

鉛直二重管吸引工法による排砂実験および その排出土砂濃度の推定方法

SEDIMENT DISCHARGING TESTS OF VERTICAL MULTI-HOLES DOUBLE-PIPES SYSTEM AND DEVELOPMENT OF ESTIMATION METHOD OF DISCHARGING SEDIMENT CONCENTRATION

前田圭介¹・庄路友紀子²・太田誠二³
Keisuke MAEDA, Yukiko SHOJI and Seiji OOTA

¹正会員 電源開発(株) 技術開発部 茅ヶ崎研究所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

²正会員 電源開発(株) 技術開発部 茅ヶ崎研究所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

³正会員 電源開発(株) 技術開発部 茅ヶ崎研究所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

Currently, sediment removal method using suction pipe is researched as an effective method for discharge of accumulated sediment in dam reservoir. Vertical multi-holes double-pipes system is one of the method and has been researched for practical application in dam site. This paper shows the laboratory tests of the system and the verification of the result of the tests. Firstly, the laboratory tests by small model and nearly full-scale prototype system was carried out to check the suction ability. Secondly, the hydraulics model was constructed with results of the tests. Finally, the estimation method of discharging sediment concentration with the flow and the loss of pressure in the pipe has been developed.

Key Words : dam, reservoir sedimentation, suction pipe, hydraulic model test, sediment concentration, vertical multi-holes double-pipes system

1. はじめに

近年、ダム貯水池における堆砂処理および山地から海岸までの土砂移動の連続性確保を目的として、排砂バイパストンネル等の排砂施設や置き土による下流河川への堆砂の供給が進められている。しかしながら、排砂バイパストンネル等の排砂施設については、建設費用がかなり高額になることから、国内では数地点での採用に留まっている。また、置き土については、ダム貯水池で浚渫・掘削した後、積込、運搬、土砂の投入・整形といった一連の作業が必要となる。こうした状況を踏まえ、近年、効率的な堆砂の排除および土砂移動連続性の確保を目的として、ダム貯水位とダム下流水位の水頭差を利用した吸引方式排砂工法の開発がダム管理者、研究機関等で進められている¹⁾²⁾。吸引方式排砂工法とは、ダム水位とダム下流側の放流地点の水頭差を利用して、管路型の設備に通水し、それに伴い管底又は管側面に設けた吸砂口付近で発生する負圧により管内へ堆砂を吸引し、輸送管を通じてダム下流へ排出するものである。吸引方式排砂工法は、貯水池内に固定設置する固定式と台船等で

移動しながら吸引する移動式に大別されるが、電源開発(株)では、従来の固定式工法³⁾に比べて、貯水池への設置を比較的容易に行える工法として、鉛直二重管吸引工法⁴⁾を考案した。本論文では、本工法の小型模型実験およびプロトタイプシステムによる室内実験を実施し、同工法の水理メカニズムと土砂の吸引能力について報告する。また、同工法を実ダムへ適用する際には、長時間の稼働となり、排出土砂濃度に応じて吸砂口の開閉を自動で制御する仕組みが望ましいことから、管内流量と圧力損失の計測値から排出土砂濃度を推定する方法について述べる。

2. 鉛直二重管吸引工法の概要

鉛直二重管吸引工法は、管側面に開口部を有する鋼管(外管)と開閉装置付きの吸砂口を設けた鋼管(内管)を組合せた二重管構造を持つ工法である。本工法は取水口付近など局所的に堆砂が堆積する場所に適用することで、比較的簡易な施工により省力化した形で堆砂処理ができる可能性がある。また、本工法は鉛直管を二重にす

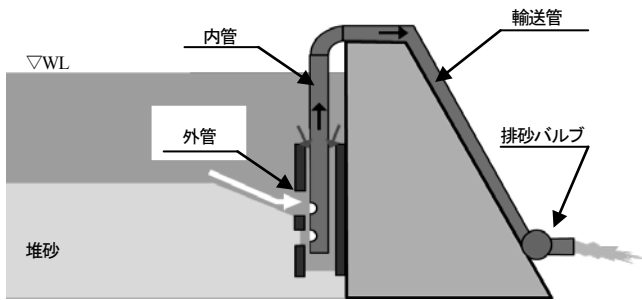


図-1 鉛直二重管吸引設備の設置イメージ

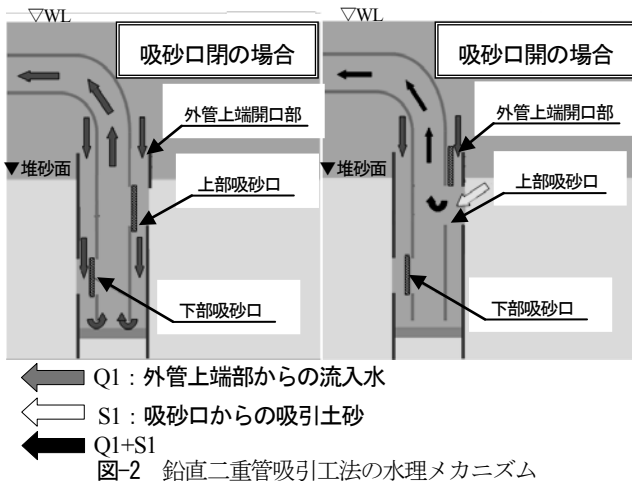


図-2 鉛直二重管吸引工法の水理メカニズム

ることで、本設備が堆砂で埋没し、自立した状態でも内管と外管の間に水みちが確保され、堆砂の吸引を行える特徴を有している。本設備の設置イメージを図-1に、水理メカニズムを図-2に示す。堆砂を吸引するためには、排砂バルブを開き、管内流量を定常状態にし、上部・下部吸砂口を順次開又は閉とすることで、外管上端開口部から流入する水が外管と内管の間を流下し、その際に生じる負圧により堆砂は吸引される。吸引後は鉛直二重管吸引設備を中心とした堆砂の水中安息角に基づいたすり鉢が形成される。

3. 小型模型実験による吸引能力の検証

(1) 実験概要および実験結果

本工法の土砂吸引能力を確認するために、始めに、小型模型による実験を実施した。実験設備の概要および実験に用いた圧力計設置位置を図-3に示す。

小型模型実験設備を設置した水槽内に厚さ1.4mの土層を整形し、水頭差4.4mを維持しながら、実験を行った。実験中は、間隙水圧計による圧力低下量、電磁流量計による管内流量、実験後の測量による吸引土量、採水による排出土砂濃度の計測を実施し、またビデオ撮影により管内流動状況を確認した。実験では、内管径0.2m、外管径0.3m、吸砂口径0.12mのCase1を基本とし、外管の大口径化（Case2）、吸砂口の大口径化（Case3）を行い、吸

表-1 小型模型実験条件およびその結果

Case	条件			平均流量 (L/sec)	吸引能力 (m³/h)	最大土砂濃度 (%)
	内管径 (m)	外管径(m)	吸砂口径 (m)			
1	0.2	0.3	0.12	54.1	13.2	17.4
2	0.2	0.4	0.12	63.0	8.5	4.0
3	0.2	0.4	0.20	58.0	9.5	17.4

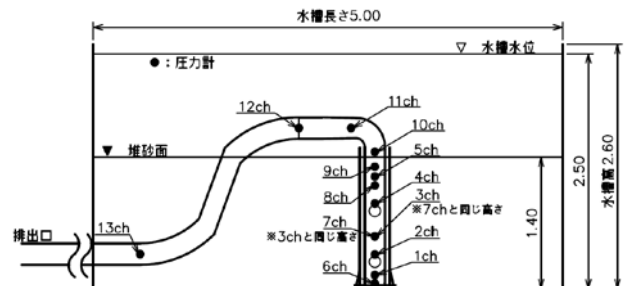


図-3 小型模型実験設備概要および間隙水圧計設置位置
(1～5ch 内管, 6～9ch 外管, 10～13ch 輸送管)

引能力の違いを確認した。小型模型実験条件およびその結果を表-1に示す。実験結果から以下の知見が得られた。

- ① Case1とCase2を比較した結果、内管径が同一の条件の時、外管径が小さい方が吸砂口付近の速度水頭が大きくなり、土砂の吸引能力は大きくなる。
- ② Case2とCase3を比較した結果、内管径と外管径が同一の条件の時、吸引口径が大きい方が吸砂口での土砂の通過面積が大きくなり、土砂の吸引能力は大きくなる。

(2) 水理モデルの構築

次に、土砂輸送に係る水理モデルを構築し、実験結果を用いてモデルの検証を行った。モデルの基本式には以下に示すベルヌーイの式を用いた。

$$H = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 + \frac{p}{\rho g} + z + \sum h_L \quad (1)$$

H : 全水頭(m), g : 重力加速度(m/s^2)

Q : 管内流量(m^3/s), A : 管路断面積(m^2)

p : 管内圧力(Pa), ρ : 流体の密度(kg/m^3)

z : 位置水頭(m), h_L : 損失水頭(m)

損失水頭には形状損失および管路摩擦損失があり、管路摩擦損失は以下のように表され、土砂輸送が伴う際には清水輸送時の管路摩擦損失係数のみでなく、土砂輸送により増加する管路摩擦損失係数が含まれる⁵⁾。

$$h_f = \lambda \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \frac{L}{D} \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_w + \lambda_s = \lambda_w (1 + \phi C) \quad (3)$$

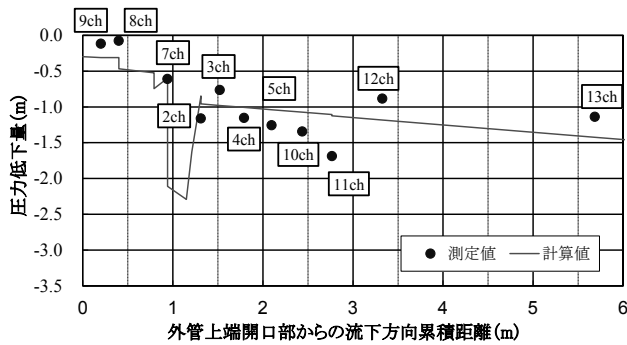


図-4 圧力低下量の測定値と水理モデルによる計算値の比較
(Case1 下部吸砂口開 排出土砂濃度17.4%の場合)

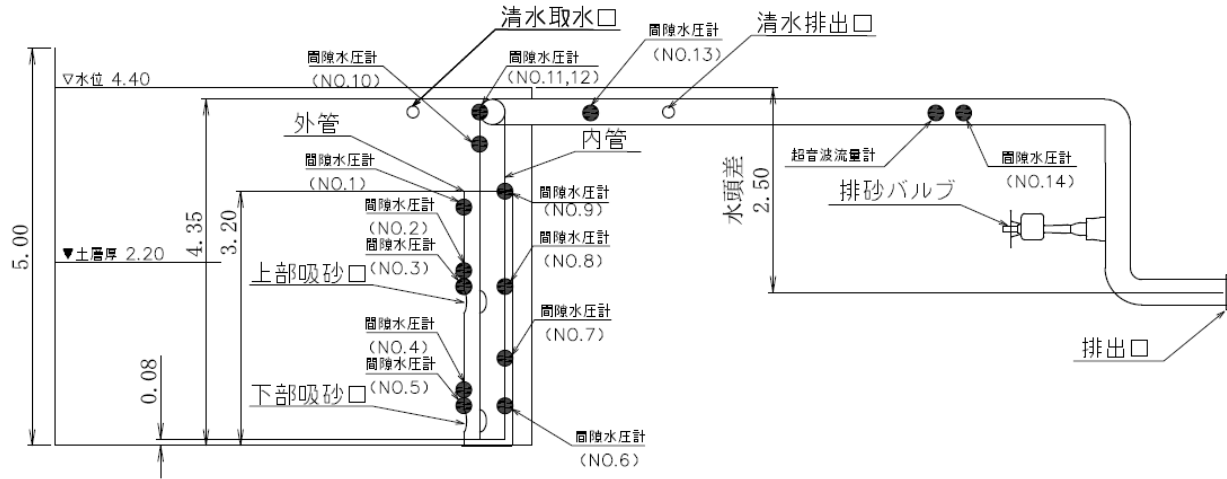


図-5 プロトタイプシステム断面図

h_f : 摩擦損失(m), λ : 管路摩擦係数,

L : 管路長(m), D : 管内径(m)

λ_w : 清水輸時の管路摩擦係数

λ_s : 土砂輸送により増加する管路摩擦係数

C : 管路内の土砂体積濃度

本論文では、圧力損失係数 ϕ の定義式として、土砂の粒度分布を考慮できるKazenskiy⁶⁾の圧力損失式を用いた。以下に定義式を示す。

$$\phi = 180 D^{0.5} V^{-3} \left(Fr_{xj}^{1.5} \right)^{0.5} \quad (4)$$

$$\overline{Fr_{xj}^{1.5}} = \sum (Fr_{xj})^{1.5} X_n / 100$$

Fr_{xj} : 各土粒子粒径とその沈降速度によるフルード数

X_n : 各粒径の百分率

土砂輸送により増加する摩擦損失については上記の式を用いて導出し、その他の損失については、水理公式集⁷⁾や岡野ら⁸⁾を参考とし、小型模型実験の水理モデルを構築した。図-4に圧力低下量の計測値と水理モデルによる計算値の比較を示す。7chと2chの間は下部の吸砂口部に相当し、その部分では断面積が変化するため、圧力低下量の計算値は大きく変化している。その他の範囲においては、11chの計測値は計算値よりもやや低いものの、計

表-2 プロトタイプシステム設備諸元

項 目	内 容
鉛直二重管 (内管)	管直径 0.30m 高さ 4.35m
鉛直二重管 (外管)	管直径 0.60m 高さ 3.20m
吸砂口 (開閉装置付)	2門 (直径0.28m) 上部吸砂口高 1.36m, 下部吸砂口高 0.17m
清水取水管	管直径 0.15m 長さ 4.0m
輸送管	管直径 0.30m 総延長 10.8m
水槽寸法	幅4.7m×長さ6.0m×高さ5.0m

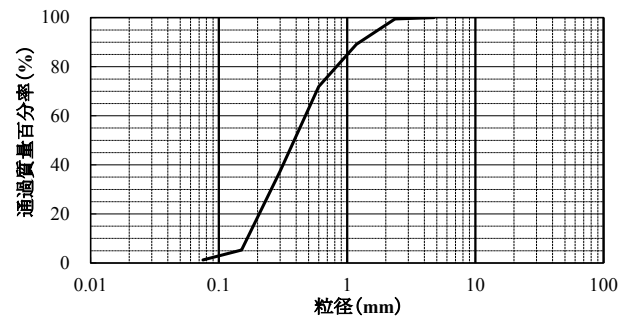


図-6 実験砂粒度分布

測値と計算値は概ね合っており、本モデルを用いることで管路内の圧力低下量の変化を概ね表現可能であることを確認した。

4. プロトタイプシステムによる実験

(1) 実験概要

小型模型実験から得られた知見を踏まえ、実際のダムへの適用を目指し、実機の1/3～1/2規模の鉛直二重管吸引工法設備のプロトタイプシステムを開発した。プロトタイプシステムの断面図を図-5に、その設備諸元を表-2に示す。また、実験では、D50粒径0.4mm程度の砂質土を使用した。実験砂の粒度分布を図-6に示す。本実験で

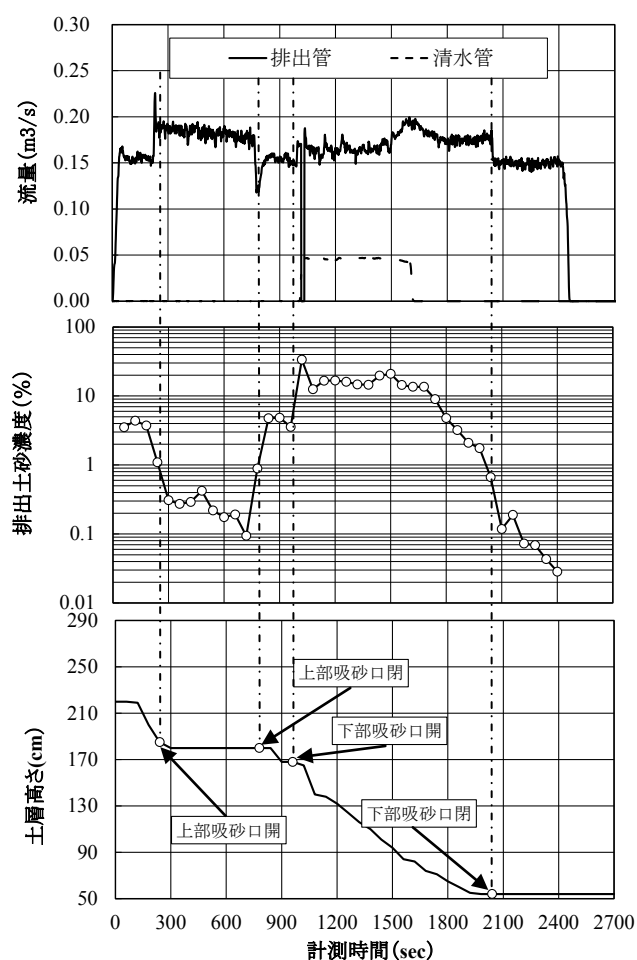


図-7 プロトタイプシステム実験結果（上段：管内流量・清水取水管流量，中段：排出土砂濃度，下段：土層高さ）

は、土層高さ2.2mとなるように土を整形し、水頭差2.5m程度で一定となるように水槽内へ給水をしながら土砂吸引を行った。実験では、管内流量が定常状態となつてから吸砂口の開操作を行い、土層高さの変化がみられなくなった段階で吸砂口の閉操作を行った。また、管路内の土砂濃度上昇による管内閉塞防止機能として、鉛直二重管とは別の呑口より水槽貯水のみを取水する清水取水管を取り付け、それを輸送管と接続し、必要に応じて管路内の土砂濃度を低下させることができるよう改良を行った。

(2) 実験結果

清水取水管流量を含む管内流量および清水取水管流量、排出土砂濃度、鉛直二重管近傍の土層高さの経時変化を図-7に示す。排出土砂濃度の経時変化から、上部吸砂口の開操作後は排出土砂濃度は上昇していないことがわかる。このとき、土層高さも変化していないことから分かるように、上部吸砂口敷居高より上に堆積する土量が少ないためであると考えられる。一方、下部吸砂口の開操作後は、管内流量が大きく変動していることが確認できる。これは下部吸砂口が開いたと同時に水槽の底面か

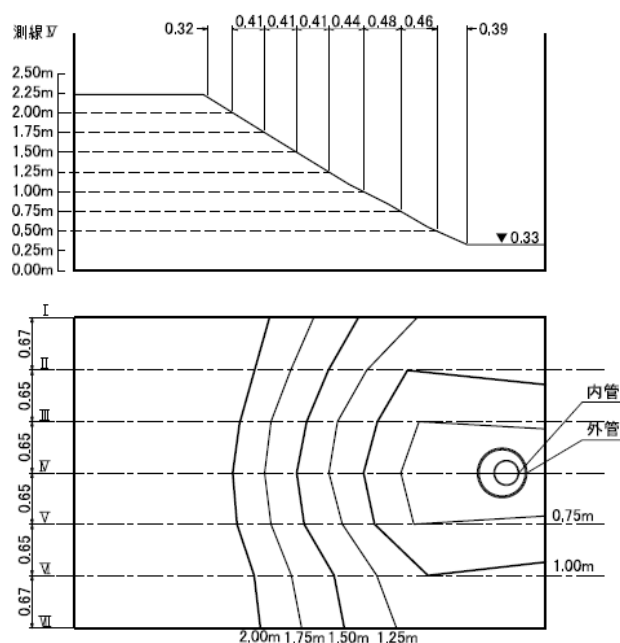


図-8 吸引土量の測量結果

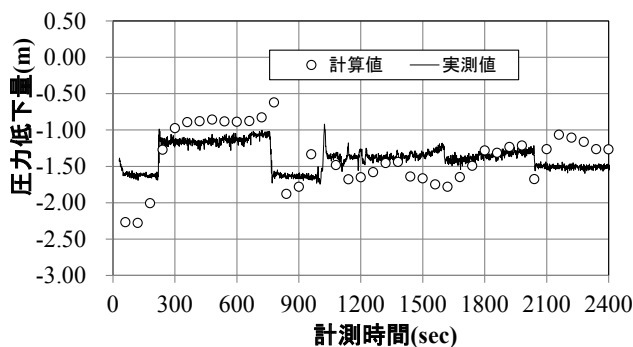


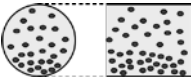
図-9 輸送管における圧力低下量の計算値と実測値の比較

ら約1.7m程度堆積している土層が吸砂口内に流れ込み、管路内の土砂濃度が急激に増加し、水が流れにくくなったためと考えられる。その際の排出土砂濃度は33.6%であり、輸送管底部には堆積層が生じ、管内閉塞が発生しやすい状態であった。その後、清水取水管からの取水を開始したことにより排出土砂濃度は減少し、管内流量も定常状態となった。その後は下部吸砂口を閉じるまで土砂が吸引され続け、排出土砂濃度は徐々に減少した。

次に、実験終了後に行った水槽内土層の測量結果を図-8に示す。吸引後の土層形状は概ね鉛直二重管を中心としたすり鉢状になっており、吸砂口正面の測線（測線IV）では0.33mまで土層が吸引されている。実験後に測量した結果、全吸引土量は実験開始から終了するまでの40分間で約15m³のものであることが確認された。

次に、小型模型実験結果から構築した水理モデルをプロトタイプシステムにおいても適用し、水理モデルの適用性を検証した。輸送管（水平管部分）の圧力低下量の計算値と計測値の比較を図-9に示す。ここで、水理モデルによる計算に用いた土砂濃度および流量は実測値を用

表-3 管路内の粒子輸送形態の分類¹⁰⁾

流れ区分	輸送形態	流速
浮遊流れ		大
摺動層流れ		浮遊速度 V_n
部分堆積層流れ		堆積速度 V_d
堆積層流れ		堆積限界速度
		小

いている。比較の結果、本モデルによる計算値と計測値は概ね合っており、本モデルは実規模程度の設備仕様の場合においても適用可能であることが確認された。

5. 排出土砂濃度の推定

鉛直二重管吸引設備を実ダムへ適用する際には、下流への過剰な土砂供給を避けるために排出土砂濃度に応じて吸砂口の開閉を自動で制御する仕組みが望ましいことから、プロトタイプシステム実験結果から排出土砂濃度の推定方法を検討した。推定式にはTurianら⁹⁾による管路摩擦係数の式を変形して用いた。以下に推定式を示す。

$$C = \left[\frac{1}{a} \frac{\lambda_s}{\lambda_w^b \cdot C_D^c \cdot \left[\frac{V^2}{gD(S-1)} \right]^d} \right]^{1/e} \quad (5)$$

C : 排出土砂濃度, C_D : 抗力係数, S : 土粒子比重

a, b, c, d, e : 土砂の輸送形態に依存する係数

また、土砂輸送により増加する管路摩擦係数 λ_s は次式のように与えられる。

$$\lambda_s = \lambda - \lambda_w = \Delta P \frac{2g}{V^2} \frac{D}{L} - \lambda_w \quad (6)$$

ΔP : 水平管内の異なる2点間の圧力損失(m)

V : 管内流速(m/s)

ここで、式(5)は土砂の輸送形態により各係数が変化するため、まずは、実験時の土砂の輸送形態を検証した。既往の研究¹⁰⁾によると、管路内の粒子輸送形態は表-3のように分類され、その輸送形態は、管内流速により変化する。管内流速が遅い時は管底の粒子が移動しない「堆積層流れ」であるが、徐々に管内流速を上げると、一部の粒子が掃流状態で移動する「部分堆積層流れ」となる。さらに管内流速をあげると粒子層が滑動と停止を繰り返しながら管底を移動する「摺動層流れ」が発生し、また

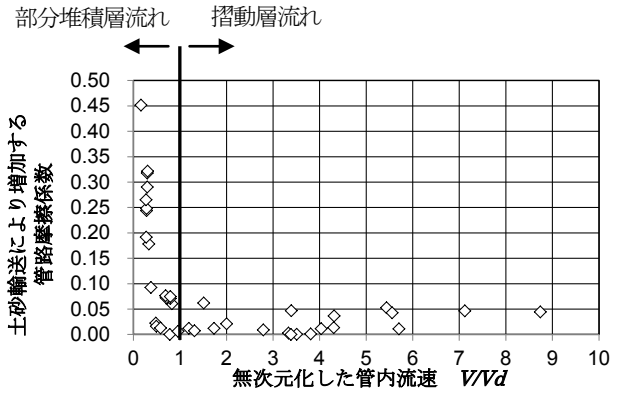


図-10 部分堆積層流れと摺動層流れの判定

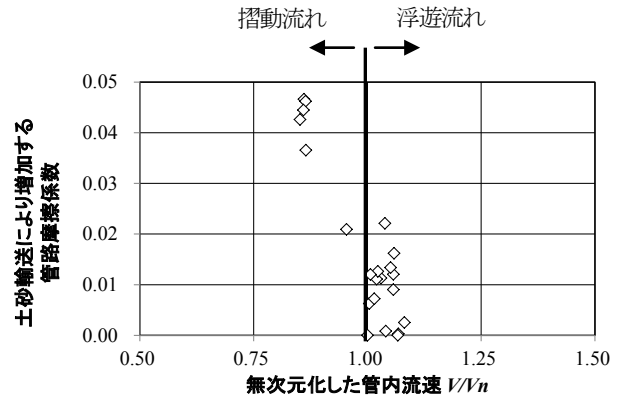


図-11 摺動層流れと浮遊流れの判定

さらに管内流速を上げると、徐々に摺動層が減少し、最終的には粒子が管内を浮遊しながら流れる「浮遊流れ」となる。各流れの変化点にあたる流速は流速の小さいものから堆積限界流速、堆積速度、浮遊速度とされ、このうち、堆積速度 V_d ¹¹⁾および浮遊速度 V_n ¹²⁾は次式で表される。なお、実験では堆積層流れは生じなかったことから、本検討では堆積層流れは考慮しないこととする。

$$V_d = \sqrt{\frac{40Cg(S-1)}{\sqrt{C_D}}} \quad (7)$$

$$V_n = 17V_{fall} \quad (8)$$

V_{fall} : 土粒子の沈降速度

上記の式を用いて、堆積速度および浮遊速度にて無次元化した管内流速と土砂輸送により増加する管路摩擦係数との相関関係を整理し、土砂の輸送形態の判定を行った。ここで、土粒子の沈降速度は実験砂の粒度分布とRubeyの沈降速度¹³⁾より決定した。判定結果を図-10および図-11に示す。部分堆積層流れと摺動層流れの判定については、土砂輸送により増加する管路摩擦係数が概ね0.05を超えると部分堆積層流れが発生することがわかる。特に下部吸砂口を開けている時は部分堆積層流れとなる傾向が強く、実験時の目視による管内の流動状況と一致する。次に、摺動層流れと浮遊流れの判定については、土砂輸送により増加する管路摩擦係数0.02が摺動層流れと浮遊流れの境界となっていることがわかる。これは上

表-4 Turianら⁹⁾による¹⁾管路摩擦係数の式の係数

係数	部分堆積層流れ	摺動層流れ	浮遊流れ
<i>a</i>	0.4036	0.9857	0.5513
<i>b</i>	0.7717	1.0460	1.2000
<i>c</i>	-0.4054	-0.4213	-0.1677
<i>d</i>	-1.0960	-1.3540	-0.5938
<i>e</i>	0.7389	1.0180	0.8687

部吸砂口を開いている時および下部吸砂口の閉操作直前の吸引土量が少ない時であり、実験時の管内の流動状況と一致する。よって、本検討では土砂の輸送形態を以下の条件で場合分けし、排出土砂濃度の推定に用いた。

$\lambda_s \geq 0.05$ の場合：部分堆積層流れ

$0.02 \leq \lambda_s < 0.05$ の場合：摺動層流れ

$\lambda_s < 0.02$ の場合：浮遊流れ

上記の条件を用いて表-4に示す係数を選択し、式(5)に用いることで水平管内の異なる2点間の圧力損失と管内流量の計測値から排出土砂濃度の推定を行った。なお、推定対象範囲は管内流量が定常状態の場合とした。排出土砂濃度の推定値と計測値の比較結果を図-12に示す。その結果、推定値と計測値の傾向は概ね一致しており、推定式を用いることにより、排出土砂濃度をある程度推定可能であることが確認された。

6. おわりに

本論文では、鉛直二重管吸引工法の小型模型実験およびプロトタイプシステム実験を行うとともに、管内流量と圧力損失の計測値を用いて排出土砂濃度を推定した結果、以下の知見が得られた。

1. 小型模型実験を行い、本工法の基本的な土砂吸引能力を確認した。また、実験結果から構築した水理モデルを用いて圧力低下量を定式化し、水理メカニズムを明らかにした。
2. 実規模に近いプロトタイプシステム実験を行い、土砂の吸引能力を確認した。また、清水取水管からの取水により管内の土砂濃度を低下させることで管内閉塞状態を解消できることを確認した。
3. プロトタイプシステム実験結果を小型模型実験から得られた水理モデルに適用した結果、実規模に近い設備においても構築した水理モデルは有効であることを確認した。
4. プロトタイプシステム実験では、部分堆積層流れ、摺

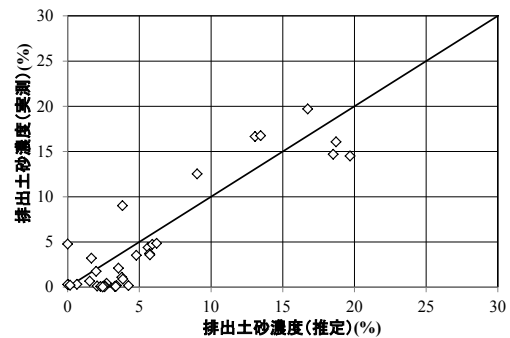


図-12 排出土砂濃度の推定値と計測値の比較

動層流れおよび浮遊流れのいずれかで土砂輸送されており、その輸送形態を土砂輸送により増加する管路摩擦係数で凡そ判定できることを確認した。

5. Turianらの理論式と水平管内の異なる2点間の圧力損失と管内流量の計測値を用いること排出土砂濃度を推定できることを明らかにした。

参考文献

- 1) ダム水源地土砂対策技術研究会：鉛直埋設吸引管排砂工法の実験的検討，第57回水工学講演会，2013。
- 2) 櫻井寿之，箱石憲昭：潜行吸引式排砂管の現地排砂実験，第57回水工学講演会，2013。
- 3) 橋本徹：ダムや堰などの貯水池に堆積した土砂を排出する Hydro技術，大ダム，No.183，85-89，2003-4。
- 4) 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，2014 5月号，pp54-58
- 5) スラリー輸送研究会：スラリー・カプセル輸送技術要覧，耕文社，1984。
- 6) Kazanskij, I. : Scale-up Effects in Hydraulic Transport Theory and Practice, Hydrotransport 5, May 1978, paper B3, pp. 47-79
- 7) 土木学会：水理公式集，平成11年度版，土木学会
- 8) 岡野眞久，俣野文孝，片山裕之，田島芳満，中川一：水圧吸引土砂排除システムの排砂機能に関する研究，ダム工学，Vol.14, No.4, pp.237-249, 2004。
- 9) Raffi M. Turian and Tran-Fu Yuan. : Flow of slurries in pipelines, AIChE Journal Vol. 23, Issue 3, 1977
- 10) 野田佳六：土砂の管路輸送，水工学に関する夏期研究会講義集，Aコース-3, pp1-16, Aコース，1986
- 11) Zandi, I. and Govatos, G. : Heterogeneous Solid Transportation in Pipelines, Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.93, pp. 145-159, 1967
- 12) Newitt, D. M. , Richerdson, J. F. , Abbot, M. and Turtle, R. B. : Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes, Trans. Inst. Chem. Engrs. , Vol.33/2, pp.93-103, 1955.
- 13) Rubey, W. W. : Settling velocity of gravel, sand, and silt particles, American Journal of Science, Vol.25, pp. 325-338, 1933.

(2015. 4. 3受付)