# 潜行吸引式排砂管の土砂輸送特性と管損失の評価

AN EVALUATION OF THE PIPE LOSS AND THE CHARACTERISTICS OF SEDIMENT SLURRY TRANSPORTATION ABOUT THE BURROWING TYPE SEDIMENT REMOVAL SUCTION PIPE

# 宮川 仁<sup>1</sup>・高田 翔也<sup>2</sup>・宮脇 千晴<sup>3</sup>・石神 孝之<sup>4</sup> Masashi MIYAKAWA, Shoya TAKATA, Chiharu MIYAWAKI 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 研究員(〒305-8516 つくば市南原1-6)
 3正会員 同上 特任研究員(〒305-8516 つくば市南原1-6)
 4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 difference between the upstream and downstream areas of a dam. In this study, we have carried out a sediment discharge laboratory experiment to confirm effectiveness of the sediment concentration measurement system, an evaluation of the pipe loss, and the sediment discharge characteristics of a 300mm pipe. As a result, it is confirmed the system can measure detail sediment concentrations, and the detail pipe loss coefficient and sediment slurry transportation characteristics were found by the system. The burrowing type sediment removal suction pipe method will be expected to one of the effective sediment discharge technology.

# *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,吸引能力の向上に向けた取組 を行い,排砂管の有効性を確認してきている<sup>1,2,3</sup>).しか し,実際のダムでの堆砂対策技術として活用可能な規模 が不明であることや排砂管の施設を設計する上で必要と なる管損失の評価ができていない.

そこで、本研究では安価に製作できる最大規模の管径 300mmについて室内実験を実施し、流量・土砂濃度計測





装置<sup>3)</sup>の有効性を確認した上で時間当たりの排砂量や排 出される土砂濃度(以下,排出土砂濃度)と管内流速の 関係を把握するとともに,管損失の評価を行い排砂管の 設計法を示す.そして排砂管がダムでの堆砂対策技術と なりうることを示す.また既報<sup>3)</sup>の管径100mmの実験結 果と比較を行い管径の違いによる管損失の評価も行った. 排砂管の堆砂設置状況と吸引部の構造を図-1,図-2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、吸引部と上流管の底面には管径の半分の大きさの土砂吸引口を配している.管径300mmの排砂管の吸引部の直径は1.5mで吸引部底面に直径150mmの土砂吸引口を7個、上流管底面に直径150mmの土砂吸引口を250mm間隔で5個配置しており、吸引部の重量は約700kgである.

## 2. 実験概要

## (1) 実験方法

実験は図-3に示す水槽で実施した.排砂管は,土砂を 水槽内に床板から約2.5mの高さまで投入した後,土砂表 面上に設置した.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300mmの塩化ビニ ル管を接続し,下流に図-4に示す流量・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.既報<sup>3)</sup>と同様の方法で 給水,管終端部との水位差を約2.3m程度確保する.管終 端部は床板から約1mに位置し,吸引部が床板に到達す ると管終端部より低くなる.土砂は図-5に示す既報<sup>3)</sup>と 同様の粒度分布で粒径0.053mm~3.35mmで構成される平 均粒径0.55mmの混合粒径砂を使用した.なお,本研究 で言う土砂濃度とは,(1)式で示す体積土砂濃度を指す.

$$C = V_s / V \tag{1}$$

ここに*C*:体積土砂濃度,*V<sub>s</sub>*:土粒子の実質部分の体積 (m<sup>3</sup>),*V*:土砂混じりの水の体積(m<sup>3</sup>)を表す.

実験は、バルブを全開にして開始し、吸引部での土砂 吸引と自重により潜行する条件で実施し、表-1の項目を 計測した.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%未満とした.

以上から管径300mmの土砂濃度計測装置の有用性,排砂量,土砂濃度と管内流速の関係,管損失を分析した.

### (2) 管径300mm土砂濃度計測装置の土砂濃度の計測方法

既報<sup>3)</sup>では管径100mmの土砂濃度計測装置の有用性を 確認した.本稿では管径を300mmに拡大した場合の土砂 濃度計測装置の精度検証を行った.図-4に示す濃度計測 区間の重量を荷重計で計測することで,管内の土砂濃度 (以下,管内土砂濃度)の清水のみと土砂混合時の重量 の比から(2)式により管内土砂濃度に換算した.この管内 土砂濃度C<sub>1</sub>について,管内に土砂の堆積がない場合は 排出土砂濃度と一致するが,土砂が堆積した場合は排出 されない(移動していない)土砂の重量(濃度)が含ま れるため排出土砂濃度とは異なる.このため,堆積した 場合に(3)式~(5)式で管内土砂濃度を補正し排出土砂濃 度を推定した.なお,解析では秒単位で取得した計測値 は流体が概ね5秒で吸引部から吐口部まで到達すること を踏まえ5秒平均値を採用した.

$$C_1 = \frac{\frac{W}{\frac{W_w}{\rho_w} - 1}}{\frac{\rho_s}{\rho_w}} = \frac{\frac{W}{\frac{W_w}{\rho_s} - 1}}{\gamma_s - 1}$$
(2)

$$S = R^{2} \cos^{-1}\left(\frac{(R-a)}{R}\right) - (R-a)\sqrt{\left(R^{2} - (R-a)^{2}\right)}$$
(3)

$$Ra = 1 - \left(\frac{S}{R^2 \pi}\right) \tag{4}$$

$$C_2 = \frac{1}{Ra} \left[ \left( \frac{W}{W\omega} - 1 \atop \gamma_s - 1 \right) - (1 - Ra)(1 - \varepsilon) \right]$$
(5)



ここに $C_1$ :管内土砂濃度または排出土砂濃度,W:土 砂混合時の流体荷重(g),Ww:水のみの荷重(g), $\rho_w$ :水 の密度(g/cm<sup>3</sup>), $\rho_s$ :土砂の密度(g/cm<sup>3</sup>), $\gamma_s$ :土粒子比 重,S:堆積断面積(cm<sup>2</sup>),R:管半径(cm),a:堆積厚 (cm),Ra:流積比, $\epsilon$ :空隙率(0.4),v:管内流速(cm/s),  $C_2$ :堆積層が生じた際の排出土砂濃度を表す.

## 3. 実験結果および考察

#### (1) 管径300mm土砂濃度計測装置の精度検証

図-6に管径300mmの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3m/s未満の場合に堆積層が生じた.このため流速3m/s 未満については流況観察から堆積厚を計測して(3)式によ り堆積厚に相当する土砂の断面積を計算し,(4)式により 堆積土を考慮した土砂の断面積の比率を控除した流積比 を求めた.図-7左図に示す流積比と管内流速との関係か ら近似式(6)式を算出して(5)式で補正し排出土砂濃度を



求めた.また,既報<sup>3)</sup>の管径100mmの実験の吸引部を制 御しないケースにおける流積比は流速2m/s未満の場合に 堆積層が生じたことから図-7右図の関係から(7)式を用い て算出している.

また,摺動流と堆積流の境界流速として代表的な Durandの堆積限界流速<sup>4)</sup>の(8)式がある.

$$v_L = F_L \sqrt{4gR(\gamma_s - 1)} \tag{8}$$

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-8),g:重力加速度(m/s<sup>2</sup>)を表す.

管径300mmでの粒径0.053mm~3.35mmの土砂濃度2%~ 15%の堆積限界流速は0.62m/s~4.67m/sの範囲となり, 流速3m/sはこの範囲の中で、実験の現象と合致した.

実験は図-9に示すように3時間行い,土砂濃度計測装置による計測から求めた総排砂量は50.19m<sup>3</sup>(空隙率0.4含む)となった.実験前後の水槽内の土砂の測量から総排砂量を計算し,土砂濃度計測装置から計算された総土砂量と比較した.図-10に実験後の水槽内の状況と縦横断測量結果から得た河床高を示す.等高線法により求めた総排砂量は48.96m<sup>3</sup>(空隙率0.4含む)となった.2%程度の差はあるが,管径300mmの土砂濃度計測装置においても精度の高い排出土砂濃度が計測できたと考えられる.

## (2) 管径300mmでの排砂量と管内流速と土砂濃度の関係

実験では図-9および図-11に示すように実験開始直後 から吸引部は潜行し、概ね30分で吸引部が水槽の床板に 到達し、潜行中は排出土砂濃度が上昇するとともに管内 流速が低下する現象が確認された.図-9に示したとおり



1時間で概ね50m<sup>3</sup>の排砂を確認した.この結果から排砂 管4系統の48時間の洪水中に運用できれば9600m<sup>3</sup>相当の 土砂が排砂できることになり、実際のダムにおける堆砂 対策に活用可能な規模と考えられる.図-12に管径 100mmと管径300mmの管内流速と排出土砂濃度の関係 を示す.清水時は管径300mmの流速が約3.4m/s,管径 100mmの流速が約2.8m/sで管内流速が異なる.また,管 径300mmでは土砂濃度の上昇に伴って管内流速が低下し, 管径100mmでは流速2m/sまでは管内流速が低下した.こ れは吸引部からの土砂吸引量の増加に伴う損失の増加に よるものと考えられる. また管径100mmの流速1.2m/sか ら2m/sの間は、流速と排出土砂濃度は正の相関となった. これは排砂管の吸引部が水槽の床板に到達、土中に完全 に埋まったことで、吸引部の損失が変化したことや側部 の土砂しか吸引されないため土砂吸引量が低下したため と考えられる.

## 4. 排砂管の管損失の評価

### (1) 排砂管の管損失の考え方

排砂管は吸引口から堆砂を管内へ吸引し、輸送管を通 じて土砂のスラリー輸送によりダム下流河川へ排出する ものである.このため土砂を含む管内の流体の水に対す る比重は、1より大きくなり(9)式により求められる.管 内は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-13を参照)と速度水頭は

比重を考慮した(10)式,(11)式と表わすことができる. また,圧力水頭は(12)式となる.

$$\gamma = (1 - C) + \gamma_s C \tag{9}$$

$$H_h = \gamma (h - H_o) + H_o \tag{10}$$

$$H_v = \gamma \frac{v^2}{2g} \tag{11}$$

$$H_p = \frac{p}{\rho_w g} \tag{12}$$

ここに $\gamma$ :管内比重, C:排出土砂濃度,  $H_h$ :位置水 頭(m), h:管の任意位置の高さ(m),  $H_o$ :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(13)式となる.さらに,損失水頭は管内 流速と比重の関係式となると考えられることから(14)式



と仮定すると,損失水頭を考慮したベルヌーイの定理を 適用すると(15)式が成立する.これにより排砂管の施設設 計では流速, 圧力,位置(特に吸引部),損失の水頭と 有効落差の関係から設計できる.

$$H_e = (H_n - H_i) + \gamma (H_i - H_o)$$
<sup>(13)</sup>

$$H_f = F \gamma \frac{v^2}{2g} \tag{14}$$

$$(H_n - H_i) + \gamma (H_i - H_o) = \gamma \frac{v^2}{2g} + F \gamma \frac{v^2}{2g}$$
(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),  $H_f$ : 管内での吸引や曲がり等の抵抗や摩擦 による損失水頭(m), F:全管路損失係数,  $P_h$ :任意の 位置hでの圧力(kN/m<sup>2</sup>)を表す.

ここで, 吐口部を基準(*H*<sub>o</sub>=0)とし(15)式を管内流 速で整理すると(16)式となる.

$$v = \sqrt{\frac{2g(H_n - H_i + \gamma H_i)}{\gamma(1 + F)}}$$
(16)

さらに、全管路損失係数Fは(17)式に示すように、吸 引部、管路部、その他の吐口部までのすべての損失係数 の和で表すことができる.

$$F = f_i + f_l \frac{L}{D} + f_{etc} \tag{17}$$

ここに $f_i$ :吸引部の損失係数, $f_l$ :摩擦損失係数,  $f_{etc}$ :その他曲がり等管路内の損失係数の和,D:管径 (m),L:管長(m)を表す.

以上,全管路損失係数Fを求めれば(16)式から土砂濃 度Cに対する管内流速vが算定可能となり,排砂設備と して排出可能土砂濃度が明らかとなる施設設計ができる.

#### (2) 管損失,損失係数およびその評価

そこで実験結果を基に管損失を求め,損失係数を評価 する.管径300mmの全管路損失係数Fと管内流速の関係 を図-14に,管径100mmでの全管路損失係数Fと管内流 速の関係を図-15に示す.管径300mm,管径100mmとも に管内流速の低下とともに,全管路損失係数が上昇傾向 にある.特に,管径100mmに着目すると,管内流速2m/s より低下すると急激に損失係数が増加していることがわ かる.管内流速2m/sは管径100mmにおける堆積層が形成 される流速であり,管路における土砂堆積が損失係数の 増大に関係しているものと考えられる.管径300mmにお いても管内流速3m/sよりも小さくなった場合は損失係数 が上昇する傾向も見受けられる.

また, 管径300mmおよび既報<sup>1)</sup>の管径100mmでの実験 において, 管内の圧力を図-16, 図-17に示す吸引部の直 下流(①), サクション部の終端部(②), 流量計の下



流部(③)で計測した.この計測結果から有効落差と① の全エネルギー水頭の差から吸引部での損失水頭,①と ②の全エネルギー水頭の差からサクション部での損失水 頭,②と③の差から下降部での損失水頭,③と速度水 頭との差から水平部での損失水頭を求める.管径300mm における圧力計測位置での全エネルギー水頭と排出土砂 濃度の時間変化を図-18に,管径100mmにおける圧力計 測位置での全エネルギー水頭と排出土砂濃度の時間変化 を図-19に示す.管径300mm,管径100mmともに,土砂 濃度が上昇すると全エネルギー水頭が低下していること がわかる.この結果を基に管径300mm,管径100mmそ れぞれの全管路損失係数を(18)式のとおり分割した.



$$F = f_{i} + f_{s} \frac{L_{s}}{D} + f_{d} \frac{L_{d}}{D} + f_{L} \frac{L_{L}}{D}$$
(18)

ここに $f_i$ :吸引部の損失係数, $f_s$ :サクション部の損失 係数, $f_d$ :降下部の損失係数, $f_L$ :水平部の損失係数,  $L_s$ :サクション部の管延長(m), $L_d$ :降下部の管延長(m),  $L_i$ :水平部の管延長(m)を表す.

**表−2**に各箇所における損失係数の範囲を示す. 管径が 小さくなると損失係数の最大値が大きくなることや吸引 部が管路に比べて損失係数が大きいことがわかる.また, 図-20に管径300mmと管径100mmの吸引部の損失係数fiと 排出土砂濃度の関係を,図-21に管径300mmと管径 100mmのサクション部の損失係数fと排出土砂濃度の関 係を、図-22に管径300mmと管径100mmの降下部損失係 数faと排出土砂濃度の関係を,図-23に管径300mmと管 径100mmの水平部の損失係数fiと排出土砂濃度の関係を 示す. なお、図中にはそれぞれの損失係数に管内比重y を考慮した値も記載した.清水時の損失から変動がみら れる. 特に、 管径100mm については、 土砂濃度10% 以上 となった場合は損失係数が2分されている.これは、前 述したとおり吸引部が床板付近となって、吸引機構が変 化したことや十砂が管路部に堆積したことなどによるも のと考えられる.

また,ここでポンプ浚渫において用いられている長谷 川ら<sup>5)</sup>が提案した送泥時の管路摩擦係数fi'を算出する(19) 式,(20)式がある.

$$f_l' = \alpha \times f_l \tag{19}$$

$$\alpha = 1 + \beta(\gamma - 1) \tag{20}$$

ここに*f<sub>l</sub>*':送泥時の管路摩擦係数,*f<sub>l</sub>*:送水時の管路摩 擦係数,α:送泥時の管摩擦損失係数の増加割合,β:材料 係数(**表-3**)を表す.

ここで、 $f_i'は比重\gammaが考慮された損失係数となっているため、実験から求めた水平部の損失係数<math>f_i$ に比重を考慮した $f_i$ と比較した.なお、本実験で使用した土砂は細砂で材料係数として $\beta$ =3を採用するのが妥当と考えられるが、比較のため $\beta$ =2および $\beta$ =4の値も計算した.図-24



に管径300mmと管径100mmの水平部損失係数と排出土 砂濃度の関係を示す.材料係数として過大な傾向はある が,土砂濃度が10%程度と小さい場合には,実験から得 られたyfiは長谷川の式から得られるfi'と概ね合致してお り,設計において長谷川の式を採用しても問題ないとい える.一方,管径100mmのケースのように土砂濃度が 10%を超えた,長谷川の式から求められるfi'と実験値yfi が大きくかい離する場合(前述の吸引部が土砂に埋まり 吸引機構が変化した状態)は長谷川の式が適用できることが わかった.一方,管径100mmでは長谷川の式を適用でき ない場合があるが,土砂濃度が大きい場合であり,設計 しようとする土砂濃度を所定以上とする考え方であれば, 長谷川の式を適用することで足り,設計において土砂濃 度が大きい場合は考慮しなくても良いと考えられる.

以上,排砂管の損失係数を評価した.設計では(1)の考 え方により現場条件を基に吸引部位置を設定,目標とす る土砂濃度を設定し図-20~図-23の傾向を踏まえて損失 係数を求めて管内流速を求め施設設計が可能となる.

# 5. まとめ

本研究の成果は次のとおりである.

(1) 土砂濃度計測装置について,既報<sup>3)</sup>で構築した管径 100mmの装置を管径300mmに拡大しても精度の高い排 出土砂濃度が計測できることを確認した.

(2)この計測装置を用いた水位差が概ね一定の条件の水 理実験の結果から、管径300mmについてはダム貯水池の 堆砂処理量として相応の排砂が可能な規模であることを 確認した.また、排砂管の設計において、これまで不明 であった、管径や排出土砂濃度などの違いによる管損失 が求められ、さらに管内流速を算出することにより施設 設計が可能となった.これにより、排砂管が堆砂対策技 術の1つの実用技術となると示すことができたと考える.

なお、本検討では、単一の混合粒径砂を用いた場合で 整理した. 今後、粒径の違いによる損失係数の整理が汎 用化に向けては必要となると考える.

謝辞:本実験は国土交通省国土技術政策総合研究所の河 川水理実験施設を使用して実施した.ここに謝意を表す.

#### 参考文献

- 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.
- 宮川仁, 岩田幸治, 石神孝之: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,河川技術論文集, Vol.25, pp.753-758, 2019.
- Durand R.: "Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes-Experimental Research", IAHR 5th Congress, Minneapolis, pp.89-103, 1953.
- 5) 長谷川源太郎,八木得次,徳永省三:運輸技術研究所別冊 浚渫ポンプの性格とその使用法,三角舎,p.11,1958. (2020.4.2受付)