

管路の土砂輸送に関する研究

愛媛大学工学部 正員 〇栗原 崇
 愛媛大学工学部 正員 鈴木 幸一
 四国建設コンサルタント(株) 正員 戸井 英人
 (株)二神組 正員 小田 聡志

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、下水道システム内の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。

本研究ではその第一歩として、低流速時の流れを対象にした実験を行い、従来の研究結果と比較検討した。

2. 従来の研究

固液二相流のほとんどは、二相流の動水勾配 I_s 、液体のみが管渠を流れる場合の動水勾配 I_w 、さらに固体粒子の体積濃度 C を用いて、式(1)の様に表されている。無次元水理量 Φ は、Durandらをはじめとした多数の研究者により抵抗係数とフルード数の関数として種々提案されている。

$$I_s - I_w = C I_w \Phi \quad (1)$$

3. 堆積層をともなった管渠内の土砂流動に関する検討

3. 1 管渠内の土砂の流動形態

管渠内の固液二相流は、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」となる。流速が増すに伴って、表層の砂礫が掃流される「部分堆積層流れ」、管底と砂面の境界に作用するせん断応力がせん断抵抗応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れる「浮遊流れ」が表れる。

3. 2 実験概要

水平に設置された透明アクリルパイプ(直径 $D=4\text{cm}$ 、長さ $l=4\times 100\text{cm}$)と粒径 $d=0.064\text{cm}$ 、 0.143cm の均一砂を用い、堆積層流れ・部分堆積層流れを再現する実験を行った。水理量として、圧力水頭、流量、流砂量を測定した。

3. 3 実験結果に関する検討

図1に動水勾配と流速の関係を、図2に無次元水理量 Φ とフルード数の関係を示す。これらを見ると、次のことが分かる。

- ①堆積層流れ・部分堆積層流れとも、清水と比較するとかなり大きな抵抗が作用し、動水勾配が急になる。この傾向は、流速が大きくなるほど著しい。また、清水の動水勾配 I_w と固液二相流のそれ I_s は、 $I_s = 2.5 \sim 3.5 I_w$ 程度になる。
- ②摺動層流れ・浮遊流れ¹⁾の抵抗は、部分堆積層流れの場合よりも小さく、動水勾配も清水のそれに近い。
- ③実験結果は、Durand-Condoliosの式(1953)に良く適合する。この式は基本的に浮遊流れを対象に得られたものであるが、今回実施した堆積層が生じるような低流速(流速が数10cm程度)流れにも十分適用できる。

3. 4 管渠内流体の抵抗則に関する検討

記号	粒径 (cm)	流動形態
●	0.064	堆積層
○	0.064	部分堆積層
■	0.143	堆積層
□	0.143	部分堆積層
△	0.212 ¹⁾	部分堆積層
+	0.212 ¹⁾	摺動層

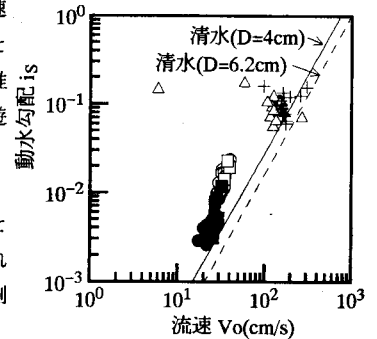


図1 動水勾配と断面平均流速の関係

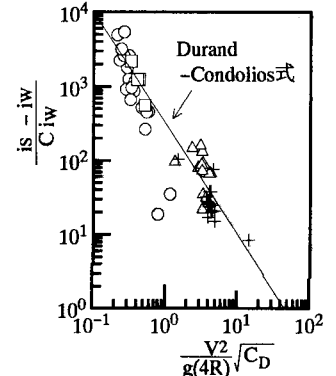
図2 無次元水理量 Φ とフルード数の関係

図3の様な流れを想定した場合、管渠の通水部分に作用する平均せん断応力 τ 。は次のように表される。

$$\tau_o (S_{wp} + S_{ws}) = \tau_{wp} S_{wp} + \tau_{ws} S_{ws}, \quad \tau_i = \rho_w g R_i I_i \quad (2)$$

ここに、 S : 潤辺長, ρ_w : 水の密度, R : 径深, I : 動水勾配

これらの式によると、せん断応力は流水断面と動水勾配によって表されることが分かる。管壁面と砂礫面が共存するように、異なる性質を持つ壁面を持った閉水路流れの流速分布を表す方法は不明な点が多い。ここでは、流水断面 A_w が潤辺長 S_{wp} と S_{ws} により支配される A_{wp} と A_{ws} に分割されると共に、その境界にせん断力が作用せず（平均流速が等しい）、動水勾配は両支配域で等しいと仮定した。また、流速分布はPrandtl-Karmanの対数則に従うとした。

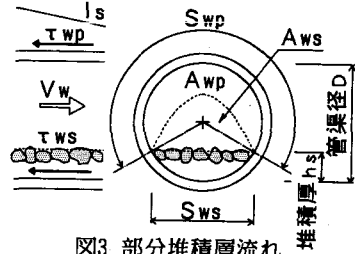


図3 部分堆積層流れ

$$A_w = A_{wp} + A_{ws} = S_{wp} R_{wp} + S_{ws} R_{ws}, \quad V_{ws} = V_{wp} \quad (3)$$

$$\frac{V_{wp}}{U_{*p}} = \sqrt{\frac{8}{f_{wp}}} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{U_{*p} R_{wp}}{\nu} \right) \quad (4)$$

$$\frac{V_{ws}}{U_{*s}} = \sqrt{\frac{8}{f_{ws}}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{R_{ws}}{k_s} \right) \quad (5)$$

ここに、 V : 断面平均流速, U_{*} : 摩擦速度, R_w : 径深, ν : 動粘性係数, k_s : 相当粗度, 添字 wp, ws は管壁, 砂面を示す。

図4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。堆積層流れでは両値はほぼ等しくなり、部分堆積層流れにおいては河床波が発生するため実測値は計算値よりも小さく表れるが、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。

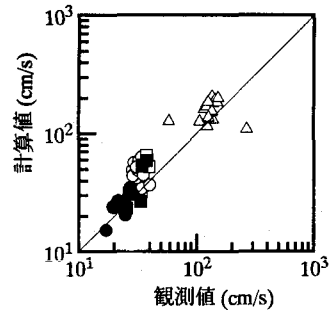


図4 流速の計算値と実測値の比較

3. 5 流砂量に関する考察

図5に上式を用いて分離した無次元掃流力と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おり、開水路の流砂量式の考え方を適用できることがわかる。

4. まとめ

本研究では、管渠内に砂礫堆積層を有する低流速時の流れの抵抗則の推定方法を検討するとともに、管渠の流砂量を開水路で得られている流砂量公式と比較した。

その結果、流速が小さい流れでは開水路抵抗則を用いれば管壁や砂面に作用するせん断応力を分離することができ、開水路の流砂量式から管渠における流砂量を推定できることがわかった。

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必要がある。

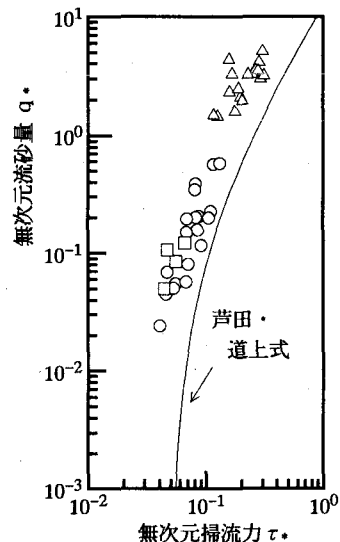


図5 流砂量の理論値（芦田・道上式）と実験値の比較

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, pp. 489-505, 1988.