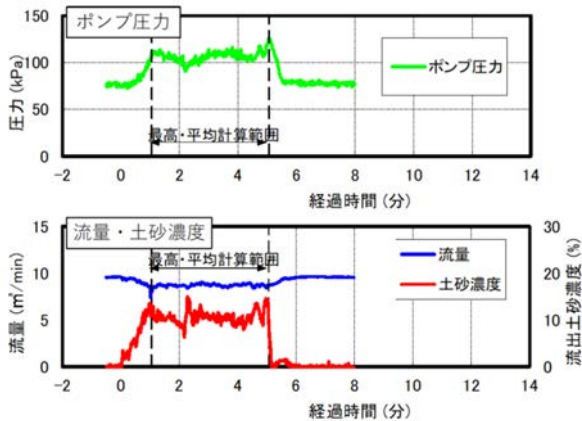


図-13 各計測値の履歴図
(開口度 80%, 20rpm)

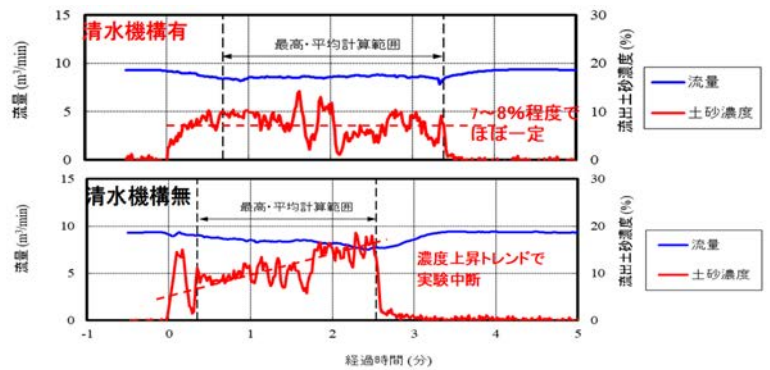


図-14 清水吸引機構有無による土砂濃度比較
(開口度 80%, 20rpm)

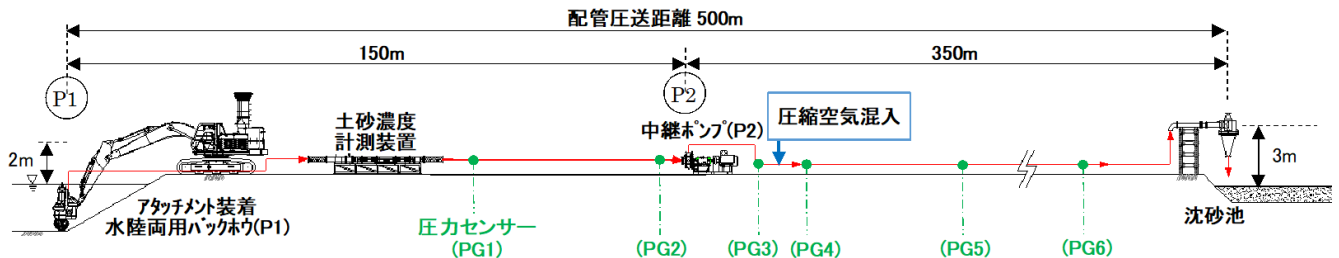


図-15 現場実証試験概要図

試験では、本機 (P1) を装着した 0.8m³ 級水陸両用バックホウを使用して水際の堆砂吸引を行った。また長距離圧送に対応するため、ブースターとして出力 140kW の中継ポンプ (P2) を直結配管して使用した。なお P2 が過吸引すると P1 のオーバーロードが発生するため、P2 前後の圧力を管理して P2 吐出量をインバーター制御により調整した。また P2 直下流で圧縮空気を混入し、圧送性への影響も確認した。試験計測項目は、土研式の流量・土砂濃度計測装置を使用したリアルタイムの管内流量と圧力、土砂濃度とし、あわせて圧送ライン上の 6 ヶ所に設置した圧力センサーによる管内圧力とした。

(2) 実証試験結果

a) ドラム回転数による土砂濃度の確認

美和ダム堆積土砂 (固結シルト質) におけるドラム回転数と土砂濃度の関係を表-3 に示す。この結果から、平均土砂濃度が 10% 程度となるようにドラム回転数を 50rpm に設定して試験を行うことにした。

表-3 ドラム回転数と土砂濃度の関係

ドラム回転数 (rpm)	10	20	30	40	50
平均流量 (m ³ /min)	7.8	7.8	7.5	7.4	7.1
土砂濃度最高 (%)	2.5	2.8	5.0	9.8	17.4
土砂濃度平均 (%)	0.9	1.3	2.1	2.5	10.6

表-4 空気混合量と流量係数の関係

	空気量 (m ³ /min)	流量 (m ³ /min)	土砂 濃度 (%)	損失水頭 hf(m)		動水勾配 S		流量係数 C	
				PG1-2	PG4-6	PG1-2	PG4-6	PG1-2	PG4-6
清水	0	7.52	0.10	3.16	13.62	0.043	0.050	169	156
	1	8.00	0.00	3.67	15.35	0.050	0.057	166	155
	2	7.59	0.10	3.16	15.76	0.043	0.058	171	145
	3	7.21	0.29	2.96	14.94	0.040	0.055	168	142
土砂水	0	7.33	4.43	4.10	14.75	0.056	0.055	143	145
	1	7.41	4.41	4.13	14.55	0.057	0.054	144	148
	2	7.33	4.85	4.21	16.00	0.058	0.059	141	139
	3	7.29	4.54	3.91	15.83	0.054	0.059	146	139

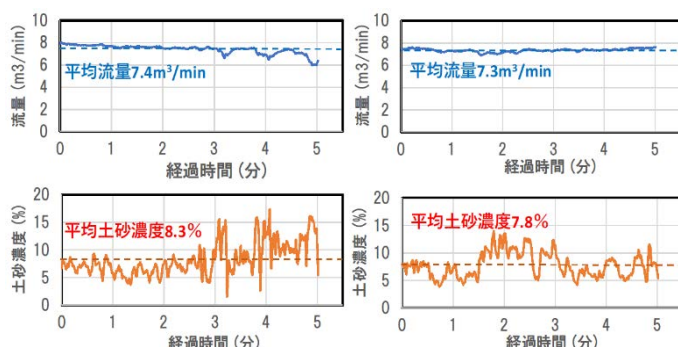


図-16 連続運転時の流量と土砂濃度履歴



図-17 水深に適応したベース機への装着例

b) 連続運転での浚渫能力の確認

圧縮空気を混入しないケースで5分間の連続運転を2回行い、吸引流量と土砂濃度を計測した。計測履歴を図-16に示すが、2回とも安定した流量と土砂濃度による圧送ができ、平均土砂濃度8%程度、平均流量8.3m³/分であり、浚渫能力50m³/hを確認できた。

c) 圧縮空気混入による圧送性への影響

圧縮空気を0~3m³/分混入した各ケースの管内圧力計測値から算出した流量係数Cを表-4に示す。PG4~PG6の区間(270m)では、0から1m³にすると土砂水でCがわずかに大きくなったが顕著な差はなかった。一方、2~3m³に増やすと清水・土砂水ともCは小さくなり、管内抵抗が増加する結果となった。今回は土砂濃度が比較的低い条件であったが、圧送性向上の可能性のある空気量は1m³以下とわかった。今後、高濃度条件による再確認が必要と考えられる。

6. まとめ

プロトタイプモデル機での現場実験における課題を基にアタッチメント改良機を製作し、実験により土砂吸引性能の改善が確認できた。この結果、巨礫等を含む土砂から細粒土砂を分別吸引し、堆砂の土質や粒度の違いがあっても、先端開口度とスクリーン回転数の組合せにより濃度調整可能な浚渫アタッチメントの基本構造が確立でき、現場実証試験によりその性能を検証できた。

表-5 従来の浚渫方法との比較

	グラブ浚渫	バックホウ浚渫	ポンプ浚渫	本法
使用機械	専用浚渫船	バックホウ台船	①マイクロポンプ船 ②サンドポンプ船	①浅水バックホウ ②バックホウ台船 ③T-iROBO UW(クレーン台船)
運搬方法	土運船	土運船	パイプライン圧送	パイプライン圧送
適応土質	粘性土～礫混り土	粘性土～礫混り土	粘性土～砂質土 (礫混り不可)	粘性土～礫混り土
巨礫・沈木対応	浚渫後陸上で選別	浚渫後陸上で選別	浚渫不可	水中で選別
適応水深	-2～25m	-2～10m	①-2～-10m ②-2～-25m	① 0～-2m ② -2～-10m ③-10～-50m
能力	100m ³ /hr (2.5m ³ バケット)	50m ³ /hr (1.0m ³ バケット)	50m ³ /hr (150kWポンプ)	50m ³ /hr (55kWポンプ)

今回開発したダム堆砂分別吸引アタッチメント「T-A Dredger[®]」は、汎用バックホウに装着できるので、実証試験に用いた水陸両用バックホウでの浅水深（水深 3m 程度）浚渫以外にも、図-17 に示すような水深に応じたベース機を使うことで、あらゆる水深の浚渫に適用できる特徴を持つ。また表-5 に示すように大規模な仮設が不要でありながら、従来工法に匹敵する浚渫能力 50m³/h を実現できるメリットがある。本機が今後のダム浚渫工事に広く活用していければと考えている。

参考文献

- 1) 宮川仁，本山健士ら：吸引工法（潜行吸引式排砂管）の現場適用に向けた塵芥等の前処理手法に関する一検討，土木学会第 72 回年次学術講演会，VI，pp.1703-1704，2017
- 2) 佐野和幸，木村政俊ら：水中作業機の沈木切削アタッチメントの開発，土木学会第 73 回年次学術講演会，II，pp.153-154，2018
- 3) 宮川仁ら：スラリー輸送における土砂濃度計測の自動化の試みと潜行吸引式排砂管の排砂特性，土木学会第 73 回年次学術講演会，II，pp.149-150，2018