

管路における土砂の移動形態と輸送濃度

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 進治

阪 急 電 鉄 正員○中島 智彦

1.はじめに ダム堆砂の排除、養浜などに関連して管路における土砂輸送機構の解明が望まれている。本研究では水平管路における掃流形態、集合流動形態に着目しそれらの流れの機構を理論的に明らかにし、その結果と実験結果とを比較検討する。

2.掃流 静止砂層上を土砂が掃流砂として移動する流れを掃流形態(individual movement)と言う。図-1のように管路断面を径深分割し、各領域にそれぞれ粗面、滑面の対数則を適用し、堆積層上面に働くせん断力を求め、芦田・道上式より掃流砂量を算定する。掃流形態の形成限界は、砂粒子の限界掃流力を用いて求められる¹⁾。

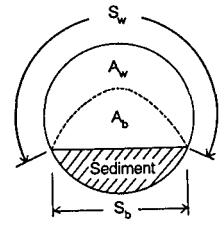


図-1

3.集合流動 砂層全体が移動する流れを、集合流動(massive movement)と言う。管路断面を図-2のようにモデル化し、砂層の流れに対して江頭・芦田らの土石流の理論²⁾を適用する。すると、集合流動は、図-3、4に示す砂層内の応力の分布に応じて更にpartial plug flow (図-3) とshear flow (図-4) に分類できる³⁾。砂層に作用する外力 τ_{ext} 、および内力 τ_{int} は以下のように表される³⁾。

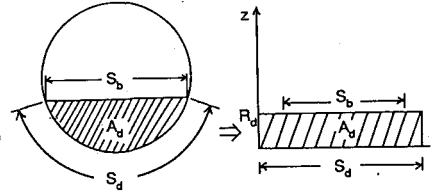


図-2

$$\tau_{ext} = -\frac{\partial p}{\partial x} (R_d - z) + g \sin \theta \int_z^{R_d} \rho_m dz + \rho g R_b i_e \frac{S_b}{S_d} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \theta = \rho g i_e \quad (2) \quad \rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho \quad (3)$$

$$\tau_{int} = \tau_y + \tau_f + \tau_g \quad (4)$$

$$\tau_y = \rho(\sigma/\rho - 1)g \cos \theta \int_z^{R_d} c dz \cdot \frac{\tan \phi_s}{1 + \alpha} \quad (5) \quad \tau_f = \rho k_f \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}} d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (7)$$

$$\tau_y|_{z=0} = \rho(\sigma/\rho - 1)g \cos \theta \int_0^{R_d} c dz \cdot \frac{\tan \phi_{sb}}{1 + \alpha} \quad (6) \quad \tau_g = k_g \sigma (1 - e^2) c^{1/3} d^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (8)$$

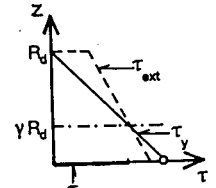


図-3

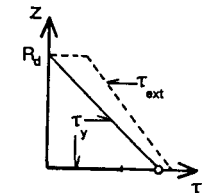


図-4

ここに、 dp/dx :管路内の圧力勾配、 g :重力加速度、 σ 、 ρ 、 ρ_m :砂礫、水および流動砂層(混合物)の密度、 c :流動砂層の濃度、 i_e :水流のエネルギー勾配、 $R_b = A_b/S_b$ 、 A_b 、 S_b :砂礫による支配領域における径深、断面積、潤辺長、 $R_d = A_d/S_d$ 、 A_d 、 S_d :流動砂層の径深、断面積、潤辺長、 ϕ_s 、 ϕ_{sb} :砂粒子の内部摩擦角及び砂粒子と管壁との摩擦角、 θ :管路の傾斜角(下りを正とする)、 d :粒径、 e :砂粒子の反発係数、 k_f 、 k_g は係数で、それぞれ $k_f=0.25$ 、 $k_g=0.0828$ 程度の値をとる²⁾。 α は、動的粒子間圧力と静的粒子間圧力との比で、静的状態では、 $\alpha=0$ 、動的状態では、 $\alpha=0.25$ 程度で、 $\frac{du}{dz}$ は速度勾配である。上層の水流と下層の砂層との境界における相互作用を考慮するため、水流層の砂礫支配領域における抵抗則を次式で与える⁴⁾。

$$\frac{v}{u_{*b}} = \frac{u_i}{u_{*b}} + \frac{\ell_0}{\kappa^2 R_b} \left\{ \left(1 + \frac{\kappa}{\ell_0} R_b \right) \ln \left(1 + \frac{\kappa}{\ell_0} R_b \right) - \frac{\kappa}{\ell_0} R_b \right\} \quad \ell_0 = \sqrt{k_f} \left(\frac{1-c_0}{c_0} \right)^{1/3} d \quad (9)$$

ここに、 v :水流の平均流速、 u_{*b} :砂層上面の摩擦速度、 u_i :砂層と水流層との境界における流速、 ℓ_0 :水流層と砂層との境界における混合距離、 c_0 :境界における粒子体積濃度、 κ :カルマン定数。砂層と管壁との間に、粘性底層を導入し、partial plug flowのplug flowの部分($0 \leq z \leq \gamma R_d$)の濃度には静止堆積層濃度 c を用い、shear flowの部分($\gamma R_d \leq z \leq R_d$)では、一様濃度 $\bar{c} (= c/2)$ を仮定する。 $\tau_{ext} = \tau_{int}$ として、

Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA, Tomohiko NAKAJIMA

砂層の流速分布を求め、さらに砂層の平均流速を求めると、次式を得る。

partial plug flow

$$\frac{v}{\sqrt{g R_d}} = \frac{u_s}{\sqrt{g R_d}} + \frac{4}{15} \frac{1}{\sqrt{f_f + f_g}} \frac{1}{(G_1 - Y)^2} \frac{R_d}{d} G_2^{5/2} / (1 - \gamma) \quad (10)$$

shear flow

$$\frac{v}{\sqrt{g R_d}} = \frac{u_s}{\sqrt{g R_d}} + \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{f_f + f_g}} \frac{1}{(G_1 - Y)} \frac{R_d}{d} \cdot \left[(G_1 + G_2 - Y)^{3/2} + \frac{2}{5(G_1 - Y)} \{ G_2^{5/2} - (G_1 + G_2 - Y)^{5/2} \} \right] \quad (11)$$

$$G_1 = i_e + (\sigma/\rho - 1) \bar{c} \sin \theta, \quad G_2 = i_e \frac{S_b R_b}{S_d R_d}$$

$$Y = (\sigma/\rho - 1) \bar{c} \cos \theta \frac{\tan \phi_s}{1 + \alpha}, \quad f_f = k_f (1 - \bar{c})^{5/3} / \bar{c}^{2/3}$$

$$f_g = k_g (\sigma/\rho) (1 - e^2) \bar{c}^{1/3} \quad u_s = \frac{u_{se}^2}{\nu} \delta$$

ここに、 δ : 粘性底層厚、 u_s : $z = \delta$ における流速、 $u_{se} = \sqrt{(\tau_{ext}(0) - \tau_y(0))/\rho}$: 流動砂層底面における摩擦速度。粘性底層厚は、開水路滑面上の土流実験³⁾によれば、次のようである。

$$u_{se} \delta / \nu = 7.32 \quad (12)$$

集合流動の発生限界は $z = 0$ で $\tau_{ext} = \tau_y$ となる条件から限界の i_e は、次のようになる。

$$i_e = - \frac{(\sigma/\rho - 1) \{ \gamma c + (1 - \gamma) \bar{c} \} \left(\sin \theta - \cos \theta \frac{\tan \phi_{sb}}{1 + \alpha} \right)}{1 + S_b R_b / S_d R_d} \quad (13)$$

上式において $\alpha = 0$ は、静止砂層が滑動し始める限界（集合流動限界）を与え、 $\alpha = 0.25$ は、流動砂層が停止する限界（堆積限界）を与える。2つの限界の間は、掃流と集合流動の遷移領域(transition)となる。

3. 実験と理論の比較 平均粒径 $d = 2.12 \text{ mm}$ 、 $\sigma/\rho = 2.65$ の一様砂を用い、管径 $D = 6.4 \text{ cm}$ のアクリル製の閉管路で $\theta = 0^\circ$ の実験を行ない、流量、エネルギー勾配、流砂量を測定した。一方、計算においては、partial plug flowでは、plug flowの部分で $c = 0.5$ とし、shear flowの部分で $\bar{c} = 0.25$ とし、管路壁面のせん断力に関して若干の補正⁵⁾を行う。さらに、式(9)、(10)を用いる。shear flowでは、濃度に関する近似式⁵⁾や式(9)、(11)を用いてエネルギー勾配 i_e 、流量 Q 、輸送濃度 c_t の関係を計算した。図-5に、 i_e と無次元流量をパラメータとした掃流、集合流動の領域区分図と流動形態ごとに分類した実験値を示す。これより領域区分は、現象をよく表現していることがわかる。図-6、7は、それぞれ掃流、集合流動における i_e 、 Q 、 c_t の間の関係に対する計算値と実験値を示す。本理論により実験値はかなりよく説明されている。

4. おわりに 本研究によって、管路における掃流、集合流動形態について

の土砂輸送現象の評価がかなりできるようになったものと思われる。今後は、浮遊砂を対象とした研究を進めたい。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、1988。2) 江頭・芦田・矢島・高濱: 土石流の構成則に関する研究、京大防災研年報、1989。3) 江頭・芦田・中島: 管路における土砂輸送機構、第34回水理講演会、1990。4) 江頭・芦田・高濱: エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル、京大防災研年報、1990。5) 中島: 管路における土砂輸送の形態と機構に関する研究、京大修士論文、1990。

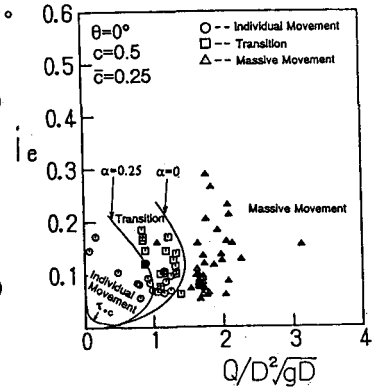


図-5

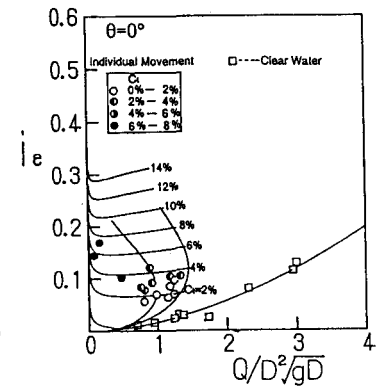


図-6

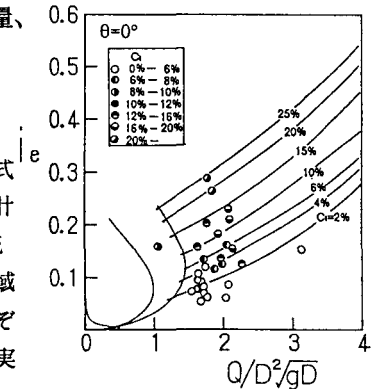


図-7