

II-270

管路における部分堆積層流れの抵抗

愛媛大学工学部 正員 栗原 崇
愛媛大学工学部 正員 鈴木 幸一

1. はじめに

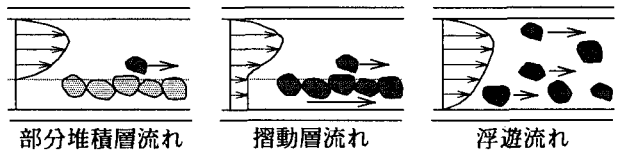
管路内を流送される固体粒子の流動機構を把握することは、貯水池の堆積土砂の排除や鉱物資源の輸送方法を検討したり、下水道管渠内に堆積している土砂の挙動を解明したりする上で重要な課題となっている。

このような流れは固液混相流として取り扱われ、混相流の動水勾配 Is は液体のみが管路を流れる場合の動水勾配 Iw と固体粒子による付加動水勾配 I_m の和で $Is = Iw + I_m = Iw + C\Phi Iw$ (C : 粒子の流送体積濃度, Φ : 無次元量) と表されてきた。固液混相流の記述は、流れが多様で流動機構が複雑であること等を理由に、実験的・次元解析的手法によるものが多数を占めており、力学的に一般化されたものは比較的少ない。

本研究では、管路における粒子の流動機構を把握するための第一歩として、流送形態のひとつである堆積層流れ・部分堆積層流れを対象にした実験を行い、その結果を従来の知見と比較検討した。

2. 管路内を流送される粒子の流動形態

管路内を流れる固体粒子は、次のような挙動を示す。流れによるせん断力が粒子の限界掃流力よりも小さい場合には「堆積層流れ」が発現する。流速が増すに伴って、表層粒子が掃流される「部分堆積層流れ」、管底と粒子面の境界に作用するせん断力が抵抗力よりも大きくなり堆積層が一斉に滑り出す「摺動層流れ」、全粒子が浮遊して流送される「浮遊流れ」が表れる。



3. 部分堆積層流れの抵抗に関する検討

3.1 実験の概要と実験結果

実験では、水平に設置した透明アクリルパイプ(内径 $D=4\text{cm}$, 長さ $l=4\times 100\text{cm}$)内に粒径 $d=0.064\text{cm}$, 0.143cm の均一砂を敷設し、堆積層流れ・部分堆積層流れを再現すると共に、圧力水頭、流量、流砂量を測定した。

図2に動水勾配と流速の関係を示す。図3に混相流(実験値)と清水(滑面乱流々れとした場合の計算値)の動水勾配の関係を示す。これらを見ると、堆積層流れ・部分堆積層流れは、ともに清水と比較するとかなり大きな抵抗が作用するため動水勾配が急になり、流速が大きくなる程この傾向も著しくなることが分かる。また、清水の動水勾配 Iw と固液混相流のそれ Is は、 $Is = 2.5\sim 3.5Iw$ 程度になることが認められる。図4に無次元量 $\Phi = (Is - Iw) / CIs$ とフルード数の関係を示す。これより、実験結果は、Durand-Condoliosの式(1953)に良く適合し、堆積層が生じるような低流速(流速が数10cm程度)流れにも適用できることが確かめられた。

図1 流動形態とその速度分布

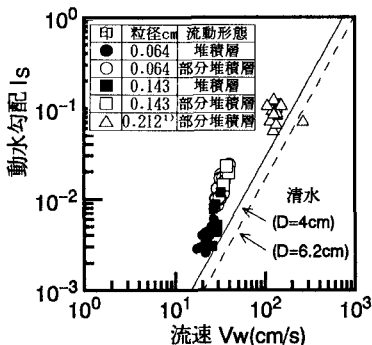


図2 動水勾配と断面平均流速の関係

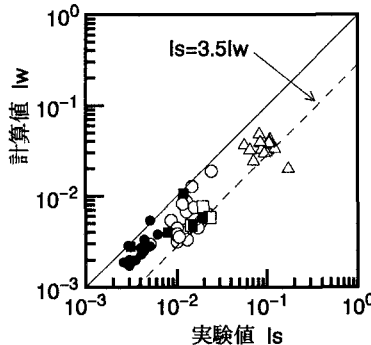


図3 動水勾配の比較

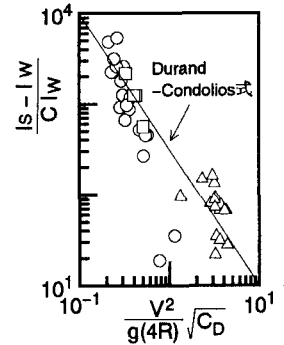


図4 Φ とフルード数の関係

3. 2 堆積層を伴う流れの抵抗に関する検討

図5の様な堆積層を伴う管路流れを想定した場合、流水部分の力の釣合から次式が得られる。

$$\tau_s (S_p + S_s) = \tau_p S_p + \tau_s S_s, \quad \tau_i = \rho_w g R_i I_i \quad (1)$$

ここに、 S : 潤辺長、 ρ : 水の密度、 R : 径深、 I : 動水勾配を示す。

実際に計測される平均的なせん断力 τ を、管壁に作用するせん断力 τ_p と砂面に作用する τ_s に分離することができれば、抵抗は推定できる。せん断力は断面形状と動水勾配によって決定されるが、管壁面と砂礫面が共存するような異なる性質の壁面を持った閉水路流れにおいては未だ不明な点が多い。ここでは、流水断面 A_w が潤辺長 S_p と S_s により支配される A_p と A_s に分割され、各支配断面の平均流速が等しくなるようなせん断力が作用していると考えた。また、各支配断面の動水勾配は等しく、流速分布はPrandtl-Karmanの対数則に従うとした。

$$A_w = A_p + A_s = S_p R_p + S_s R_s, \quad V_p = V_s, \quad I_p = I_s \quad (2)$$

$$\frac{V_p}{U_{*p}} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{U_{*p} R_p}{\nu} \right), \quad U_{*p} = \sqrt{g R_p I_p} \quad (3)$$

$$\frac{V_s}{U_{*s}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{R_s}{k_s} \right), \quad U_{*s} = \sqrt{g R_s I_s} \quad (4)$$

ここに、 V : 断面平均流速、 U_* : 摩擦速度、 R : 径深、 ν : 動粘性係数、 k_s : 相当粗度、添字 p, s : 管壁、砂面を示す。

図6は、断面平均流速の計算値と実測値を比較したものである。

堆積層流れにおいては、両値はほぼ等しくなることがわかる。部分堆積層流れにおいては、河床波が形成されるためにエネルギー損失が生じ、断面平均流速の観測値は計算値よりも多少小さく表れるようであるが、この方法で低流速時のせん断力が分離可能であると推定される。

3. 3 流砂量に関する考察

図7に上式を用いて分離した無次元掃流力と無次元流砂量の関係を示す。実線は理論値(芦田・道上式)を表す。部分堆積層流れの流砂量(実験値)は、芦田・道上式による計算値よりも大きめの値を取っているが、その傾向は良く似ていることがわかる。

4. まとめ

本研究では、管路内の土砂の流動に関する従来の知見を確認するとともに、砂礫堆積層を有する低流速時の流れの抵抗の推定方法を検討し、管渠の流砂量を開水路の流砂量公式である芦田・道上式と比較した。

その結果、流速が小さい流れでは開水路の抵抗則を適用することで管壁や砂面に作用するせん断力を分離することが可能であること、部分堆積層流れの流砂量は開水路の流砂量公式よりも大きくなるがその増加傾向は、開水路の場合と比較的良く似ていることが確かめられた。

管渠内の土砂の流れは、摺動層流れにおける堆積層の移動速度、堆積層と浮遊砂の交換機構をはじめとして未だ不明な点が多い。今後は、これらについて検討を進める予定である。

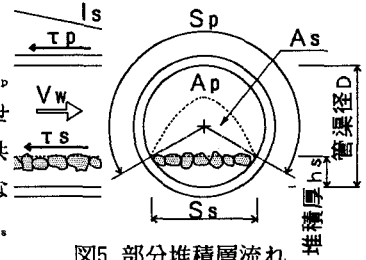


図5 部分堆積層流れ

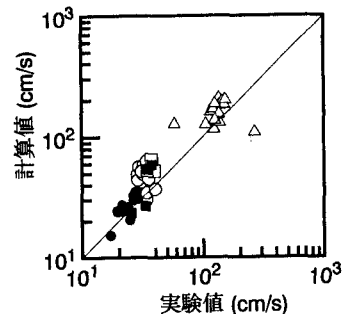


図6 流速の計算値と実験値の比較

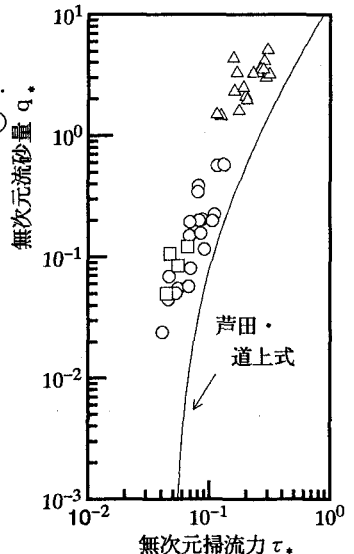


図7 流砂量の理論値(芦田・道上式)と実験値の比較

参考文献: 1) 芦田ら: 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, 1988.