

水位差を活用した新たな堆砂対策技術の開発

宮川 仁・岩田幸治・石神孝之

1. はじめに

国土交通省が所管する河川管理施設のダムでは、既に50年以上を経過したダムが増加している状況であり、堆砂容量を超えて堆砂が進行することによる洪水調節や利水補給といったダムが有する機能への支障が懸念されている。ダムの貯水容量は有限であることから、既設ダムの機能を長期的に有効活用していくためには、より効果的・効率的な堆砂対策を推進していくことが重要である。平成29年6月には、既設ダムを有効活用するダム再生の取り組みを一層推進するための方策として「ダム再生ビジョン」が策定され「ダムの長寿命化」などで堆砂対策の必要性が掲げられた¹⁾。ダム上流の地形、地質等はダム毎に異なり堆砂の量や質（粒径）等は様々なため、堆砂対策は画一的とはならず、ダム毎で最適技術の選択が求められる。このため、各ダムでは先行事例や蓄積された知見等を基に堆砂対策技術を発展させながら堆砂対策の検討を進めていく必要性が今後増してくると考えられる。そこで、本稿では堆砂対策技術の発展に対する貢献を目指し、新技術として開発中の潜行吸引式排砂管の施設設計法の確立に向け、排砂性能を評価するために精度の高い土砂濃度の計測手法を構築し、土砂濃度、管内流速およびこれらとの関係などを明らかにしたので報告する。

2. 潜行吸引式排砂管の概要と課題

2.1 現在の堆砂対策技術

現在の堆砂対策技術としては、最も一般的な「掘削・浚渫」、図-1に示すように貯水池の上流に分流施設を設置し、洪水時の土砂を含む流れの一部をトンネル水路によってダムの下流にバイパスする「土砂バイパス」、図-2に示すようにダムの堤体に排砂設備を設置し、貯水位を低下させて貯水池内を河川に近い状態（流速を土砂が動く程度以上に高めた状態）にして貯水池内の堆砂を侵食・運搬し、ダム

下流に土砂を放流する「排砂ゲート」がある。しかし、掘削・浚渫は、コスト、労力、時間が多くかかる。土砂バイパスや排砂ゲートは、貯水池運用の制約を受ける。土砂バイパスは大規模な施設となり、建設及び維持管理に多額の費用を要する課題がある。

2.2 新技術（潜行吸引式排砂管）

そこで、新しい堆砂対策技術として堆砂の除去・土砂運搬並びに下流河川への土砂供給について、あまりコストをかけない簡易な方法により、ダムの上下流の水位差のエネルギーを利用し、無動力で堆砂を吸引・放流する吸引工法と称される技術の開発が各方面で進められている²⁾。わが国では吸引工法は、これまで堆砂中の塵芥や粘性土への対応等が課題となり、ダム貯水池では実用化に至っていない。しかし、吸引工法は、以上の現在の堆砂対策技術の課題を解消できる技術として条件を整えば極めて有用な技術になると考えている。現在、土木研究所でも、実用化を目指し吸引工法の一つとして図-3に示す堆砂の表面に吸引管を置き、洪水時の排砂を基本とした図-4に示す潜行吸引式排砂管（以下「排砂管」という。）の技術開発を行っている⁴⁾。排砂管は、

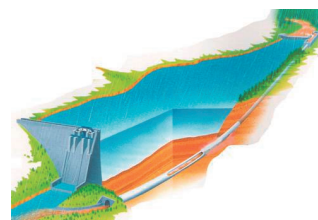


図-1 土砂バイパストンネルのイメージ（美和ダム）



図-2 排砂ゲートの例（宇奈月ダム）

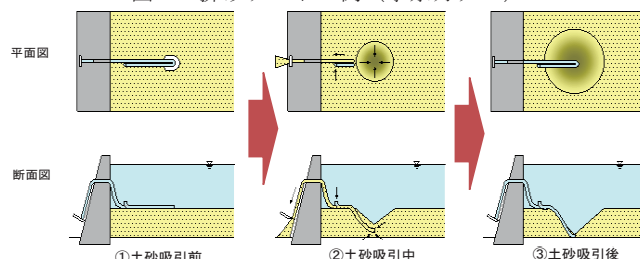


図-3 潜行吸引式排砂管の操作イメージ

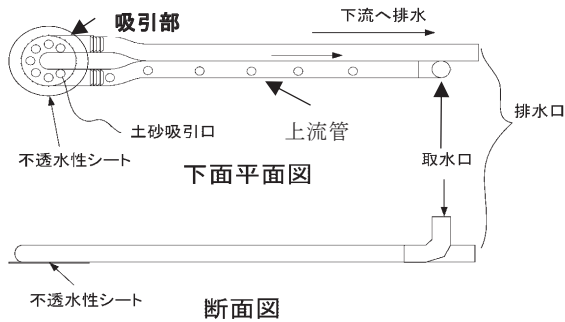


図-4 潜行吸引式排砂管(上流管土砂吸引口6個の例)

フレキシブル管材をU字状に曲げたような形状となっており、曲がり部（以下「吸引部」という。）は鉄材、吸引部の上下流管はサクシオンホース、吸引部の底面には不透水性のシート、管径の半分程度の大きさの土砂吸引口を吸引部の底面に7個と上流管の底面に複数配しているものである。洪水時に運用できれば、貯水池の堆砂対策と併せて、堆砂対策に伴うダム下流への環境負荷の低減にも寄与できることから日本の河川で適用できるメリットを有する技術となると考えている。しかし、実際の排砂設備として排砂管を設置することを検討した場合、土砂濃度と管内流速の関係などがほとんど解明されていないため、排砂能力が不明で施設設計が行えない状況となっている。そこで、管径100mmの排砂管を用いて、精度の高い土砂濃度の計測手法を構築し、排砂管の土砂濃度、管内流速およびこれらの関係などについて実験により検討を行った。

3. 実験方法

実験は図-5に示す水槽で実施した。使用した排砂管は内径100mmの管路で吸引部底面に直径50mmの土砂吸引口を7個、上流管底面に直径50mmの土砂吸引口を250mm間隔で12個配置したものである。土砂を水槽内に床板から約2.1mの高さまで投入した後、排砂管を土砂表面上に設置し、この高さを初期河床高（吸引部深度0m）とする。排砂管と水槽外の管径100mmの塩化ビニル管を接続し、さらに下流に後述する図-6に示す新たに開発した流量および土砂濃度を計測する流量・土砂濃度計測装置（以下「土砂濃度計測装置」という。）、管終端部に止

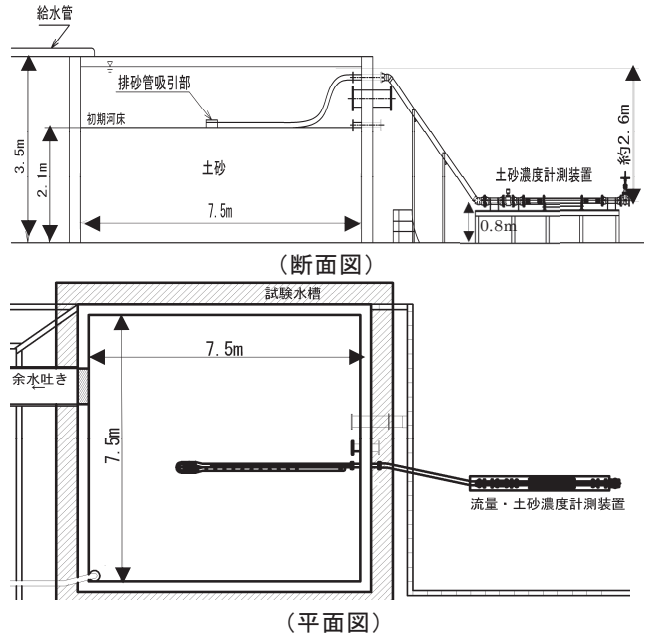


図-5 実験施設概要図

水バルブ（スルースバルブ）を設置した。水をポンプで水槽内に一定流量で給水し、余水吐からの越流により実験中は貯水位をほぼ一定とし、管終端部との水位差を約2.6m確保する。管終端部は床板から0.8mに位置し、吸引部が床板に到達すると管終端部よりも低くなる。

使用した土砂は、図-7に示す粒度分布で粒径0.1mm～2.85mmで構成される平均粒径で0.55mmの混合粒径砂を用いた。なお、ここで言う土砂濃度は、土砂の土粒子の実質部分の体積と土砂混じりの水の体積から求まる空隙なしの式(1)で示す体積土砂濃度を指す。

$$C = V_s/V \quad \text{式(1)}$$

ここにC:空隙無体積土砂濃度、 V_s :土粒子の実質部分の体積(m^3)、V:土砂混じりの水の体積(m^3)を表す。

実験は、バルブを全開にして開始し、表-1に示す4ケースの条件で実験中は表-2の項目を常時監視して計測し土砂濃度と管内流速の関係などを分析する目的で実施した。ケース1とケース2は吸引部をクレーンで吊り下げて位置を管理し、ケース3は吸引部をクレーンで吊り下げず、ケース4は図-8に示すように、他ケースよりも管長を長くし、クレーンで管を吊り上げ、サイフォンを形成させて吸引部はクレーンで吊り下げずに実施した。

実験終了は吸引部の深度が概ね床板に到達し、吐口から排出される土砂濃度が概ね1%未満となる条件とした。以上から土砂濃度計測装置の有効性と土砂濃度と管内流速の関係などを分析した。

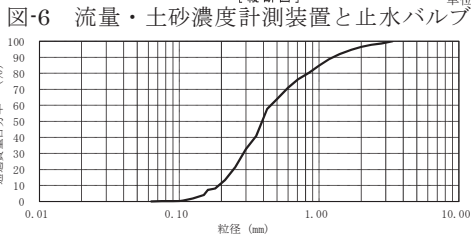
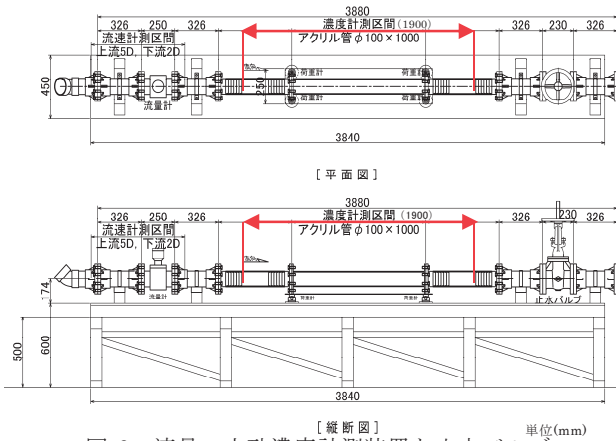


図-7 実験土砂の粒度分布

表-1 実験条件一覧

	吸引部等操作方法	管長 (m)	清水時管内流速 (m/s)
ケース1	吸引部位置を段階的に管理する ※土砂濃度がほぼ0%となったことを確認し概ね30cm間隔で降下させる	15.8	2.8
ケース2	吸引部位置を連続的に管理する ※概ね土砂濃度5%を維持する	15.8	2.8
ケース3	吸引部位置を管理しない	15.8	2.8
ケース4	吸引部位置を管理しない サクシオンホース管をクレーンで吊り上げサイフォンを形成	28	2.3

表-2 実験計測項目

計測項目	計測方法	計測間隔
水槽内水位	水位計	1秒間隔
吸引部深度	水位計	1秒間隔
管内流量	電磁流量計	1秒間隔
流砂量	計測区間の荷重を荷重計で計測	1秒間隔
流況	吐口部で直接採取(バケツ) 2秒~5秒程度/回	随時(様々な土砂濃度に配慮)
	吐口部で直接採取(バケツまたは採砂ネット 2秒~5秒程度/回)	随時(様々な土砂濃度に配慮)
	アクリル管内の土砂移動・堆積状況をビデオ撮影・観察	連続

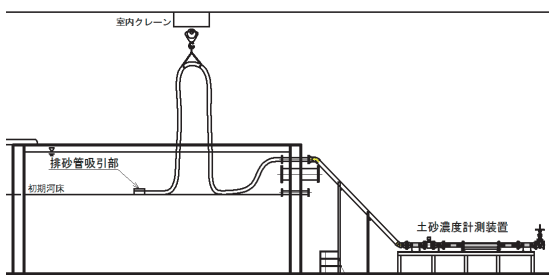


図-8 ケース4のサイフォン形成時のイメージ

4. 実験結果

4.1 土砂濃度計測装置の開発

4.1.1 管内土砂濃度と排出土砂濃度

これまでは吐口から排出される土砂濃度（以下「排出土砂濃度」という。）の計測は吐口部での人力による直接採取により計測していたため頻度の高い計測が困難であった。そこで、図-6の赤で示す、アクリル管と両側のフレキシブル管で構成するフレキシブル区間(以下「濃度計測区間(合計1.9m)」と

いう。)の重量を荷重計で計測することで、リアルタイムで管内の土砂濃度（以下「管内土砂濃度」という。）を取得可能とし、管内の状態によって排出土砂濃度を推定可能とする手法について、ケース1～ケース4の実験を通じて検討した。具体的には、濃度計測区間の清水のみと土砂混合時の重量の差分から式(2)により管内土砂濃度に換算、電磁流量計も併設して管内流量を計測し、水平管路の土砂輸送の状態（管内流速と管内土砂濃度）を秒単位でほぼ同時刻に自動取得できる仕組みとし、さらに、長さ1mのアクリル管内の土砂の堆積状態などの流況を目視観察することで、後述する補正により排出土砂濃度を推定できる装置を検討した。なお、精度検証のため、吐口部ではこれまでどおり人力により排出土砂を直接採取し式(2)で排出土砂濃度も算出し、土砂濃度計測装置から得られる値との比較を行い、精度を確認した。

$$C_1 = \frac{W - W_w}{V_w} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad \text{式(2)}$$

ここに C_1 :管内土砂濃度または排出土砂濃度、 W :土砂混合時の荷重(g)、 W_w :水だけの荷重(g)、 ρ_s :土砂の密度(g/cm³)、 ρ_w :水の密度(g/cm³)、 V_w :濃度計測区間体積または直接採取時の容器体積(cm³)を表す。

一般的にスラリー輸送においては、流体と固体粒子の速度に差異があるため管内土砂濃度と排出土砂濃度が異なる⁵⁾。流動状態では、流速が大きいと均質流(浮遊流)となるが、流速の低下とともに、下層が高濃度となる不均質流、下層に摺動層が生じる摺動流、下層に堆積層が生じる堆積流へと変化する⁶⁾。また、摺動流と堆積流の境界流速は堆積限界流速と定義されており、代表的なDurandの堆積限界流速⁷⁾の式(3)がある。

$$v_L = F_L \sqrt{2gD(s-1)} \quad \text{式(3)}$$

ここに v_L :堆積限界流速(m/s)、 F_L :粒径と土砂濃度で決まる定数(図-9)、 D :管径(m)、 s :土粒子比重、 g :重力加速度(m/s²)を表す。

使用した粒径0.1mm～2.85mmの土砂濃度2%～15%の範囲の堆積限界流速は、1.4m/s～2.7m/sの範囲となる。

また、図-10に全ての実験ケースを通じ吐口部で直接採取した際の排出土砂濃度と同時刻の土砂濃度計測装置の荷重計値の関係を示すとともに、式(2)の関係も示す。なお、既往の文献⁹⁾を参考として、

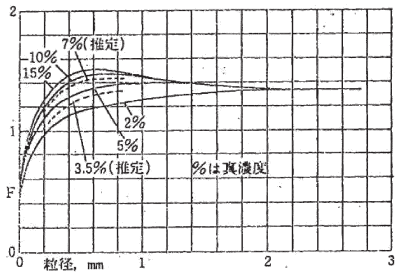


図-9 Durand 式の F_L 、粒径、濃度の関係⁸⁾

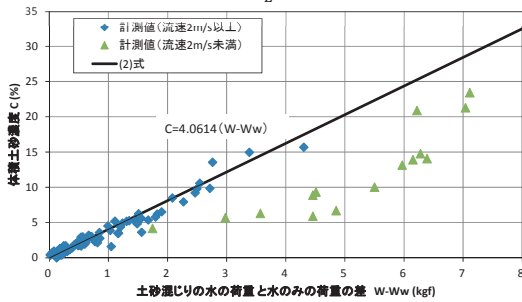


図-10 直接採取土砂濃度と土砂濃度計測装置荷重との関係

本稿では電磁流量計の値を断面積で除した値を管内流速とした。流速2m/s以上は式(2)と直接採取値が概ね一致する。一方、流速2m/s未満は直接採取値が式(2)の値からかい離した。管内土砂濃度と排出土砂濃度が概ね流速2m/sを境に異なることが確認でき、流速2m/sは前述のDurandの堆積限界流速と同程度の値となったことから堆積層を形成する境界速度とした。

4.1.2 補正による排出土砂濃度の計測

次に流速2m/s未満の場合の排出土砂濃度の計測について堆積厚を考慮する手法を検討した。図-11に実験中のアクリル管内の流れの様子を示す。土砂の堆積状態等を確認したところ、概ね流速2m/s以上では、管の下層で土砂が摺動する摺動流となっており、管内土砂濃度と排出土砂濃度が異なると考えられたが、前述のとおり式(2)の値と直接採取値が概ね一致したため式(2)の値を排出土砂濃度とした。概ね流速2m/s未満では管底部が完全に土砂が堆積し堆積流となっていた。このため流速2m/s未満は流況観察から堆積厚を計測して式(4)により堆積厚に相当する土砂の断面積を計算し、式(5)により堆積土の空隙率を考慮した土砂の断面積の比率を控除した流積比(管断面積を100%とした値)を求め、流積比と管内流速との関係を図-12に示す。

$$S = R^2 \cos^{-1} \left(\frac{R-a}{R} \right) - (R-a) \sqrt{R^2 - (R-a)^2} \quad \text{式(4)}$$

$$Ra = 100 \left(1 - \frac{(1-\varepsilon)S}{R^2 \pi} \right) \quad \text{式(5)}$$

ここに、S:堆積断面積(cm²)、R:管半径(cm)、

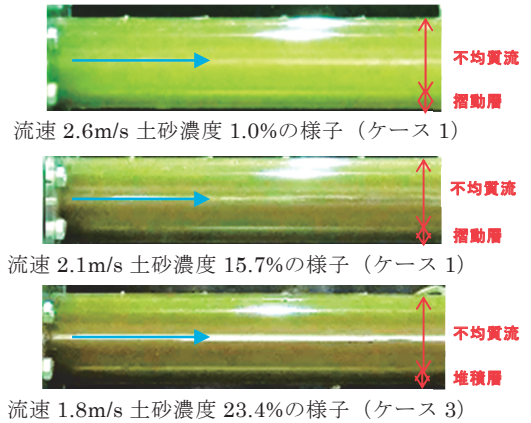


図-11 アクリル管内の流れの様子

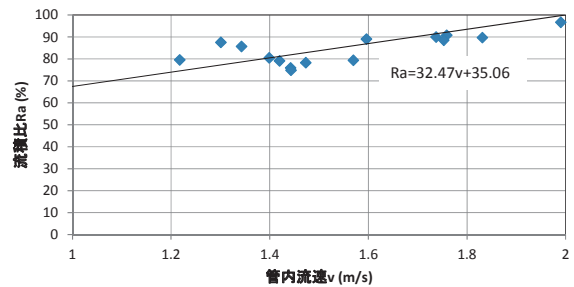


図-12 流積比と管内流速の関係

a : 堆積厚 (cm)、 Ra : 流積比(%), ε : 空隙率(0.4)を表す。

図-12に示す関係から近似式 式(6)を算出して式(7)で補正する排出土砂濃度を求めた。

$$Ra = 32.47v + 35.06 \quad \text{式(6)}$$

$$C_2 = \frac{W-Ww - (100-Ra)R^2 L \pi (\rho_s - \rho_w) / 100}{\frac{\rho_s - \rho_w}{V_w}} \quad \text{式(7)}$$

ここに Ra :流積比(%), v :管内流速(cm/s)、 C_2 :流速2m/s未満の排出土砂濃度、 L :濃度計測区間(cm)を表す。

ここでは流速2m/sを流積比100%としている。

ケース毎の吸引部の初期河床高からの深度の時系列関係を図-13に、図-14にケース1からケース4の土砂濃度計測装置において式(2)のみから算出した管内土砂濃度、管内流速2m/s以上を式(2)、管内流速2m/s未満を式(7)により算出した排出土砂濃度、吐口で直接採取した排出土砂濃度および管内流速の時系列関係を示す。また、ケース4の吸引部の初期河床高からの深度と管の吊上げ高さ(貯水位基準)の時系列関係を図-15に示す。土砂濃度計測装置から算出された排出土砂濃度と直接採取した排出土砂濃度が概ね合致し、土砂濃度計測装置により精度高く排出土砂濃度が推計できることがわかった。なお、本稿では堆積厚を目視計測し線形式で補正したが、管径100mm、土砂粒径が0.1mm~2.85mmなど今回の条件で適用できたと考えており、管径や粒径が

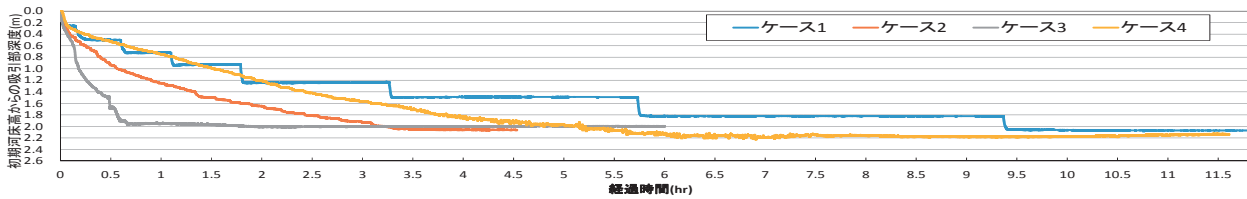


図-13 吸引部の初期河床高からの深度の時系列関係 (ケース1~ケース4)

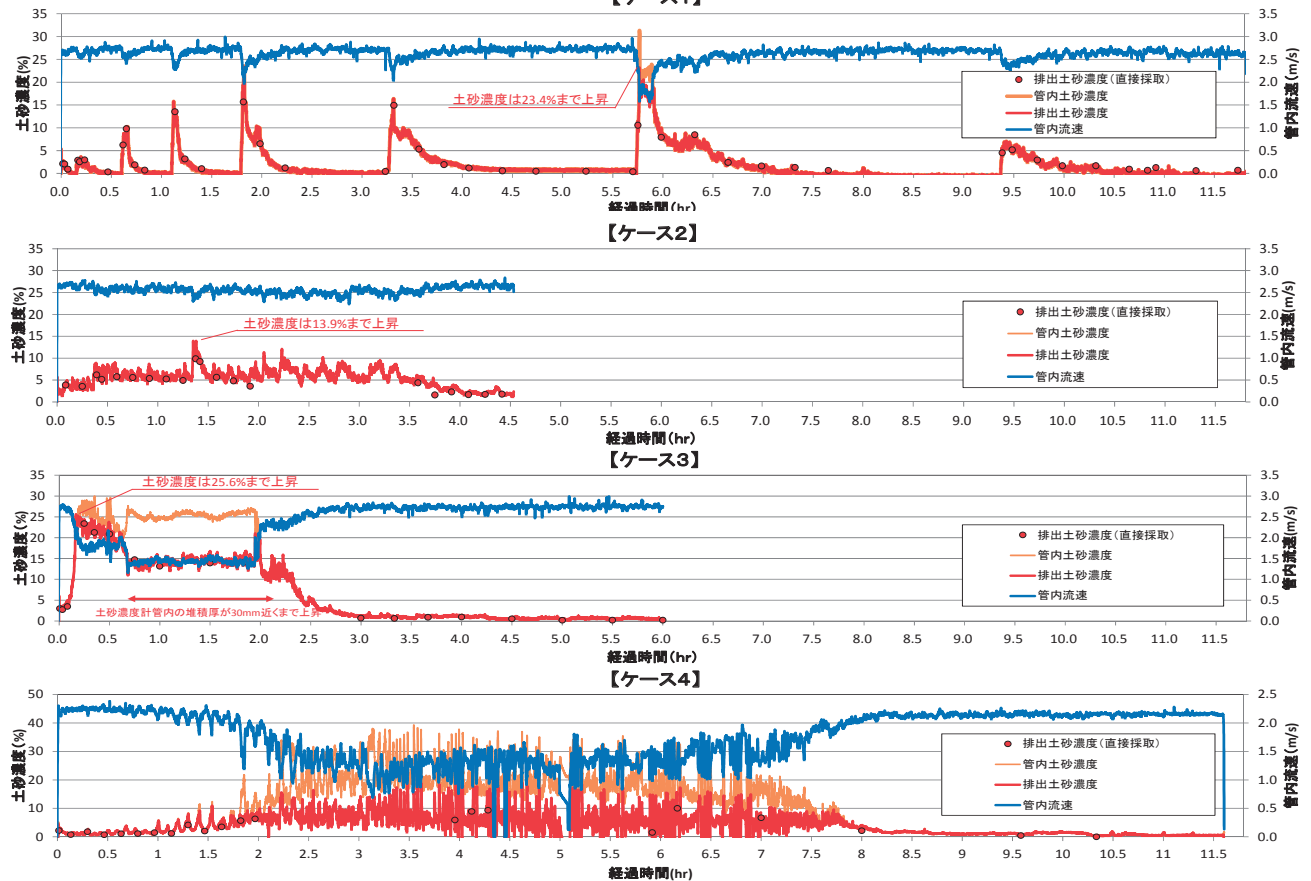


図-14 実験ケース毎の土砂濃度 (土砂濃度計測装置と直接採取) と管内流速の時系列関係

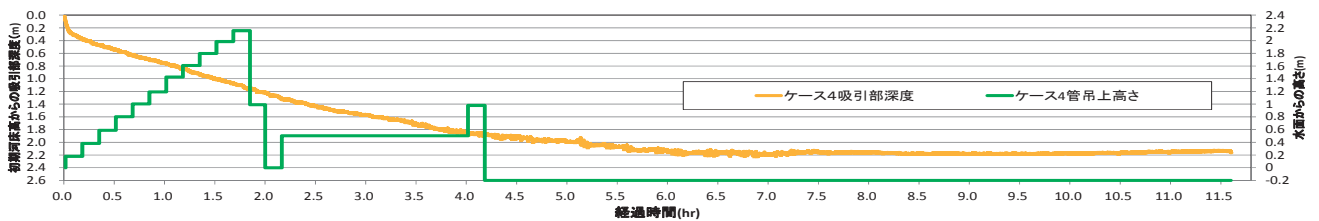


図-15 ケース4の吸引部の初期河床高からの深度と管の吊上げ高の時系列関係

異なる他の条件でも適用可能な補正方法の検討していく予定である。

4.2 管内流速と土砂濃度等の分析

各ケースの管内流速と土砂濃度の時間的変化等については、図-13~図-15に示したとおりである。ケース1は吸引部を概ね30cm間隔で降下させながら排砂した。降下中に土砂濃度が高くなると同時に流速が低下する現象が確認された。吸引部の位置が初期河床高から1.8mとなった5.7時間後の降下では水槽内に形成されるすり鉢状の土砂崩壊形状が大きくなったため吸引部を30cm降下させただけでも崩落

土砂量が多くなり、約23%程度の土砂濃度が計測されたものと考えられた。ケース2はリアルタイムで土砂濃度が概ね5%を維持するように監視しながら連続的に吸引部を操作して降下させた。急激な土砂濃度の上昇や流速の大きな変動は見られず安定的に排砂ができた。ケース3は吸引部を制御せずに排砂した。実験初期に吸引部が一気に土中に潜行すると同時に土砂濃度も20%を超えた。これは、吸引部の土砂吸引口の直下に土砂が存在し吸引が容易であったためと考えられる。その後、概ね30分から2時間の間は、吸引部が床板に着底し、管内流速が

表-3 実験結果総括表

	空隙込総排砂量 (空隙率0.4)(m ³)	排砂完了概算時間 (hr)	時間当たり排砂量 (m ³ /h)
ケース1	29.5	10.5	2.81
ケース2	27.4	4.5	6.09
ケース3	29.2	3	9.73
ケース4	28.7	8.5	3.38

1.5m/sよりも低下、土砂濃度は約15%を維持した状態となった。これは、吸引部が土中に完全に埋没し、吸引部あるいは上流管の土砂吸引口から土砂が吸引されたためと考えられた。ケース4はケース3に比べて管長を12.1m長くし、実験途中でサイフォンも形成させた。管長の増加により損失が大きくなったため、管内流速が低下し、吸引能力が低下、吸引部の潜行もケース3に比べて遅くなった。管を水面から約2.2m吊り上げたサイフォン形成時には吸引量の低下も考えられたが流速が大きく低下せず、排砂は順調に行われた。また、全てのケースで排砂管が目詰まりや損傷することもなかった。

最後に、吸引部が床板に着床し、概ね土砂濃度が1%未満となるタイミングで区切り、表-3に実験ケース毎の排砂能力を整理した。吸引部を管理しない、比較的管内流速が早いケース3の排砂能力が空隙込みの土砂量で時間当たり9.73m³/sと一番高く、平均土砂濃度は5%以上となった。

以上、管径100mmの排砂管を用いて、精度の高い土砂濃度の計測手法を構築し、図-13～図-15、表-3に示したように、土砂濃度が高くなると管内流速が低下する関係など排砂管の土砂濃度、管内流速およびこれらの関係などを明らかとした。

5. おわりに

これまでは土砂濃度と管内流速の関係などがほとんど不明であったが今回の検討を通じて①土砂濃度の計測法として、新たに土砂濃度計測装置を開発

し、従来の直接採取による計測値と概ね合致し、精度の高い装置となることが確認できた。②また、この装置を用い水位差が約2.6mの条件で管径100mmの水理実験を行い土砂濃度が高くなると管内流速が低下する関係など、新技術として期待される排砂管の土砂濃度と管内流速の関係などが明らかとなった。

今後、この知見を踏まえ、管径300mmの排砂能力を検証しながら粒径、管内損失なども考慮した施設設計法を確立してまいりたい。

また、前述した吸引工法が有する塵芥や粘性土の課題への対応等として、事前にこれらを除去する前処理技術の開発にも土木研究所では取り組んでおり、吸引工法の汎用性を向上させてまいりたい。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局：ダム再生ビジョン、平成29年6月
- 2) 前田修一、多田康一郎、庄路友紀子：ダム堆砂土の吸引・下流供給技術としての鉛直二重管吸引工法の開発、電力土木、No.371、pp.54～58、2014
- 3) Alberto JIMENEZ、 Raul FIGUEROA、 Tom JACOBSEN: Dredging of cohesive sediments with SediCon Dredge in El Canada hydropower plant in Guatemala、 25th INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS、 Norway、 Q99、 2015
- 4) 宮川仁、箱石憲昭、石神孝之、櫻井寿之：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
- 5) 高橋弘：スラリー輸送研究の歩みと固液混相流研究の将来展望、混相流、31巻、2号、pp.130～134、2017
- 6) 片山裕之、田島芳満：水圧吸引方式の土砂管路輸送技術、混相流、27巻、3号、pp.282～289、2013
- 7) Durand R.: Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes-Experimental Research、 IAHR 5th Congress、 Minneapolis、 pp.89-103、 1953
- 8) 河野正吉:排砂管に関する小川式とDurand 式の比較および小川式の吟味、作業船、Vol.34、pp.18～25、1964
- 9) 入江義次、白鳥保夫、是石昭夫：土砂の水力輸送に関する研究—土砂輸送時における電磁流量計の特性について—、港湾技研資料、No.42、1967

宮川 仁



土木研究所水工研究グループ
水理チーム 主任研究員
Masashi MIYAKAWA

岩田幸治



研究当時 土木研究所水工研究
グループ水理チーム 交流研究
員、現 日立造船㈱
Koji IWATA

石神孝之



土木研究所水工研究グループ
水理チーム 上席研究員
Takayuki ISHIGAMI