管径100mm潜行吸引式排砂管における 土砂濃度計測と吸引排砂特性 SEDIMENT DISCHARGE CHARACTERISTICS AND SEDIMENT CONCENTRATION MEASUREMENT ABOUT THE 100MM PIPE DIAMETER BURROWING TYPE SEDIMENT REMOVAL SUCTION PIPE

宮川 仁¹・岩田 幸治²・石神 孝之³ Masashi MIYAKAWA, Koji IWATA and Takayuki ISHIGAMI

¹正会員 (国研)土木研究所水工研究グループ水理チーム主任研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)
 ²正会員 同上 交流研究員(現 日立造船(株)(〒559-8559 大阪府大阪市住之江区南港北1丁目7番89号))
 ³正会員 同上 上席研究員(〒305-8516 つくば市南原1-6)

The authors have been developing a new sediment discharge countermeasure method which is a "burrowing type sediment removal suction pipe method" using the water head energy differential between the upstream and downstream areas of a dam. In this study, we have carried out some laboratory experiments to examine the new sediment concentration measurement system and sediment discharge characteristics of the pipe. As a result, it is confirmed the system can measure detail sediment concentrations of the pipe's flow at real-time, and the detail hydraulic characteristics such as the relationship between velocity and the sediment discharge concentration, etc. were found by the system. These hydraulic characteristics will be expected to design the efficient sediment discharge facility.

Key Words : reservoir sedimentation, burrowing type sediment removal suction pipe, sediment discharge characteristics, sediment countermeasure technology, sediment concentration measurement.

1. はじめに

土砂の流れに起因する安全上,利用上の問題の解決 と、土砂によって形成される自然環境や景観の保全を図 るため、山地から海岸までの一貫した総合的な土砂管理 が求められている.特に、ダムでは土砂を適正に流下さ せる取組を推進するとされ、ダム貯水池の堆砂対策およ びダム下流の河床環境の改善のために、既存の土砂供給 手法に加えて、ダムの運用にほとんど制限されない、経 済的な手法の開発が必要とされている.

筆者らはダムの上下流の水位差エネルギーを活用し、 フレキシブル管を用いるダム貯水池からの土砂供給手法 (潜行吸引式排砂管(以下,排砂管))の開発を進めて おり、水理実験を通じて、吸引可能な土砂の粒径や下流 に排出される土砂の濃度計測などにより土砂が吸引・排 砂されることの確認や吸引能力の向上に向けた改良等を 行い、排砂管の有効性を確認してきた^{1,2,3}.しかし、排 砂管の排砂能力を評価するためなどに必要な土砂濃度と 管内流速の関係などがほとんど解明されていない.そこ で、本稿では4ケースの水理実験を通じ、精度の高い土



図-1 潜行吸引式排砂管(上流管土砂吸引口が6個の例)

砂濃度計測手法を構築し、排砂管の土砂濃度、管内流速 およびこれらの関係などを明らかにした.

排砂管の概要を図-1に示す.排砂管は、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



		(m)	(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 サクショ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		
	吐口部で直接採取((パケツ) 2秒~5秒程度/回)	随時(様々な土砂濃度に配慮)		
流砂量	計測区間の荷重を荷重計で計測	1秒間隔		
	吐口部で直接採取((パ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)		
流況	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		

部(以下,吸引部)は鉄材,吸引部の上下流管はサクションホース,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に7個と上流管の底面に複数配しているものである.



2. 実験方法

実験は図-2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-3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)、管終端部に止水バルブ (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に位置しており、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-4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、本研究で言う土砂濃度とは、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(1)式で示す体積土砂濃度を指す.

$$C = V_{\rm s}/{\rm V} \tag{1}$$

ここに*C*:空隙無体積土砂濃度,*V*₅:土粒子の実質部分の体積(m³),V:土砂混じりの水の体積(m³)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-5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. なお,ケース4では管閉塞の可能性を確認する目的で実験途中にバルブ操作も行った.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.

3. 実験結果

(1) 土砂濃度計測装置の開発

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)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-3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))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)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(2)式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、叶口 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 (2)式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.

$$C_1 = \frac{\frac{W - Ww}{\rho_s - \rho_W}}{Vw} \tag{2}$$

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),Ww:水のみの荷重(g), ρ_s :土砂の密度 (g/cm³), ρ_w :水の密度(g/cm³),Vw: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⁴. 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⁵. 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⁶の(3)式がある.

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

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-6) g:重力加速度, D:管径(m), s:土粒子比重を表す.

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-7に全ての実験ケースを通じた吐口部での直接採取による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し、(2)式の関係も示す.なお、本 稿では既往の文献⁸⁰を参考に土砂混入に伴う流量計測へ の影響は小さいとして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(2)式と直接採取値 が概ね一致する.一方、流速2m/s未満は直接採取値が(2) 式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.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-8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(2)式と直接採取値が概ね 一致したため(2)式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(4)式により堆積厚に相当する土砂の断面積を計 算し、(5)式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-9に示す.

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



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

ここに, S:堆積断面積(cm²), R:管半径(cm), a:堆積厚 (cm), Ra:流積比(%), ε:空隙率(0.4)を表す.

図-9に示す関係から近似式(6)式を算出して(7)式で補正 する排出土砂濃度を求めた.

$$Ra = 32.47v + 35.06 \tag{6}$$

$$C_{2} = \frac{\frac{W - Ww - (100 - Ra)R^{2}L\pi(\rho_{S} - \rho_{W})/100}{\rho_{S} - \rho_{W}}}{Vw}$$
(7)

ここにv:管内流速(cm/s), C₂:流速2m/s未満の排出土砂 濃度,L:濃度計測区間(cm)を表す.

なお,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-10に、図-11にケース1からケース4の土砂濃度計 測装置において(2)式のみから算出した管内土砂濃度,管 内流速2m/s以上を(2)式,管内流速2m/s未満を(7)式により 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-12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などの今回の条件で適用できたと 考えており、今後、管径や粒径が異なる他の条件でも適 用可能な補正方法の検討を行っていく予定である.

(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-10~図-12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.

また,ケース4では実験開始から5時間前後にバルブを 閉める操作を行った.図-11の当該時間を拡大した図を 図-13に示す.バルブを閉じると流速が低下し,アクリ ル管内の土砂が沈降・堆積した.一方,バルブ付近は開 度を低くしても流速があるため土砂も流下し管が閉塞す る現象は見られなかった.これは今回の土砂粒径であれ ば1つのバルブで運用が可能となることが示唆された.

土砂を含む管内の水の比重は、水のみより大きくなる ため(8)式で求められる。管内が土砂を含むため管内の任 意の位置における位置水頭(床板を基準とした高さ:図 -14を参照)と速度水頭は比重を考慮した(9)、(10)式と 表わすことができる。なお、圧力水頭は(11)式となる。

$$\gamma_s = \frac{\rho_w(1-C) + \rho_s C}{\rho_w} \tag{8}$$

$$H_{h} = \gamma_{s} (h - H_{out}) + H_{out}$$
⁽⁹⁾

$$H_v = \gamma_s \frac{v^2}{2g} \tag{10}$$



ここに γ_s :管内比重, C:土砂濃度, H_{λ} :位置水頭(m), h:

管の任意位置の高さ(m), H_{out} :吐口部標高(m), H_v :速度 水頭(m), H_p :圧力水頭(m), p:圧力(Pa)を表す.

ここで貯水位と吐口部の高さとの差で与えられる有効 落差を考えると、吸引部から吐口部までの土砂を含む水 の存在を考慮し(12)式となる.さらに、管内圧力が無い 吐口部で、損失水頭(管内流速と比重の関係式となると 考えられることから(13)式と仮定)も考慮したベルヌー イの定理を適用すると(14)式が成立する.この(14)式に(8)、 (10)、(12)、(13)式を適用すると、土砂濃度は(15)式で表 わすことができる.

$$H_e = (H_n - H_i) + \gamma_s (H_i - H_{out})$$
(12)

$$H_f = f \gamma_s \frac{v^2}{2a} \tag{13}$$

$$H_e = H_v + H_f \tag{14}$$

$$C = \frac{2gH_n - 2gH_i}{(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1) \ (v^2(1+f) + 2gH_{out} - 2gH_i)} - \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1}$$
(15)

ここに H_e :有効落差(m), H_n :貯水位(m), H_i :吸引部標高 (m), H_f :損失水頭(m), f:損失係数を表す.

(15)式から土砂濃度は管内流速の2乗に反比例し,吸引 部の深度の関数となっていることが分かる.ケース1から ケース4のバルブを全開とした状態における土砂濃度と 管内流速の関係を図-15に示す.土砂濃度が上昇すると, 管内流速が低下する傾向が分かり,(15)式の関係が現れた と考えられた.

また、ケース1の吸引部深度毎の土砂濃度と管内流速 の関係を図-16に、ケース1の吸引部深度毎の管内比重と 速度水頭との関係を図-17に、ケース1の吸引部深度と速 度水頭の関係を図-18に示す.土砂濃度は、有効落差によ るもののほか、吸引部等の土砂吸引口周辺の土砂の存在 状況にも依存する.吸引部深度が2.1mの際には、すり鉢



状の崩壊形状がほぼ形成され、土砂吸引口周辺にほとん ど土砂がない状態となったため土砂濃度が小さく、図-18の速度水頭の最大低下量は小さくなったと考えられた. このケースを除くと土砂濃度や比重が上昇すると、管内 流速が低下する傾向や,同じ土砂濃度,比重であれば, 吸引部の深度が大きくなると、管内流速、速度水頭が低 下し, 速度水頭の最大低下量は大きくなる傾向が分かり, (15)式の吸引部深度と土砂濃度の関係が現れたものと考 えられた.また土砂濃度,管内流速,管断面積の積を基 に時間当たりの吸引輸送量を算出し、管内流速との関係 を図-19に示す.ケース1からケース3では2m/s付近で時間 当たりの吸引輸送量が高く、ケース4では1m/sから1.5m/s で高い.(15)式から管内流速が早すぎると土砂濃度が低下 する.一方で遅すぎると排砂量が低下する.このため時間 当たりの吸引輸送量と管内流速の関係を確認した上で排 砂に最適な管内流速の検討が設計上必要となると考える.

以上から,排砂施設の設計にあたっては,吸引部の深 度と管内流速を考慮する必要であり,このことを踏まえ て設計手順を検討すると,吸引部の最深位置を検討した 後,最深部での目標土砂濃度を設定,その場合の目標管 内流速を検討し,目標管内流速以上の流速が清水時に確 保できる施設に設計していく手順になると考えられる.



図-19 止水バルブ全開時の管内流速と吸引輸送量の関係

4. おわりに

以上,本研究の成果は次のとおりである.

(a)排出土砂濃度の計測法について、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を確認した.

(b)この装置を用い水位差が約2.6mの条件で管径100mm の排砂管による4ケースの水理実験を行い、土砂濃度 が高くなると管内流速が低下する関係やバルブ操作 による管内閉塞は生じないことなどが明らかとなり 排砂管の排砂能力を評価するためなどに必要となる 排砂管の施設設計に向けた有用な知見が得られた.

今後は、本研究の知見を踏まえ実用規模と考えられる 管径300mmについて検証しながら粒径,吸引部深度,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.

謝辞:本実験では、国土交通省国土技術政策総合研究所 のご協力をいただいた.ここに謝意を表す.

参考文献

- 櫻井寿之,箱石憲昭:潜行吸引式排砂管の現地排砂 実験,土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69,No.4, I _1075-I_1080,2013.
- Miyakawa, M., Hakoishi, N. and Sakurai, T. :Development of the Sediment Removal Suction Pipe by Laboratory and Field Experiments, Dams and Reservoirs under changing Challenges "82th Annual Meeting of ICOLD 2014", pp.V-15-V-24, International Commission on Large Dams, Bali, Indonesia. 2014.
- 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.
- 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.
- 5) 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.
- Durand R.: Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes-Experimental Research, IAHR 5th Congress, Minneapolis, pp.89-103, 1953.
- 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.
- 8) 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,No42,1967.

(2019.4.2受付)