

低エネルギー管路土砂輸送システムの 基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON LOW ENERGY SAND TRANSPORTATION PIPELINE

片山裕之¹・田島芳満²

Hiroyuki KATAYAMA, Yoshimitsu TAJIMA

¹正会員 博(工) 五洋建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

²正会員 Ph.D 東京大学大学院准教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Conventional pipeline sand transportation systems generally consume excessive amount of energy to ensure the system to transport sediments without causing problems such as blockage of the system. These systems are thus economically inefficient although the safety operation factor of the system may be relatively high. On the other hand, some systems aim to utilize clean energy such as water head to transport sediments. While these systems, consuming relatively low energy, may have only small sediment transport rates, the system may be operated for longer duration of time without having significant impacts on the surrounding environment. The ultimate goal of this research is thus to develop such low-energy sand-bypassing systems. This paper especially aims to investigate the sediment transport characteristics in the pipe flow especially when the flow velocity is relatively low.

Key Words : Pipeline sand transportation, dredging, low energy, low cost, flow-condition in a pipeline, suspended flow, sliding flow, depositional flow

1. 研究の目的

従来の浚渫などの通常の管路土砂輸送では、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), 高濃度の運用とされてきた。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, 近年のダム排砂の研究では, 今まで主流であったポンプ動力に代わって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¹⁾。低濃度排砂は, 下流河川への土砂還元の見点からも望まれる技術である。また静岡県では侵食海岸への土砂供給として恒久的なサンドバイパスシステムの導入を検討している²⁾が, 公共事業ではLCC(Life Cycle Cost)の見点からのプロジェクト評価が必須であり, 低コストの運用が可能な土砂輸送システムの開発も望まれる。

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, 環境負荷の見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システムが望まれる。本研究では, 低エネルギーな管路土砂輸送システムを開発することを念頭に, 特に管路内の土砂輸送機能の把握を試みた。その基礎的研究として, 管路内の土砂流動形態, 排砂量の評価手法について検討し, 低エネル

ギー管路土砂輸送システムを提案するものである。

2. 管路土砂輸送の形態

管路による土砂輸送の分類として, ①土砂吸引形式による分類, ②輸送動力による分類, ③管路内の土砂流動状態による分類, などが考えられる。

(1) 土砂吸引形式による分類

沼野ら³⁾はサンドバイパスの海外先進事例を調査し, 吸引部が土中にあるタイプと表層から採取するタイプ, 吸口の位置について移動式と固定式に分類している。片山ら¹⁾も海岸だけでなくダム貯水池の堆砂対策技術も含めた国内外の管路土砂輸送システムを紹介し, 吸口移動型と吸引部が土中に固定される埋設固定型に分類している。

これらを参考にすると, 土砂を表層から吸引しながら吸引位置を移動していくタイプ(吸口移動式)と位置を固定するタイプ(吸口固定型), 土中に埋設した吸引部上に堆積した土砂を吸引するタイプ(埋設固定型)の大きく三種類に分類される。

吸口形式の違いについては, 表層から吸引する吸口移動型および吸口固定型については, 土砂の圧密状態などを考えなければ, 概ね吸引能力に応じた土砂が管路内に流入してくると思われる。ただし, 吸口の位置管理(表層との距離)や吸引位置の移動

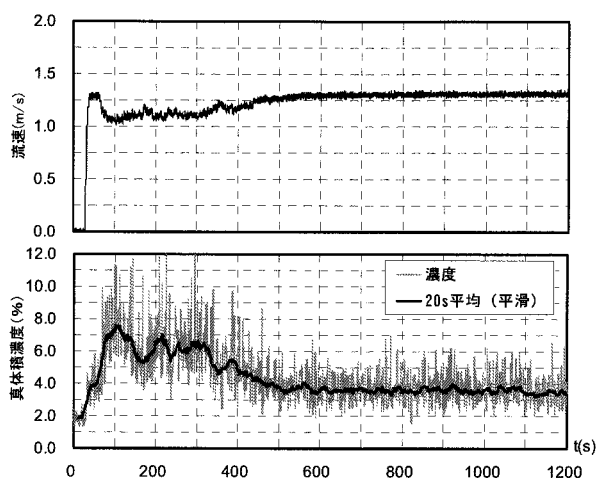


図-1 輸送管路部における流速，真体積濃度の変化例

時には流入土砂量が変動する。

一方，埋設固定型は，初期は吸引口周辺の土砂を吸引し（Phase1），その後は上部堆積土砂が崩壊し吸引部周辺に沈降してくる（Phase2）。従って，Phase1 では吸引能力に相応の土砂が流入してくるが，Phase2 では条件によっては吸引能力に相当する土砂に対して不十分な土砂供給も考えられる。言い換えると，吸引初期と後半で流入土砂量が変動すると考えられる（図-1）。

どちらの形式も要因は異なるが土砂流入量が変動するため，いかにその変動を少なくし，吸引効率を高めるかが課題となる。

(2) 輸送動力による分類

土砂吸引の動力としては，従来のポンプ浚渫としてポンプによるものの実績が多いが，ダム貯水池など地形条件から可能となる水位差を利用したものもある。ポンプを利用すると水位差に加圧することが可能のため，水位差以上の能力（流速，輸送距離）が得られる。しかしながら，吸引メカニズムの観点では，吸口部の管内外圧力差により発生する流れに伴って土砂が吸引されるため，吸引土砂量を直接決定する圧力差に着目すれば，動力の有無に関わらずこれらのシステムを同時に比較することができると考えられる。ただし，水位差に比べポンプは管内圧力の変動が大きくなるため，この脈動効果が吸引土砂に影響を与えることも考えられ，今後より詳細な検討が必要である。

表-1 管路土砂輸送形態の分類¹⁾（一部加筆）

吸口形式	動力	浚渫実績事例
吸口移動型	ポンプ	ポンプ浚渫
	水位差	サイフォン浚渫 Hydro-J 工法，SY 工法
空中固定型	ポンプ	豪州サンドバイパスシステム
埋設固定型	水位差	Hydro-Pipe 工法 MHS 排砂管工法

表-1 に管路土砂輸送形態の分類として，土砂吸引方式と動力による分類について整理した。

(3) 土砂流動状態による分類

野田⁴⁾によると，管内の流動状態は，高流速時の均質流（浮遊流）から，流速の低下につれて不均質流，下層に摺動層が生じる摺動流，摺動層が停止し堆積層となる堆積流へと変化する。また各状態の遷移点における流速を浮遊限界流速，摺動限界流速，堆積限界流速と呼ぶ。また土砂輸送時では清水時より圧力損失は大きくなるが，流動状態の変化に伴い圧力損失が最小となる流速が存在し，臨界流速と定義される。従来の浚渫ではこの臨界流速に安全率を乗じた流速を目標に設計されてきている。低エネルギー管路輸送の観点からも，この臨界流速が一つの目標であり，閉塞条件とならない臨界流速の推定が不可欠である。

3. 管路土砂輸送特性の検討

(1) 既往の実験データの収集

本研究では，管路土砂輸送の既往データとして，比較的ケースが多く整理されている埋設固定型に関する実験データを収集した。収集したデータは，図-2 に示すように土砂の性状，管径，流速，圧力，密度，排砂量である。なお，真体積濃度（以降，濃度とする）は計測された密度から変換した。収集したデータのケース一覧を表-2 にまとめた。なお，全てのデータが揃わないが排砂量の比較のためにポンプ浚渫⁵⁾，サイフォン浚渫⁶⁾のデータも使用した。

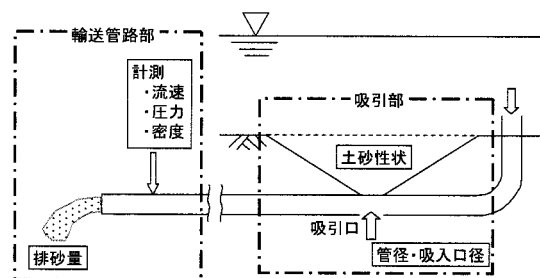


図-2 埋設固定型装置と収集データの全体イメージ

表-2 収集データ一覧（埋設固定型）

土砂 50%粒径 d_{50}	管径 D	吸引口 数・径・間隔	水位差 (流速範囲)	実験 スケール
8号硅砂 0.07mm	52mm	1~2口 23mm 35cm間隔	0.4~1.0m (約 1m/s)	室内 実験
5号硅砂 0.3mm	52mm	1口 23mm	0.4~0.6m (1.0~1.5m/s)	室内 実験
シルト細砂 0.16mm	52mm	1~2口 23mm 35cm間隔	0.7m, 0.8m (約 1m/s)	室内 実験
シルト細砂 0.1mm	300mm	1~2口 134mm 2m間隔	2.0~4.0m (2.5~3.5m/s)	現地 スケール

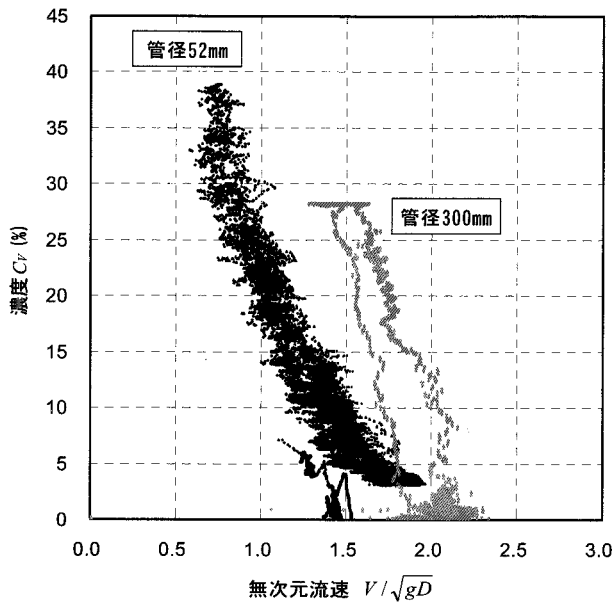


図-3 土砂輸送中の流速 V と濃度 C_V の関係

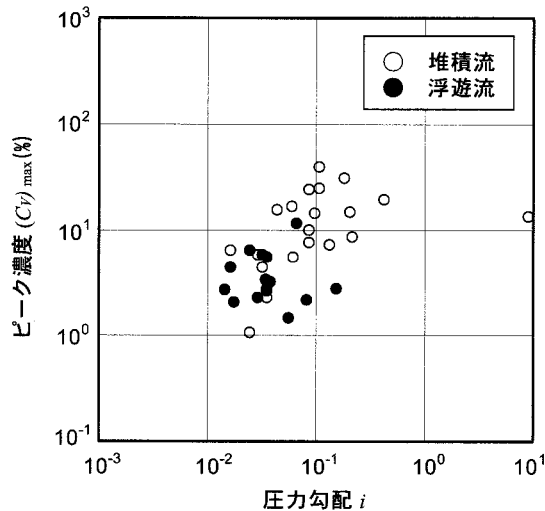


図-4 濃度ピーク時の圧力勾配 i と濃度 C_V の関係

(2) 管路土砂輸送の基本特性

a) 排出濃度特性

まず、管路土砂輸送における基本特性の把握をするために、輸送管路部で計測した濃度 C_V と無次元流速 $V/\sqrt{gD}$ の関係を図-3 に整理した。ここで、 g ：重力加速度、 D ：管径である。また図-1 から明らかなように流速と濃度は排砂中において変動するため、ここでは濃度ピーク時の値について整理した。全体的には、流速が低下すると濃度が高くなる傾向がみられる。これは、流速低下とともに流動状態が摺動流あるいは堆積流に変化することによるものと考えられる。なお、管径により流速や濃度上限などの分布が異なるが、対象土砂の性状の違いなどが影響していると考えられる。

次に、土砂輸送力、吸引力を示すパラメータとして輸送管路部の圧力勾配 i を用い、排出濃度との関

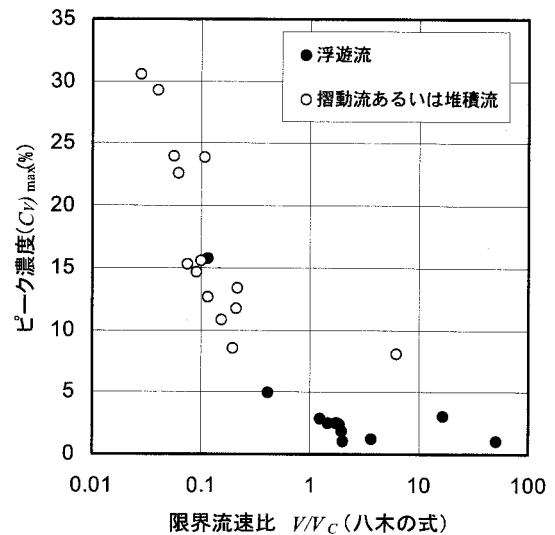


図-5 限界流速比と流動形態の関係

係を調べた結果を図-4 に示した。全体的には圧力勾配 i が大きくなると排出濃度も大きくなる傾向がみられる。また i が大きいほど堆積流となっているが、これは堆積層の存在による損失が増大することによると考えられ、清水中と異なり損失勾配が大きくなるにつれ流速が低下していることを示している。

b) 限界流速と流動状態の関係

流動状態と各限界流速は、輸送物質の特性により若干の違いはあると思われるが、基本的には密接な関係があると考えられる。ここでは、既往の限界流速式のうち、濃度や土砂粒径を考慮できる八木⁷⁾の限界流速式を用いて、実験の流動状態との関係を調べた。八木の式(1)は、Durand⁸⁾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 (ここでは50%粒径とする) との関係を用いたもので、臨界流速 V_c を示していると考えられる。

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

図-5 は、ピーク濃度時の管内流速 V と、実験結果の濃度から計算した V_c との比(限界流速比)と濃度 C_V の関係を示したものである。限界流速比が概ね1を下回ると摺動あるいは堆積流となっており、実験時の流動状態の再現性は高いと言える。また、限界流速比が小さくなると高濃度排砂となる傾向が強く、実験結果における高濃度は管内下層の高濃度層の存在の影響が大きいと考えられる。

c) 排砂量特性

埋設固定型の濃度ピーク時の流速と排砂量の関係を図-6 に示す。図中には比較のため吸口移動型のデータも示したが、これらは平均流速との関係をプロットしている。埋設固定型は、管内の流動状態によって分布が異なり、浮遊状態よりも堆積状態の時に排砂量が大きくなる傾向がみられた。これは、埋設固定型の吸引定常状態では吸引口への土砂供給が土砂の崩壊・沈降速度に支配されるため、土砂供給

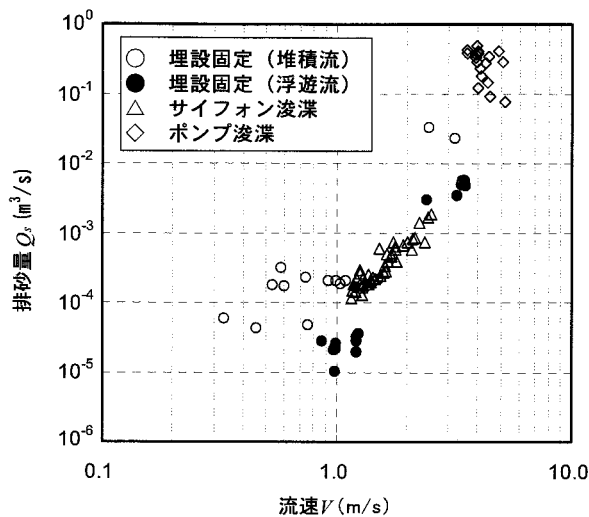


図-6 流速と排砂量の関係

量が能力に対して不十分であることによると考えられる。また埋設固定型の低能力時には能力と土砂供給がバランスするが、流動状態が堆積流となるため実質的な排砂量が増大し、高能力時では土砂供給不足と堆積流の消滅により排砂量が低減するものと推定される。

流速評価の差異はあるものの、吸口移動型のデータは浮遊流状態の一部のデータを除けば埋設固定型のデータと同じ傾向を示していることがわかった。これは、移動式では吸引・輸送能力に対して土砂供給量が十分であることによると考えられる。

4. 漂砂モデルの適用

以上のデータに基づく検証では、土砂吸引口からの土砂供給量が十分にある条件では、管路内の流速と排砂量との間に強い相関があることが分かった。ここでは、管路内に土砂の堆積を許しながら低エネルギーで土砂輸送をすることを念頭に置き、供給するエネルギーと管路や輸送する土砂性状などの情報から可能な土砂輸送量を予測することのできるモデルの開発を試みる。

(1) モデルの概要

上述した条件を勘案し、モデルの開発には管路内にある程度の土砂が堆積していることを仮定する。この仮定の下に既往の漂砂量モデルを管路内の土砂輸送メカニズムに適用し、管路内における土砂輸送モデルを構築する。

a) 底面せん断応力の算定

管路輸送において既往の漂砂量モデルを適用するには、まず、管路内において土砂に作用するせん断応力を算定する必要がある。例えば無次元化した圧力勾配*i*が既に計測値などから求められている場合には、単位長さあたりの管路に作用する平均せん断

応力 τ_b と圧力勾配*i*の間には次の関係が成り立つ。

$$\pi D \tau_b = \rho g i \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2)$$

ここで求められたせん断応力 τ_b は管の全内径に対する平均値となるので、厳密には底面の土砂に作用するせん断応力とそれ以外に区分する必要がある。しかしながら、ここでは単純に平均したせん断応力を用い、以下に整理する手順で掃流砂と浮遊砂による土砂輸送量を算定する。

b) 掃流砂量の算定

管路内に堆積した土砂の表層を移動する掃流砂量を Madsen⁹⁾の掃流砂モデルをそのまま用いて次式で算定する¹⁰⁾。

$$q_{SB} = \frac{8(\tau_b - \tau_{cr,\beta})}{(\rho_s / \rho - 1)\rho^{3/2}g} \frac{(\sqrt{\tau_b} - \alpha_\beta \sqrt{\tau_{cr,\beta}})}{\cos \beta (\tan \beta + \tan \phi_m)} \quad (3)$$

ここで、 β は流下方向の砂面勾配、 $\tan \phi_m$ は底質粒子の動摩擦角、 $\tau_{cr,\beta}$ は海底勾配の影響を考慮した移動限界せん断応力、 α_β は海底勾配による補正係数である。式(3)は $\beta=0$ とした条件では一般的に用いられるMeyer Peter-Mullerの掃流砂量算定式と良く一致する⁹⁾。上式では流下方向の海底の下り斜面勾配 β が動摩擦角 ϕ_m ($\approx 30^\circ$)に近づくとき無限大となり、逆に登り斜面勾配が 90° に近づくときゼロに漸近する。本モデルのように砂面勾配の影響を考慮したモデルを用いることによって、輸送管路が傾斜を持つ場合にもその影響を適切に考慮することが可能となる。ただし上式は単位幅辺りの掃流砂量になるため、管路では砂面幅の次元を考慮する必要がある。ここで砂面幅が管径*D*で代表できると仮定すれば管路内における掃流砂移動量は次式で表される。

$$q_{SB,p} = \frac{8(\tau_b - \tau_{cr,\beta})}{(\rho_s / \rho - 1)\rho^{3/2}g} \frac{(\sqrt{\tau_b} - \alpha_\beta \sqrt{\tau_{cr,\beta}})}{\cos \beta (\tan \beta + \tan \phi_m)} D \quad (4)$$

砂面の幅は管路幅よりも必ず小さいので、より精度の高いモデリングが必要になるかも知れないが、ここでは単純に上式を用いることとした。後で示すように掃流砂量は浮遊砂量よりも1オーダー以上小さくなる場合が多く、砂面幅の評価が実務上問題になることは少ないと考えられる。

c) 浮遊砂量の算定

次に浮遊移動による土砂輸送量を算定する。まず、浮遊砂濃度の算定には、シートフロー条件で適用可能な次のHerrmann¹¹⁾の底面浮遊砂濃度式を用いる。

$$C_0 = 0.0022(\tau_b / \tau_{cr,\beta} - 1) \quad (5)$$

ここで用いられるせん断応力 τ_b はシートフロー条件に対する移動床全体に作用する応力であり、式(3)で算定したせん断応力をそのまま適用することができる。さらに、管路内で一様な渦動粘性係数 $e \sim ku_* D$ を仮定し、管路断面を矩形で近似すれば浮遊砂の平均濃度は次式で算定される。

$$\bar{C} = C_0 \frac{1}{D} \int_0^D \exp\left(-\frac{w_f}{\kappa u_* D} z\right) dz = C_0 \frac{\kappa u_*}{w_f} \left(1 - \exp\left(-\frac{w_f}{\kappa u_*}\right)\right) \quad (6)$$

一方、Moody図表に基づく摩擦係数 f を用いれば、管路内の断面平均流速 U と摩擦速度 u_* との関係は次式で表される。

$$U = \sqrt{\frac{2}{f}} u_* \quad (7)$$

以上より、管路内の浮遊砂フラックスは次式で算定可能である。

$$q_{ss,p} \sim \bar{C} U \frac{\pi}{4} D^2 = C_0 \frac{\kappa u_*}{w_f} \left(1 - \exp\left(-\frac{w_f}{\kappa u_*}\right)\right) \sqrt{\frac{2}{f}} u_* \frac{\pi}{4} D^2 \quad (8)$$

以上、スケーリングを用いて簡易的に既往のモデルを管路内土砂輸送モデルへと拡張した。管路形状や砂面幅の考慮など、改良すべき課題は残るものの、本研究ではこの単純なモデルの適用性およびその将来性について検討するものとする。

(2) 既往データへの適用

収集したデータについて、上記モデルを適用した場合の排砂量と実験結果による排砂量の比較を行った(図-7)。図中、横軸は計算による排砂量(=掃流砂+浮遊砂)、縦軸は実験結果の排砂量である。その結果、8号珪砂によるデータとの比較を除けば計算値と実験値の間には高い相関がみられ、概略の排砂量を管路に応用した漂砂モデルから概ね評価可能であることがわかった。8号珪砂のばらつきについては、排砂量が吸入砂量によって規定されるため、吸引部への崩壊、沈降による土砂供給量が十分でないことによると考えられる。一方、同じ細砂である5号珪砂にはばらつきがみられないのは、8号珪砂に比べ沈降による土砂供給量が多く、能力に応じた供給があったためと推定される。

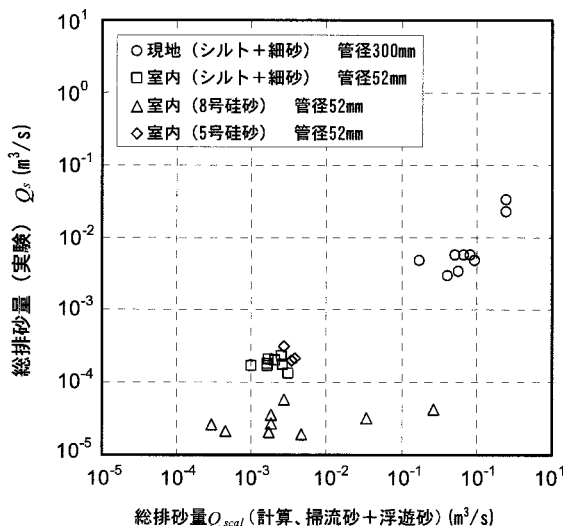


図-7 モデルによる排砂量推定結果

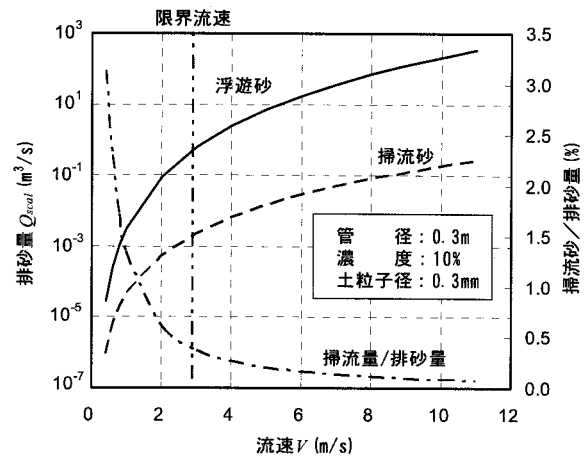


図-8 モデルによる排砂量推定の一例

(3) モデルによる管内流動形態の推定

管路に適用した漂砂モデルで概ねの排砂量が推定できることより、将来的に管径、砂粒子径、流速が与えられると浮遊砂量、掃流砂量が推定できることになる。またこれらの値から、管内の流動形態を推定できることが期待される。

図-8には、一例として管径 0.3m、濃度 10%、砂粒子径(d_{50}) 0.3mmとして、モデルにより浮遊砂量、掃流砂量を計算したものである。図中には、式(1)による限界流速値も示してある。モデル中でもふれたように、浮遊砂量は掃流砂量より1オーダー程度大きい結果となっている。また、流速が限界流速を下回ると掃流砂比率の増加傾向が顕著となっている。この結果も、浮遊流から摺動流、堆積流への流動形態変化と限界流速の相関が高いことを示すものと考えられる。

モデルの精度向上など今後の課題は残されるが、限界流速付近における浮遊砂量と掃流砂量の計算による比率と実験結果の流動状態を確認していくことにより、管内流動形態を推定できる可能性もある。また流動状態の推定精度が高まることにより、輸送可能な限界状態を設定できるようになると期待している。

4. 結論

管路土砂輸送の機能を把握するために、既往のデータの整理を行った。また管内土砂輸送量を、既往の漂砂モデルを管路に適用したモデルにより推定した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 実験結果の管内流動状態および輸送管路部の濃度は、限界流速または管内の圧力勾配と高い相関を有する。
- ② 排砂量は流速と相関が高い。また土砂吸引口への土砂供給量により吸引土砂量が規定されるため、管内輸送能力が高く浮遊流の場合には相対的に濃度が低くなり、逆に低能力の時は供給量が輸送能力に応じた量となり、比較的高濃度の

排砂となる。

- ③ 既往の漂砂モデルを管路に適用したところ、概ね管路土砂輸送量を推定できることがわかった。

本研究により、概略の土砂輸送機能について把握できたが、土砂供給量が吸入砂量によって規定される場合や、管内流動状態の推定精度の向上など課題が残されている。今後は、これらの課題に取り組み、低能力の輸送限界を把握できるよう研究を進めていく予定である。

謝辞：本研究にあたり、有限責任中間法人 ダム水源地土砂対策技術研究会（土砂研）から実験データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 片山裕之，田島芳満：水圧吸引式土砂排除システムの土砂輸送機能について，河川技術論文集，土木学会水理委員会，2007（印刷中）。
- 2) 水谷 将，添田 洋，内山一郎：サンドバイパスシステムの開発と流域土砂管理に関する一考察，財団法人漁港漁場漁村技術研究所 調査研究成果発表会論文集「水産物の安定供給と豊かな海と漁村の再生に向けて」，pp. 51-56，2005。
- 3) 沼野祐二，我原弘昭，佐々木崇之：海外におけるサンドバイパス先進事例について，財団法人 漁港漁場漁村技術研究所 調査研究報告，No. 17，pp. 71-76，2004。
- 4) 野田佳六：土砂の管路輸送，1986 年度（第 22 回）水工学に関する夏季研修会講義集 A コース，土木学会水理委員会，pp. A-3-1～A-3-16，1986。
- 5) 八木得次・宮崎昭児・入江義次・奥出律：鹿島港におけるポンプ船試験報告，港湾技研資料，No. 45，52p，1968。
- 6) Dan G. Batuca & Jan M. Jordaan(Jr)：Silt and Desilting of Reservoirs, *A.A.Balkema*, pp.282-291, 2000.
- 7) 八木得次：スラリー輸送の動向について，埋立と浚渫，No. 109，pp. 32-36，1983。
- 8) Durand R.:Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes-Experimental Research, *IAHR 5th Congress, Minneapolis*, pp.89-103, 1953.
- 9) Madsen, O.S. : Mechanics of cohesionless sediment transport in coastal waters, *Proc. Coastal Sediments '91*, pp.15-17, 1991.
- 10) Madsen, O.S. : Chapter 6 in Coastal Engineering Manual., *U.S. Army Corps of Engineers*, 2001.
- 11) Herrmann, M. and O.S. Madsen : Effect of stratification due to suspended sand on velocity and concentration distribution in unidirectional flows, *J. Geophys. Res.*, vol.112, C02006, 13p., 2007.