

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

Study on Flow Resistance and Sediment Transport on the Bed with Sediment Deposition in Pipe

栗原 崇*・鈴木 幸一**・奈尾 賢治***

By Takashi KURIHARA, Koichi SUZUKI and Kenji NAO

Resistance of pipe flow with a stationary bed and with bed load on sediment deposition in pipes is discussed theoretically and experimentally, in which water flow area and hydraulic radius in a cross section of the pipe is divided into two parts : area and hydraulic radius influenced by smooth pipe wall and those by rough sediment wall. Experimental results about mean velocity and sediment transport rate in a pipe proved that the division of hydraulic radius of the water flow area into two is useful for the estimation of flow resistance and bed shear stress.

Keywords : sediment transport, pipe flow, flow resistance

1. はじめに

固体粒子の水力輸送は、河川や港湾における浚渫土砂や石炭・鉄鉱石をはじめとした鉱物資源の輸送などに用いられており、最近ではダム上流に堆積している土砂を排除するための1手段として関心を集めている。管路内を土砂と水が混合して流れる現象は実流域においても見ることができる。例えば、市街化が急速に進行した都市域では、不透透域の増大にともない雨水とともに多量の土砂が管渠内へ流れ込み、混相流となって流下している。これらの土砂が管路内でどのような挙動を呈するのかを把握することは、下水道システムの管理・保守の面からも重要な問題になってくるものと考えられる。

従来の研究によると管路内を流れる砂礫粒子の流動形態は、図-1のように分類される。管内流速が比較的小さく砂礫の堆積限界速度を越えないときには、砂礫が移動しない「堆積層流れ」や開水路流れでいう掃流状態に対応する「部分堆積層流れ」が表れる。砂礫の堆積限界速度を越えるような流速になると、上部が掃流流れで下部は粒子の相

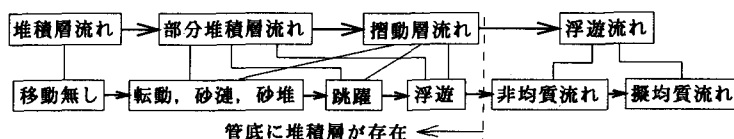


図-1 管路内を流れる粒子の流動形態¹⁾

* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町3番)

** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科 (同上)

*** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科修士課程 土木海洋工学専攻 (同上)

対的位置が変化せずに全体が層をなして管壁を滑りながら流れる「摺動層流れ」が出現する。摺動層流れは、砂礫と管壁の間のせん断抵抗応力が砂礫同士の場合に比べて非常に小さいために起こる現象であると考えられる。流速が砂礫の浮遊速度よりも大きくなると「浮遊流れ」が表れる。

このような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、混相流の動水勾配 I は液体のみが流れる場合の動水勾配 I_w と粒子が混合することによる付加的動水勾配 I_m の和で表されたとした Durand²⁾ らの式 $I_s = I_w + C I_w \Phi$ (C : 土砂の流送体積濃度, Φ : 無次元量, $I_m = C I_w \Phi$) が一般に広く用いられている。これに対して、混相流れを力学的に取り扱った研究^{3), 4)} は比較的少ないように思われる。これは、この種の流れが多様性を持っていることと、その流動機構が複雑なことが主な理由になっている。

本研究では、管底に静止堆積層をともなった場合の砂礫の流動状況を検討するモデルを仮定するとともに、その適用性について実験結果を用いて検討した。

2. 流砂機構の検討

2.1 現象のモデル化

堆積層を有する管路流れは図-2のようにモデル化することができる。管路断面を流水部分と堆積層部分に分け、さらに堆積層部分を掃流部分と摺動層部分に分ける。

流水の断面平均流速を v_w 、掃流層および摺動層の移動速度をそれぞれ v_s および v_b 、堆積層の厚さと断面積をそれぞれ h_s , A_s 、掃流層の厚さと断面積をそれぞれ δ , A_b 、動水勾配を I とすると、部分堆積層流れでは流水層と掃

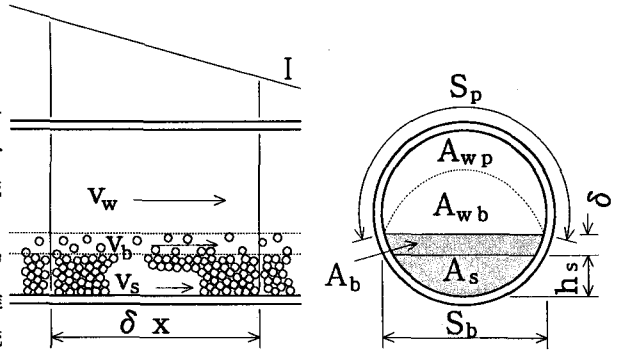


図-2 管路の土砂輸送の記号図

流層の2層、摺動層流れではこれに流動層を加えた3層の流れとして取り扱うことができる。各層の平均流速は $v_w > v_b > v_s$ という関係となる。

2.2 堆積層流れ

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、その全抵抗は管壁面と砂礫面という異なった抵抗特性を持つ二種類の境界面での抵抗が合成して現れる。これらに作用しているせん断応力、流速などを径深分割法⁵⁾により求める。

径深分割法は、流水断面積 A_w が管壁面と砂礫面にそれぞれ支配される A_{wp} , A_{wb} という領域に分割され(幾何学的条件から $A_w = A_{wp} + A_{wb}$)、この2つの領域においてはエネルギー勾配 I と断面平均流速 v_w は共通であるが全く独立した水路であり、管壁面での抵抗は管壁潤辺 S_{wp} に、砂礫面でのそれは砂礫面潤辺 S_{wb} に受け持たれると考えるものである。ここでは、 A_{wp} と A_{wb} がそれぞれ滑面と粗面として取り扱うことができ、これらの抵抗則が Prandtl-Kármán の対数分布則に従うものと仮定し以下のように表した⁴⁾。

$$\frac{v_w}{u_{*p}} = \sqrt{\frac{8}{f_p}} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{u_{*p} R_p}{\nu} \right) \quad (1)$$

$$u_{*p} = \sqrt{\tau_p / \rho} = \sqrt{g R_p I}, \quad R_p = A_{wp} / S_p \quad (2)$$

$$\frac{v_w}{u_{*b}} = \sqrt{\frac{8}{f_b}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{R_b}{k_s} \right) \quad (3)$$

$$u_{*b} = \sqrt{\tau_b / \rho} = \sqrt{g R_b I}, \quad R_b = A_{wb} / S_b \quad (4)$$

ここに、 u_* , f , R および τ はそれぞれ摩擦速度、摩擦損失係数、径深およびせん断応力で、添字の p およ

び b はそれぞれ管壁面と砂礫面を表す。また、 ν は動粘性係数、 k_s は相当粗度、 g は重力加速度、 ρ は水の密度である。

(1)～(4)式を断面形状と流量あるいは動水勾配が与えられているもとで解けば断面平均流速と支配面積が算定され、せん断応力を求めることができる。

2. 3 部分堆積層流れ

部分堆積層流れは、堆積層表層の砂礫が粒径程度の厚さで掃流状に流れる状態をいう。掃流層の砂礫の体積濃度を C_b とすると、流れの連続式は次のように表される。

$$Q = v_w A_w + (1 - C_b) v_b A_b, A_b = \delta S_b, \delta = \beta d_m \quad (5)$$

ここに、 β は定数、 d_m は砂礫の平均粒径である。

せん断応力が移動限界値より大きくなれば砂礫は動き始めるが、この現象自体は開水路であろうと管路であろうと変わりはないので、流砂量に関しては開水路における種々の知見が適用できると考えられる。

たとえば、流砂量 Q_{sb} にMeyer-Peter&Müller型の式を用いると次のように表される。

$$Q_{sb} = C_b v_b A_b = S_b q_{sb} \quad (6)$$

$$q_{sb} = \sqrt{s g d_m^3} K (\tau_{*b} - \tau_{*c})^m \quad (7)$$

ここに、 q_{sb} は単位幅当たりの流砂量、 K および m は定数 ($K=8, m=3/2$)、 $s=(\sigma/\rho-1) \approx 1.65$ 、 σ : 砂礫の密度、 ρ : 水の密度) は砂礫の水中比重、 τ_{*c} は無次元限界掃流力 ($=0.047$) である。

なお、部分堆積層流れのように砂粒の移動がある場合には、(3)式の相当粗度に砂粒の飛行高さを考慮した次式を用いる。

$$k_s = d_m (n + \alpha \tau_{*b}), \tau_{*b} = u_{*b}^2 / (s g d_m) \quad (8)$$

ここに、 n および α は定数 (一般に開水路では $n=1, \alpha=2$ 程度の値を取る)⁹⁾である。

従って、堆積層表面に作用するせん断応力を(1)～(4)および(8)式を用いて算定し、これを(5)～(7)式に代入すれば流砂量を求めることができる。

3. 部分堆積層流れに関する実験および検討

3. 1 実験装置の概要

実験装置は図-3に示すとおりである。ポンプを使って水をオーバーフロータンクに供給し、一定の水頭を保って管路に送る。途中、給砂装置 (500×500×1500mm) から砂礫が供給され、混相流は水平管路 (透明アクリルパイプ製、 $\phi=4$ cm, $l=400$ cm) に流れ込む。給砂装置には円錐形の鋼栓が取り付けられており、これを上下させることで砂礫の供給量が調節できる。計測は、動水勾配を管路に取り付けられたマノメータで、流砂量と流量を下流の三角堰において行っている。なお、実験に用いた砂礫は平均粒径0.064cmと0.143cmのほぼ均一の砂 (堆積固定床の実験には

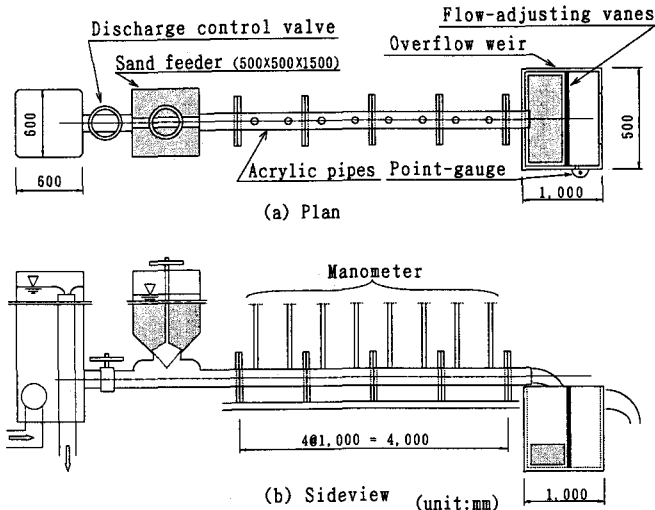


図-3 実験装置

粒径0.064, 0.143, 0.405cmの砂を用いた)で、給砂装置内の砂量の違いによる供給量の変化は殆ど見受けられなかった。また、清水のパイプ流れは滑面乱流となることが確かめられている。

3. 2 堆積固定床上の流れの抵抗則に関する検討

管壁面と砂面という異なった特性の固定境界面を持つ管路流れの実験を行い、流れの抵抗則を調べた。抵抗則は管路内の流速分布から検討すべきであるが、このような管路流れを二次元的に取り扱うことは非常に困難であるため、ここでは断面平均流速を用いて検討した。実験では、砂を管底から1, 2 cm程度の層厚に平坦に敷き詰め、これらが流水の抵抗によって移動しないように管壁に固定した後、動水勾配を数段階変化させたときの流量を計測した。砂の粒径および堆積層厚は表-1に示すとおりである。

表-1 実験条件

Series	1	2	3
dm (cm)	0.064	0.143	0.405
Thickness hs (cm)	1.23	1.39	1.41
	2.23	2.39	2.41

図-4(a), (b)に、(1)~(4)式から得られる断面平均流速の計算結果と実験値の一例を示している。これには、壁面が粗面あるいは滑面とした場合の計算値も記してある。これを見ると、実験結果は壁面全体が滑面の場合と粗面の場合の間に位置するとともに、計算値の方が実験値よりもやや大きくなっていることがわかる。この傾向は、流速が大きいほどあるいは粗面(砂礫面)潤辺長が短い程著しい。これは、流水断面が大きく全潤辺長に占める粗面潤辺長の割合が小さいほど粗面乱流の抵抗則に従って支配される領域の割合が大きくなっていることを示している。反対に、堆積層厚が増し流水断面積が小さくなると、粗面潤辺長の割合が大きくなりこの影響が小さくなるようである。実際の流れでは、管路内には粗面領域から滑面領域へ移行する遷移領域が存在するためにこのような実験結果になると考えられるが、流水断面中の遷移領域の範囲を評価することは現段階では困難である。そこで、相当粗度 k_s の値を大きくすることで粗面領域が広がる影響を表すこととした。図-4に、 $k_s=2d_m$ ($n=2$)としたときの流速を示してある。これによると実験値と計算値はほぼ等しくなっている。 n の値は管径や粒径、潤辺長などによって変化すると考えられるが、本実験では一定値として取り扱うこととする。以上のように、遷移領域の影響を考慮して相当粗度を粒径の2倍程度に取れば、径深分割法を適用してせん断応力が算定できる。

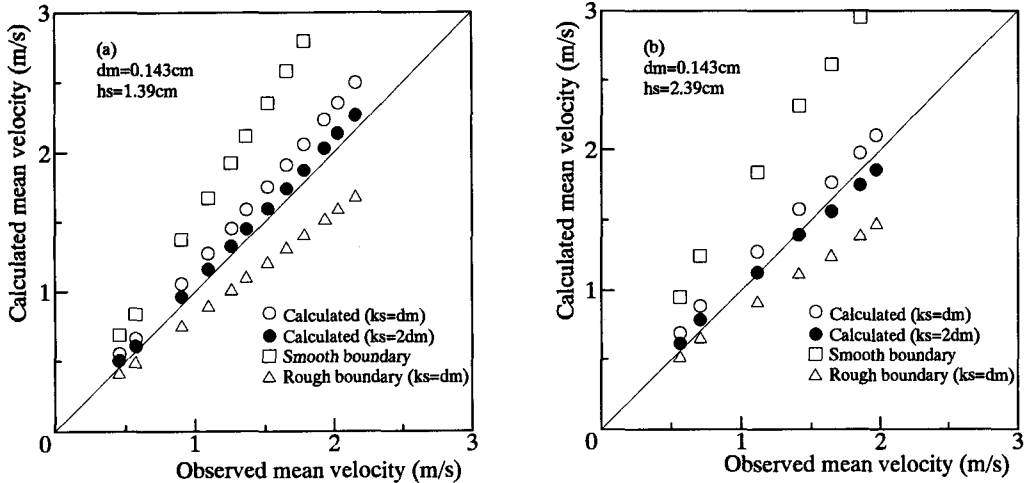


図-4 堆積層流れの平均流速の計算値と実験値の比較

3. 3 堆積層上の管路流れと掃砂量量の検討

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は移動し始め河床波が形成される。従来の研究によると、流速が小さいうちは砂漣・砂堆を形成し、続いて平坦河床があらわれ、

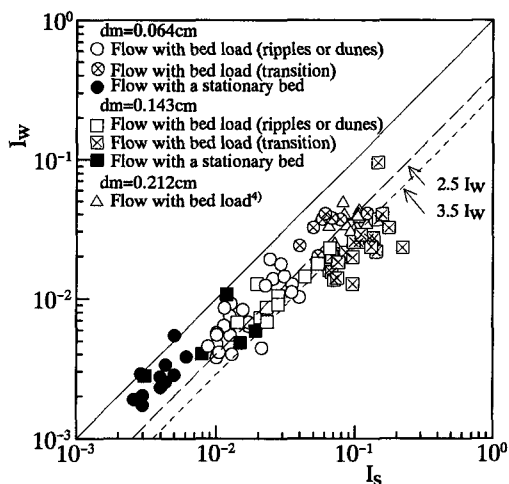


図-5 清水流のエネルギー勾配部分と
堆積層流れのエネルギー勾配の関係

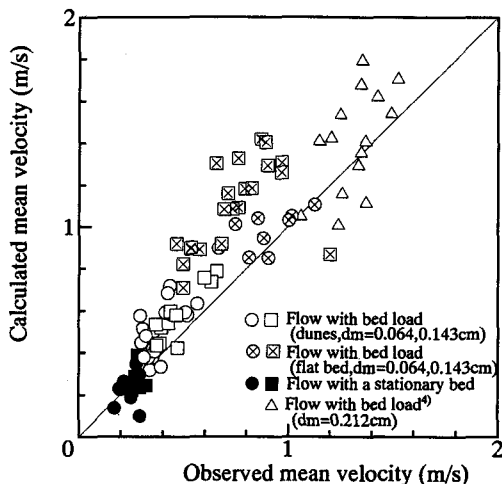


図-6 堆積層・部分堆積層流れの平均流速
の計算値と実験値の比較

水面の影響を受ける反砂堆は発生しないことが実験的に確かめられている。ここでは堆積層および部分堆積層流れを対象に実験を行ない、流量、流砂量、動水勾配の関係を従来の研究成果と比較するとともに、(1)～(8)式の適用性について検討した。

図-5に清水の動水勾配 I_w と混相流のそれ I_s 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動水勾配が急になっていることが分かる。また河床波が形成されている状態では、部分堆積層流れの動水勾配 I_s は清水の I_w の2.5から3.5倍とした寺田⁷⁾の結果とほぼ一致する。

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-6に示す。なお、(8)式の定数は固定床の実験から得られた値を考慮して $n=2$ 、 $\alpha=2$ と仮定し計算を行った。これを見ると、堆積層流れでは計算値と実験値がほぼ等しいものの、流速が速くなり砂礫が移動し始める部分堆積層流れに移行し始め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ことが分かる。

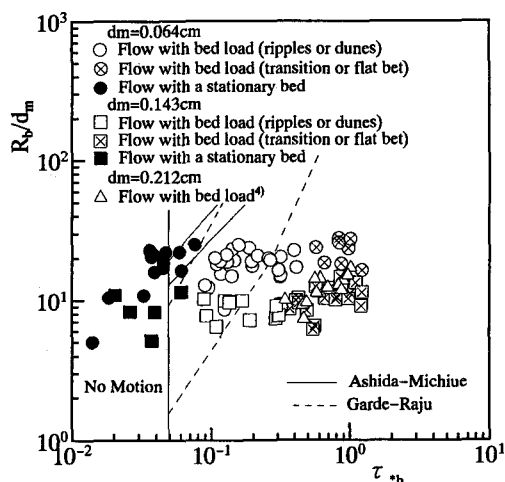


図-7 砂面形態の発生領域区分

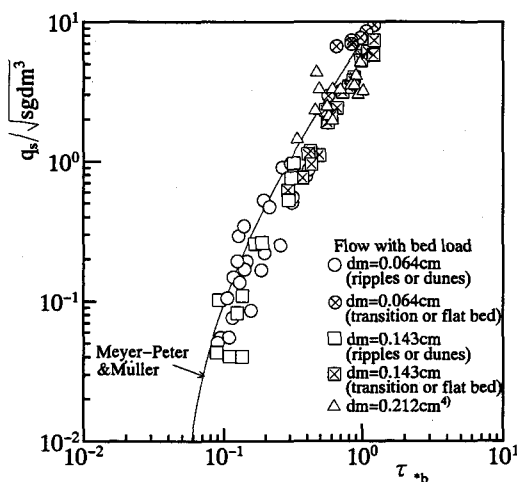


図-8 砂面せん断力と流砂量の関係

図-7は、実験中に観察された河床波を開水路の領域区分図にプロットしたものである。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ようである。なお、今回の実験中に反砂堆河床は観察されなかった。

図-8には流砂量の観測値と計算値を比較してある。実験値は開水路の流砂量式に良く似た形状を示しているが全体的に無次元掃流力が大きく評価されているようである。

このように流量や無次元掃流力が大きくなった原因は、計算された河床せん断応力中に摩擦抵抗と河床形状抵抗が含まれているためであり、詳細には砂漣・砂堆による形状抵抗を分離して評価する必要がある。しかし、上述したような方法を用いれば流速や流砂量のおまかな傾向は把握することが可能である。

5. おわりに

本研究は、ダムや貯水池など堆積土砂の排除、固体粒子の大量輸送、都市下水道システム内での堆積土砂の挙動に係わる問題として、管路内の土砂の流動を定量的に検討する必要があるという立場から、流動形態のモデルを提案し、堆積層流れ・部分堆積層流れを対象に実験を行ってモデルを検証するとともに、従来の研究によって得られている結果と比較した。

その結果、砂礫が移動しない堆積層流れでは、管路の流水断面積を管壁面及び砂礫面に支配される領域に分割できると仮定した径深分割法を用いれば、せん断応力を算定できることが確かめられた。また、その場合、粗面と滑面領域を結ぶ遷移領域の影響を考慮する必要があり、本研究では相当粗度で表した。

これらを砂礫の移動がある部分堆積層流れに適用した結果、流速や流砂量の傾向は推定できることが分かったが、詳細には河床に作用する抵抗を形状抵抗と摩擦抵抗に分けて評価する必要がある。

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，1986.
- 2) Durand, R.: Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes Experimental Research, I. A. H. R., 5th Congr. Minneapolis., pp. 89-103, 1953.
- 3) 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. 253-263, 1978.
- 4) 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.
- 5) Einstein, H. A.: Formulas for the Transportation of Bed Load, Transactions, ASCE, Vol. 107, Paper No. 2140, pp. 561-577, 1942.
- 6) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と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.
- 7) 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，1973.