水圧吸引方式の土砂管路輸送技術*

Pipeline Sediment Transportation Using Hydro Suction Sediment Removal Systems

片山 裕之**
KATAYAMA Hiroyuki田島 芳満***
TAJIMA Yoshimitsu

Abstract This paper shows Pipeline Sediment Transportation using HSRS (Hydro-Suction sediment Removal Systems) which is one of countermeasures for removable sedimentation in a dam reservoir. Since HSRS can also use power other than water head, it is the technology in which expansion of scopes, such as not only dam reservoirs but river channel, a seashore region, etc., is expectable. This paper is reported about the function of pipeline sediment transportation. Therefore, it reexamined about experiment data from a viewpoint of sediment discharge and flow state of sediment in a pipe-line.

Keywords: HSRS(Hydro Suction sediment Removal Systems), Dredging in a dam reservoir, Sediment discharge, Pipeline transportation, Flow state of sediment in a pipeline

1. 緒言

管路を用いた輸送技術は、我々建設業に従事する者にとっては掘削または浚渫した土砂の輸送を最初に思い出すが、一般的には鉱物や食品系材料の輸送など幅の広い技術である。筆者は、建設業に従事し、浚渫土砂の管路輸送の検討に関わってきたことから、本稿では対象を土砂に絞って、管路による輸送技術の一部をご紹介させて頂くこととする。

港湾では航路水深維持のため浚渫工事を実施してきた。従来の浚渫に代表される通常の管路土砂輸送では、高濃度による流速低下に伴う閉塞などの問題が生じないように一般的に高エネルギー（高揚程、高流速）の運用とされ、また経済性の観点から特に環境上の配慮事項がない限り、閉塞しない程度の高濃度土砂輸送が通例であった。従って稼働安全率は高いが、エネルギーの観点からは不経済であった。

しかし、例えば近年のダム堆積土砂の排除技術の研究では、今まで主流であったポンプ動力に代わって、環境配慮の観点から、化石燃料を用いず自然営力として水位差を利用したり、排砂効率が多少低くても低濃度で安定した排砂を目標とする技術開発も見られるようになってきている[1]。低濃度排砂は、下流河川への土砂還元の観点からも望まれる技術である。

ダム堆積土砂の下流河川への還元に関連する運用条件の制約等から比較的低濃度の排砂が許容される場合、環境負荷の観点からも低エネルギー（低揚程、低流速）で、稼働安全率は若干低くなるものの低コストの土砂輸送システムが望まれることとなる。本稿では、低エネルギーな管路土砂輸送システムの開発を念頭に、特に管路内の土砂輸送機能の把握を試みてきた成果の一部を報告させて頂くものである。特に基礎的研究として、管路内の土砂流動形態、それに伴う損失の評

* 2013.7.30 受付

** 五洋建設株式会社 技術研究所 〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1

TEL: (0287)39-2123 FAX: (0287)39-2132 E-mail: Hiroyuki.Katayama@mail.penta-ocean.co.jp

*** 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻

価方法、排砂量の評価手法について検討した結果を紹介する。吸引排砂中の管路内は、土砂と水の固液二相の混相流となっている。また同時に、筆者が所属する一般社団法人ダム水源地土砂対策技術研究会（土砂研）で検討を続けてきている水圧吸引方式ダム堆積土砂排除工法の一つであるマルチ・ホール・サクション（MHS）排砂管工法[2]についても紹介させて頂く。

2. 管路土砂輸送技術

2.1 管路スラリー輸送の既往の研究

例えば Durand[3]、八木[4]に見られるように、1950 年代から管路を利用したスラリー輸送の観点からの研究が行われてきている。特に、土砂輸送時の管内圧力損失、流動形態、各流動形態に応じた限界流速についての研究が多くなっている。

Fig. 1 に示すように、沈降性スラリーの流動状態については、流速が大きいと均質流（浮遊流）となるが、流速の低下とともに、下層が高濃度となる不均質流、下層に摺動層が生じる摺動流、下層に堆積層が生じる堆積流、と変化する。それぞれの状態変化点における流速を浮遊限界流速、摺動限界流速、堆積限界流速と定義される。またスラリー輸送時では清水より圧力損失が大きくなるが、流動形態の変化に伴う圧力損失最小点（最小エネルギーとなる点）があることも知られており、対応する流速を臨界流速と定義されている。

Durand[3]は、摺動層を伴う二相流として取り扱えるスラリーに対して、水平管の場合の圧力損失について次式を与えている。

Fig. 1 Flow state in a pipeline[5].

Fig. 2 Relationship between F_L and grain diameter[4].

$$\phi = \frac{i - i_w}{i_w C} = K \left[\frac{V^2 \sqrt{C_D}}{gD(s-1)} \right]^{-n} \quad (1)$$

ここで、 ϕ : 圧力損失係数、 i : スラリーの水力勾配、 i_w : 清水の水力勾配、 C : 真体積濃度、 V : 管内流速、 C_D : 土粒子の抗力係数、 g : 重力加速度、 D : 管径、 s : 土粒子と水の比重の比 ($=\gamma_s/\gamma_w$) である。

式(1)中の K と n について、多くの研究者が実験などから提案している（例えば野田[6]など）。ただし、どれも一般性はなく粒子の影響を考慮していないこともあり、粒度分布を考慮した圧損係数の提案（Kazasnskij[7]）もある。

各限界流速についてもいろいろな研究者によって提案されているが、代表的なものは Durand[3]による次式である。これは堆積限界流速に相当するものと考えられる（Fig. 2）。

$$V_L = F_L \sqrt{2gD(s-1)} \quad (2)$$

ここで、 V_L : 堆積限界流速、 F_L : 土粒子径と濃度によって決まる係数である。

また八木[4]は、臨界流速について、Durand の圧力損失式を微分することによりエネルギー最小点の流速を求め、実験から求めた C_D と土粒子径 d_s との関係を用いて次式を提案している。

$$V_c = 5C_v^{1/3} D^{1/2} \left[4.5 - 1/\sqrt{d_s} \right]^{5/6} \quad (3)$$

ここで、 C_v : 体積濃度、 d_s : 土粒子径である。ただし、式の形から分かるように、この式は土粒子径 d_s が 0.05(mm)程度以上の場合にしか適用で

きない。

限界流速式の代表的な二つを紹介したが、その他も含め提案されている式はそれぞれ適用範囲があるものと考えられ、同じ条件で計算をしてもかなりのばらつきがある。流動状態の指標としては、条件に応じて使い分ける必要があると考えられる。また、種々の条件による実験結果などから研究されているにも関わらず、排砂量あるいは排砂濃度について汎用的な整理をされたものは今のところ見当たらない。これは、流動形態、管径、流速、輸送対象物質の特性などパラメータが多く、定量的評価が難しいためと考えられる。

2.2 水圧吸引工法による管路土砂輸送

水圧吸引土砂排除システム（HSRS）とは、管内外の圧力差で吸引力を発生させ、管に設けられた吸引口から水とともに土砂を吸引・排除し、管路により土砂輸送を行うものである。HSRS の課題としては、堆積土砂が固結した場合の吸引不能、管路内閉塞によるシステム停止、堆積土砂に含まれる流木などの障害物による吸引口や管路内の閉塞の問題などが挙げられるが、大規模な実験が容易ではなく、これら課題を克服した実績がないことも実用化へ踏み切れない一つの要因となっていると思われる。なお HSRS は水位差以外の動力も使用可能であるため、ダム貯水池だけでなく河道や海岸域などの水頭差が確保できない場所など適用範囲の拡大が期待できる技術である。

HSRS は、①集砂や堆積土砂の性状に関する課題、②土砂を吸引口から吸引する過程の現象の把握、③吸引した土砂を管路輸送する機能の把握、④下流河川への放流および下流環境に与える影響と効果の把握、などの課題を持っている。土砂排除システムの機能としては、③の管路の土砂輸送機能で輸送能力の上限が規定され、①あるいは②の条件によって能力が決定される。

また、現在のところダム堆積土砂排除工法として検討されている HSRS の吸引口の形式としては、埋設固定型の排砂管を利用したものや吸口移動型の2種類がある。筆者ら[1]は、2種類の吸引口形式と、動力として水位差またはポンプ動力の2種類について種々の実験データを収集して土砂輸送能力、管内流動形態、動力、吸口形状などの違いが排砂量に及ぼす影響について検討している。また同時に管内流動形態の指標としての限

Fig. 3 Empirical data (velocity, density of discharge, pressure gradient) using MHS method[1].

Fig. 4 Diagram of suction using underground suction pipe type[1].

界流速式の適用性についても考察を加えている。ここでは埋設固定型の吸引方式の特徴について紹介する。

埋設固定型の一例として、Fig. 3 に MHS 排砂管工法の室内実験データを示した。特徴としては、排砂初期に高濃度ピークが見られ（Phase1）、その後緩やかに濃度が低下していき低濃度の定常排砂状態（Phase2）に落ち着いているのが分かる。また、高濃度時には圧力損失が大きくなり、その

Fig. 5 Relationship between velocity and concentration in experiment using MHS[1].

(1) Coarse sand

(2) Fine sand

Photo 1 Flow state of sediment in pipe-line[8].

影響で管内流速も大きく低下している。Fig. 4 に示す埋設固定型では、Phase1 では吸引口周辺の土砂を吸引するため能力に応じた土砂が管内に流入するが、その後は吸引口周辺にできた空隙に崩壊・沈降してくる上部の土砂を吸引するため、吸引口への土砂供給が能力より少ない可能性が高い。このケースを含め数ケースの流速と濃度時系列データのスクエアープロットを Fig. 5 に示した。これから高濃度となると流速が低下することが明らかであり、両者に高い相関があることがわかる。

また Photo 1 には細砂（6号硅砂）と粗砂（4号硅砂）を使った吸引実験における排砂管輸送部の様子を比較したものである。粗砂では管底部に堆積層が見られるが、細砂では堆積層が見られなかった。この実験では管内流速がほぼ同程度であったので、同じ流速に対して粒径が異なると流動形態が異なり得るということであり、また流動形態により損失も異なる。

2.3 管路土砂輸送への限界流速式の適用性

既往の実験データを用いて限界流速公式の適用性を確認した[1]。ここでは、管径、濃度だけでなく、土粒子径の効果を簡単に取り込める八木[4]の式(3)を用い、Fig. 6 に示すように平均的な管内流速と式(3)による限界流速との比と、土砂濃度の関係を整理した。なお、ポンプ動力のデータの一部はシルト粘土に対する浸漬のため、式(3)が適用できないため除外した。また吸口移動型で他のデータよりやや右側に分布しているが、脈動流によるデータ変動の影響および対象土砂がシルト質土のため式(3)の適用に問題がある可能性があり、この後の検討から除外した。これらを除いて見ると、若干のばらつきはあるものの概ね比が 1~2 を下回ると高濃度となる傾向が見られた。管内流速が限界流速以下となると、輸送能力は低下するが、流動形態が褶動流あるいは堆積流となることにより下層に高濃度層が生じる。この影響で濃度が高くなっているものと考えられるが、水平管における二相流の濃度計測精度にも留意する必要がある。

Fig. 6 Relationship between velocity and concentration in corrected data[1].

2.4 土砂輸送能力評価の試み

次に、HSRS による土砂輸送機能について検討した。

既往の管路土砂輸送の中で用いられている土砂輸送能力を表すパラメータとして、Durand の圧力損失式(1)に見られる粒子フルード数 F_r^* (式

(4) がある。この式には土粒子の抗力係数 C_D が含まれるが、収集したデータには平均的な粒径情報しかないため、ここでは粒子の影響を含まないフルード数 F_r を用いて土砂濃度について整理した。

$$F_r^* = \frac{V^2}{gD(s-1)} \sqrt{C_D} = F_r \frac{\sqrt{C_D}}{(s-1)} \quad (4)$$

ここで、 C_D ：抗力係数である。

なお、フルード数 F_r 自体は通常、開水路の水理現象に用いるパラメータである。管路における土砂輸送力が摩擦損失により発生する圧力差と考えると、式(5)に示すようにフルード数 $F_r = V^2/(gD)$ がパラメータとなることが分かり、式(4)はこれに粒子の影響を考慮したパラメータへと拡張したものと考えることができる。

$$\Delta P = f \frac{V^2}{2g} \frac{\Delta x}{D} \gamma \quad (5)$$

一方、管路流のパラメータとしてレイノルズ数 Re があり、管内流が乱流になるほど土砂輸送能力が増加すると考えることもできる。

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (6)$$

ここで、 ν ：渦動粘性係数である。

代表的なパラメータとしてフルード数、レイノルズ数、および流速に着目し、排砂量との関係を調べた。詳細は前報[1]を参照して頂くこととして、その結果、レイノルズ数と排砂量の相関係数が一番高くなった (Fig. 7)。またこの結果からは、管内の土砂流動形態が堆積流と考えられるケースは上側に、浮遊流と考えられるケースは下側に分布する傾向が確認され、流速をパラメータとした場合よりも流動状態による分布が見られると考えられる。逆に吸口形式による違いは明確には見られなかった。即ち、吸口形式に寄らず、流動形態に応じて吸引口に土砂輸送能力に応じた十分な土砂供給がある場合は摺動・堆積流のような不均質流となり、吸引口への土砂供給が、例えば埋設固定型のように周辺の土砂崩壊や沈降に支配され不十分の場合は浮遊流となる可能性が高いと考えられる。

次に、レイノルズ数との関係において、流速と限界流速との比が2を境界として分類したものを

Fig. 7 Relationship between Reynolds number and sediment discharge in corrected data[1].

Fig. 8 Relationship between Reynolds number and sediment discharge by V/V_c [1].

を Fig. 8 に示した。全てのデータで、概ね上下に分類されており、限界流速が流動状態および排砂量の定量的評価に重要な指標であることが示唆される。また、レイノルズ数と排砂量の関係から、概略の土砂濃度を推定できることになる。なお、この関係から導いた排砂濃度の推定式は以下となる。

$$C_v = \begin{cases} 5.09 \times 10^{-13} \nu^{-1.8} V^{0.8} D^{-0.2} : \text{上限 (堆積流)} \\ 8.91 \times 10^{-14} \nu^{-1.8} V^{0.8} D^{-0.2} : \text{下限 (浮遊流)} \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 C_v ：排出濃度、 ν ：水の動粘性係数、 V ：管内流速、 D ：管径、である。

3. 土砂研における HSRS の研究

3.1 MHS 排砂管工法の開発

土砂研では、ダム水源地の堆積土砂に関する技術開発を行ってきている。例えば、従来の浚渫に関する技術開発だけでなく、U型コンベアや空気圧送によるスラリー輸送技術の開発も行っている。平成 13 年度からは、これらの技術開発に加え、環境へのインパクトを考慮して HSRS の研究を開始した。

平成 13 年度は、その中でも課題の多い堆砂を吸入する部分（吸口）について、室内模型実験により検討を行い、今の MHS 排砂管工法の原案となる排砂管による水圧吸引土砂排除工法を提案した。平成 14 年度は、平成 13 年度の補足実験を行い、吸入理論モデルを検討するための基礎データを取得するとともに、管内閉塞回避や吸入範囲拡大方策についても実験による検討を行った。平成 15 年度からは、管内閉塞回避の補助機能として上流部に吸水口を付加したタイプを MHS 排砂管工法（Fig. 9,10）と名付け、その土砂吸入メカニズム理論の構築をするとともに、現地適用に向けた基本的検討として、吸入範囲拡大方策となる吸砂口の開閉制御や吸砂口付近の高圧水噴射の有効性を確認した。また室内実験結果より、MHS 排砂管工法の 1 次元水理モデルを構築した。

Fig. 9 Application image of MHS in a dam reservoir[9].

Fig. 10 Illustration of MHS[9].

Photo 2 Overview of field experimental devices[9].

Photo 3 MHS installed in the pond[9].

Photo 4 Discharge pipe during operation[9].

さらに実際の貯水池への適用性を高めるため、平成 16 年度には長野県の上野川水系三峰川にある美和ダム湖内にて、美和ダムの堆積土砂を対象

とした現地スケールの排砂実験を実施し、その適用性を確認した (Photos 2~5)。これらの成果を整理し、貯水池の状況、排砂管の敷設レイアウト、使用できる水位差、堆積土砂の土質性状などの基本的条件による概略設計手法を確率している。

Photo 5 Geometry change after suction[9].

3.2 MHS 排砂管工法の改良

MHS 排出管工法は、吸引により出来た間隙に管上方の土砂が浸透流により崩され流入してくることを期待するものだが、その後の検討で地盤条件や吸引土砂が高土厚になると、アーチアクションが生じることにより管上方の堆積土砂が自立し崩れてこないことが課題となった。

そこで平成 23 年度より、吸引土砂が高土厚の場合にも土砂崩壊を促進し安定した吸引を可能とするため、Fig. 11 に示すように吸引口を鉛直方向に配置することにより各吸引孔が分担する吸引土厚を薄くした鉛直埋設吸引管排砂工法 (以下、「縦型 MHS 排砂管工法; VMHS」という。) を提案し、模型実験によりその吸引特性および排砂性能を検証している[8]。

Fig. 11 Image of Vertical-MHS (VMHS).

平成21年度には、VMHSの砂を対象とした小規模吸引実験を実施し、吸引口を鉛直に配置した吸引管で、表層に近い吸引孔から順次、標高の低い吸引孔へと吸引が移行し、アーチアクション対策として機能することを確認した (Photo. 6)。

Photo 6 Visualization of a suction situation by VMHS[8].

更に平成 24 年度には、排砂実験のスケール効果と実ダムへの適用性を確認するため、中規模室内排砂実験を実施した (Photo 7)。実ダム堆積土砂では砂分だけでなくシルトの混入も多くなり、吸引に対する抵抗も大きくなるが、安定した吸引が可能となるよう検討をしているところである (Photo 8)。

Photo 7 Middle scale experiment institution view.

Photo 8 Geometry change after suction by middle scale experiment.

4. 結 言

本稿では、土砂研での検討成果を中心に、筆者らが水圧吸引式の管路土砂輸送技術に関して得てきた知見の一部を紹介したものである。管路による土砂輸送の場合、土砂性状の影響が大きく、例えばダム堆砂対策として実用化を図るためには、全国の個々のダム堆積土砂に対する検討をする必要がある。今後も水圧吸引式の管路土砂輸送技術がダム堆砂対策として実用化されるよう鋭意研究を進める予定である。また、本稿に少しでも興味のある方に参考になれば幸いである。なお、土砂研の活動については <http://doshaken.com/> を参照して頂きたい。

参考文献

- [1] Katayama, H. and Tajima, Y., Studies on Dredging in a Reservoir using HSRS (Hydro-Suction Sediment Removal System), Proceedings of River Technology, Vol. 13, 393-398 (2007).
- [2] <http://doshaken.com/technology/mhs.html>
- [3] Durand, R., Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes-Experimental Research, Proc. IAHR 5th Congress, Minneapolis, 89-103(1953).
- [4] Yagi, T., Trend of Slurry Transportation, Umetate to Shunsetsu(in Japanese), Vol. 109, 32-36(1983).
- [5] Okano, M., Matano, F., Sekimoto, T. and Katayama, H., Experimental Study on the Hydraulic Characteristics of the Multi-Hole Suction Pipe, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 48, 1393-1398(2004).
- [6] Noda, K., Pipeline Sand Transportation, Summer Lecture Collection about Hydraulic Engineering (A course) (in Japanese), Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering, JSCE, A-3-1-A-3-16(1986).
- [7] Kazanskij, I., Scale-Up Effects in Hydraulic Transport Theory and Practice, Hannover, Federal Republic of Germany, B-3-47-B-3-79(1978).
- [8] Katayama, H., Fukuhama, M. and Arakawa, K., Experimental Study about The Vertical Multi-Hole Suction Pipe Method Using Water Head, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering) Vol. 69(4) (2013)(in printing)
- [9] Nakashima, H., Katayama, H. and Tajima, Y., Development and Applications of Multi-Hole Suction Pipe, Proc. International Symposium on Sediment Management and Dams, 175-182(2005).