滑り外管付きサイフォン吸引パイプによるダム内堆積物の浚渫*

Dredging of Sediment in Dam Utilizing Siphonage with Sliding Outer Tube

田 島 直 樹** 佐田富 道 雄*** 川 原 顕磨呂*** 寺 田 秀 平†
 TAJIMA Naoki SADATOMI Michio KAWAHARA Akimaro TERADA Syuhei

Abstract This study is concerned with a siphonage with a sliding outer tube, aiming at the collection of sediments, causing a decrease in pondage as well as water pollution in dams. Experiments were performed using siphon pipes of 20 mm and 30 mm I.D. and five kinds of particles with different densities and dimensions. Measured parameters are the volume fraction of the particle in the siphon pipe, the flow rates of water and the particle. The effects of particle diameter and density and the level difference from water surface to siphon exit were investigated. In addition, a performance prediction model is proposed and tested to know its applicability as a design tool of actual large scale systems.

Keywords: Siphonage, Level Difference, Sediments, Particles, Performance Prediction Model

1. 結 言

治水において重要なダム湖では、上流から水とともに流れてきた土砂が湖底に堆積して、それが貯水量低下や水質悪化の原因となっている。そこで、ダムの長期運用のために、湖底の堆積物を随時排出できるシステムの開発が望まれている。

堆積物を除去する方法としては、ポンプを用いる除去（例えば[1]）やバケット浚渫（例えば[2]）が一般的であるが、大きな動力と高額な費用を必要とする。そこで、佐田富はサイフォンの原理を用いて低動力で運転可能な堆積物排出装置[3]を考案した。サイフォンを用いる先行技術には、ダム湖内で 2 つの管にパイプを渡し片方の管の中の水をポンプで排水することにより高低差を作り出し堆積物を排出する技術[4]やダム湖の壁面

にバイパストンネルを設けることにより管水路の効果による排出とサイフォン効果による排出とを使い分ける技術[5]等が考案されている。しかし、前者は常時ポンプを使うために大きな動力を必要とし、後者は付加設備が大きく既存のダムに設置するのは難しい。また、後者は堆積物の連続的な排出ができず、ほとんどの時間は水のみを流出させるという欠点を有しており、共に実用化に至っていない。それに対して、佐田富が考案した装置 [3]は、サイフォン管への設置当初の給水時を除き外部動力を用いる必要がなく、堆積物を連続的に排出可能であり、構造が簡単であるために制御や保守管理が容易であるという利点を有する。しかしながら、特許出願時点[3]では簡単な実現性確認実験を行っただけであったので、実現化

* 2009.11.25 受付

** 熊本大学大学院自然科学研究科機械システム工学専攻 〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1

TEL: (096)342-3748 E-mail: 080d8525@st.kumamoto-u.ac.jp

*** 熊本大学大学院自然科学研究科先端機械システム講座

† エアーネクスト株式会社

を目指すためには、ダム湖等へ設置する大型装置の設計に利用可能な性能予測モデルを開発する必要があった。そこで、そのモデル化に必要な情報を実験室規模の内径が 20 mm と 30 mm の小型装置の実験から得るとともに、一次元の簡単なモデルを立案して、本実験によりその検証を行おうとするのが本研究の目的である。

2. 提案装置[3]の概要

2.1 原理

本研究が対象とする堆積物排出装置[3]の作動原理の基礎知識として、まずは水のみを排出する場合について、Fig. 1 により作動原理を説明する。サイフォン管を水槽の壁面を跨ぐように取り付け、そのサイフォン管内を水で満たすことにより水槽内の水が排出される。具体的には、弁 1 と 2 を閉じた状態で弁 3 を開けて給水してサイフォン管を水で満たしたのち、弁 3 を閉じて弁 2 を開ける。そして、水を排出する時には弁 1 を開けて作動させる。

サイフォン管から排出できる水の流量は、水槽の水面とサイフォン管出口間のエネルギー保存式、式(1)、から求めることができる。

$$p_0 + \frac{\rho v_1}{2} + \rho g H = p_0 + \frac{\rho v_2}{2} + (\zeta_I + 2\zeta_E + \lambda \frac{l}{d}) \frac{\rho v_2}{2} \quad (1)$$

ここで、 p_0 は大気圧、 ρ は水の密度、 v は平均速度、 g は重力加速度、 H は水槽の水面からサイフォン管出口までの高低差、 ζ_I は入口損失係数、 ζ_E は曲がり損失係数、 λ は管摩擦係数、 d と l は管の内径と全長である。添字の 1 は水槽の水面、2 はサイフォン管出口を表す。ダム等の貯水池の水面はサイフォン管の出口面積と比較して格段に広く、サイフォン管から水を排出しても水面の降下は無視できるので、 $v_1 = 0$ である。式(1)を排出速度 v_2 について変形すると次のようになる。

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gH}{1 + \zeta_I + 2\zeta_E + \lambda \frac{l}{d}}} \quad (2)$$

結局、水槽の水面とサイフォン出口との高低差 H の平方根に比例した速度で水は排出される。

水のみを排出する場合のサイフォン管吸引部

は管を切断したままで良いが、一緒に堆積物も排出しようとすれば吸引部に工夫を要する。例えば、その吸引口を堆積層の上面に接した状態から作動させると、当初は堆積物も吸引するが、堆積層がえぐれて管入口との距離が増していくと次第に水のみを吸引するようになる。そこで、それを避けるために吸引部にシート状の部材を取り付ける工夫[6]なども行われている。

Fig. 1 Principle of siphon.

2.2 吸引部

特許出願[3]の吸引部は、Fig. 2 に示すように入口部 4 とサイフォン管 5 が二重管構造となっており、入口部 4 がそれ自体の重みにより自動的に降下できる仕組みとなっている。これにより堆積物を吸引し、その堆積物の堆積層の表面が下がってもそれに応じて入口部 4 も自動的に下がるため粒子との間隔を適切に保ったまま連続的な吸引が可能であり、堆積物の吸引性能が高い。その上下運動に加えて、ダムの突堤に設けた水平移動用レール 9 と、支柱 10 を回転中心として吸引部を回転できる水平支持棒 8 の利用によって、広範囲の堆積物を吸引できるよう考慮した。

次に吸引部 4 について説明する。吸引部 4 は、上部円板、同じ直径の下部金網（サイフォン管の半径よりも大きな石等によるサイフォン管の閉塞防止用）、整流板、そして汚泥を浮揚させるための加圧水の噴射装置 6 からなる。整流板を設けた理由は、自由渦の発生により土砂に遠心力が働

くのを抑えるためである。これにより、土砂が水流速の大きい管中心部分を通ることができ、管の摩擦を少なくすることができる。加圧水の噴射装置は、堆積物が固化した粘土状の場合に、その堆積物を砕いて水の通過を可能にするためのものである。一般的な砂地のように堆積層が水が通過することができる場合は、この水の噴射装置は必要ではない。

Fig. 2 Principle of the proposed siphon system.

3. 模擬装置による実験

Fig. 3 に本実験装置を示す。地上 2.4 m の位置に直径 55 cm、高さ 85 cm の水槽を置き、水槽壁を跨ぐようにサイフォン管を垂直下向きに取り付け、水面近くと出口には弁を取り付けた。水槽には、常温の水道水と堆積物を模擬した粒子を入れた。粒子は Table 1 に示す 5 種類を用いた。SP-01&SP-04 は実際の堆積物は様々な粒径のものが分布していることを考慮して、SP-01 と SP-04 を同体積ずつ均一に混ぜたものである。SP-01、SP-02、SP-04 はそれぞれ粒径の揃った粒子であるのに対して、砂の粒径は 0.4-4 mm の範囲で分布している。サイフォン管は内径 20 mm および 30 mm の 2 種類を準備し、水槽水面とサイフォン出口との高低差は 1.5-2.0 m の範囲において 0.1 m 間隔で設定可能とした。なお、特許出願[3]に記した吸引部の平行移動・回転運動は、水槽の大きさの関係により本装置では行わなかった。また、下部金網と整流板は、本サイフォン管と粒子の大きさ

では必要ないと判断し装着しなかった。さらに、加圧水の噴射装置は、20 mm サイフォンにおける砂の実験でのみ閉塞を起こす場面があったので使用した。

Fig. 3 Experimental apparatus.

Table 1 Specification of particles.

Name	Average diameter mm	Materials	Density kg/m ³
SP-01	1.21	Aluminium oxide	3690
SP-02	2.12	Aluminium oxide	3690
SP-04	4.03	Ceramics	2600
Sand	1.16	Sand	2557
SP-01 & SP-04	1.28	Aluminium oxide & Ceramics	3145

実験では、サイフォン管の出口を所定の高低差に設定した条件で水槽内の水と粒子をサイフォン管により排出し、排出後に両者を分離器により分離した。その後、水は下部水槽へ排出され、粒子は台秤の上のバケツへ排出された。実験中は、水と粒子の排出分と同体積の水を下部水槽内の水中ポンプで汲み上げて水槽に戻し、水槽の水面

高さを一定に保った。これは、ダムでは浚渫により水と土砂を排出しても水位の変化はほとんどないためである。本実験の測定パラメータは、サイフォン管内の粒子の体積率と排出した水と粒子の流量であり、サイフォン管内の粒子の体積率は検定済みの定電流法[7]で、水と粒子の流量は両者を分離後にそれぞれ電磁流量計と重量法で、測定した。

4. 解析

実用化のためには実機の設計に使える性能予測モデルが必要である。そのために解析を行った。解析ではサイフォン管内の水と粒子の混合物を均質混合流体[8]と仮定し(妥当性については付録1参照)、基礎式は水槽の水面－サイフォン出口間のエネルギー保存式である。

$$\begin{aligned} p_0 + \rho_L \frac{v_{L1}^2}{2} + \rho_L gH = p_0 + \rho_H \frac{v_{H2}^2}{2} + \\ \zeta_P \rho_L \frac{v_{L2}^2}{2} + \left(\zeta_I + 2\zeta_E + \lambda \frac{l}{d} \right) \rho_H \frac{v_{H2}^2}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、添字の L は水を、 H は均質混合流体を、1 は水槽の水面、2 はサイフォン出口を表す。右辺において、 ζ_P は水が粒子層を通り抜ける時の損失係数、 ζ_I は入口損失係数、 ζ_E は曲がり損失係数、 λ は管摩擦係数(ブラジウスの式で計算)である。式(3)はサイフォン管の出口を基準高さとしており、左辺は水槽の水面におけるエネルギーを、右辺は管出口におけるエネルギーと諸損失を表している。なお、水槽(ダム)の水面は十分に広く水面の降下は無視できるので、 $v_{L1} = 0$ である。そこで、式(3)を整理して簡単化すると、管出口の排出速度 v_{H2} について次式を得る。

$$v_{H2} = \sqrt{\frac{2\rho_L gH}{\rho_H (1 + \zeta_I + 2\zeta_E + \lambda \frac{l}{d}) + \zeta_P \rho_L (1 - \beta_S)^2}} \quad (4)$$

ここで、 β_S は水と粒子の均質混合流体中における粒子の体積流量率(= $Q_S/(Q_L + Q_S)$)である。なお、均質混合流体では、速度は水と粒子で等しく($v_L = v_S = v_{H2}$)、粒子の管内体積率 α_S は体積流量率 β_S に等しいので、均質混合流体の密度 ρ_H は次式で与えられる。

$$\rho_H = \rho_L (1 - \beta_S) + \rho_S \beta_S \quad (5)$$

そして、均質混合流体では $v_{L2} = v_{H2}(1 - \beta_S)$ となるので、管断面積を A とすると、水と粒子の体積流量、 Q_L と Q_S 、は次式で求められる。

$$Q_L = v_{H2}(1 - \beta_S)A, \quad Q_S = v_{H2}\beta_S A \quad (6)$$

結局、 β_S を諸パラメータで相関できれば、 Q_L と Q_S は計算できる。そこで、Table 2 に示す各実験における β_S の値を見ると、粒径が小さく、粒子の密度が大きく、サイフォン管径が大きいかほど β_S の値が高いことが分かる。そこで、これらのパラメータを用いて β_S を相関した結果、式(7)の実験式を得た。ただし、相関に際しては β_S の測定精度が高いTable 2に四角で示す5条件の実験値に重きを置いた。

$$\beta_S = 2.61 \left(\frac{d_p}{d} \right)^{-0.67} s^{0.30} \left(\frac{v_P d_P}{v_W} \right)^{0.11} \quad (7)$$

ここで、 d_p は粒子の平均直径、 d はサイフォン管内径、 s は粒子の比重、 v_P は静止水中における粒子の自由沈降速度、 v_W は水の動粘度であり、 $v_P d_P/v_W$ は粒子レイノルズ数である。

Table 2 Experimental data of β_S .

Diameter of siphon pipe mm	Particles	Average diameter of particles mm	Density of particles kg/m ³	β_S %
20	SP-01	1.21	3690	49.8
	SP-02	2.21	3690	35.0
	SP-04	4.03	2600	23.9
	Sand	1.16	2557	35.0
30	SP-01	1.21	3690	58.5
	SP-02	2.21	3690	45.9
	SP-04	4.03	2600	32.0
	Sand	1.16	2557	53.6
	SP-01&SP-04	1.28	3145	52.3

式(7)による β_S の計算値と実験値との誤差をFig. 4に示す。計算値は20 mm サイフォンの砂の実験点を除き8%以内の誤差で実験値に一致している。なお、20 mm サイフォンの砂の実験で誤差が大きくなった理由は、砂が閉塞するのを防ぐために、

この条件でのみ吸引部に水を供給しながら実験を行ったためである。

さらに、式(4)における ζ_p には予備実験で求めた値(実験法の詳細は付録2参照)を用い、 ζ_l は1.56、 ζ_e は1.13で一定値として与えた。

Fig. 4 Comparison of β_S between calculation and experiment.

5. 実験結果および考察

5.1 予測モデルの検証

Fig. 5-7 に計算値と実験値の比較例を示す。横軸は水槽水面と管出口との高低差 H であり、縦軸は流量である。水と粒子の流量の実験値をそれぞれ●と◆で示している。いずれの図でも高低差 H が大きくなるにつれて、水と粒子の流量が少しずつ増えている様子がわかる。

計算値は、 ζ_p 値が違う場合の2種類を実線で示している。予備実験で求めた ζ_p を用いた時の計算値を太い実線で、 ζ_p を変化させ計算値が実験値とほぼ一致したときの計算値を細い実線で示す。便宜上、前者を ζ_p の予備実験値、後者を ζ_p の補正值と呼ぶことにする。 ζ_p の補正值の算出過程では、4章の解析における式(4)-(6)の β_S には実験値を使用した。それは、 β_S に式(7)による計算値を用いて解析を行うと、 β_S に関する式(7)の予測誤差が Q_L と Q_S の計算にも影響するからである。

Fig. 5 は、20 mm サイフオンの SP-04 に関する比較結果であり、 ζ_p の予備実験値は補正值とかなり異なるため、 Q_L と Q_S の計算値も実験値と大きく異なる。20 mm サイフオンでは ζ_p を求める予備実験においてフランジを粒子層に10 mm 埋めた

が、10 mm よりも深く埋めた実験も行っており ζ_p を見

Fig. 5 Comparison of Q_L and Q_S between calculation and experiment (SP-04, $d = 20$ mm).

Fig. 6 Comparison of Q_L and Q_S between calculation and experiment (SP-01, $d = 30$ mm).

Fig. 7 Comparison of Q_L and Q_S between calculation and experiment (SP-01&SP-04, $d = 30$ mm).

直す必要が有りそうである。一方、細い実線で示した ζ_p に補正値を用いた時の計算値は、Fig. 4に示した誤差が β_s に含まれているにも関わらず実験値とよく一致している。

Fig. 6は、30 mm サイフンの SP-01 に関する結果 (ζ_p は予備実験値を使用) である。おおむね計算値は実験値と一致しており、 ζ_p に予備実験値を用いた性能予測モデルで予測可能といえる。なお、30 mm サイフンの ζ_p を求める予備実験ではフランジを 20 mm 埋めた。

Fig. 7は、30 mm サイフォンにおいて、SP-01と SP-04を同体積ずつ混ぜた混合粒子の場合である。 ζ_p には予備実験値を使用し、 β_s には式(7)による計算値 56.7 % (ただし、式中の d_p には粒子個数の重み付き平均値を採用)を用いた場合の計算値を太い実線で、 β_s に実験値 52.7 %を用いた場合の計算値を破線で、それぞれ示している。いずれの計算値も高低差に対する変化の傾向は実験値と定性的に一致するが、定量的には破線のほうが良い。従って、性能予測モデル自体の有用性は混合粒子の場合もあると考えるが、 β_s のわずかな違いが Q_L と Q_S の計算値に大きく影響するので式(7)についてはさらなる改良が必要と思われる。

Fig. 6と7に関する ζ_p の予備実験においては、フランジを粒子層に 20 mm 埋めて行った。その結果、予備実験値と補正値がほぼ一致した。従って、予備実験ではフランジを 20 mm 埋めれば実際の吸引の状況を再現できると思われる。

今後の課題として、水が粒子層を通り抜ける時の損失係数 ζ_p を粒子の粒径、サイフォン管の管径などで相関する実験式を開発することが挙げられる。

5.2 Q_L と Q_S に及ぼすサイフォン内径の影響

本研究では、サイフォン内径の変化が Q_L と Q_S に及ぼす影響を調べるために 20 mm と 30 mm の 2 種類のサイフォン管で実験を行った。20 mm サイフォンに対して 30 mm サイフォンでは、水と粒子の流量が何倍に増えたかを Fig. 8 に示す。これを見ると、サイフォン管の内径を 20 mm から 30 mm に変えることにより断面積が 2.25 倍大きくなるため、水の流量はほぼ同じ 2.25 倍となっている。他方、粒子の流量はその増え方が 3.5~4 倍となっており、サイフォン断面積の倍率の 1.5 倍程度である。このように粒子の流量の増え方が水よりも大きい理由は、粒子径/サイフォン内径の比が 30 mm サイフンのほうが小さいために粒子の運動に自由度があり、管径が大きいほうがよりスムーズに粒子を吸引できるためであろう。

Fig. 8 Effects of siphon diameter on the flow rates of water and particles.

6. 結 言

サイフォン吸引作用によりダムなどの堆積物を除去する装置の模型を作って実験と解析を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 堆積物の排出によって堆積部の上面が低下しても、それに応じて吸引部が下がったため、水だけでなく粒子の流量も高低差が大きくなるにつれて大きくなった。
- (2) 粒子の吸引に伴う堆積粒子層の減少に依らず、装置は連続的に定常的に水と粒子を吸引・排出できることが確認できた。
- (3) 水と粒子の吸引・排出流量は、式(4)-(6)の均質流モデルに粒子の体積流量率 β_s に関する式(7)の実験式を組み込むことにより、堆積粒子が混合粒子の場合も予測できることが明らかとなった。
- (4) サイフォン内径が大きいほど、水流量よりも粒子流量の増加割合が大きい。

今後の課題は次の 2 点である。(1)水が粒子層を通り抜ける時の損失係数 ζ_p を粒子が様々な場合について推定できるように実験値を増やして実験式を得ること、(2)より大きな装置を作って実験を行い、その実験値も予測できるようにモデルの修正を行って、実機の性能予測ができるようにすることである。

謝 辞

本実験装置の製作に協力いただいた熊本大学技術職員の有吉剛治氏に感謝の意を表する。

付録 1 均質混合流体の仮定の妥当性

均質混合流体の仮定に関する妥当性を調べるために、定電流法を用いて下降流における粒子の管内体積率 α_s を測定し、体積流量率 β_s の測定値と

比較した。その結果を粒子径が最大と最小の SP-04 と Sand の場合について Fig. A に示す。低 α_S における下降流のように粒子速度が水速度より大であれば $\alpha_S < \beta_S$ となるはずであるが、本実験における高 α_S の条件では、管直径と粒子寸法の如何に関わらず $\alpha_S = \beta_S$ に近いので、均質混合流の仮定はほぼ妥当といえる。なお、 $\alpha_S > \beta_S$ の実験点が多いのは、 α_S の増加によって粒子相互間ならびに粒子とサイフォン壁の間の干渉が大きくなり粒子速度のほうが遅くなったためと考える。

Fig. A Relation between volume fraction of particles, α_S , and volume flow rate ratio of particles, β_S .

付録 2 ζ_P に関する予備実験

粒子層を通る水流の損失係数 ζ_P を求める予備実験では、まず、吸引部下部のフランジに補強用の目の粗い金網を取り付け、薄手のストッキングで覆って粒子を吸引できない状態にした。次に、そのフランジを粒子層にフランジの厚さ分 (20 mm と 30 mm) のサイフォンでそれぞれ 10 mm と 20 mm) だけ埋めた状態 (粒子を吸引する本実験と類似の状態) で水のための吸引実験を行い、排出した水の流量を電磁流量計で測定した。この流量から平均速度 v_{L2} を求め、次式に代入して ζ_P を算出した。

$$p_0 + \rho_L \frac{v_{L1}^2}{2} + \rho_L gH = p_0 + \rho_L \frac{v_{L2}^2}{2} + \left(\zeta_P + \zeta_I + 2\zeta_E + \lambda \frac{l}{d} \right) \rho_L \frac{v_{L2}^2}{2} \quad (A1)$$

ここで、式(A1)は本文中の式(3)とほぼ同じであるが、この予備実験ではサイフォン管内は水だけの流れであるので式(3)の右辺第2項と第4項における ρ_H と v_{H2} はそれぞれ ρ_L と v_{L2} に変えた。

Nomenclature

A	: cross-section area of siphon pipe	[m ²]
d	: inner diameter of siphon pipe	[m]
l	: length of siphon pipe	[m]
p_0	: atmospheric pressure	[Pa]
g	: gravitational acceleration	[m/s ²]
H	: level difference	[m]
Q	: volume flow rate	[m ³ /s]
v	: velocity	[m/s]

Greek letters

α	: volume fraction	[-]
β	: volume flow rate ratio	[-]
ρ	: density	[kg/m ³]
λ	: friction coefficient for pipe wall	[-]
ζ_I	: inlet loss coefficient	[-]
ζ_E	: loss coefficient for 90 degrees elbow	[-]
ζ_P	: loss coefficient when water flow through particles bed	[-]

Subscripts

L	: liquid phase
S	: solid phase
H	: homogeneous mixture
1	: surface of water tank
2	: outlet of siphon pipe

参考文献

- [1] Hamada, S., Japanese Patent JP, 2002-266369, A, (2002).
- [2] Mishima, K., Japanese Patent JP, 2001-262613, A, (2001).
- [3] Sadatomi, M., Japanese Patent JP, 2008-223465, A, (2008).
- [4] Oigawa, S., Japanese Patent JP, 1998-183678, A, (2008).
- [5] Tsuchiya, Y., Japanese Patent JP, 2001-164543, A, (2008).
- [6] Nishimura, K., Japanese Patent JP, 2005-226403, A, (2005).
- [7] Fukano, T., Pulsative characteristics of two-phase gas-liquid upward flows in a pipe (in Japanese), Doctor's Thesis, Kyusyu university, Fukuoka, Japan, (1971).
- [8] The Japan Society of Mechanical Engineers ed., Handbook of Gas-Liquid Two-Phase Flow Technology, 60-72, Corona Publishing, Tokyo (1989).