

砂礫堆積層を伴う水平管路流れの抵抗と流砂量に関する研究

栗原 崇¹・鈴木 幸一²・渡辺 政広³

¹正会員 工修 復建調査設計株式会社 水工技術部 (〒732-0052 広島県広島市東区光町二丁目10-11)

²正会員 工博 愛媛大学工学部 教授 建設環境工学科 (〒790-8790 愛媛県松山市文京町三番)

³正会員 工博 愛媛大学工学部 助教授 建設環境工学科 (〒790-8790 愛媛県松山市文京町三番)

管路内を砂礫粒子が流送される場合、粒子と管壁の摩擦係数の違い、堆積層の厚さ、エネルギー勾配などの関係から、砂礫堆積層が一体となって管壁を滑る摺動層流れなど開水路流れとは異なった流動形態が表れる。本研究では、堆積層を有する水平管路流れを対象にした流送土砂の実験結果をもとに、流れの抵抗、掃流砂量、各流送形態の発生領域区分などを一次元的に取り扱う方法を示した。

Key Words : pipe flow, flow resistance, sediment transport, slip flow

1. はじめに

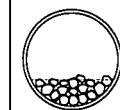
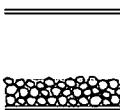
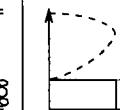
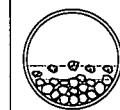
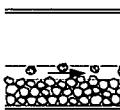
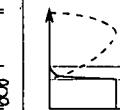
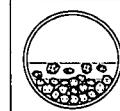
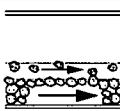
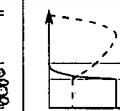
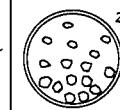
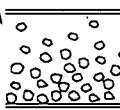
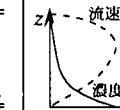
管路を用いた固体物質の輸送には、固体粒子を気体で輸送する固気輸送、固体を液体で輸送する固液輸送などがある。現在は輸送媒体として水を使用した方法が主流であるが、これは空気に比べて約800倍以上の密度があるため輸送効率が極めて良いこと、他の液体にくらべて原材料の供給が容易であることといった理由による。実際、河川や港湾における浚渫土砂の撤去、鉱物資源の輸送などの方面で実用化されている^{1) 2)}ほか、ダム上流の堆積土砂を排除するための1手法としても関心を集めている²⁾。

このような管路内の混相流れは実流域においても見ることができる。都市域では、不浸透域の増大とともに雨水とともに多量の土砂が管渠内に流れ込み混相流となって流下している。下水道管渠システムにおいては、浸水氾濫解析などの実用化は比較的進んでおり³⁾など、その精度を向上させるための計算手法⁴⁾なども確立されつつあるが、システムの保守・管理の面からすると流入土砂をいかに排除するかといったことが今後の重要な問題である。

これらのような現象を工学的に取り扱うためには、管路および開水路で流れる場合の流れ場や流砂量の評価、土砂の堆積と各種流動形態への遷移、断面変化等の流れの不等流性への対応といった課題が残されている。

従来の研究^{5), 6)}によると、管路内を流れる固体粒

表-1 管路内固体粒子の流動状況

名称	流動形態	分布状態
堆積層流れ		 
部分堆積層流れ		 
摺動層流れ		 
浮遊流れ		 

子の流動形態は表-1のように分類されている。管路内流速が固体粒子の堆積限界速度以下のときには、管底に堆積した粒子が移動しない「堆積層流れ」や粒子が掃流状態で流動する「部分堆積層流れ」が現れる。管路内流速が粒子の堆積限界速度を越えると「摺動層流れ」が出現する。「摺動層流れ」は、堆積層を形成する粒子がその相対的位置を変化させず、

層全体が管壁を滑りながら流動する現象をいう。さらに管内流速が大きくなると、粒子が管内を浮遊しながら流下する「浮遊流れ」が現れる。

このような管路内固液混相流れは、そのほとんどが実験的あるいは次元解析的に取り扱われており、一般には、混相流のエネルギー勾配 I_w を液体のみが流れる場合の勾配 I_w と粒子が混合することによる付加的勾配 I_s の和で表したDurand⁷⁾の式形が広く用いられている。特に付加的勾配 I_s を評価するために、式(1)のような無次元土砂輸送パラメータ Φ が導入されている。

$$\Phi = \frac{I_m - I_w}{CI_w} \quad (1)$$

ここに、 C は吐き出し体積濃度である。

たとえば、Durandは管底に粒子堆積層が認められる流れ場を対象に、無次元土砂輸送パラメータ Φ を管内平均流速 V 、粒子径 d 、粒子の水中比重 s_s 、管径 D および粒子の沈降速度 V_{fall} を用いて次のように表現している。

$$\Phi_D = K_D \left[\frac{V^2}{gD(s_s - 1)} \sqrt{C_D} \right]^{-3/2} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{gd(s_s - 1)}{V_{fall}^2} \quad (3)$$

ここに、 $K_D (=150)$ は定数である。

一方、Newitt⁸⁾らは、浮遊流れ状態における圧力損失について次式を提案している。

$$\Phi_N = K_N (s_s - 1) \frac{V_{fall}}{V} \frac{gD}{V^2} \quad (4)$$

ここに、 $K_N (=1100)$ は定数である。

堆積速度 V_d ⁹⁾（部分堆積層流れから摺動層流れに至る速度）や浮遊速度 V_n ¹⁰⁾（摺動層流れから浮遊流れに至る速度）についても次式が示されている。

$$V_d = \sqrt{\frac{40CgD(s_s - 1)}{\sqrt{C_D}}} \quad (5)$$

$$V_n = 17V_{fall} \quad (6)$$

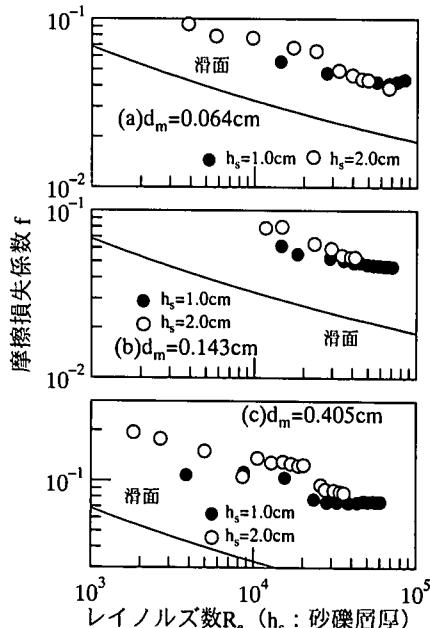


図-1 固定床の平均摩擦損失係数

これに対して、混相流れを力学的に取り扱った研究^{9)~12)}は比較的小ないが、これは、式(1)～(4)のように流れの指標をフルード数で評価すると取り扱いが容易であるといった実用面からの問題の他に、この種の流れが多様性を持っていることや、その流動機構が複雑なことが主な理由になっている。

本研究は、固体粒子として砂礫を用い、管底に砂礫層が存在するような管路流れを再現し、その流動特性と抵抗、流砂量、摺動層流れの発生限界などについて力学的検討を行ったものである。

2. 堆積層を有する管路の流水抵抗

(1) 概要

管路内に砂礫堆積層が形成された状態で水が流れる場合、平均的な流水抵抗は、管壁面と砂礫面という異なる特性を持つ境界面での抵抗が合成して現れることになる。一般に、管壁面は水理学的滑面、砂礫堆積面は粗面と取り扱われるため、このような2種類の境界を持つ流れも平均的には滑面・粗面流れを用いて表現できるものと推察される。

そこで、はじめに2種類の固定境界面を有する断面における管路流れの流水特性について検討し、それぞれに作用する流水抵抗を評価する方法について示す。

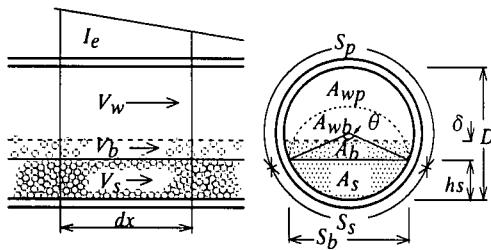


図-2 流れの模式図

(2) 固定床の実験

実験には、水平に設置された内径4cm、長さ400cmの透明アクリル製円形断面パイプ水路を用いた。管底の砂礫堆積層は、管形をかたどった石膏の表面に砂粒子を張り付けた固定床として取り扱った。固定床表面には、平均粒径 d_m が0.064, 0.143, 0.405cmの均一砂が張り付けてあり、それぞれ1.0~2.0cmの厚さに設定した。

計測項目は、水温、エネルギー勾配および流量である。エネルギー勾配は管路に50cm間隔で計6箇所に取り付けたマノメーターにより計測し、流量は最下流の三角堰を用いて算出した。アクリルパイプについては、事前にPrandtl-Kármánの滑面对数分布則が成立することを確認してある。

実験結果を摩擦損失係数 $f (= 8gRI_m / V_w^2)$ 、 g は重力加速度、 R は径深、 V_w は断面平均流速)とレイノルズ数 $Re (= 4R \cdot V_w / \nu)$ 、 ν は動粘性係数)についてまとめると図-1のようになる。

固定床砂面が存在するため、管路内平均流速は、壁面を全て滑面として取り扱ったものに比べ小さくなる。この傾向は、流水断面積が小さくなるほど、砂粒径の大きいほど顕著であり、潤辺長全体に占める粗面の長さが大きくなると流水抵抗も増えることが分かる。ただし、これらの傾きはいずれの場合も滑面の計算結果とほぼ平行であり、滑面としての性質を無視して管路全体を平均的な粗面として取り扱うことはできないことが示されている。

(3) 流水抵抗の推定¹³⁾

実験結果によると流水断面における滑面・粗面それぞれの占める割合が、全体の流れを支配していることが予想される。そこで、図-2のように、堆積層を伴う管路内の流れ場を、管路断面を管壁(滑面)と砂礫堆積層(粗面)によって支配される領域に分けて取り扱う。

なお、 A_s および V_s は4章に示す摺動層の断面積および移動速度であり、堆積層流れ・部分堆積層流れでは $V_s=0$ と取り扱う。

流水部においては流水断面積 A_w 、エネルギー勾配

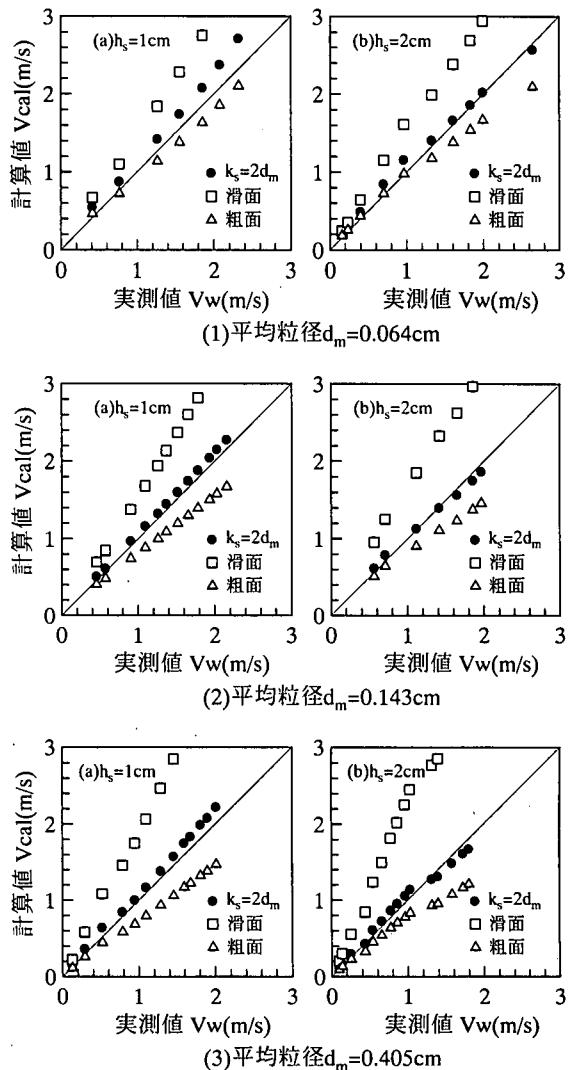


図-3 固定床断面平均流速の算定結果

配 I_m のもとで、断面平均流速 V_w の水が流れるが、このとき管壁面(潤辺長 S_p)と砂礫堆積面(潤辺長 S_b)は粗度特性が著しく異なるため、各面に作用するせん断応力も違った値をとることが予想される。ここでは、流水断面 A_w が管壁面に支配される領域 A_{wp} と砂礫堆積面に支配される領域 A_{wb} に分けられるものとして、各々の境界面に作用するせん断応力を求める(径深分割法^{9), 10), 13)}。

力の釣り合いを考えると境界面に作用する平均せん断応力 τ は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \tau(S_p + S_b) &= \tau_p S_p + \tau_b S_b \\ \tau &= \rho g R I_m, \quad \tau_p = \rho g R_p I_m, \quad \tau_b = \rho g R_b I_m \end{aligned} \quad (5)$$

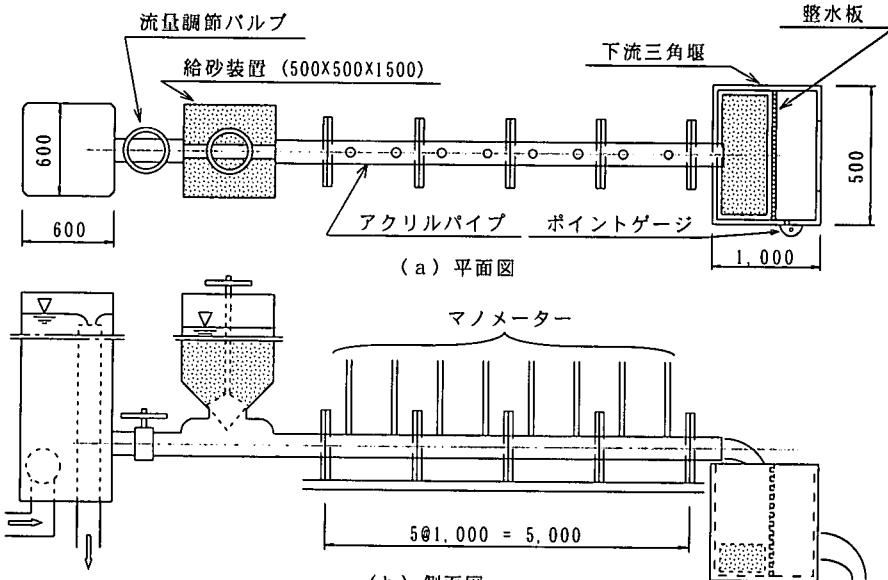


図-4 実験装置 (単位: mm)

ここに、 τ_p および τ_b はそれぞれ管壁面および堆積砂面に作用する平均せん断応力、 $R\{=A_w/(S_p + S_b)\}$ 、 $R_p(=A_{wp}/S_p)$ および $R_b(=A_{wb}/S_b)$ はそれぞれ流水断面 A_w 、 A_{wp} および A_{wb} の径深である。

連続条件から流量 Q は次のように表される。

$$Q = A_w V_w = A_{wp} V_{wp} + A_{wb} V_{wb} \quad (6)$$

ここに、 V_{wp} および V_{wb} はそれぞれ断面 A_{wp} および A_{wb} の平均流速であり、式(7)に示すPrandtl-Kármánの対数則に従うものと仮定する。

$$\frac{V_{wp}}{u_{*p}} = \sqrt{\frac{8}{f_p}} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \frac{u_{*p} R_p}{v} \quad (7)$$

$$\frac{V_{wb}}{u_{*b}} = \sqrt{\frac{8}{f_b}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R_b}{k_s}$$

ここに、 u_{*p} および u_{*b} は、それぞれ S_p および S_b に作用する平均摩擦速度、 f_p および f_b は摩擦損失係数である。

各領域の接合面では流速が同じであるはずであるから、各断面の平均流速が全断面のそれにほぼ等しいという想定の元 $V_w = V_{wp} = V_{wb}$ と仮定する。

式(5)～(7)における未知量は R_p 、 R_b 、 I_m 、 Q および堆積層厚 h_s の5個であり、これらのうち2個を決定すれば、連立式を解くことができる。ここでは、固定床の厚さ h_s と観測された混相流のエネルギー勾配

I_m から式(5)～(7)および $V_{wp} = V_{wb}$ を満足するような径深 R_p 、 R_b を計算し、得られた流量 Q について実験結果と比較した。

なお、管路内の流水特性を検討する場合には、流速分布を計測する必要があるが、断面が非対称であり、壁面の条件も均一でないという流れ場において、三次元的特性を無視した上で詳細な一次元的検討を行うことは意味がないため、ここでは断面平均流速を用いて抵抗則を検討している。

図-3には式(5)～(7)より得られる断面平均流速の計算結果と実測値を比較して示している。これによると、実験結果は、壁面（管壁面と堆積砂面）が全て滑面であると想定した計算結果と粗面であると想定した計算結果の中間に位置することが分かる。径深分割法によると、流れの抵抗は計算値の方が実験値よりも若干小さく見積もられる傾向にあるが、粗面における粗度高さを $k_s = 2d_m$ 程度に見積もれば、断面平均流速は比較的一致することが分かる。

また、辻本ら¹²⁾は、代数応力モデルを用いた堆積層を有する円管内流れの詳細な数値計算を行っている。これによると、径深分割を行るために必要な等流速線は管壁や砂礫堆砂面にほぼ平行に現れると共に、最大流速発生位置が中央上よりも発生すること、径深分割法における断面分割線の存在が確認されることといった計算結果が得られている。

このような結果から、径深分割法を用いて滑面と粗面という2種類の境界を持つ流れを評価することが可能であり、そのためには相当粗度 k_s を適切に見積もる必要があることが分かる。

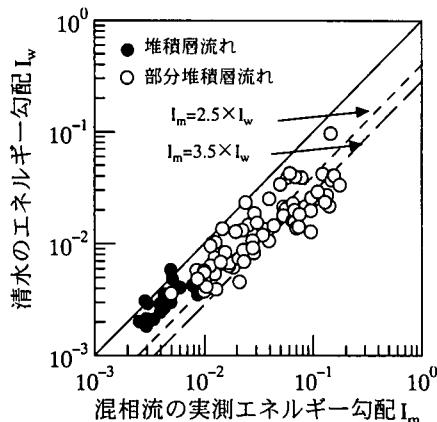


図-5 エネルギー勾配の比較

3. 部分堆積層の掃流砂量に関する検討

(1) 概説

堆積層が存在する管路流れでは、砂礫粒子に限界掃流力以上の力が作用すると粒子が移動し始める「部分堆積層流れ」が発生する。

ここでは「堆積層流れ」や「部分堆積層流れ」を対象に実験を行ない、従来の研究成果と比較すると共に、径深分割法を用いた流量と壁面せん断応力の算定および、掃流砂の発生限界と流砂量について検討した。

(2) 土砂の流動特性

a) 部分堆積層流れの実験

実験装置は、基本的に固定床流れにおいて使用した装置と同じであり、水平に設置された内径4cm、長さ500cmの透明アクリル製円形断面パイプ水路を用いている。上流端には給砂装置（B50×W50×H150cm）が設置され、円錐形の鋼栓の開度を調節することで砂礫の供給量が設定できるように改良されている（図-4）。

実験には平均粒径0.064cm、0.143cm、0.268cmの均一砂を用い、流量や供給土砂量を調整しながら定常流れを作り出して、それぞれの砂礫層厚 h_s 、流量 Q 、掃流砂量 Q_{sb} 、エネルギー勾配 I_m を測定している。エネルギー勾配は管路に取り付けられたセンサーやマノメータで、流砂量と流量は下流の三角堰において計測している。

b) 土砂の流動特性

図-5に清水と部分堆積層流れのエネルギー勾配の関係を示す。これによると、堆積層流れ・部分堆積層流れとも清水の滑面乱流流れに比べかなり大きな抵抗が作用しエネルギー勾配が急になっていること

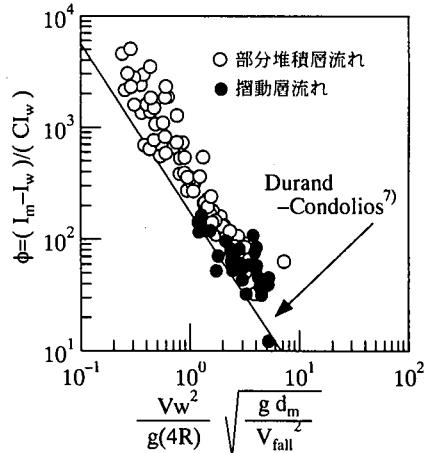


図-6 ϕ とフルード数の関係

が分かる。また河床波が形成されている状態では、部分堆積層流れのエネルギー勾配は清水の2.5～3.5倍とした寺田の実験結果¹⁴⁾とほぼ一致する。図-6は、式(1)および(2)の妥当性を検証したものであるが、実験結果と良く適合している。

部分堆積層流れにおける砂礫の移動形態は、開水路流れのそれと良く似ている。断面的に見た場合、堆積砂礫面は掃流砂があっても水平に保たれている。河床波は、管路の全域においてほぼ同時にかつ等間隔に発生し、それらの合体により個々の河床波は発達していく。管路内流速が増すと、河床波は形成されず平坦河床に移行する。粒子の飛行高さは流動形態により違いが見られる。河床波が形成されるような管内平均流速が比較的小さい流れでは、飛行高さはせいぜい粒径の1～2倍程度である。しかし、平坦河床では、飛行高さが流砂量に比例して高くなり、通水高の8割程度までに至ることも確認された。

(3) 掫流砂量と流出量

部分堆積層流れは、基本的に堆積層流れの流動形態と大差はないので、固定床実験結果から径深分割法モデルが適用できると考えられる¹⁵⁾。ただし部分堆積層流れでは、砂の移動に伴う摩擦抵抗の増加を、芦田・道上¹⁶⁾が提案したように飛行高さを考慮した相当粗度 k_s により評価する。

$$k_s = d_m (n + \alpha \tau_{*b}) \quad (8)$$

ここに、 d_m は砂の平均粒径、 $n (=1)$ および $\alpha (=2)$ は定数、 τ_{*b} は堆積砂面に作用する無次元掃流力である。

流砂量は、堆砂面に作用するせん断応力を適切に評価できれば開水路での掃流砂量式を適用できるはずである。

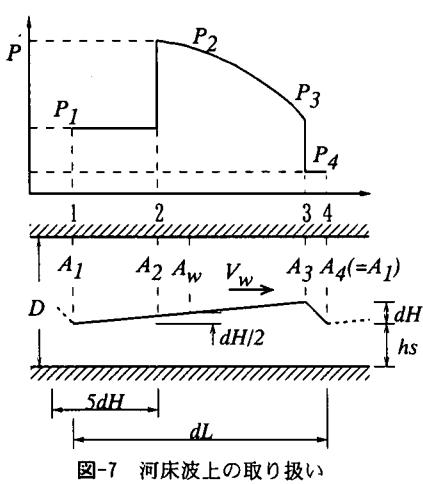


図-7 河床波上の取り扱い

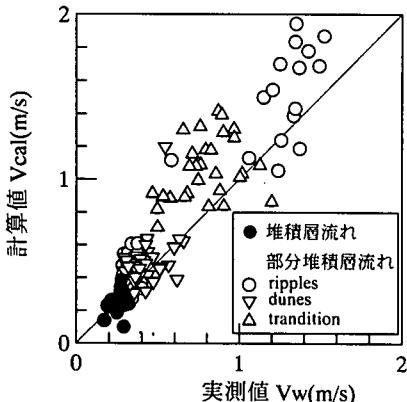


図-8 部分堆積層流れの断面平均流速

円管のように通水断面の場所的变化が大きい場合には、せん断応力の場所的变化も大きいと考えられるが、辻本ら¹²⁾の研究によると、円管内堆積層上の横断方向への掃流力の分布には顕著な違いが見られないことが報告されている。

ここでは流砂量を表す式として、便宜的に流砂量が開水路と同じ形で表されるとして、式形が簡単で開水路で良く用いられているMeyer-Peter&Müller式を用いた。

$$q_{sb} = \sqrt{sgd_m^3} K (\tau_{*b} - \tau_{*c})^m \quad (9)$$

ここに、 K は定数($=8$)、 m は定数($=3/2$)、 τ_{*c} は無次元限界掃流力($=0.047$)である。

したがって、全流砂量 Q_{sb} は次のように表される。

$$Q_{sb} = C_b V_b A_b = S_b q_{sb} \quad (10)$$

実際には式(5)～(7)により各面に作用するせん断

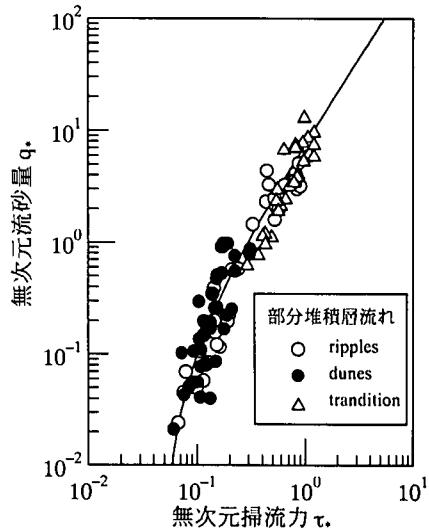


図-9 部分堆積層流れの流砂量の計算結果

応力を求めて、式(9)および(10)により流砂量を算出することになる。ただし、河床波が発生する場合には、式(5)の全体の抵抗 τ が摩擦抵抗による τ_f と形状抵抗による τ_s に分けられるものと考え、次式(11)による形状損失を考慮してせん断応力を算定する¹⁷⁾。

$$\tau_0 = \frac{\rho}{2} C_D U^2 \frac{A_0 - A_3}{L} \frac{A}{S} \frac{1}{A_0} \quad (11)$$

$$C_D = \frac{A_2 - A_3}{(A_0 - A_3) \frac{A_2}{A_0} \left(\frac{A_3}{A_0} \right)^2} \left(C_{p0} + \frac{A_2 - A_3}{A_2} \right)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 C_{p0} は定数($=0.13$)、 $A_0 \sim A_3$ は図-7に示す河床波上の各断面積である。

なお、部分堆積層流れの流量は詳細には次のように表される。

$$Q = V_w A_w + (1 - C_b) V_b A_b \quad (12)$$

$$A_b = \delta S_b, \quad \delta = \beta d_m$$

ここに、 β は定数である。実際は飛行高さも小さく掃流砂量も少ないので、 $(1 - C_b) V_b A_b$ は無視しても差し支えない。

堆積層流れと部分堆積層流れにおける平均流速の実験値と計算値を比較した結果を図-8に示す。式(8)の定数は固定床の実験から得られた値($n=2$ 、 $\alpha=2$)を考慮して計算を行った。これによると、堆積層流れでは計算値と実験値がほぼ等しいものの、部分堆積層流れになると計算値は次第に実験値からず

れ始める状況が表されている。

図-9には流砂量の計算値を示しているが、従来提案されている開水路の流砂量式によって、管路における流砂量を推定できることが分かる。言い替えれば、先に示した方法で砂礫面に作用しているせん断応力が正確に推定されていると言える。

(4) 発生領域

図-10は、実験中に観察された流れを開水路の領域区分図にプロットしたものである。河床形態に影響をおよぼすのは堆積層に作用する領域の径深 R_b であると考え、河床波の生じる有効無次元掃流力については全抵抗のうち摩擦抵抗のみを考慮している。

本実験データから推察すると砂漣・砂堆河床と遷移・平坦河床の形成領域は明らかに異なっていることが分かる。また、これらの領域は開水路の河床形態の発生領域とも異なっている。管路であるため河床に影響を与える領域 A_{wb} および径深 R_b が制限され、 R_b/d_m は開水路の一般的な値よりも小さくなっていると考えられる。しかし、Garde-Rajuの領域区分¹⁸⁾にはよく一致しているようである。

4. 摺動層流れと流砂量

(1) 概説

固体粒子の管路輸送においては、管路の閉塞を防ぐために浮遊状態で輸送することが多い。しかし、固体粒子を完全に浮遊させて流送するためには、非常に大きなエネルギーを必要とするという欠点がある。ここでは、輸送時におけるエネルギー効率がもっとも良いと言われている「摺動層流れ」を対象に実験を行い、その土砂輸送量や流れの開始限界などについて力学的検討を加える。

(2) 摺動層流れの発生機構¹⁹⁾

ここでは、摺動層流れの砂礫層を掃流部分と摺動層部分とに分けて取り扱う(図-2)。摺動層流れが発現すると、摺動層断面積 A_s は速度 V_s で等速運動をするものと仮定する。この場合の流量 Q と流砂量 Q_s は、摺動層の体積濃度 C_s を用いて次のように表される。

$$Q = V_w A_w + (1 - C_b) V_b A_b + (1 - C_s) V_s A_s \quad (13)$$

$$Q_s = Q_{sb} + C_s V_s A_s$$

流水部分 A_w の流量 Q_w や掃流砂量 Q_{sb} は部分堆積層

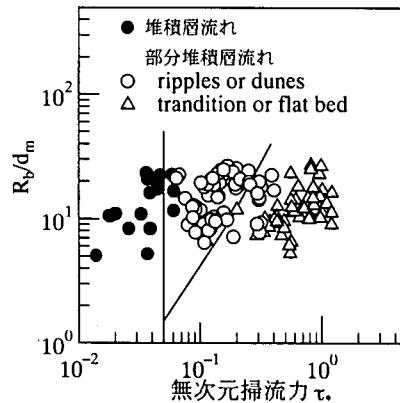


図-10 部分堆積層流れの発生領域

流れにおける径深分割法による算出方法を継承する。

また、摺動層流れにおいては、管底壁と砂粒子間に作用しているせん断力が、抵抗力として卓越していると考えると次式が成立する。

$$\tau_b S_b - \frac{\partial p}{\partial x} A_s = (\sigma - \rho) g (C_b A_b + C_s A_s) \mu_p \quad (14)$$

ここに、 μ_p は管壁と砂間の摩擦係数である。

式(14)中の $C_b A_b$ は、掃流砂量式の導出過程から式(15)のように導かれ、芦田・道上¹⁶⁾は摩擦係数 μ_f として0.5程度の値を用いている。

$$C_b A_b = \frac{\tau_{0e} - \tau_c}{(\sigma - \rho) g \mu_f} S_b \quad (15)$$

ここに、 τ_{0e} および τ_c はそれぞれ有効掃流力および限界掃流力、 σ は粒子の密度、 ρ は水の密度である。

また、掃流砂層と摺動層はそれぞれ異なる速度で移動しており、境界面における摩擦損失係数を f_s とすると次式が求まる。

$$\sigma' \frac{f_s}{8} (V_b - V_s)^2 = (\sigma - \rho) C_b \delta g \mu_b \quad (16)$$

ここに、 $\sigma' (= C_b \sigma + (1 - C_b) \rho)$ は掃流層の平均密度、 μ_b は堆積砂礫粒子間の摩擦係数、 $\delta (= \beta d_m)$ は実験定数である。

(3) 掃流土砂量

摺動層流れにおいては、堆積層の移動速度 V_s が求めれば、流水層との間に作用するせん断応力を推定することが出来るはずである。実験には先に示した装置(図-4)を用い、摺動層の移動速度はビデオに

より計測している。

実験に用いた砂は、粒径0.143, 0.268, 0.405cmの均一砂である。

a) 掃流土砂量と流量

図-11は、実測した移動速度をもとに、摺動層流れの全流砂量 Q_s を掃流分 Q_{bed} と摺動層分 Q_{slip} に分離した結果を示している。摺動層の堆積土砂濃度 C_s を直接計測することはできないので、ここでは静止堆積状態とほとんど変化ないものと想定してその濃度を $C_s=0.6$ と取り扱っている。

これによると、摺動層流れの初期状態に限ると、全土砂輸送量に占める摺動層分の割合は全体の20%ほどでごくわずかであり、堆積層厚や粒径による差はほとんどないことが分かる。

図-12は、径深分割法により推定したせん断応力を用いてMeyer-Peter&Müller式から算出した掃流砂量と掃流砂量の実験値を比較したものである。摺動状態の判定にはビデオによる解析結果を用いているため堆積層内部における流動状態は詳細には不明であるが、側面から見る限り摺動層内における速度分布は見られない。計算による流砂量も実験結果と良く一致している。したがって、今回実験を行った範囲では摺動層流れの堆積土砂濃度 C_s は0.60程度であり、堆積層表面に作用するせん断応力の算定には径深分割法を用いることができる事が確かめられた。

なお、流量について計算結果と実験結果を比べると、総じて実験値より計算値の方が大きくなり、流砂量の場合に比べてモデルの適合度が落ちる。これは、流水部分に掃流砂が多く含まれてくることにより、流れの構造自体が変化し、対数則が適用できなくなるためであると推定される。

b) 摺動層流れの開始限界

摺動層流れの開始限界は式(13)～(16)を解くことで求めることができるが、式(16)を見ても分かるように、管壁と粒子、あるいは粒子同士の間の摩擦係数が摺動層流れを規定する重要なパラメータのひとつとなっている。

堆積層と管壁の間には、部分堆積層流れから摺動層流れに至るときには静止摩擦が、摺動層流れから部分堆積層流れに至るときは動摩擦が作用する。これらは定数ではあるが、実際には粒子の形状、堆積層と管壁の状況によってある幅を有するものと考えられる。

芦田ら¹⁰⁾によると、砂と管壁の動摩擦係数は0.35、静止摩擦係数は0.44程度の値を取るとされている。葛原²⁰⁾の実験結果では、砂と管壁の動摩擦係数が0.31、静止摩擦係数が0.53程度の値となっている。ここでは、砂と管壁の動摩擦係数を0.30、静止摩擦

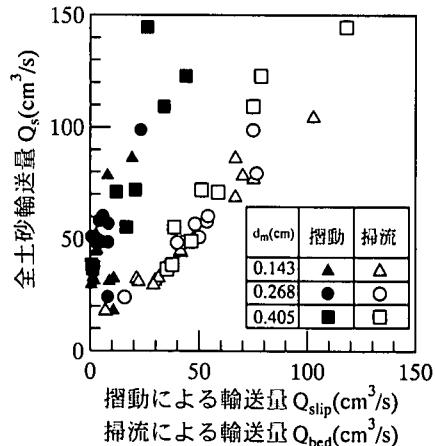


図-11 摺動層流れの流送土砂量

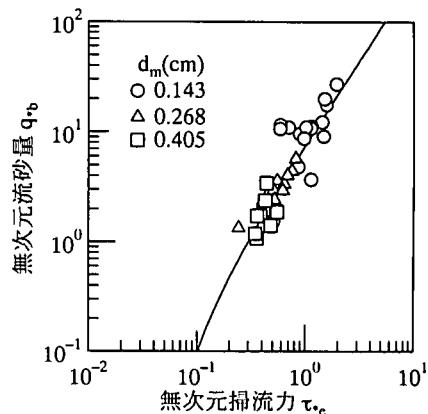


図-12 摺動層流れの掃流土砂量

係数を0.40として計算することとした。

図-13には、管径と粒径別に摺動層流れの開始限界線を実線で示している²¹⁾。実験データには、摺動層が間欠的に移動を繰り返すような限界状態から完全に安定した状態で流送される状態のデータを含んではあるが、摺動層流れの開始限界線は実験結果と比較的良く一致していることが分かる。

C_D は粒径によらずほぼ一定であることから、流速比と CD/d_m を用いて式(4)の堆積速度を評価した結果を図-14に示している。これらによると体積濃度 C が10%付近で、摺動層流れと部分堆積層流れの限界速度を示しており、限界速度としての適合性は良いことが分かる。

また、摺動層流れは、粒径が同じであれば、輸送体積濃度に関わらず発現する流速がほぼ一定であることが分かる。これは、管内流速がこれよりも小さいと部分体積層流れ、大きいと浮遊流れが表れ、摺動層流れの発生条件が限定されているためである。

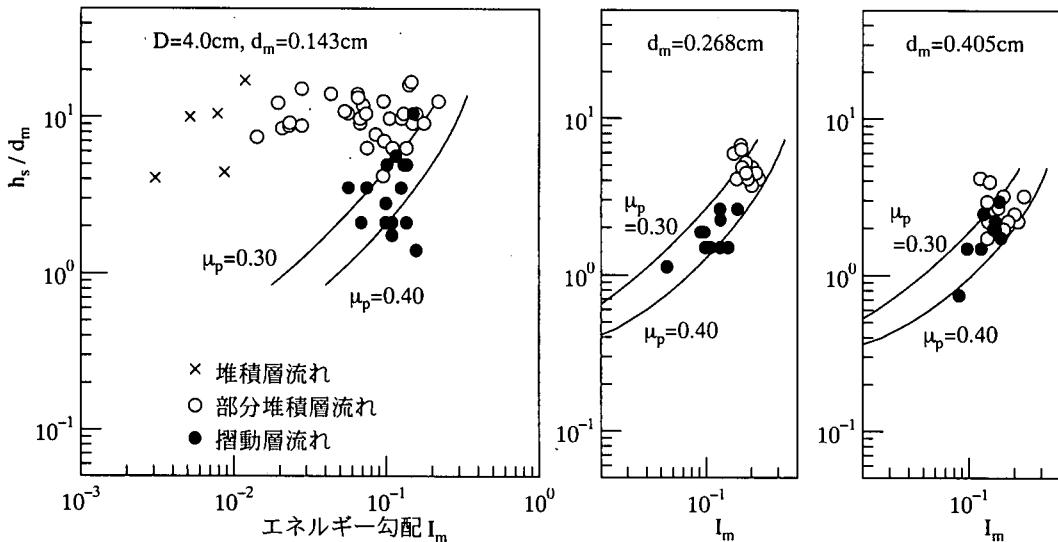


図-13 摺動層流れの発生領域

5. 結論

本研究では、砂礫堆積層を有する水平管路流れの流動形態についての基礎的研究として、「堆積層流れ」 「部分堆積層流れ」 「摺動層流れ」を対象に、力学的モデルを考え、その適用性について定量的検討を行った。

得られた主な知見は以下のとおりである。

(1)管壁面と砂礫面という異なった特性を持つ壁面せん断応力は、相当粗度を適切に評価すれば径深割法により推定が可能である。

(2)部分堆積層流れの河床形態は、河床面に作用する有効無次元掃流力と河床面に支配される領域を平均粒径で無次元化したものを用いれば、砂渾および砂堆河床と遷移河床および平坦河床に分類できる。

(3)部分堆積層流れの流砂量は、開水路の流砂量式（たとえばMeyer-Peter&Müller式等）を用いることによって算定ができる。

(4)エネルギー勾配 I_m と堆積層厚 h_b/d_m との関係から、堆積層流れ、部分堆積層流れ、摺動層流れの領域が区別できる。摺動層流れとの境界は、静的平衡状態の釣り合い式から求めることができるが、管壁と砂礫との間の摩擦係数（動摩擦係数と静止摩擦係数）により一定の幅をもって出現する。

(5)摺動層流れの初期における流砂量はそのほとんどが掃流砂量で占められていると共に、その算定には開水路の流砂量式が適用できる。また全流砂量に占める掃流砂量と摺動砂量の比は、粒径や堆積層厚によらずほぼ一定でそれぞれ80%, 20%程度である。

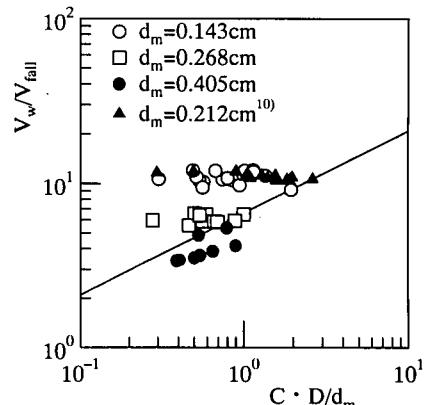


図-14 体積濃度と速度比の関係

参考文献

- 1) 野田佳六：土砂の管路輸送、水工学に関する夏期研修会講義集、Aコース-3, pp. 1-16, Aコース, 1986.
- 2) 片野尚明：ダムの排砂、水工学に関する夏期研修会講義集、Aコース-6, pp. 1-15, 1985.
- 3) 渡辺政広、室田明：都市域の流出解析(1)下水管渠網特性、自然災害科学、8巻2号, pp. 9-22, 1989.
- 4) Watanabe,M. and Kurihara,T. : Practical simulation method of surcharged flow using pressure relaxation effect in manhole, Proc. 6th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Vol.1, pp.128-133, 1993.
- 5) Graf W. H. : Hydraulics of sediment transport, McGraw-Hill, pp.425-481, 1984.
- 6) The Task Committee for Preparation of Sediment Manual, Committee on Sedimentation of Hydraulic Division : Sediment transport mechanism : J.Transportation of sediment in pipes, Proc.ASCE, Vol.96, No.HY7, pp.1503-1538, 1970.

- 7) Durand, R. : Basic relationships of the transportation of solids in pipes experimental research, Proc.5th Congress, IAHR, pp.89-103, 1953.
- 8) Newitt,D.D., Richerdson,J.F., Abbot,M. and Turtle,R.B. : Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes, Trans. Inst. Chem. Engrs., Vol.33/2, pp.93-103, 1955.
- 9) 那須浩平：管水路による砂れき輸送に関する理論的研究, 第22回水理講演会論文集, pp. 252-263, 1978.
- 10) 芦田和男, 江頭進治, 中島智彦：水平管路における土砂輸送形態と流砂機構, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-2, pp. 489-505, 1988.
- 11) 江頭進治, 芦田和男, 中島智彦：管路における土砂輸送機構, 水工学論文集, 第34巻, pp. 553-558, 1990.
- 12) 辻本哲朗, 蔵重俊夫, 北村忠紀, 岡田敏治：堆積層を伴う円管内の掃流砂, 水工学論文集, 第38巻, pp. 653-658, 1994.
- 13) 栗原崇, 鈴木幸一, 奈尾賢治：管路における堆積層および部分堆積層流れの抵抗と掃流砂量に関する検討, 水工学論文集, 第38巻, pp. 647-652, 1994.
- 14) 寺田進：固体混合液の管路輸送－流動理論と抵抗計算法－, 理工図書, pp. 86-87, 1973.
- 15) Kurihara,T. and Suzuki,K. : Study on flow resistance and bed load transport on bed with sediment deposition in pipe, Proc.9th Congress, APD-IAHR, Vol.2, pp.320-327, 1994.
- 16) 芦田和男, 道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp. 59-69, 1972.
- 17) 吉川秀夫, 石川忠晴：砂連・砂堆上の流れの抵抗について, 土木学会論文集, 第281号, pp. 55-63, 1979.
- 18) 水理公式集：(社)土木学会, p. 252, 1985.
- 19) 栗原崇, 鈴木幸一, 池辺健作：水平管路における摺動層流れの実験, 水工学論文集, 第40巻, pp. 831-836, 1996.
- 20) 萩原定朗：滑面内清水中における砂れきの沈降, 転動および滑動, 日本機械学会論文集, 第2部, pp.594-598, 1963.
- 21) Suzuki,K. and Kurihara,T. : Flow resistance and sediment transport by slip flow of sediment layer in horizontal pipes, Proc.10th Congress, APD-IAHR, Vol.2, pp.320-327, 1996.

(1997. 9. 18受付)

STUDY ON FLOW RESISTANCE AND SEDIMENT TRANSPORT WITH SEDIMENT DEPOSITION IN HORIZONTAL PIPE

Takashi KURIHARA, Koichi SUZUKI and Masahiro WATANABE

Flows with sediment deposition in horizontal pipe are categorized into three types: flow with stationary bed, flow with bed load and flow with sliding sediment layer. Then the flow resistance and sediment transport are discussed theoretically and experimentally, in which the area in cross section of pipe is divided into three sections: clear water section, bed load section and sliding section on pipe wall.

Hydraulic radius of clear water section for both pipe wall and surface of sediment layer, which is derived with the method of hydraulic radius division, is proved to be useful for the estimation of flow resistance and shear stress on the surface of sediment layer with which bed load can be estimated.

The critical condition for the occurrence of slip flow of sediment layer is also proved to be explained by relationship between energy gradient and sediment layer thickness.