

管路における部分堆積層流れに関する検討

香川県 正員○奈尾 賢治
愛媛大学 正員 鈴木 幸一・栗原 崇
(株)ウエスコ 正員 富谷 修二

1. はじめに

管路を用いた資源の流体輸送は、大量・長距離輸送が可能で経済性に優れているという利点から、1970年以降海外を中心に次々と実用化されている。従来この分野の研究は経験的手法によるものがほとんどで力学的方面からの研究はほとんど行われていないが、管路システムの保守・管理の面からみると流送機構の定性的な解明が望まれる。本研究は、管路内で発生する土砂形態のうち特に堆積層を有する流れを対象に力学的モデルを考え、その適用性について実験的検討を行ったものである。

2. 管内土砂輸送のモデル化

管路断面を流水部分と掃流層部分・撓動層部分に分け、図-1のようにモデル化する。ここに、 I : エネルギー勾配, v_w, v_b, v_s : 流水, 掃流層, 撓動層の平均流速, D : 管径, h_s : 堆積層厚, A_s : 堆積層または撓動層の断面積, δ : 掃流層厚, A_b : 掃流砂層の断面積, S_p, S_b, A_{wp}, A_{wb} : 滑面および粗面の潤辺とそれぞれに支配される断面積である。

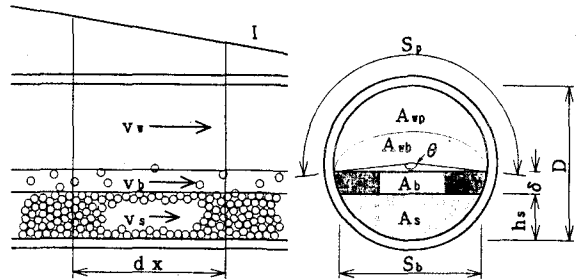


図-1 流れのモデル

1) 堆積層流れ: 堆積層流れは、管内流速が比

較的小さく、堆積層上の砂礫が移動しない清水のみの流れである。流水部分 A_w が管壁面(滑面)および堆積砂面(粗面)の抵抗則に支配される領域 A_{wp}, A_{wb} ($A_w = A_{wp} + A_{wb}$ (1))に分けられ、それぞれ同じエネルギー勾配 I が作用していると考え、各領域では断面平均流速が等しいと仮定し、境界面の抵抗がPrandtl-Kármánの対数則に従うとすると、次式が成り立つ。

$$\frac{v_w}{u_{*p}} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \frac{u_{*p} R_p}{\nu} \quad (2)$$

$$u_{*p} = \sqrt{\tau_p / \rho}, \quad R_p = A_{wp} / S_p$$

$$\frac{v_w}{u_{*s}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R_b}{k_s} \quad (3)$$

$$u_{*s} = \sqrt{\tau_b / \rho}, \quad R_b = A_{wb} / S_b$$

ここに、 ν : 動粘性係数, k_s : 相当粗度, g : 重力加速度, ρ : 水の密度, u : 摩擦速度, R : 径深, τ : せん断応力, 添え字 p, b : それぞれ管壁面と堆積砂面を表す。 A_w, S_p, S_b : は断面形状より定まるため h_s で表され、流量 Q は $Q = A_w v_w$ となるため、式(1)~(3)のうち、未知量は R_p, R_b, Q, I, h_s の5変数である。これらのうち2変数を仮定することにより他の未知量が決定できる。

なお、相当粗度は、 $k_s = 2d_m$ (d_m : 平均粒径)と仮定した¹⁾。

2) 部分堆積層流れ: 部分堆積層流れでは、堆積層表面において掃流砂や浮遊砂などが生じる。その層厚が砂粒径の2~3倍程度の砂の流れの場合には、粒子が流水に与える影響が小さく、堆積層流れのモデルが適用できると考えられる。堆積層表面に砂粒子の移動がある場合、式(3)の相当粗度には、堆積層流れの抵抗則を参考にし、飛行高さを考慮した次式を用いる。

$$k_s = d_m (n + \alpha \tau_{*b}), \quad \tau_{*b} = u_{*b}^2 / (s g d_m) \quad (4)$$

ここに、 n, α : 定数($n=\alpha=2$)¹⁾, τ_{*b} : 堆積砂面の無次元掃流力, s : 砂粒子の水中比重($=1.65$)である。

流砂量の推定には、開水路で用いられているMeyer-Peter&Müller式を用いた。

3. 管内流砂に関する実験的検討

実験には、水平に設置した内径 4cm、長さ 400cm の透明アクリル製パイプを用いた。使用砂は平均粒径 0.064, 0.143cm (均一砂)である。実験によると、その河床形態は液体の流速が大きくなるに従い、砂澱、砂堆、平坦河床と変化し、移動層厚も次第に大きくなることが観察された。

図-2には、実験より得られた断面平均流速 v_w と計算による平均流速 v_{wc} の関係を示している。

河床波が発生する場合には、図-3に示す A_i, v_i (それぞれ各断面の断面積及び圧力, $i=1, 2, 3, 4$), A_w, v_w (河床波の1/2波高における断面積及び断面平均流速), dH, dL (河床波の波高及び波長)を用いて河床波上の圧力分布をモデル化することにより、全エネルギー勾配 I を摩擦抵抗及び形状抵抗に作用するエネルギー勾配 (I', I'') に分けたものを用いている。

これによると、 I', I'', C_D は次式のように表される。

$$I = I' + I'' \quad (4)$$

$$I'' = C_D \frac{v_w^2}{2} \frac{A_1 - A_3}{dL} \frac{A_w^2}{A_1^3} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{A_2 - A_3}{(A_1 - A_3) \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2} \left(C_{p0} + \frac{A_2 - A_3}{A_2} \right) \quad (6)$$

ここに、 C_D : 形状抵抗, C_{p0} : 定数 (=0.13)である。

断面平均流速の計算値は、摩擦抵抗のみを考慮した場合に比べよく一致している。河床が平坦な場合には、計算値は実測値に比べて1割程度大きな値となっているが、これは粒子が浮遊状態で流送されているためであり、流速分布が掃流状態に比べ著しく異なっていると考えられる。

また、河床形態の発生領域を堆積砂面に作用する有効無次元掃流力と河床砂平均粒径の無次元量で表すと図-4のようになる。移動しない領域、河床波の存在する領域、平坦河床となる領域は明らかに区分されている。また、その範囲は開水路の発生領域とは異なるようである。

4. 結語

部分堆積層流れの河床波が生じるものについては勾配分割法と径深分割法を組み合わせることによりせん断応力の推定が可能であることが確かめられた。その場合、流砂量については、開水路の流砂量式を適用することができる。

部分堆積層流れのうち、平坦河床を生じるものについては、粒子が浮遊状態で流送されていると推察されるため別途検討が必要である。

参考文献 1) 栗原, 鈴木, 奈尾: 管路における堆積層および部分堆積層流れの抵抗則と流砂量に関する検討, 水工学論文集第38巻, pp. 647-652, 1994.

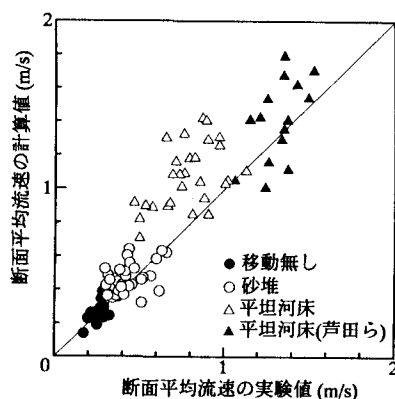


図-2 流速の比較

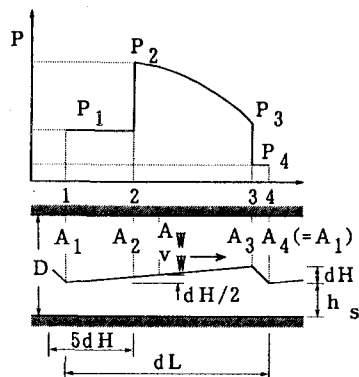


図-3 河床波上の圧力分布モデル

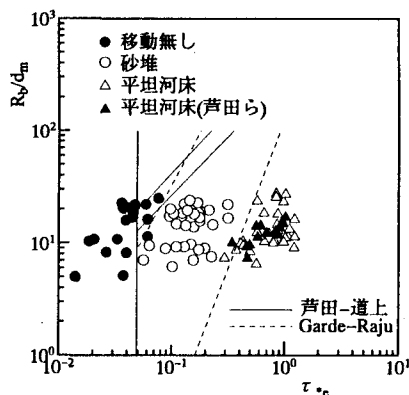


図-4 河床形態の発生領域区分