

水平管路における土砂摺動層の発生条件と流砂量

愛媛大学工学部 正 員 鈴木 幸一
 復建調査設計(株) 正 員 栗原 崇
 愛媛大学大学院 学生員 ()池辺 健作
 (株)日水コン 正 員 岡崎 浩一

1. はじめに

管路内を輸送される土砂の輸送形態は、管内流速に伴って変化することが分かっている。本研究では、この輸送形態の一つである摺動層流れについて、その発生条件と流砂量について実験的検討を行った結果について述べる。

2. 摺動層流れのモデル化と発生条件

管路断面を図-1のように流水部分と堆積層部分とに分け、さらに堆積層部分を掃流部分と摺動層部分とに分ける。摺動層部分の速度 V_s を等速と考えると、摺動層流れの連続式は、摺動層の体積濃度 C_s を用いると次のようになる。

$$Q = V_w A_w + (1 - C_b) V_b A_b + (1 - C_s) V_s A_s$$

$$Q_s = Q_{sb} + C_s V_s A_s, \quad (A_w V_w = A_{wp} V_{wp} + A_{wb} V_{wb}) \quad (1)$$

ここに、 A_w 、 V_w ：流水部面積とその速度、 A_b 、 V_b ：掃流部面積とその速度、 A_s 、 V_s ：摺動層部面積とその面積、 Q_{sb} ：掃流砂量、 h_s ：摺動層の厚さである。

次に、径深分割法¹⁾により管壁面の抵抗則に支配される領域 A_{wp} と堆積砂面の抵抗則に支配される領域 A_{wb} とに分けて取り扱うと次式のようにになる。

$$\frac{V_w}{U_{*p}} = \sqrt{\frac{8}{f_p}} = 3.0 + 5.70 \log_{10} \frac{U_{*p} R_p}{\nu}, \quad \frac{V_w - V_s}{U_{*p}} = \sqrt{\frac{8}{f_p}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R_b}{k_s} \quad (2)$$

ここに、 U_{*p} ： S_p に作用する平均摩擦速度 ($U_{*p} = \sqrt{\tau_p / \rho} = \sqrt{g R_p I}$)、 U_{*b} ： S_b に作用する平均摩擦速度 ($U_{*b} = \sqrt{\tau_b / \rho} = \sqrt{g R_b I}$)、 ν ：水の動粘性係数、 k_s ：相当粗度、 f_p 及び f_b ： S_p 及び S_b における摩擦損失係数、 R_p ：領域 A_{wp} の径深、 R_b ：領域 A_{wb} の径深である。また、掃流砂量は、開水路の掃流砂量式である Meyer-Peter&Müller 型の式を用いると次のように表される。

$$Q_{sb} = C_b V_b A_b = S_b q_{sb}, \quad q_{sb} = \sqrt{sg d_m^3} K (\tau_{*b} - \tau_{*c})^m, \quad k_s = d_m (n + \alpha \tau_{*b}) \quad (3)$$

ここに、 τ_{*b} ：堆積砂面に作用する無次元掃流力、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力(=0.047)、 K ：定数(=8)、 m ：定数(=3/2)、 k_s ：砂粒の移動を考慮した相当粗度、 d_m ：砂粒子径、 n 、 α ：定数(開水路では $n=1$ 、 $\alpha=2$ 程度、閉水路では $n=2$ 、 $\alpha=2$)である。さらに、管壁と砂粒子間に作用しているせん断抵抗力が、外力すなわち圧力勾配と堆積層表層に作用するせん断力の和に釣り合っていることから次式が成り立つ。

$$\tau_b S_b - \frac{\partial p}{\partial x} A_s = \gamma (\sigma - \rho) g (C_b A_b + C_s A_s) \mu_p, \quad C_b A_b = \frac{\tau_{*c} - \tau_c}{(\sigma - \rho) g \mu_f} S_b \quad (4)$$

ここに、 μ_p ：管壁と砂間の動摩擦係数、 $-\partial p / \partial x = \rho g I$ 、 I ：動水勾配、 γ ：補正係数、 C_b ：掃流砂濃度、 μ_f ：(=0.5)である。摺動層流れの開始限界条件は、式(1)～(4)を解けば砂粒子径をパラメータとして h_s / d_m と I の関係で求められる。式(4)において管底でこの式が成り立つことが摺動層流れの発生条件となっている。また管壁と砂礫、砂礫同士の摩擦係数が重要なパラメータの一つになっている。

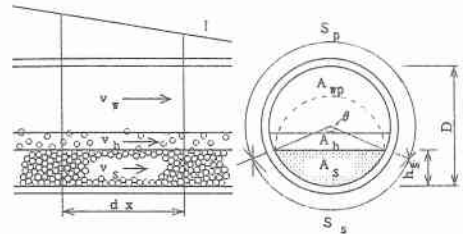


図-1 記号図

3. 実験による撓動層流れの発生条件と流砂量の検討

実験には、内径が4cm、長さが5mの亚克力製円形断面パイプを水平に設置したもので、流量、流砂量のほかに、管路側面から撓動層の移動速度が計測できるようになっている。

また実験に用いた砂は、2種類でそれぞれの砂粒子径 d_m は0.268cm 及び 0.405cm である。撓動層流れと堆積層流れの発生区分を示す図-2の開始限界線の左側は堆積層流れの領域、右側は撓動層流れの領域であり、堆積層流れ、部分堆積層流れのデータの大半は左側にあり、撓動層流れの大半のデータは右側にあり、式(4)がほぼ妥当であることが分かる。図-2の内容を詳細に見るために、2種類の粒径に関して開始限界線を示したものが図-3(a),(b)であるが、堆積土砂が移動しない部分堆積層流れと撓動層流れを比較よく区別していることが分かる。次に、流砂量についてみると図-4は、全土砂輸送量を

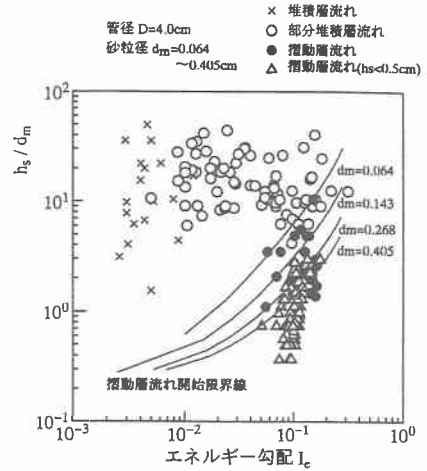


図-2 堆積層厚とエネルギー勾配の関係

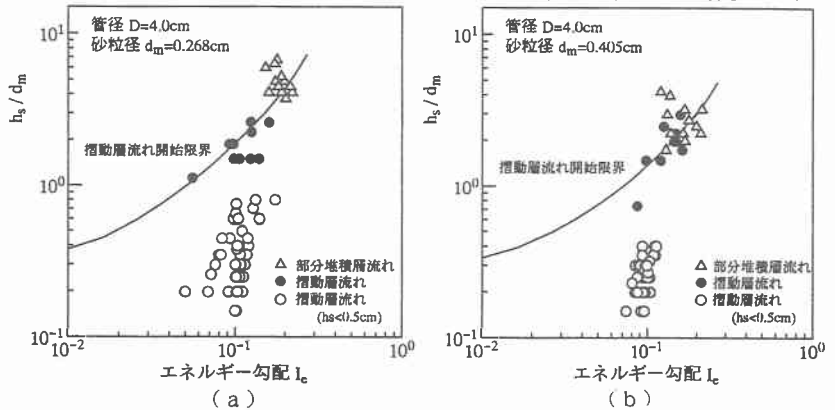


図-3 堆積層厚とエネルギー勾配の関係

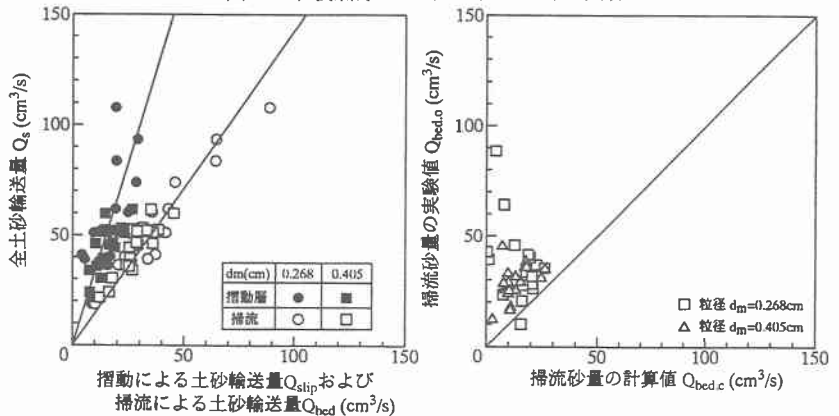


図-4 撓動,掃流による土砂輸送量の関係 図-5 掃流砂量の実験値と計算値の関係

管径 $D=4.0\text{cm}$
砂粒径 $d_m=0.268\text{cm}$
撓動層流れ開始限界
部分堆積層流れ
撓動層流れ
撓動層流れ ($h_s < 1.5\text{cm}$)
エネルギー勾配 I_e
(a)

管径 $D=4.0\text{cm}$
砂粒径 $d_m=0.405\text{cm}$
撓動層流れ開始限界
部分堆積層流れ
撓動層流れ
撓動層流れ ($h_s < 1.5\text{cm}$)
エネルギー勾配 I_e
(b)

全土砂輸送量 Q_s (cm^3/s)
撓動による土砂輸送量 Q_{slip} および
掃流による土砂輸送量 Q_{bed} (cm^3/s)
管径 d_m (cm) 0.268 0.405
撓動層 掃流
撓動層 掃流

掃流砂量の実験値 $Q_{\text{bed},0}$ (cm^3/s)
掃流砂量の計算値 $Q_{\text{bed},c}$ (cm^3/s)
粒径 $d_m=0.268\text{cm}$
粒径 $d_m=0.405\text{cm}$

参考文献 1) 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，京大防災研年報，Vol.31，B-2，pp.489-505，1988．2) 栗原・鈴木・奈尾：管路における堆積層及び部分堆積層流れの抵抗と掃流砂量に関する検討，水工学論文集，第38巻，pp.647-652，1994．