

マルチホールサクション排砂管の 水理特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE MULTI-HOLE SUCTION PIPE

岡野眞久¹・俣野文孝²・関本恒浩³・片山裕之³

Masahisa OKANO, Fumitaka MATANO, Tsunehiro SEKIMOTO, Hiroyuki KATAYAMA

¹フェロー会員 工修 (財) ダム水源地環境整備センター (〒102-0083 東京都千代田区麹町 2-14-2 麹町 NK ビル)

²正会員 有限責任中間法人 ダム水源地土砂対策技術研究会 技術委員 (五洋建設株式会社)

³正会員 博 (工) 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

In this study, we introduce the new sediment extractor pipe named "Multi-Hole Suction Sand Pipe" which has several suction holes arrayed at the bottom of the pipe in the same interval. The hydrodynamics in this pipe is expressed by the governing equations which are added to a pressure loss term derived from the momentum diffusion of the sediment inlet at the suction holes. It is verified that the results of the numerical analysis based on such equations agree well with those obtained by preliminary experiments for a water flow without sediments. Applying this pipe to sediments extraction, the blockade by a sediment discharge in the pipe is caused in some cases from the shortage of the suction velocity at the hole or velocity in the pipe. Considering the results of numerical analysis and sediments extraction experiments, the latter one is significant and the effective support systems are proposed for the evasion of the blockage of a sediment discharge.

Key Words : *sediment deposit by dam , suction pipe , pipeline*

1. 序論

(1) はじめに

わが国の近年のダムは概ね 100 年間の推定堆砂量を考慮し、予め貯水容量内に堆砂容量として確保するなどして建設されてきた。しかし、中部山岳地域等をその流域にもつ幾つかの大規模ダムではこれまで種々の堆砂対策が講じられてきたが、この推定堆砂レベルを上回って堆砂が進行している。このためこれらのダムでは上流河床の上昇、貯水容量の減少さらには取水・放流設備の機能不全等の問題が生じ、関連してダム下流域でも河床の低下・粗粒化、流路形態の変化あるいは海岸保全等が懸念されている。

しかし、ダム貯水池からの排砂にはコストと環境という大きな課題がある。これまでの排砂の経験からコストに対しては(1)なるべく流水のエネルギーを使って流入土砂をダム下流河川へ流す、(2)しかも、減電や用水不足になるリスクを回避するためなるべく貯水位を低下させずに流す。環境の面からは(1)流入土砂は洪水とともに出水時に流す、(2)少量の流入土砂でも貯めおかず、洪水のたびに新鮮なうちに流す、(3)流しやすい粒径の流入土砂から対応する、などの原則が浮かび上がっている。

岡野ら¹⁾は、これらの原則をもとにダム貯水池の流入

土砂の粒径別堆砂特性に注目し、貯水位を低下させずに行う堆砂対策として次の 3 方法の組み合わせを示唆した。

- (1)粗粒土砂は貯水池上流部に設けた貯砂ダムにより捕捉し、陸上掘削した後、下流河道の流送能力に応じ下流河川環境を考慮して河川還元する。
 - (2)細粒土砂は堆砂丘から新鮮な堆砂を水圧吸引土砂排除システムなどにより洪水時に下流河道の流送能力および下流河川環境の許容範囲で排砂。
 - (3)微細粒土砂は堤体のなるべく低標高部に設けた洪水吐により、濁水密度流として堆積させずに通過させる。
- 本論文はこの中の水圧吸引土砂排除システムについて論ずるものである。

(2) 水圧吸引土砂排除システムに関する既往の研究

貯水位を保ったまま堆砂を排砂する水圧吸引土砂排除法の原型は堤体底部のオリフィス式排砂管である。

吉良²⁾はオリフィス型点排砂法では流出口からわずかに離れただけでも流速が著しく低減し掃流力がそこまで及ばなく、堤体付近の堆砂が部分的に排砂されるのみであるのに対し、貯水池底縦断方向に有効渦動管長を有する渦動管(スリット管)を用いた線排砂法を採用すれば、渦動管延長線上の堆砂がスリット流入・ラセン流送砂によって排砂が可能になるとしている。この渦動管による排砂方法とはスリットが入った管を貯水池底に設置し、

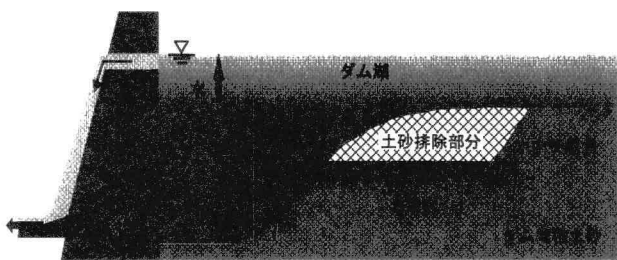


図-1 水圧吸引土砂排除システムの概念図

管内の負圧を利用して水とともに土砂を吸い込み、下流へ輸送しようとするものである。一本のスリット管では、土砂を排出できる長さは有限である。有効渦動管長とはこの排砂が有効にできる管の長さであり、スリットの幅や水頭差等に関係している。

道上ら³⁾は上述の有効渦動管長を増加させるため、開口部が離散的に配置されているスリット管（離散型スリットを用いた渦動管）を提案し、一様スリット管との比較実験により、開口比（開口部と閉鎖部の長さの比）を1:15程度とすると一様スリット管に比べ、有効管長は約5倍となりうることを示した。中国電力奥津第2発電所ではこの離散型スリットを用いた渦動管が沈砂池等に試験活用されていることが報告されている⁴⁾。

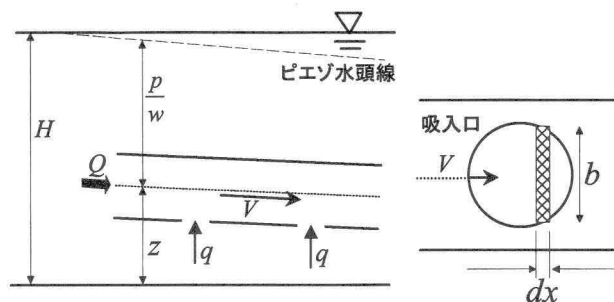
(3) 本研究の目的

本研究は図-1に示すように、貯水池表面と貯水池堆砂丘に設置した吸入口を有する固定排砂管の排出先との水位差を利用して吸入口より堆積した土砂を吸引し、全区間をパイプで、もしくは一部区間は小規模なトンネルによる開水路によりダム下流に放流する水圧吸引土砂排除システムを想定し、その土砂吸入部の機能を明らかにすることを目的とする。ここでは離散型スリットを丸穴に変えた渦動管をマルチホールサクション排砂管（以下、本排砂管）と名づけ、その基本的な水理特性について実験的検討を行った。なおスリットを丸穴に変えた理由は、加工が容易である、吸入損失が最小である、相対的にゴミや粒径の大きな堆積物の流入支障になりにくい等の理由のためである。なお、土砂排除完了部分に再度堆砂が進行した段階で次の排砂操作を行うことを考えている。

2. 吸入部の運動量拡散を考慮した水理モデル

(1) 吸入部の運動量拡散を考慮した運動方程式

道上ら³⁾は一様型スリット渦動管を対象に理論的検討を行い、管内流れの基礎方程式について、通常の管路の定常流れに連続スリットからの流入があるものとして示している。本排砂管の水理特性については、一様なスリットと異なり吸入口が離散的に設置されているため、吸入流と管内流がほぼ直角に衝突することにより顕著な運動量拡散（以下、吸入運動量拡散）が生じており、流量



貯水池および排砂管 排砂管下面図

図-2 清水中の定常状態の記号説明図

係数で表される流入損失とは異なるものと考えられる。そこで、本研究では図-2に示す定常状態を考え、管の断面変化は緩やかであると仮定して道上ら³⁾の運動方程式を改良し、新たに吸入部の運動量拡散による損失項を導入した。なお、損失項は次項の実験結果より定式化した。連続式(1)と改良した運動方程式(2)を以下に示す。

$$\frac{dQ}{dx} = q \quad (1)$$

$$\frac{1}{2gA} \frac{d}{dx} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + \frac{d}{dx} \left(\frac{p}{w} + z \right) + \frac{\lambda Q^2}{2gRA^2} + \frac{b}{a} \Delta H_{SL} = 0 \quad (2)$$

ここで、 Q ：管内流量、 x ：管の流下方向に正をとった座標、 q ：単位幅当たりの吸入流量、 g ：重力加速度、 A ：管断面積、 β ：運動量補正係数、 p ：管内圧力、 w ：単位体積重量、 z ：位置水頭、 λ ：摩擦係数、 R ：管の径深、 b ：吸入口幅、 a ：吸入口断面積、 ΔH_{SL} ：吸入部の運動量拡散による損失、である。なお、吸入口は丸形のため、計算では吸入口幅 b を dx 毎に定義した。

また、スリットからの吸入流速は、管の内側と外側の圧力差に比例するものとして次式(3)で表せる。

$$v \equiv \frac{q}{b} = C \sqrt{2g \left\{ H - \left(\frac{p}{w} + z \right) \right\}} \quad (3)$$

ここで、 v ：吸入流速、 C ：流量係数、 H ：水位差、である。式(3)中の流量係数はスリットからの吸入抵抗を表しており、本来は堆積土砂の状況や吸入の進行状況により変化する値であると考えられ、道上ら³⁾によると0.8～0.9程度の値としている。

(2) 吸入運動量拡散計測のための模型実験

吸入運動量拡散を評価するために清水状態の水理実験を実施した。実験装置概要を図-3に示す。高さ0.7m×幅1.0m×長さ8.5mの実験水槽中に貯水池内に設置された排砂管を模擬した。貯水池内の水位は変化しないように水槽上流側に越流部を設けた。最下流側は気中開放とし、開放口の位置を上下させて水位差条件を変化させた。排砂管には管内径52mmの塩化ビニルパイプを使用した。吸入口径は断面積が概ね排砂管断面積の1/5になるように23mmとし、吸入口ピッチは道上ら³⁾を参考に開口比が

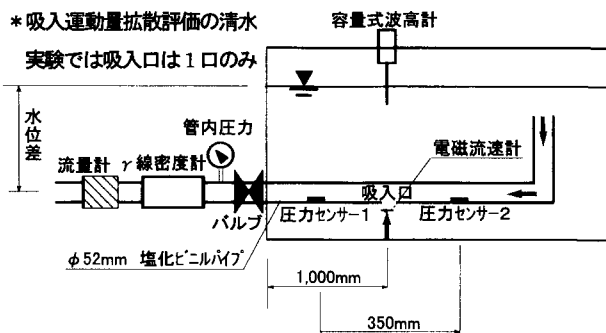


図-3 清水実験概要図

表-1 計測項目と計測装置一覧

計測項目	計測装置
管内圧力	圧力センサー、管内圧力計
管内流量	電磁流量計
管内密度	γ線密度計
水槽水位	容量式波高計
吸入流速	電磁流速計
地盤高測量	光電式砂面計

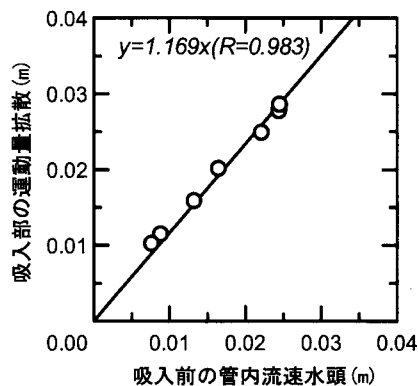
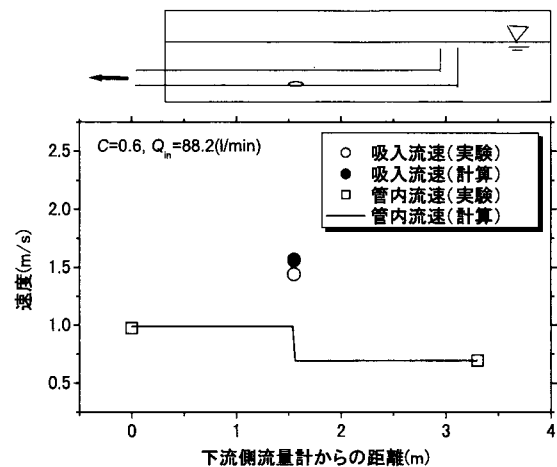


図-4 吸入部の運動量拡散と管内流速の関係

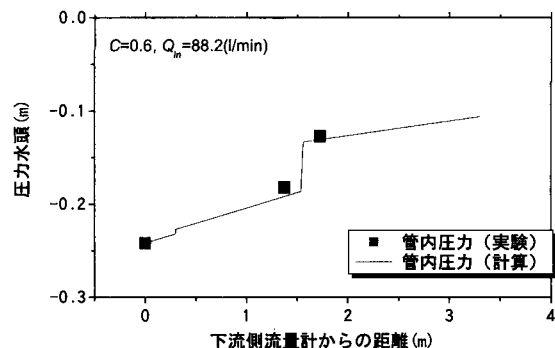
1:15程度となるよう350mmとした。実験条件は、水位差を200~600mmとし、上流端からの流量は変化させた。吸入損失評価の実験はなるべく基本的な条件とするため吸入口数を1口とした。これらの条件で実験を実施し、管内流量と管内圧力および吸入流速を測定した。なお実験縮尺は1/20とした。後述する土砂吸引実験も含めて計測項目と計測装置一覧を表-1にまとめた。

清水実験により吸入運動量拡散について検討したところ、図-4に示すように全水頭0.6mに対して最大5%程度の顕著な損失が発生していることが分かった。この損失についてのパラメスタディの結果、管内流速との相関が高いことが分かった。そこで管内流速水頭をパラメタとして式(4)のように定式化した。なお、式(4)は本実験条件による定式化であり、現地では係数の検討が必要であるが、同様の定式化により吸入運動量拡散を評価できるものと考えられる。

$$\Delta H_{SL} = 1.169V^2 / 2g \quad (4)$$



a) 吸入流速・管内流速の比較



b) 管内圧力の比較

図-5 実験結果と解析結果との比較

(3) 清水実験による検証

吸入運動量拡散を考慮した水理モデルについて、まず清水実験結果による数値計算結果の検証を行った。

数値解析は管内圧力と管内流量を未知数としたスタッガードメッシュによる差分格子を用い、安定した定常解が得られるまで繰り返し計算を行った。空間格子間隔 Δx は、吸入口径23mmに対して十分小さい格子間隔とするため1mmとした。また、管内の摩擦係数は実験から算出した $f=0.02$ を用い、運動量補正係数 β は1.0とした。境界条件は、下流排出口で圧力が0および上流側境界で所定の流量を与えた（式(5)）。

$$\begin{cases} p = 0 & (\text{下流側}) \\ Q = Q_{in} & (\text{上流側}) \end{cases} \quad (5)$$

清水実験による吸入流速と管内圧力の計測値を検証データとし解析値との比較を行った。上流からの注水流量が88.2 l/minの場合の吸入流速および管内流速の比較および管内圧力の比較を図-5に示した。なお、圧力計は吸入口から上・下流それぞれ175mmの位置に設置してある。流量係数Cについては、計算結果と実験結果の比較から0.6としている。また注水流量は、吸入口が閉じて

いる時の上流からの注水量と定義する。吸入流速および管内流速の結果を見ると、計算結果は実験結果を概ね再現できている。管内圧力についても、下流から上流に向かって管内摩擦および吸入運動量拡散による圧力低下の様子を概ね表現できている。提案したモデルで本排砂管の水理特性を評価できることが分かった。

3. 水理モデルによる排砂特性についての考察

(1) 水理モデルによる土砂吸入・流下挙動の類推

水理モデルは清水における定常状態のものであるが、管内土砂濃度があまり高くない状態であれば清水の水理モデルにより本排砂管の土砂の吸入・流下の挙動はある程度類推できる。土砂吸引状況をより厳密に評価するためには土砂濃度や土砂性状のパラメータも導入する必要があるが、ここでは清水定常状態の水理モデルを用いて排砂に関する以下の考察を進めた。

(2) 排砂有効管長の検討

まず、本排砂管の有効管長を検討する。ここで有効管長とは、水位差、土厚およびその性状が与えられた時に土砂吸入が可能なスリット数に相当する排砂管の延長距離である。

有効管長を規程する要因としては、①吸入限界流速以上の吸入流速かどうか、②管内に吸入された土砂が管内流速によって掃流されるかどうか（掃流限界流速）、の2つのPhaseがあげられる。この2つの限界流速は対象堆積物の状態と、水位差、管径および管内摩擦則などの条件から定まると考えられる。

a) 砂粒子の沈降速度と吸入流速からの検討

砂を対象とする場合、吸入流速が沈降速度以上の範囲を有効管長と考える方法がある。ルビーの式⁵⁾によれば粒径0.1mmの砂の沈降速度は0.8cm/sとなる。図-5の清水実験では吸入流速は概ね1.5m/s程度となっており、吸入口が4から6では0.7m/s以上が観測されることから、この実験条件では吸入限界流速が有効管長を決めることにはならないと考えられる。しかし、これはあくまで粒子状物質の議論であり、堆積物の固化状態等により、吸入抵抗が極めて大きくなっている場合も十分想定できる。

b) 沈殿限界流速と管内流速からの検討

掃流限界の推定には、既往の限界流速公式を用いた。ここではスラリー輸送の検討で用いられるDurand式⁶⁾(6)により後述の実験条件における掃流限界流速を試算出した。その結果、真体積含泥率15%では1.25m/s、2%では0.97m/sと概ね1m/s程度の限界流速となった。なお、スラリー輸送系の限界流速は沈殿限界流速を示すものであると考えられる。

$$V_c = F \sqrt{2gD(\gamma_s - 1)} \quad (6)$$

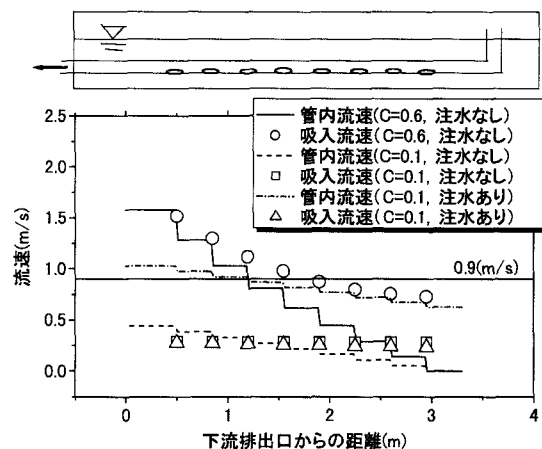


図-7 解析による流量係数および注水の効果

ここで、 F ：限界速度係数、 D ：管径、 γ_s ：土砂の単位体積重量である。

(3) 排砂有効管長確保の水理的メカニズム

土砂吸引初期には、土砂の透水性や粘性の影響で吸入しにくい状況が想定される。吸入抵抗が大きい場合、管内流速と吸入流速は低下するが、上流端から注水することにより管内流速はある程度回復できる。図-7は、簡便な位置試算として吸入口8口の排砂管を想定し、流量係数 $C=0.6$ と $C=0.1$ にした場合でいずれも上流端からの注水が無いケースと、 $C=0.1$ で上流端から定常状態で80 l/minを注水したケースの合わせて3ケースについて計算による管内流速と吸入流速分布を示したものである。なお $C=0.1$ は吸入抵抗が大きい状況を想定している。この結果より流量係数を0.1にすると管内流速は0.5m/s以下になるが、上流端からの注水により0.7~1.0m/s程度の管内流速を回復できる。管内流速の限界流速が0.9m/s程度であると想定すると、このように管内掃流力不足により吸入範囲が短くなる対策の一つとして上流端から注水を行い管内に十分な流量を与える方法が考えられる。吸入抵抗が大きくなる要因としては、吸入口付近の砂粒子の締固めやアーチアクションが想定される。この回避方策としては吸入口付近の含水比を強制的に高め土砂を崩す方策が有効であり、例えば吸入口付近への水噴射が考えられる。

4. 土砂吸引模型実験による確認

(1) 土砂吸引実験の概要

次に、本排砂管による土砂吸引状況を把握・確認するために実験を行った。実験は、清水実験と同じ実験水槽及び計測機器等を用いた。水位差600mm、土厚250mmは一定とした。図-8に土砂吸引実験の全体概要を示す。

本実験の堆積土には8号珪砂を用いた。水中に敷き均

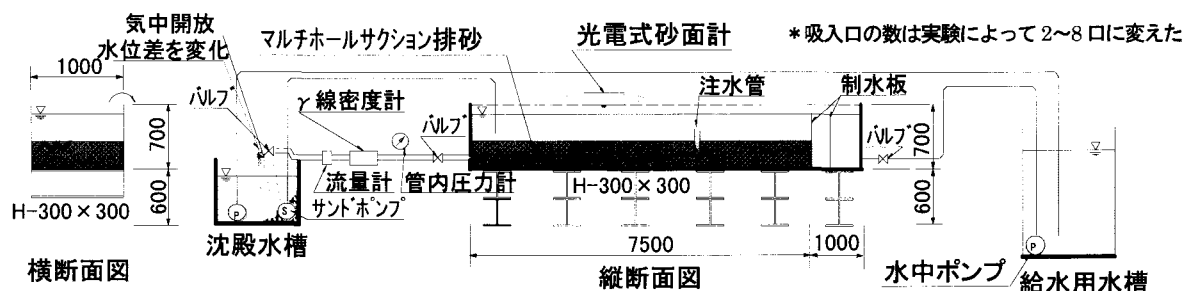


図-8 土砂吸引実験の全体概要

表-3 実験に用いた8号硅砂の土質性状

項目	値
密度 G_s	2.642(g/cm ³)
湿潤単位体積重量 ρ_t	1.936(g/cm ³)
乾燥単位体積重量 ρ_d	1.505(g/cm ³)
最大密度 ρ_{max}	1.569(g/cm ³)
最小密度 ρ_{min}	1.162(g/cm ³)
透水係数 k	1.12×10^{-3} (cm/s)
粒度分布	0~0.053(mm) : 22.4(%) 0.053~0.075(mm) : 26.0(%) 0.075~0.106(mm) : 30.3(%) 0.106~0.150(mm) : 16.8(%) 0.150~0.210(mm) : 4.5(%)

していく程度で特別の締め固めはしていない。その密度、透水係数、粒度分布などの土質性状については表-3にまとめた。なお、使用土砂については現地土砂を想定した相似則に基づく粒径が小さくなりすぎるため、使用可能な最小粒径砂として8号硅砂を用いた。なおこの場合、実対象堆砂粒径は0.1~1.0mm程度とすれば、粒径については相似則から見て、実験の方が大きい粒径を用いていることになる。

(2) マルチホールサクシヨン排砂管の土砂吸引状況

本排砂管の土砂吸引状況について、排砂管に設置した吸入口の数と実験結果を表-4(1)にまとめた。実験は吸入口2~8口までの排砂管を用いた。なお、最初から補助機能を用いない場合を単純型としている。土砂吸引実験の結果では、土砂の吸引初期あるいは吸引途中に管内で閉塞するケースが多い。実験結果では、6口排砂管で4口までおよび2口排砂管で2口まで吸引した結果の他は全て管内閉塞のため排出が不可能であった。管内閉塞は、吸引された土砂が管内の流量不足のため排出されずに閉塞するものと推定される。また、吸入口付近の砂粒子の締め固め具合やアーチ効果などで排砂管内に水が吸入されにくい事も考えられる。

実験結果では、6口排砂管で4口まで吸引できたケースがある反面、5口や4口の排砂管では吸引が出来ずに閉塞している。これは吸入口周辺の土砂のわずかな堆積

表-4 吸入口の数と土砂吸引実験結果

(1) 単純型 (最初に補助機能を使用しない)

吸入 口数	吸入部 延長*	単純型	補助機能追加	
			上流端から注水	吸入口水噴射
8口	2.45m	閉塞	—	—
6口	1.75m	4口まで吸入	5口まで吸入	—
5口	1.40m	閉塞	5口まで吸入	—
5口	1.40m	閉塞	—	4口まで吸入
4口	1.05m	閉塞	4口まで吸入	—
4口	1.05m	閉塞	—	4口まで吸入
2口	0.35m	2口まで吸引	—	—

(2) 補助機能付加型 (最初から補助機能使用)

吸入 口数	吸入部 延長*	単純型	補助機能追加	
			上流端から注水	吸入口水噴射
6口	1.75m	—	6口まで吸入	—
4口	1.05m	—	4口まで吸入	—

*)最上流と最下流の吸入口間の距離

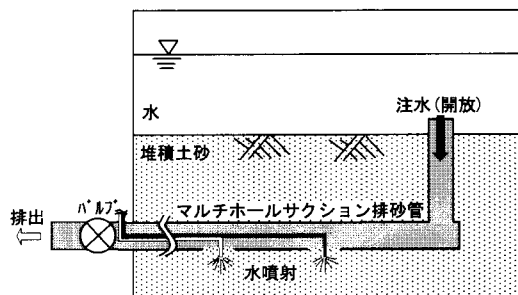


図-9 補助機能の概要 (注水管と水噴射)

状況の差異による影響であるものと考えられる。しかし、実際の貯水池でも堆積土砂の状況が一定でないことを考えると、多少の堆積状況の違いがあっても安定して吸引できる工夫が必要である。表中には、管内閉塞を生じた場合の、閉塞回避の補助機能として①上流から強制的に流量を与え管内掃流力を大きくする方法(注水)、②詰まっていると思われる吸入口付近に直接水流を与える方法(水噴射)、の2つについて試験的に実施した(図-9)。表-4(1)に示すように、閉塞したケースでも補助機能を追加することで吸入が成功しており、閉塞対策に有効であることが分かった。

表-5 上流端からの注水量確認実験結果

注水量(定常時) (l/min)	吸引結果	最大管内流速 (m/s)	最大吸入流速* (m/s)
0.0	閉塞	0.00	1.47
1.5	閉塞	0.22	1.49
2.5	4口吸引	1.03	1.49
3.5	4口吸引	1.07	1.44
53.6	4口吸引	1.08	(1.82)**

*清水状態の測定値 **()は未測定のため数値計算による

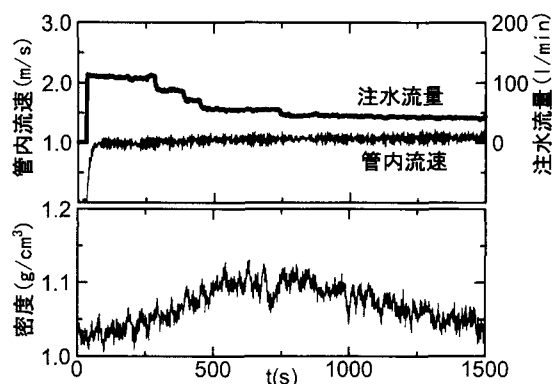


図-10 上流からの注水量と管内流速・濃度の関係

(3) 適用性拡大のための補助機能の効果

a) 上流端からの注水

表-5 には注水量を変化させたケースの注水量, 吸引結果, 管内流速および吸入流速の最大値をまとめている。上段4ケースの注水量では管内に土砂が堆積した状態での排出だったため, 5段目のケースでは注水管の径を太くして注水量を増やしている。なお, 注水量以外の条件は(1)と同じである。

表-4(2)の右側欄に示すように補助機能として上流端から注水した場合, 各実験ケースではそれぞれ確実にまた安定して排砂管が機能した。注水は, 排砂管の上流端を堆積土砂から水中に伸ばし, 水位差と排砂管および吸入口周辺の堆積土砂の特性により自動的に流入流量が調節される自然流入方式とした。図-10に注水量53.6 l/minのケースの注水流量と管内流速および濃度を示す。初期の管内流速が小さい間は注水流量が100 l/minを越えるのに対して, 100s以降の吸引が始まり管内流速が定常に向かうに従い注水流量が50 l/min程度まで小さくなりほぼ定常値となっており, 注水量が自然に調節されていることが分かる。

注水を土砂吸引当初から追加して成功している実験ケースでは, 表-5に示すようにその管内流速が1m/s程度であり, また閉塞したケースでは管内流速が0.2m/s程度であることからDurand式による沈殿限界流速以上の管内流速が必要であることが確認できた。またこのケースでは, 管内流速約1m/sに対し排出土砂密度は1.04~1.10g/cm³程度, 真体積濃度で4~11%程度が得られた。

b) 吸入口周辺の水噴射

吸入口への水噴射は内径0.5cmのパイプにより最大4.0 l/minで水噴射した。その効果は, ①吸引開始前に実施することによる吸引促進, ②閉塞を生じてしまった際の吸引回復, の2通りの使用方法が考えられる。ここでは後者の場合を想定し実験による確認を行ったところ, 吸入口4口の管で注水を行わず管内閉塞を起こした後に水噴射を実施することにより土砂吸入・流下が成功した。実験では, 水噴射直後に渦動管上部の砂表面がボーリングを起こし, その後に吸入口上部に堆砂上面までつながる水道となる縦孔ができた後に土砂吸入を開始していた。

5. おわりに

マルチホールサクション排砂管の水理特性について実験的な検討を行い, 以下の点が明らかになった。

- 1) 道上らの運動方程式に吸入圧損を加えた水理モデルを提案し, このモデルにより解析した本排砂管の清水定常状態での吸入流速, 管内流速および管内圧力は実験計測結果とよく整合した。
- 2) 単純型の土砂吸引実験では, 管内閉塞を生じるケースが多く, また土砂吸引の安定性は十分ではない。
- 3) 閉塞回避の補助工法として水理モデル解析から推定した上流から注水し管内掃流力を大きくする方法は有効であることが実験結果からも確認された。
- 4) 吸入口周辺を水噴射し含水比を高め土砂を緩める方法は流量係数を大きくする効果を持ち, 実験結果からも吸引促進(時間短縮)および閉塞状況にある状態を吸入・流下状態に回復する機能を確認できた。
- 5) 上記2つの補助工法を付加することにより有効管長までの機能発揮が安定して可能になった。

今後は, 対象となる堆積土砂を特に粘性土に広げ適用性の確認をしていくとともに, 有効管長の拡大など堆砂排除可能区域の拡大方法の開発などが課題になる。

参考文献

- 1) 岡野真久・梅田 信・田中則和・横森源治: 洪水時におけるダム貯水池流入微細粒土砂の挙動把握と貯水池堆砂管理への応用, 土木学会河川技術論文集, 第9巻, pp. 73-78, 2003.
- 2) 吉良八郎: ダム堆砂とその防除, 森北出版, p349, 1982.
- 3) 道上正規・小田明道: 沈砂池の排砂工に関する研究, 鳥取大学工学部研究報告, 第17巻, 第1号, pp. 81-92, 1986.
- 4) 今岡安則・金元高志・朝日 宏: 奥津第二発電所における効率的な流入土砂対策, 電力土木, No. 303, pp. 30-34, 2003.
- 5) 榎木・出口: 新編 海岸工学, 共立出版, p122, 1996.
- 6) 手島精一: 固体の長距離パイプ輸送について一その動向と技術的問題点一, (財) 日本産業技術振興協会, p24, 1970.

(2003. 9. 30 受付)