

エアーバルブ排砂設備の排砂特性

独立行政法人 土木研究所水工研究グループ河川・ダム水理チーム

櫻井 寿之*

泉谷 隆志**

箱石 憲昭***

キーワード 堆砂・排砂設備・エアーバルブ放流設備・排砂実験・排砂特性

1. はじめに

ダムの堆砂は、通常 100 年間の貯水池への土砂流入量を見込んで計画堆砂容量を設定しており、堆砂の進行が予測どおりであれば、100 年間はダム本来の機能を活用することが可能となる。しかしながら、予測以上の土砂流入量がある場合や、堆砂容量を計画水平に堆砂することを前提に設定しているにもかかわらず、実際は傾斜して堆砂した場合などには、堆砂容量の上に確保している洪水調節や利水などのための貯水容量（有効容量）の減少といった問題が生じる。また、貯水池内に土砂が堆積することは、ダム建設前には下流河道へ流下していた土砂の一部を捕捉していることを意味し、河川毎に程度の差はあるものの河床低下や河床材料の粗粒化などの河川環境変化の問題が生じる。

このような問題を解決すべく、近年、貯水池内の土砂を下流へ供給する技術の開発が求められている。土砂供給手法としては、①貯水池の運用の変更（貯水位の低下など）を必要としない手法、②土砂供給量、供給時期、土砂の粒径について制御できる手法、③施設規模が比較的小さく経済的な手法が望ましいと考える。②の項目は自然の土砂流下状態に近い土砂供給を行うことを想定した場合に求められる。

具体的な土砂供給手法として、土砂フラッシング（出し平ダム、宇奈月ダムなど）、土砂バイパス（旭ダム、美和ダムなど）などの手法が実用化されている。これらの手法は、貯水池内の堆砂量が年間数十万 m^3 の規模であり、大量の土砂を排出する場合に有効な手法である。しかしながら、土砂フラッシングでは、貯水池内の掃流

力を大きくするために貯水位の低下が必要となり、利水目的を有する貯水池では低下した水位を回復させるために必要な期間が問題となる。土砂バイパスでは、出水時の比較的大きな流量をバイパスすることから、分派堰施設、バイパストンネル、減勢施設などの大規模な施設が必要となる。また、両手法とも排砂量は堆砂状況や流入量の条件に依存するため、排砂量の制御には限界があると考えられる。

そこで、土木研究所では貯水池の運用条件にかかわらず広範囲な貯水池に適用でき、ある程度排出土砂の質・量を制御でき、施設規模が比較的小さく経済的な土砂供給手法の開発を試みている。そのような手法の一つとしてダム堤体直上流などの位置に固定したエアーバルブ放流設備を利用した排砂設備¹⁾（以下、エアーバルブ排砂設備と称す）の研究を実施している。この手法はダム上下流の水位差のエネルギーを利用して排砂を行うものであり、施設一式当たりの年間排砂量として数万 m^3 程度を目標にしている。

本稿では、エアーバルブ排砂設備を用いて排砂を行うことを想定した実験を行い、排砂特性およびサイフォン管の切り替えに伴う排砂状況について得られた知見を報告する。

2. エアーバルブ排砂設備の概要

エアーバルブ放流設備とは、通常鋼製のゲートやバルブで放流管の開閉をするところをサイフォン管の頂部から空気の出し入れをすることで通水と止水（開閉）の操作を行う装置であり、取水設備として利用されている。

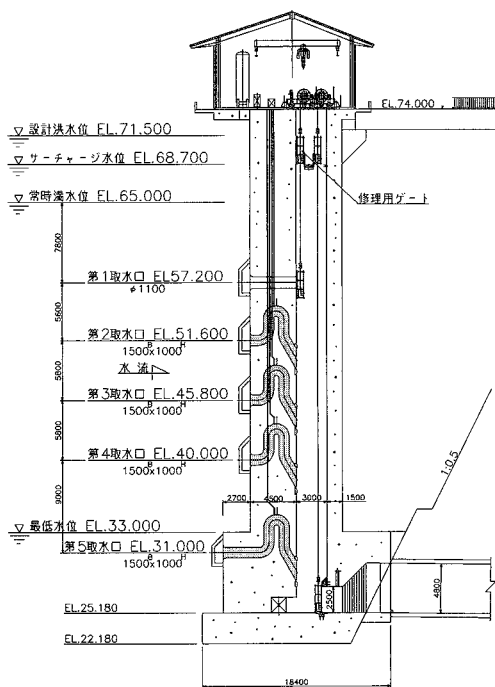
エアーバルブ取水設備（サイフォン式取水設備ともいう）の原型は、1960 年代にイギリスで開発され、1970 年代からはマレーシアにおいて数件建設事例がある。国内では、2001 年に羽地ダム²⁾（沖縄総合事務局）で初め

* 主任研究員

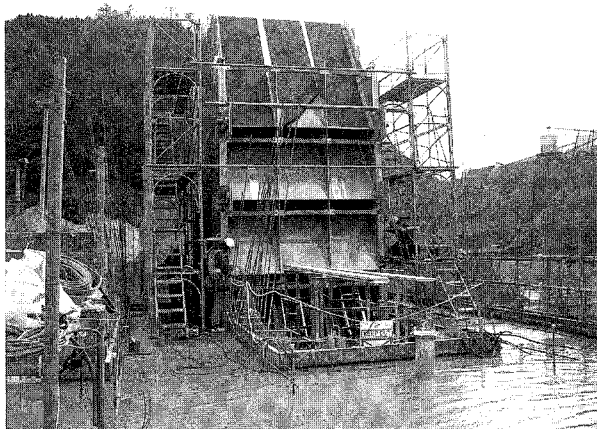
** 交流研究員

*** 上席研究員

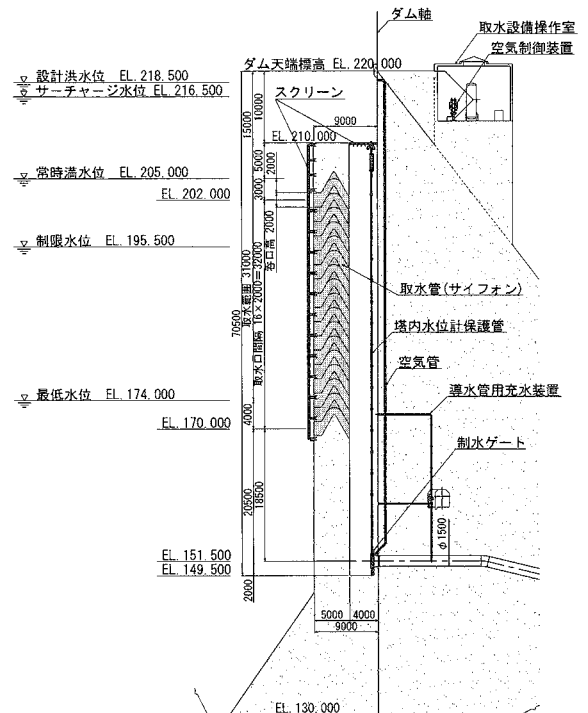
て選択取水設備として採用されている。羽地ダムの事例では、逆U字形状の取水管が水深方向に配置された多孔式タイプが用いられている（図－1）。近年では、多段式タイプと同様の取水性を確保するため、逆V字形状のサイフォン管を水深方向に連続して配置し、逆V字管の頂部から空気を出し入れすることで通水と止水（開閉）を行い、任意の標高から取水を可能とするエアバルブ取水設備（連続サイフォン式取水設備（図－2）ともいう）として、現在施工中の尾原ダム³⁾および志津見ダム（中国地方整備局）（写真－1）や夕張シューパロダム⁴⁾（北海道開発局）で採用されている。



図－1 エアバルブ取水設備（尾羽地ダムの事例）

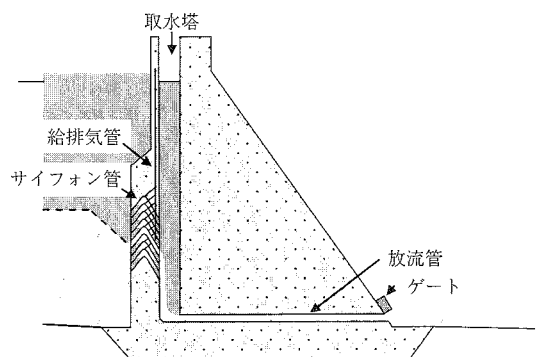


写真－1 エアバルブ取水設備（志津見ダム施行中の事例）



図－2 エアバルブ取水設備（尾原ダムの事例）

エアバルブ排砂設備は、主にサイフォン管、取水塔、空気制御装置、放流管（流量調節ゲートを有する）から構成される（図－3）。エアバルブ排砂設備の特徴として、サイフォン管を水深方向に連続して配置することにより、排砂に伴う堆砂面の低下に追従した呑口部の選択が可能となり、堆砂面に対して常に放流による吸引力を効率良く作用させられる点が挙げられる。また、サイフォン管の止水は、管の頂部に圧縮空気を送り込みサイフォン流を空気溜まりによって遮断すること（以下ではエアロックと称する）により行うため、呑口施設にゲートを有さず、ゲート操作に伴う土砂の噛み込みによる機能不能などのリスクを回避できるため、排砂設備への適用が有用と考えられる。



図－3 エアバルブ排砂設備（イメージ）

排砂手順としては、堆砂面の低下に追従するように、エアーバルブの開閉操作により通水するサイフォン管を上段管から下段管へと順次切り替えることにより排砂する（図－4）。具体的な手順は次のとおりである。

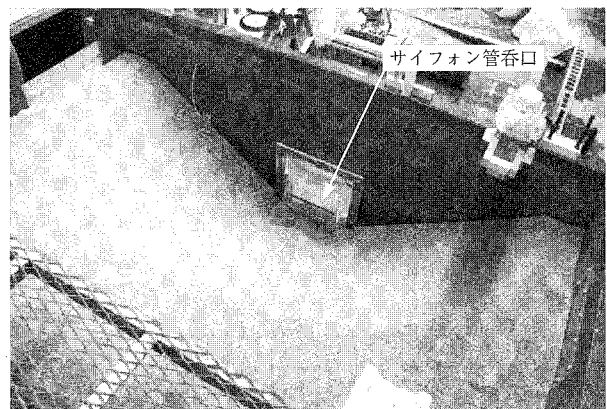
- ① 1 段目（最上段）のサイフォン管頂部に溜めた空気を抜いてエアーロックを解除して通水状態とし、下流の流量調節ゲートを開く。
- ② 1 段目のサイフォン管から排砂を実施。
- ③ 1 段目のサイフォン管からの排砂が終了した時点で、2 段目のサイフォン管のエアーロックを解除して通水状態とする（この時点では1・2 段目ともサイフォン管は通水状態となっている。）。
- ④ 1 段目のサイフォン管をエアーロックし、2 段目のサイフォン管から排砂を実施。
- ⑤ 堆砂面の低下に追従するように、③④の操作を繰り返し、順次サイフォン管を下段に切り替え、排砂を実施。
- ⑥ 下流の流量調節ゲートを閉じ、最下段のサイフォン管をエアーロックし、排砂終了。

なお、下流の流量調節ゲートを開いた状態で、すべてのサイフォン管をエアーロックした場合、取水塔内水位

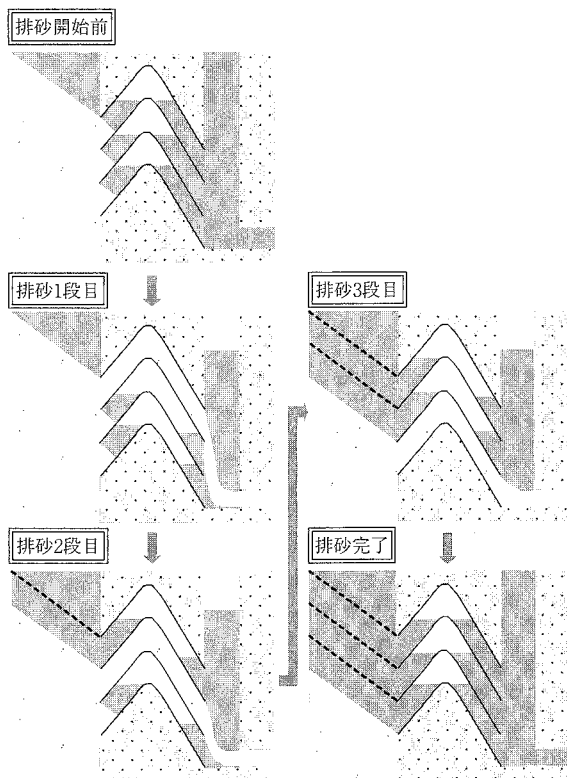
が急激に低下し、サイフォン管頂部に溜めた空気が下流の取水塔内へ抜けてエアーロックが壊れることになるため、少なくとも1 管は通水状態にしておく必要がある。

排砂後の貯水池内の堆砂形状は、サイフォン管呑口部を頂点とした概ね半円錐形状（写真－2）となることが想定されるため、この排砂設備一式で数十万 m^3 といった大量の土砂を排出するのは困難である。しかしながら、図－5 に示すように日本の貯水池では年平均堆砂量が数万 m^3 以下の貯水池も多く存在（年平均堆砂量1 万 m^3 以下の貯水池は約50%を占める）し、このような貯水池の機能を維持する場合には数万 m^3 の排砂能力を有する設備が有益と考えられる。

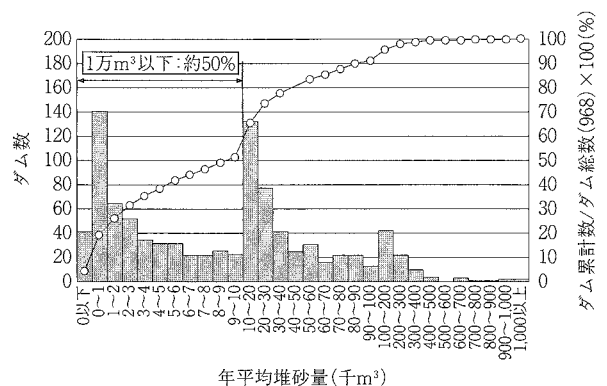
仮に一連の操作で1 万 m^3 程度の土砂を排砂する場合には、土砂の水中安息角度を 30° と仮定すると、高さ18.6 m、半径32.2 m 程度の半円錐形状を形成することになり、サイフォン管の呑口高を2 m と仮定すると、水深方向に10 段程度連続して配置した施設規模となる（表－1）。



写真－2 排砂後の堆砂形状



図－4 排砂手順



表一 1 サイフォン管からの排砂量の概略値

サイフォン管 段数 (最上段 からの配管)	排砂深度 (m)	排砂形状 の半径 (m)	排砂量 (1段当たり) (m ³)	総排砂量 (m ³)
1段	0.0～-2.0	3.5	13	13
2段	-2.0～-4.0	6.9	88	101
3段	-4.0～-6.0	10.4	239	339
4段	-6.0～-8.0	13.9	465	804
5段	-8.0～-10.0	17.3	767	1,571
6段	-10.0～-12.0	20.8	1,144	2,714
7段	-12.0～-14.0	24.2	1,596	4,310
8段	-14.0～-16.0	27.7	2,124	6,434
9段	-16.0～-18.0	31.2	2,727	9,161
10段	-18.0～-20.0	34.6	3,405	12,566

3. 実験方法

エアバルブ排砂設備による既往の排砂実験では、サイフォン管一要素（単管）を用いた排砂実験⁵⁾を実施しており、排砂状況や排砂量の推移、排砂後の堆砂形状、サイフォン管内の壁面圧力など排砂の基本特性に関する知見を得ている。既往実験では、サイフォン管一要素の排砂特性を把握することに重点をおいているため、取水槽や放流管は有さず、サイフォン管末端に設置した流量調節ゲートからの放流における排砂量を計測している。

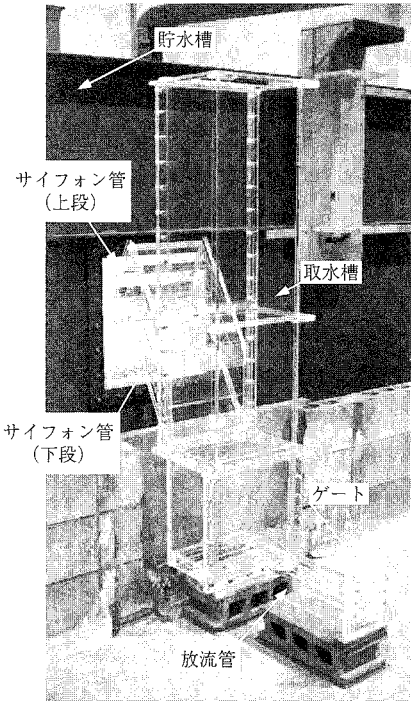
既往の検討結果より、排砂時における管内の流況は非常に乱れ、管内の壁面圧力分布が複雑な分布形状となっている（図－6）ことが把握されたが、取水槽を有していないことから、排砂時のサイフォン管全体の損失エネルギーを算定することが困難であった。また、サイフォン管一要素の排砂実験であるため、サイフォン管の切り

替えに伴う排砂状況の変化などは確認できていない。

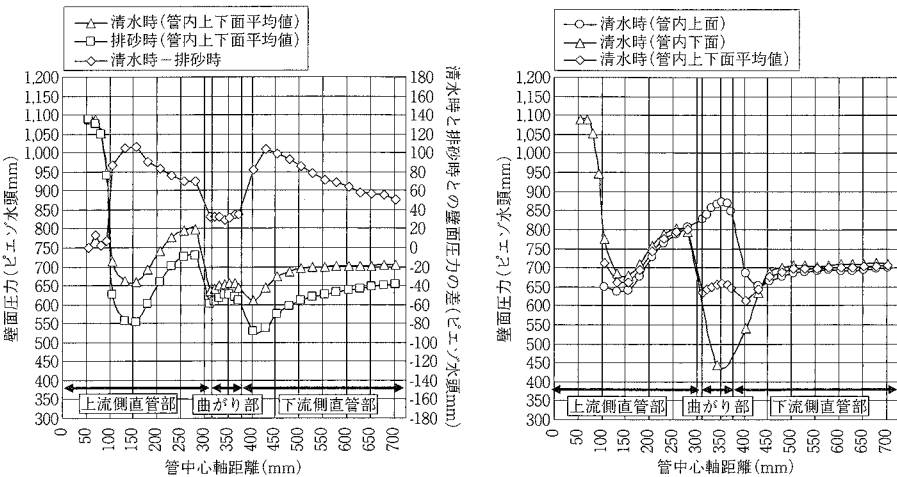
そこで、本実験ではサイフォン管複数要素（上下2段）を用いた排砂実験を実施し、サイフォン管の切り替えに伴う排砂状況の変化を確認した。あわせてサイフォン管の下流部に取水槽、流量調節ゲートを有する放流管を設置し、実際の施設に近い模型を作成して排砂状況の確認および排砂特性の把握を試みた。

3.1 実験模型

実験で用いた模型は、貯水槽、サイフォン管、取水槽、流量調節ゲートを有する放流管から構成されている（写真－3）。貯水槽は鋼製水槽を用い、サイフォン管、



写真－3 エアバルブ式排砂設備の実験模型



図－6 サイフォン管内の壁面圧力分布（既往実験結果、流量 25 L/s、粒径 1.73 mm、給砂量 3,190 cm³/s）

排砂実験は、貯水槽内に呑口部中心を頂点とした半円錐形状で整形した土砂を初期堆砂形状（堆砂高はサイフォン下段管の呑口下面から0.8m）とし、サイフォン上段管からの排砂を行い、排砂が終了した後、下段管からの排砂を行った。排砂実験の流れは次のとおりである。

- ① 貯水槽内に呑口部中心を頂点とした半円錐形状で初期堆砂形状を整形する。堆砂高0.8m、堆砂勾配（水中安息角）30°程度とし、サイフォン上段管の呑口が半分程度埋没した状態とした。
- ② サイフォン上段管からエアロックを解除（通水）し、下流の流量調節ゲートを所定開度で開き、上段管からの排砂を開始する。流量はエアロックが壊れない最大流量程度を目標として管内平均流速1.15 m/s程度に設定した。
- ③ サイフォン上段管からの排砂終了後、一旦下流の流量調節ゲートを閉めて、貯水槽内の堆砂形状を計測する。
- ④ サイフォン下段管のエアロックを解除（通水）し、上段管をエアロックした後、下流の流量調節ゲートを所定開度まで開き、下段管からの排砂を開始する。
- ⑤ サイフォン下段管からの排砂時の貯水槽および取水槽の水位、サイフォン管内の壁面圧力、排砂量を計測する。
- ⑥ サイフォン下段管からの排砂終了後、下流の流量調節ゲートを閉めて、貯水槽内の堆砂形状を計測する。

3.3 計測項目

排砂時の各計測項目の概要は次のとおりである。

① 流 量

サイフォン管からの放流量は、貯水槽への給水量から、水槽側面の刃形堰からの越流量を引いた値とした。

② 貯水槽および取水槽内の水位

貯水槽および取水槽の水位は、サーボ式水位計を用いて連続計測した。また、実験開始直後は、排砂量が非常に多く、取水槽内の水位が急低下しサーボ式水位計の測定範囲以下になることが懸念されたため、測定範囲外では、補助的に取水槽に取り付けた圧力計の圧力水頭から水位に換算した。計測は0.2秒間隔で行い、整理は15秒間隔で前後12点（5秒間）の平均値を用いた。

③ サイフォン管内の壁面圧力

サイフォン管内の壁面圧力は、フラッシュダイヤフラム圧力計を用いて連続計測（5箇所）した。計測は0.2秒間隔で行い、整理は15秒間隔で前後12点（5秒間）の平均値を用いた。

④ 排 砂 量

排出土砂は、使用した土砂が通過しない網目（0.086 mm）のネットで捕捉した。捕捉した土砂は水中体積を測定し、あらかじめ求めた水中重量と土砂の乾燥重量との関係より、排砂重量を算定した。

⑤ 流 況

動画撮影、写真撮影により流況を記録した。

⑥ 排砂後の貯水槽内の堆砂形状

堆砂形状は1mm読みレベルにより、縦横断方向に25cmピッチで計測した。呑口付近は、横断方向に詳細に計測した。

3.4 実験条件

実験条件の一覧を表－3に示す。なお以下では実験条件の断面平均流速については清水時の値を示す。下段管からの排砂実験は、流量調節ゲート開度により断面平均流速の異なる3ケース（0.33, 0.74, 1.15 m/s程度）、堆砂材料は一樣粒径珪砂を採用し、平均粒径は0.36, 0.74, 1.73 mmの3種類を用いた。サイフォン管幅0.33 mの形状については、3種類の粒径で実験を行い、その他の形状では1.73 mmの粒径を用いた。なお、サイフォン管幅0.33 m、粒径0.36 mm、断面平均流速0.74 m/s程度の条件およびサイフォン管幅0.10 m、断面平均流速0.33 m/s程度の条件については実験を実施していない。

表－3 実験条件一覧

ケース名	サイフォン管形状 (高さ×幅)	粒径 (mm)	上段管排砂 時放流量 (L/s)	下段管排砂 時放流量 (L/s)	下段管排砂 時管内断面 平均流速 (m/s)
A-1-1	0.05 m × 0.33 m アスペクト比 1 : 6.6	1.73	19.00	5.41	0.328
A-1-2				12.18	0.738
A-1-3				19.00	1.152
A-2-1		0.74		5.41	0.328
A-2-2				12.18	0.738
A-2-3				19.00	1.152
A-3-1		0.36		5.41	0.328
A-3-3				19.00	1.152
B-1-1	0.05 m × 0.20 m アスペクト比 1 : 4	1.73	11.50	3.30	0.330
B-1-2				7.40	0.740
B-1-3				11.50	1.150
C-1-2	0.05 m × 0.10 m アスペクト比 1 : 2	1.73	5.75	3.71	0.742
C-1-3				5.75	1.150

注：放流量および断面平均流速は清水放流時の値を示している。

4. 実験結果

4.1 清水放流時の水理特性

実験結果から得られたゲート開度毎の放流量とサイフォン管内の損失水頭（貯水槽と取水槽の水位差）の関係から、清水時のサイフォン管の放流特性は管断面形状毎に以下の式で表される（図－9）。

$$Q = CA\sqrt{2g\Delta H_w}$$
 (1)

$$C = \sqrt{-a \frac{D}{\Delta H_w} + b}$$
 (2)

幅 0.33 m の場合：

$a = -0.0141, b = 0.304$

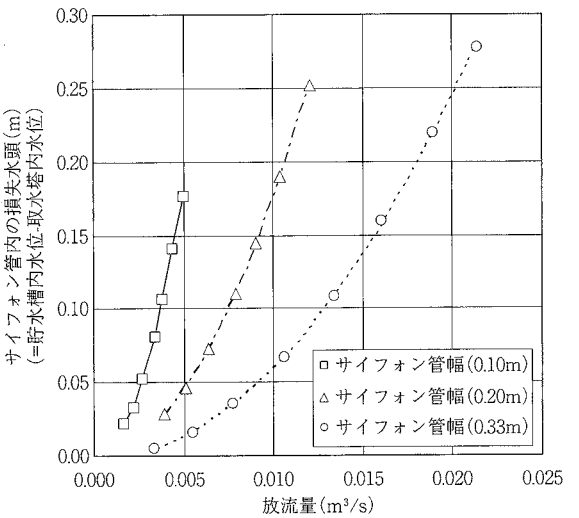
幅 0.20 m の場合：

$a = 0.0090, b = 0.293$

幅 0.10 m の場合：

$a = 0.0017, b = 0.287$

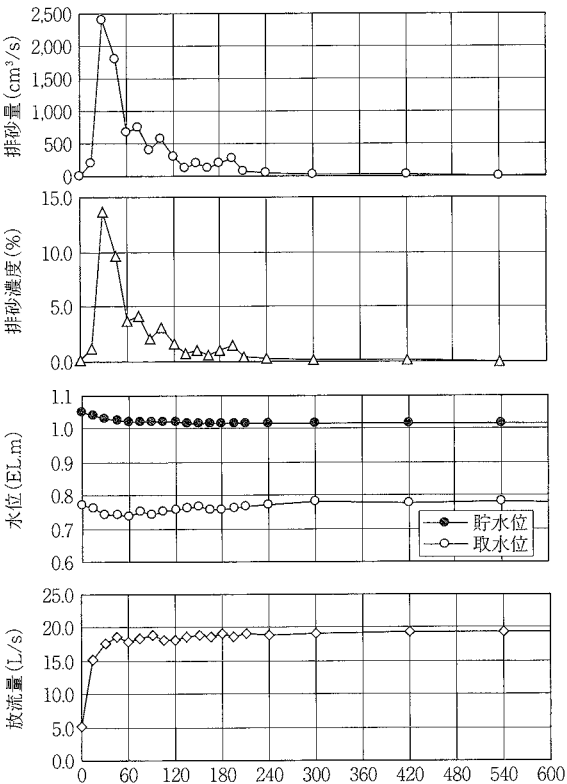
ここで、 Q ：放流量（ m^3/s ）、 C ：サイフォン管の流量係数、 A ：サイフォン管の断面積（ m^2 ）、 g ：重力加速度（ $= 9.8 m/s^2$ ）、 ΔH_w ：清水流下時のサイフォン管の損失水頭（ m ）、 D ：サイフォン管の高さ（ $= 0.05 m$ ）、 a および b ：定数を表す。



図－9 サイフォン管の放流特性

4.2 排砂状況

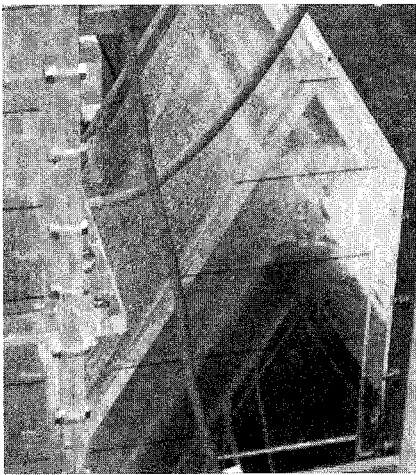
排砂状況の例として、ケース A-1-3（管幅 0.33 m，粒径 1.73 mm，管内断面平均流速 1.15 m/s）の実験条件でサイフォン下段管の排砂を実施した場合の排砂量，排砂濃度，貯水槽および取水槽の水位，放流量の結果を図－10 に示す。ここで，排砂量は土砂の空隙なしの単位時



図－10 排砂実験結果（ケース A-1-3）

間当たりの流下体積としており，排砂濃度は排砂量を，土砂を含んだ放流量で割ること求めた値であり，以下のデータ整理および解析において用いた排砂量と排砂濃度についても同様の定義である。

排砂開始直後に，貯水槽からサイフォン管内に土砂が急激に流れ込み（写真－4），排砂量のピークが現れている。また，サイフォン管内を通過した土砂は取水槽内に流れ込み，一時的に取水槽内の水位が大きく低下した。予備実験では，下流の流量調節ゲートの開度を瞬時に大



写真－4 排砂開始直後のサイフォン管内の状況

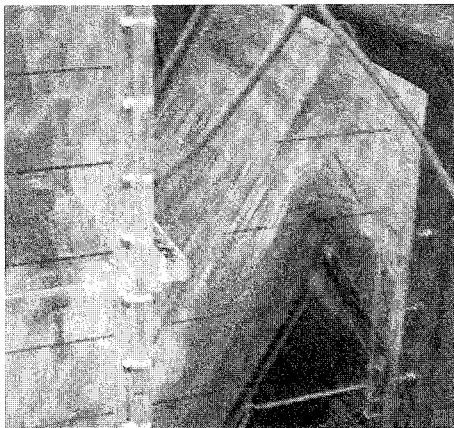
きくすると、取水槽内の一時的な水位低下により、サイフォン上段管頂部に溜めた空気が下流の取水槽内へ抜けてしまう様子もみられ（写真－5）、運用時のゲート操作において留意する必要があると考えられる。

取水槽内に流入した土砂は乱れた状態になっており、水槽底面に堆積する様子もみられた（写真－6）が、最終的には排出された。

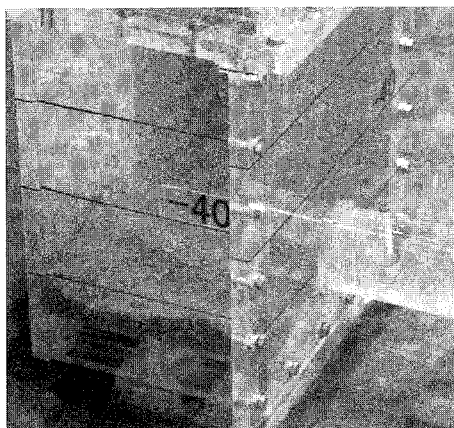
排砂量のピーク時では、排砂濃度がかなり高い値を示す傾向が認められた。排砂量のピーク後は、急激に排砂量が減少する傾向となったが、減少する過程において堆砂面が急に崩れ、一時的に排砂量が増加する現象が繰り返しみられた。この現象は、排砂量の程度差はあるものの排砂完了時まで続いた。

実験模型では、サイフォン管頂部のエアの流入空間に、土砂が入り込む様子が確認された（写真－7）ため、施設設計において給排気構造に留意する必要がある。

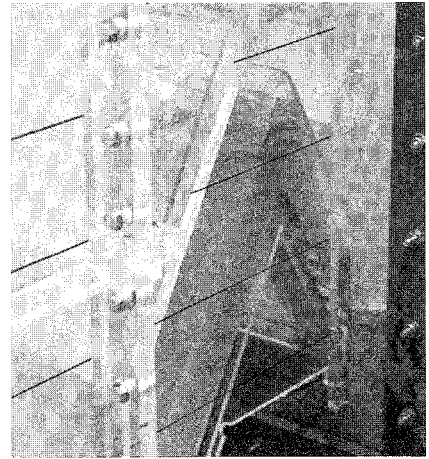
なお、本実験では、サイフォン上段管から下段管に切り替える際に、上段管排砂終了時の堆砂形状を計測するため、流量調節ゲートを閉めて切り替えを行っているが、



写真－5 サイフォン上段管のエアロックが壊れた様子



写真－6 取水槽底面の土砂の堆積状況



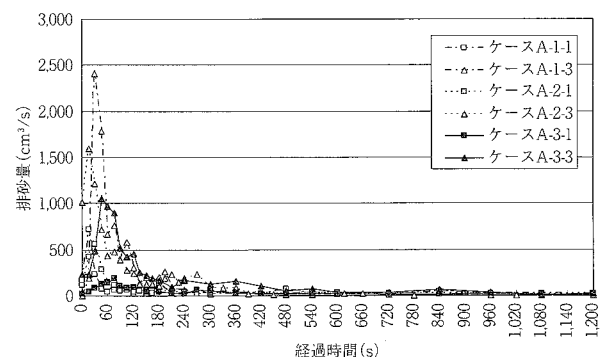
写真－7 エア流入空間に土砂が入り込んだ様子

予備実験では、流量調節ゲートを開けたまま、上段管から下段管への切り替えを実施しており、切り替えに伴う排砂は可能であることを確認した。

4.3 排 砂 量

ケース A-1-1, A-2-1, A-3-1 および A-1-3, A-2-3, A-3-3（管幅 0.33 m, 粒径 0.36, 0.74, 1.73 mm, 断面平均流速 0.33, 1.15 m/s 程度）の実験条件における排砂量と排砂濃度、累計排砂量（累計排砂量を総排砂量で除してパーセント表示した値）の結果を図－11, 12, 13 に、ピーク排砂量と粒径、放流量との関係を図－14 に示す。

排砂開始直後のピーク排砂量は、概ね 1 分以内に現れている。また、粒径の大きい方がピーク排砂量は多く、放流量が大きいほど粒径の違いによるピーク排砂量の差が大きい傾向がみられる。断面平均流速 1.15 m/s の条件では、排砂開始後 3 分半程度で、総排砂量のうち粒径 1.73 mm で 90%、粒径 0.36 mm で 55% の土砂が排出されており、粒径が小さいほど排砂量が低減するまでに要する時間が長い傾向がみられた。



図－11 排砂量の推移（管幅 0.33 m）

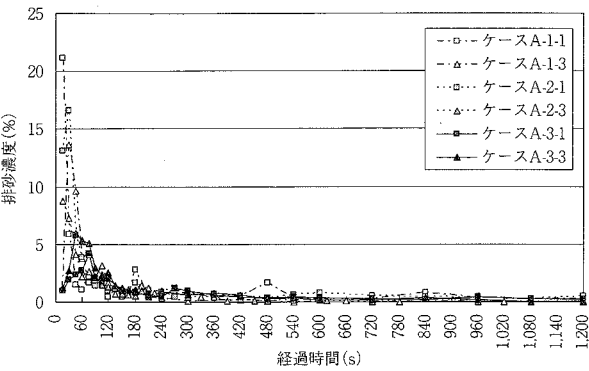


図-12 排砂濃度の推移 (管幅 0.33 m)

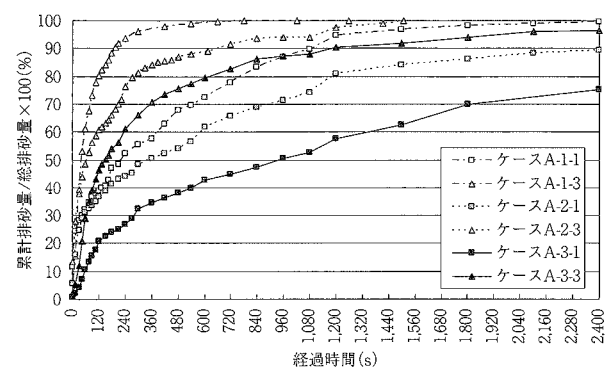


図-13 累計排砂量の推移 (管幅 0.33 m)

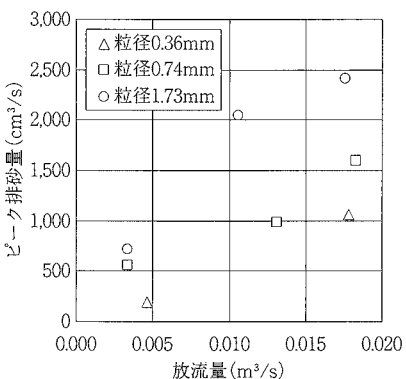
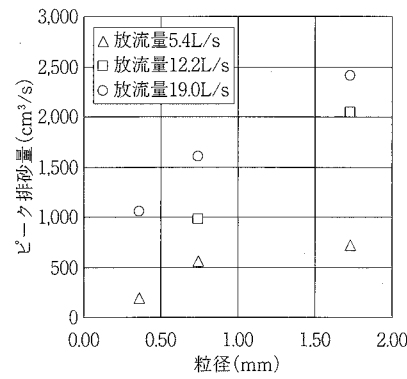


図-14 ピーク排砂量と粒径、放流量の関係 (管幅 0.33 m)

ケース A-1-2, A-1-3, B-1-2, B-1-3, C-1-2, C-1-3 (管幅 0.10, 0.20, 0.33 m, 管内平均流速 1.15, 0.74 m/s 程度) の実験条件における排砂量と排砂濃度の結果を図-15, 16 に示す。管断面の幅と高さのアスペクト比 (幅 / 高さ) が小さくなると排砂量のピーク値は幅 0.20 m の条件で幅 0.33 m と比較して若干小さくなり, 幅 0.10 m とするとかなり小さくなる。一方, 排砂濃度でみるとア

スペクト比が小さいほど高い値を示している。幅 0.20 m では濃度が 10% を超える期間は 60 秒以下であるが, 幅 0.10 m の場合には, 濃度が高い期間が長くなっている。実験では, 取水槽と下流の放流管を通った土砂を測定したため, サイフォン管内部の土砂濃度はさらに高い可能性もあり, 損傷や取水塔内の水位変動などに留意する必要がある。

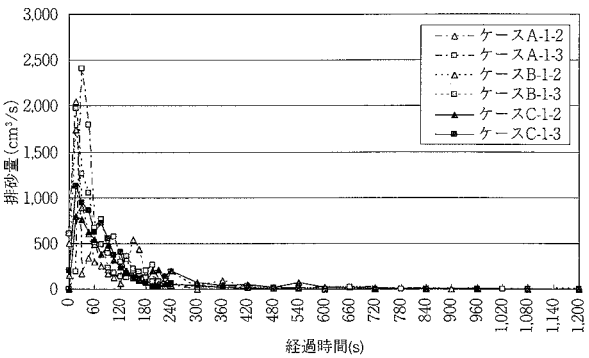


図-15 排砂量の推移 (アスペクト比の影響)

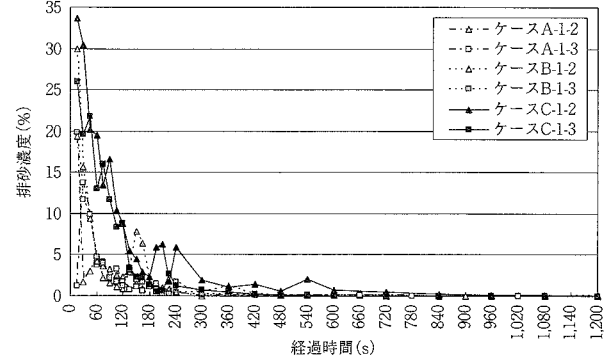


図-16 排砂濃度の推移 (アスペクト比の影響)

しかしながら、排砂量が低減するまでに要する時間はそれほど大きな変化は認められず、サイフォン管1段あたりの排砂のために必要な通水時間は大きく変わらないと考えられるため、アスペクト比を小さくすることで、小規模な施設と少量の水量で同等の効果が得られそうである。

4.4 排砂時の損失エネルギー

管幅 0.33 m の実験結果（ケース A シリーズ）について排砂時の清水流下時の損失水頭と土砂が流下することにより増加した損失水頭（それぞれ後述の式(7), 式(10)により算定しており、以下では、それぞれ水の損失水頭、土砂の損失水頭と称す）との関係を図-17 に示す。断面平均流速 0.74 m/s のケースでは、粒径の違いによりややばらつきがみられるものの、断面平均流速 0.33, 1.15 m/s のケースでは粒径の違いによらず、概ね土砂と水の損失水頭の関係は同じ傾向であった。

放流量が小さいケースでは、ピーク排砂量は小さいものの、排砂時間は長い傾向にあり、水の損失水頭に対して土砂の損失水頭が大きい期間が比較的長い傾向がみられた。

管幅 0.33 m の実験結果（ケース A シリーズ）について無次元排砂量と無次元掃流力との関係を図-18 に示す。無次元掃流力が概ね 0.5 より小さい領域では、粒径および放流量の違いによりばらつく傾向がみられた。排砂量の全体的な変動傾向は、実験開始直後にピークが発生し、それ以降は、急激に減少する傾向となるが、排砂量が減少していく過程で堆砂面が急に崩れ、一時的に排

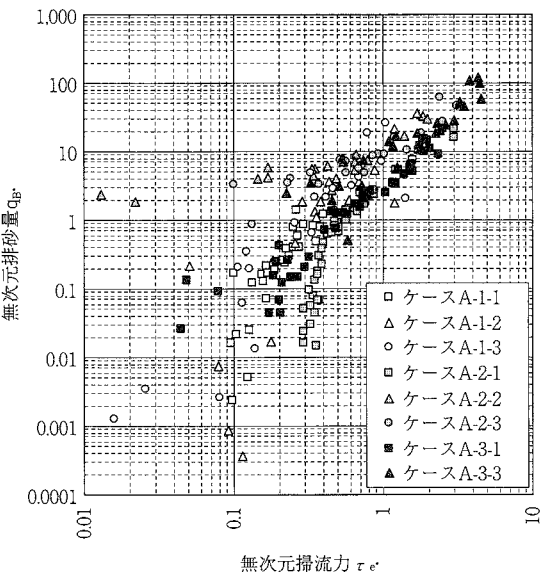


図-18 無次元排砂量と無次元掃流力との関係（管幅 0.33 m）

砂量が増加する現象が繰り返しみられるため、無次元排砂量と無次元掃流力との関係にばらつきがみられたものと考えられる。

そこで、一時的に排砂量が増加する期間を除く排砂初期の期間（100 ～ 200 秒程度）について無次元排砂量と無次元掃流力との関係を整理すると、両者との関係に概ね相関（相関係数 0.717）が得られた（図-19）。この結果を用いることで、排砂によるエネルギー損失を考慮したサイフォン管の水理設計がある程度可能であると考えられる。すなわち、最大放流量と最大排砂量および土砂の

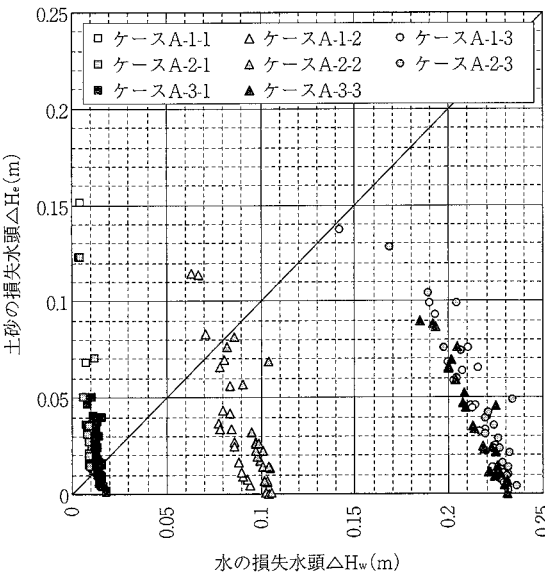


図-17 排砂時の土砂と水の損失水頭の関係（管幅 0.33 m）

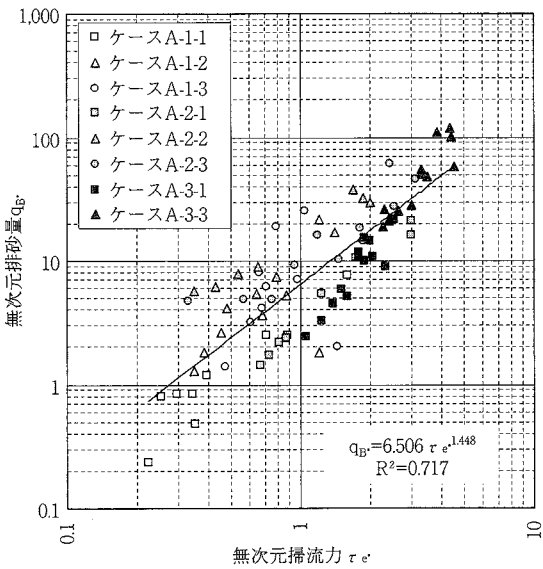


図-19 無次元排砂量と無次元掃流力との関係（排砂初期の期間）

粒径を設定すると、損失水頭を求めることができ、必要な水位差を確保するためのサイフォン管形状を定めることができる。ただし、最大排砂量の設定法には課題が残る。

土砂の粒径 1.73 mm の条件で、管幅を 0.10, 0.20, 0.33 m とした場合の排砂実験の結果について、無次元排砂量と無次元掃流力との関係を図-20 に示す。

無次元掃流力が概ね 0.1 より小さい領域では、粒径および放流量の違いによりばらつく傾向がみられた。そこで、排砂が概ね完了した期間（総排砂量の 90% 程度）について無次元排砂量と無次元掃流力との関係を整理した結果を図-21 に示す。

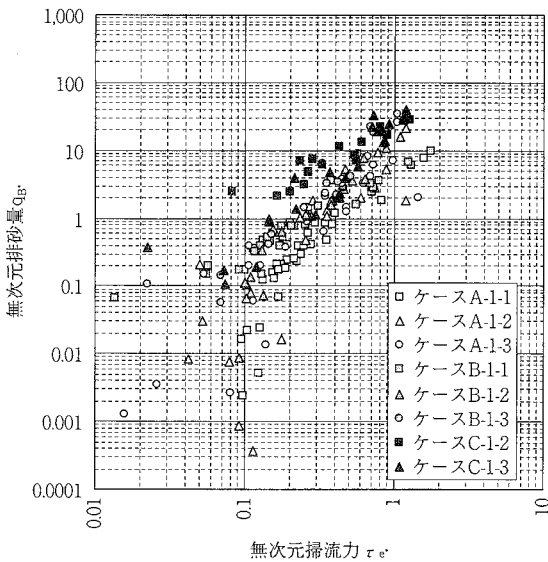


図-20 無次元排砂量と無次元掃流力との関係
(アスペクト比の影響)

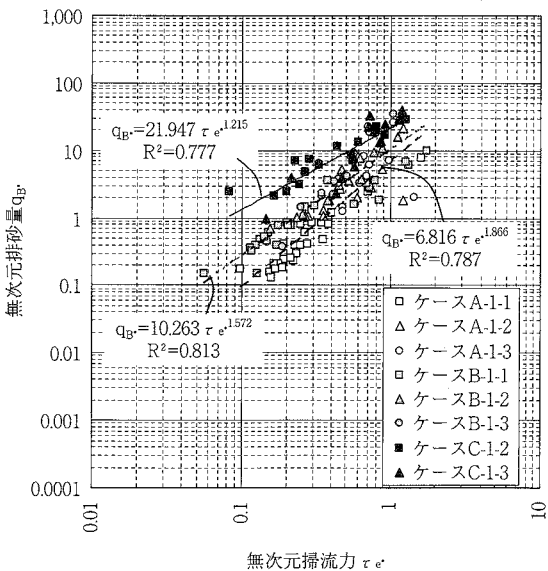


図-21 無次元排砂量と無次元掃流力との関係
(排砂が概ね完了する期間、アスペクト比の影響)

アスペクト比（サイフォン管の幅）が小さい方が、無次元掃流力に対する無次元排砂量が多い傾向がみられる。これについては、実験の流況観察から、土砂が管の両端付近に筋状に偏って流れ、中心部では土砂濃度が低くなる様子が認められており、アスペクト比が小さくなると土砂の薄い領域が小さくなることが一因と考えられる。この流況は呑口付近の端部での局所流や管断面内の2次流が影響していると思われる。また、排砂ピーク量を含む無次元掃流力が大きい領域では、アスペクト比による無次元排砂量の差は小さくなる傾向にある。これは、排砂開始直後の土砂濃度が非常に高い期間では、土砂がほぼ全幅で流れて端部への偏りが少なくなる流況が認められており、幅による差が小さくなることが理由として考えられる。

なお、図中の無次元排砂量、無次元掃流力は以下の式(3)~(11)より算定した。

$$q_B = \frac{Q_B}{B} \quad (3)$$

$$q_B^* = \frac{q_B}{\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) g d^3}} \quad (4)$$

ここで、 Q_B ：排砂量 (m^3/s)、 B ：サイフォン管の幅 (m)、 q_B ：単位幅当たりの排砂量 (m^2/s)、 σ ：土砂の密度 ($= 2,600 \text{ kg}/\text{m}^3$)、 ρ ：水の密度 ($= 1,000 \text{ kg}/\text{m}^3$)、 d ：粒径 (m)、 q_B^* ：無次元排砂量を表す。

$$u_* = \sqrt{gR \frac{\Delta H}{L}} \quad (5)$$

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) g d} \quad (6)$$

ここで、 R ：径深 (m)、 ΔH ：排砂時（土砂＋水）の損失水頭 (m)（貯水槽と取水槽との水位差に相当）、 L ：管路延長 ($= 0.749 \text{ m}$ ，管軸中心延長)、 u_* ：排砂時（土砂＋水）の摩擦速度 (m/s)、 τ_* ：排砂時（土砂＋水）の無次元掃流力を表す。

$$\Delta H_w = \frac{1}{b} \left[\frac{Q^2}{2gA^2} + aD \right] \quad (7)$$

$$u_{w*} = \sqrt{gR \frac{\Delta H_w}{L}} \quad (8)$$

$$\tau_{w*} = \frac{u_{w*}^2}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd} \tag{9}$$

ここで、 u_{w*} ：清水時の摩擦速度 (m/s)， τ_{w*} ：清水流下時の無次元掃流力を表す。なお、式(7)は式(1)，(2)より導出した。

$$\Delta H_e = \Delta H - \Delta H_w \tag{10}$$

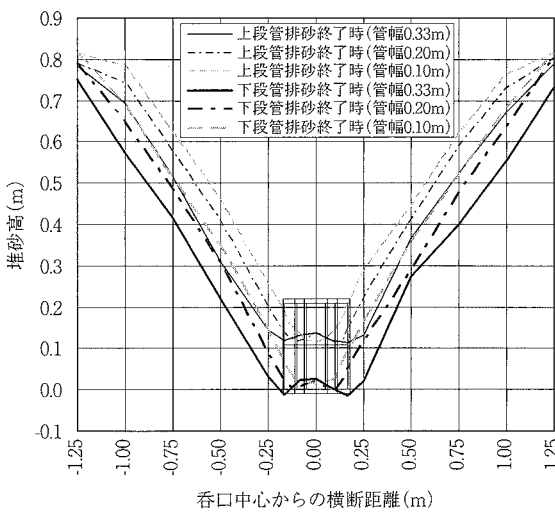
$$\tau_{e*} = \tau_* - \tau_{w*} \tag{11}$$

ここで、 ΔH_e ：土砂流下により増加する損失水頭 (m)， τ_{e*} ：土砂流下により増加する無次元掃流力を表す。

4.5 排砂後の堆砂形状

ケース A-1-3、B-1-3、C-1-3 における堆砂縦断形状を図－22 に、堆砂横断形状を図－23 に示す。なお、堆砂縦断形状はサイフォン管呑口の中心位置を、横断形状は呑口直下の位置を示している。

ケース A-1-3 のサイフォン下段管からの排砂終了時の堆砂形状をみると、排砂前の半円錐形状が一回り大きくなった形状で安定しており、堆砂面の平均的な水中安息角度は 33 ～ 35° 程度であった。呑口付近の堆砂形状をみると、排砂終了時の堆砂面が呑口下面付近まで低下しており、呑口中央部では両端部と比較して少し盛り上がる形状となった。両端部では、局所流による洗掘の影響でやや堆砂面が低下していると考えられる。上段管からの排砂終了時点では、下段管の呑口がやや埋没しているケースもみられたが、管内で閉塞することなく下段管からの土砂の排出は可能であった。



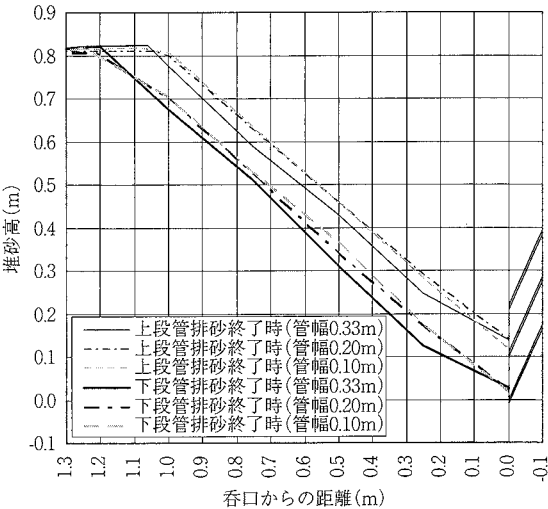
図－23 堆砂横断形状 (粒径 1.73 mm，管内流速 1.15 m/s)

サイフォン下段管からの排砂終了時の堆砂形状をみると、管幅 0.33 m のケース A-1-3，管幅 0.20 m のケース B-1-3 では呑口中央部で両端部と比較して少し盛り上がる形状となり，両端部では，局所流による洗掘の影響でやや堆砂面が低下しているが，概ね下段管の呑口下面まで排砂可能と考えられる。一方，管幅 0.10 m のケース C-1-3 では，下段管の呑口がやや埋没しており，呑口下面まで排砂されていない。実験では，呑口がやや埋没した状態でも下段管の排砂は可能であったが，実運用においては，管内で閉塞する可能性もあることから，設計する上で留意する必要がある。

5. おわりに

エアバルブ排砂設備について，管内流速や土砂の粒径およびサイフォン管のアスペクト比を変化させた実験による検討を行った結果，以下の知見が得られた。

- 1) 3つのサイフォン管断面のアスペクト比 (幅 / 高さ) の条件で清水流下時の放流特性を把握した。
- 2) 排砂開始直後のピーク排砂量は，実験値で概ね 1 分以内に現れ，粒径の大きい方がピーク排砂量は多く，放流量が大きいほど粒径の違いによるピーク排砂量の差が大きい傾向が確認された。
- 3) 断面平均流速 1.15 m/s の条件では，排砂開始 3 分半程度で，総排砂量のうち粒径 1.73 mm で 90%，粒径 0.36 mm で 55% の土砂が排出されており，粒径が小さいほど排砂量が低減するまでに要する時間が長い傾向が認められた。
- 4) 管断面のアスペクト比 (幅 / 高さ) が小さくなると排砂量のピーク値は小さくなり，排砂濃度は高くなる。



図－22 堆砂縦断形状 (粒径 1.73 mm，管内流速 1.15 m/s)

- 5) 管断面のアスペクト比（幅／高さ）による排砂量が低減するまでに要する時間の大きな変化は認められず，アスペクト比を小さくすることで，小規模な施設と少量の水量で同等の効果が得られそうである。ただし，排砂時の土砂濃度が高い点について留意が必要である。
- 6) サイフォン管幅 0.33 m の条件について無次元排砂量と無次元掃流力との関係を整理すると，両者との関係に概ね相関が得られ，排砂によるエネルギー損失を考慮したサイフォン管の水理設計がある程度可能であると考えられる。
- 7) サイフォン管幅を変化させた場合の無次元掃流力に対する無次元排砂量の関係については，アスペクト比（サイフォン管の幅）が小さい方が，無次元排砂量が多い傾向がみられる。
- 8) サイフォン下段管からの排砂終了時の堆砂形状の結果から管幅 0.33 m，0.20 m では吞口中央部で両端部と比較して少し盛り上がる形状となり，両端部では，局所流による洗掘の影響でやや堆砂面が低下

しているが，概ね下段管の吞口下面まで排砂可能と考えられる。幅 0.10 m では，下段管の吞口がやや埋没しており，吞口下面まで排砂されなかった。

今後は，サイフォン管吞口標高と堆砂面標高との関係などを調査してピーク排砂量の検討を行うとともに，設計手法や運用手法の検討を行っていきたい。

参 考 文 献

- 1) 箱石憲昭，櫻井寿之，泉谷隆志，久保康夫：新しい排砂技術の開発，取水と制水，No.52，pp.132～144，2008.3
- 2) 川崎秀明，喜納敏男，橋村 潔，津嘉山正光：空気ロック式ゲートレス取水設備に関する研究，ダム工学，Vol.11，No.4，pp.275～288，2001
- 3) 津村信昌，重政博史：尾原ダム選択取水設備における連続サイフォン式の採用，ダム技術，No.240，pp.93～96，2006.9
- 4) 長原 寛，野呂浩生，小川直樹：連続サイフォン式取水設備によるコスト縮減，ダム技術，No.257，pp.57～61，2008.2
- 5) 泉谷隆志，櫻井寿之，箱石憲昭，柏井条介，田中郁臣：エアバブル放流設備を利用した排砂設備の排砂基本特性，土木学会第 63 回年次学術講演会投稿中
- 6) 社団法人 ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル編)，pp.517～518，1999.3