

管路における流砂の形態と機構

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男

京都大学防災研究所 正員 江頭 進也

京都大学大学院 学生員 中島 智孝

1.はじめに ダム堆砂による貯水機能障害が社会的な問題となっており、機能回復技術の進展が強く望まれている。その一つとして管路による土砂排除法がある。本研究は、その基礎を得るために着手したものであり、流砂形態の発生領域ならびに各流砂形態における流量、エネルギー勾配、流砂濃度について理論・実験の両面より検討したものである。

2.掃流 掃流は、管底部の静止砂礫層の上を土砂が掃流砂として移動する流砂形態である。流砂量を求めるためには砂礫層上面の摩擦速度 U_{bt} を推定しなければならない。そこで図1に示すように流水断面を分割して流砂機構を考える。基礎式は次のようになる。

$$\text{連続式} \quad AV = A_b V_b + A_w V_w \quad (1)$$

$$\text{粗面の抵抗則} \quad V_b/U_{bt} = Ar - 1/K + 1/K \ln R_b/\xi_s \quad (2)$$

$$\text{滑面の抵抗則} \quad V_w/U_{tw} = As - 1/K + 1/K \ln U_{tw} R_w/\nu \quad (3)$$

$$U_{bt} = \sqrt{g R_b i_c} \quad (4) \quad U_{tw} = \sqrt{g R_w i_c} \quad (5)$$

$$\text{掃流砂量式} \quad Q_b = 17 \sqrt{S g d^3} T_b^{1/2} (1 - T_w/T_b) (1 - U_{tw}/U_{bt}) \quad (6)$$

ここにA:全流水断面積, A_b, A_w :砂礫面及び管壁支配部分の断面積, V :断面平均流速, V_b, V_w : A_b, A_w における平均流速, $R_b = A_b/S_b$, $R_w = A_w/S_w$, U_{bt}, U_{tw} :砂礫面・管壁における摩擦速度, i_c :エネルギー勾配, d :粒径, S :砂礫の水中比重, T_b :砂礫の限界掃流力。ここで粗面分割のための近似として、 $V = V_b = V_w$ (7) を用いる。以上より堆積厚を長さパラメータ θ , i_c , 体積濃度 C , 流量 Q のうち2つを与えれば他の2つが決定される。

3.集合流動 集合流動は管底部の砂礫層が一体となって移動する流れである。この流れは条件によってplug flowとshear flowに分類される。plug flowは、砂礫層と管底部との境界で変形するが、内部の変形速度が無視できるような流れであり、shear flowは砂礫層内の変形速度が顕著な流れである。この場合砂礫層の濃度は静止状態のものより減少する。これらの流れを、

解析するにあたり、流れの場を図2のように簡略化し、芦田・江頭らの土石流の理論を適用する。また、輸送形態は、砂礫層に作用する力と内力の関係より、全層plug flow(図3)局所的plug flow(図4)、全層shear flow(図5)に分類できる。芦田・江頭らによるとせん断力 τ は

$$\tau = \tau_y + \tau_f \quad (8)$$

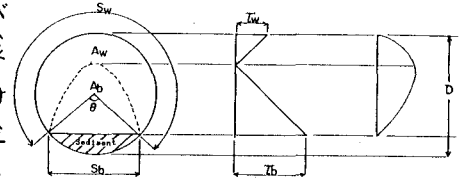


図-1

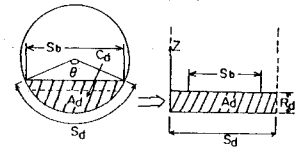


図-2

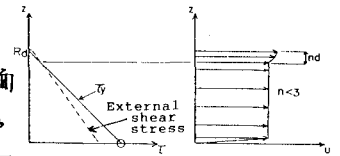


図-3

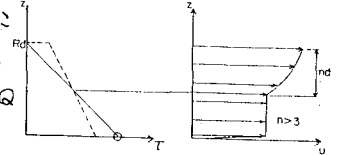


図-4

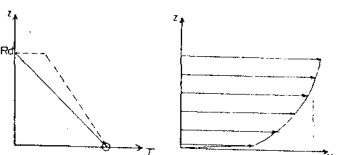


図-5

Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA, Tomohiko NAKAJIMA

と表せる。 T_f :降伏せん断応力。 T_f は変形速度に依存する応力である。 T_f の分布および T_f は次式のように表せる。

$$T_f = (p_s - p) g C_d (R_d - z) / \mu_k \quad (9)$$

$$T_f = p l^2 (du/dz)^2 \quad (10)$$

ここに、 p_s, p :砂礫及び水の密度、 $R_d = A_d / S_d$ 、 μ_k :砂礫の内部摩擦係数、 l は粒子間間隙における乱れの混合距離である。外力としてのせん断力 T_0 は次式のように表せる。

$$T_0 = -\frac{\partial \tau}{\partial x} (R_d - z) + \rho g f_b (v_w - v_s)^2 S_b / S_d \\ = \rho g i_e (R_d - z) + \rho g f_b (v_w - v_s)^2 S_b / S_d \quad (11)$$

v_w :水流の平均流速、 v_s :砂礫層の平均流速、通常の $v_w \gg v_s$ とし、 $T = T_0$ より shear flow の平均流速を求めると次式を得る。

$$\frac{v}{g R_d} = \frac{2}{3} \frac{A}{l} \left\{ i_e \left(1 + \frac{A l}{A_d} \right) - (\rho_f - 1) C_d \mu_k \right\}^{\frac{1}{2}} R_d \quad (12)$$

$$\left[\frac{2}{5} A \left\{ \left(\frac{A+1}{A} \right)^{\frac{5}{2}} - 1 \right\} - 1 \right] \left(A = \frac{i_e (1 + A l / A_d) - (\rho_f - 1) C_d \mu_k}{(\rho_f - 1) C_d \mu_k - i_e} \right)$$

plug flow の平均流速も同様にして求められる。以上より稀流と同じように θ, i_e, Q, C の関係が求まる。

4. 発生領域 稀流が始まる限界は、砂礫の限界稀流力を考えることにより次式で与えられる。

$$i_e = (\rho_f - 1) d T_{0bc} / R_b$$

plug flowが始まる限界は、砂礫層に作用する力と内力の関係より次のように表される。

$$i_e = (\rho_f - 1) C_d \mu_{sb} / (1 + S_b R_b / S_d R_d) \quad \mu_{sb}: \text{砂礫と管壁の静止摩擦係数} \quad (14)$$

plug flowから稀流への遷移は、上式の μ_{sb} の代わりに μ_{kb} (砂礫と管壁の動摩擦係数)を用いることにより与えられる。shear flowの発生は、 μ_{sb} の代わりに μ_s (砂礫間の静止摩擦係数)を用いて、shear flowからplug flowへの遷移は μ_{sb} の代わりに μ_k を用いることにより推定される。局所的 plug flowは $i_e \geq (\rho_f - 1) C_d \mu_s (1 + S_b R_b / S_d R_d)$ ($M \geq 3$) のとき発生する。このようにして推定される領域区分図を図7に示す。区分図は (Q, C) 平面上にも表すことができる。

5. 実験結果と考察 $d_m = 0.212 \text{ cm}$ 、比重2.65の一樣砂を用いたアクリル製の閉管路で実験を行いエネルギー勾配、流砂量を測定した。その結果を図7・8に示す。ここでデータに付けられた数字は θ の値である。Transitionは、稀流と集合流動の遷移域である。図7~8より実験結果(i_e, Q, C)はほぼ理論と同様の傾向を示していることがわかる。また、発生領域に関する理論もほぼ妥当なものといえるだろう。

5. おわりに 現段階では集合流動時の粒子体積濃度 C_d や水流が砂礫層におよぼすせん断力が、十分に把握できていない。今後、これに関する一層の研究が必要である。

参考文献 (1) 江崎・芦田・佐々木: 土石流の流動機構、第32回水理講演会、1988

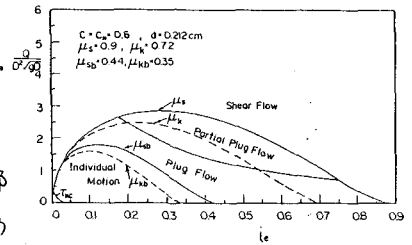


図-6

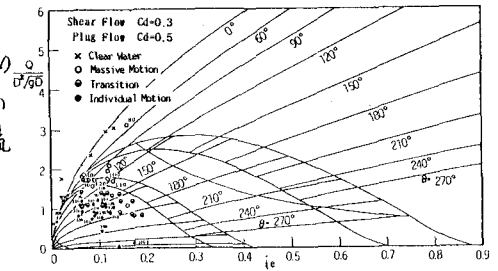


図-7

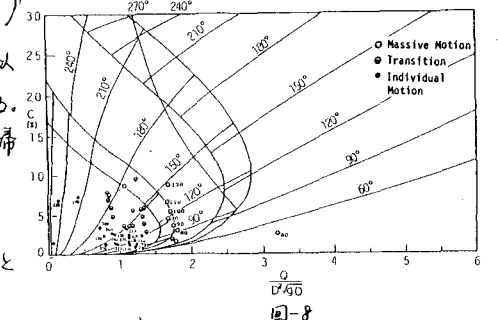


図-8