

II-206

管路における摺動層流れの開始限界に関する検討

復建調査設計㈱ 正会員 栗原 崇
愛媛大学工学部 正会員 鈴木幸一
愛媛大学大学院 学生員 池辺健作

1. はじめに

管内を流送される砂礫の輸送形態は、管内流速が大きくなるに伴い、堆積層流れ、部分堆積層流れ、摺動層流れ、浮遊流れへと変化することが知られている。ここでは、これらの形態のうち摺動層流れを対象に、流送土砂量やその開始限界について実験的検討を行った結果について報告する。

2. 摺動層流れ

堆積層を有する管路内の流れが、流水部と堆積層部とに分割できるものとして取り扱う^{1), 2)}。摺動層流れを対象にした場合、流量 Q_w と流砂量 Q_s の連続式は図1の記号を用いると次のようになる。

$$\begin{aligned} Q_w &= A_w v_w + (1 - C_s) A_s v_s \\ Q_s &= q_{sb} S_b + C_s A_s v_s \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 C_s は摺動層の土砂濃度であり、静止堆積土砂濃度0.60と同じであると仮定した。

流水部においては、管壁と堆積面それぞれに作用するせん断応力が式(2)で表される径深分割法により求められ、掃流砂量 q_{sb} は式(3)により算定できるものとする。

$$\frac{v_w}{u_{*p}} = 3.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{u_{*p} R_{wp}}{\nu} \right), \quad \frac{v_w - v_s}{u_{*b}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{R_{wb}}{k_s} \right) \quad (2)$$

$$q_{sb} = \sqrt{s g d_m^3} 8 (\tau_{*b} - \tau_{*c})^{3/2}, \quad k_s = d_m (n + \alpha \tau_{*b}) \quad (3)$$

ここに、 s :砂の水中比重($=\sigma/\rho-1$, σ :砂礫の密度, ρ :水の密度), g :重力加速度, d_m :砂粒子径, u_* :摩擦速度($=\sqrt{g R_w I}$), $\tau_{*b} = u_{*b}^2 / s g d_m$, $\tau_{*c} = 0.04 \sim 0.06$, R_w :径深, I :エネルギー勾配, 添字 p および b はそれぞれ管壁および堆積砂面を表す。

摺動層部においては、管壁と砂礫粒子間に作用しているせん断力が、堆積面のせん断力と摺動層に作用する圧力との和に等しくなることから次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \tau_b S_b - \frac{\partial p}{\partial x} A_s &= \mu_p \gamma (\sigma - \rho) g (C_b A_b + C_s A_s) \\ C_b A_b &= \frac{\tau_b - \tau_c}{(\sigma - \rho) g \mu_f} S_b \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 τ_b :堆積層表層のせん断応力, τ_c :砂の限界掃流力, μ_p :管壁と砂礫間の動摩擦係数, γ :補正係数($=1$), $-\partial p / \partial x = \rho g I$, C_b, A_b :掃流砂濃度とその面積, n, α, μ_f :定数である。

また、堆積面に作用するせん断応力 τ_b は、平均流速 v_w と摺動速度 v_s を用いて次のように表される。

$$\tau_b = \frac{f_b}{8} \rho (v_w - v_s)^2 \quad (5)$$

3. 摺動層流れに関する実験結果の考察

実験には、内径4cm、延長500cmの水平に配置された透明アクリル製円形断面の管路を使用した。図2は、摺動層流れの掃流砂量分と摺動層分を、実測した摺動層の移動速度をもとに分離したものである。摺動層流

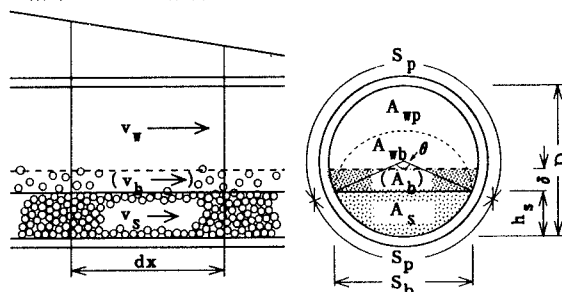


図1 摺動層流れ

れでは全土砂輸送量に占める撓動層分の割合は20%程度であり、層厚や粒径等による差は殆どないようである。また、図3は掃流砂量と無次元掃流力を比較したものであるが、これによると、堆積層表面に作用するせん断応力の算定に径深分割法を用いることの妥当性が確かめられた。

4. 撓動層流れの開始限界

撓動層流れの開始限界は、式(5)において $v_* = 0$ となる条件のもとで、式(2)～(5)を解けば良い。図4は、砂礫と管壁の摩擦係数を0.35と仮定した場合の開始限界を実験結果と併記している。データには、撓動層が間欠的に撓動を繰り返すような限界状態から等速で移動する平衡状態までのデータを含んでいるが、これを見ると、撓動層流れの開始限界線は実験結果と比較的良好一致していることが分かる。

ただ、図5は堆積層厚内の高さ y におけるせん断抵抗応力の平均値を示したものであるが、これによると、管底付近の外力が限界状態よりも僅かでも大きくなれば、砂礫層は内部でせん断破壊が発生していることが分かる。このような状態では、見かけ上は撓動層流れのような挙動を示すものの、堆積層の濃度が静止状態のそれと同じとは考えにくく、また、せん断破壊領域では速度分布を持っていると想定されることから、どちらかと言えば非均質な浮遊流れに近い状態であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、管路における撓動層流れを対象にモデルを考え、実験結果をもとに撓動層流れの流況やその開始限界に関して考察を行った。今後は、流砂濃度が大きくなった場合のモデルの適合性が低下するなどの課題を解消する必要がある。

参考文献 1) 那須: 管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. 253-264, 1978. 2) 芦田・江頭・中島: 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, pp. 489-505, 1988.

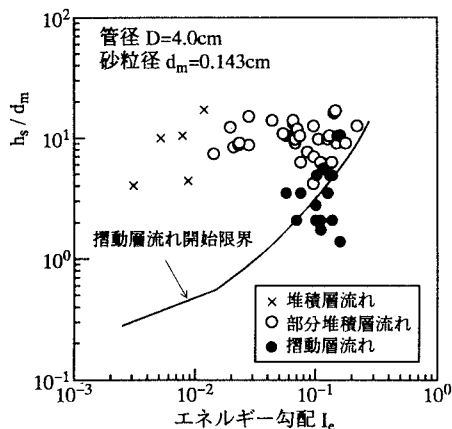


図4 撓動層の開始限界

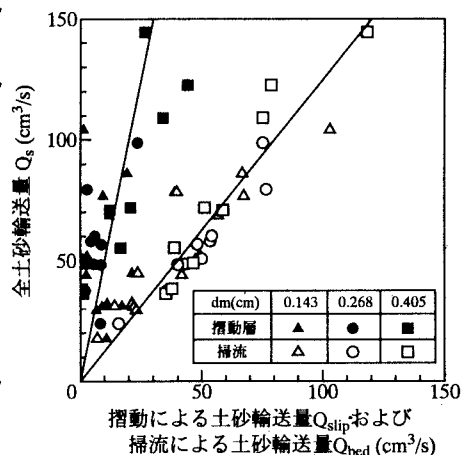


図2 撓動砂量と掃流砂量の割合

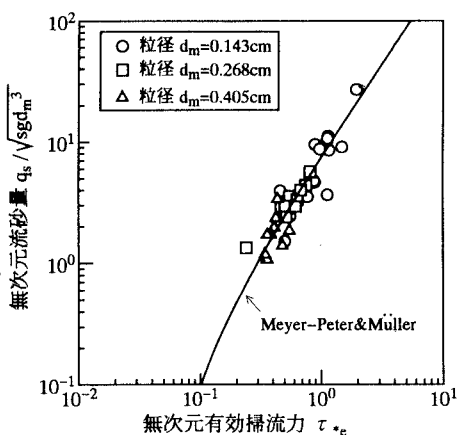


図3 無次元流砂量と τ_{*o} の関係

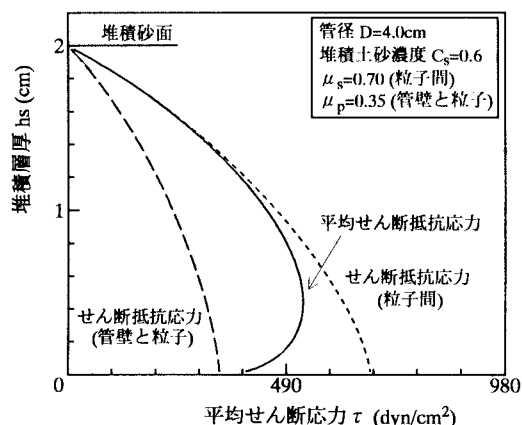


図5 高さ y におけるせん断抵抗応力 (管径 4 cm, 堆積層厚 2 cm)