

II-121 傾斜管路における土砂の輸送機構

阪 急 電 鉄 正 員 中 島 智 彦
 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

1. はじめに ガム堆砂の排除、養浜などに関連して管路の土砂輸送機構の解明が望まれている。本研究では著者らがこれまでにに行った水平管路における研究¹⁾をもとに、集合流動に関する理論を上り勾配傾斜管に拡張し、その妥当性を検討する。

2. 基礎式 砂層全体が管底部を移動する流れを、集合流動 (massive movement) と言う。管路断面を図-1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-2、3に示す砂層内の応力分布に応じてpartial plug flow (図-2) と shear flow (図-3) に分類できる¹⁾。砂層に作用する外力 τ_{ext} 、内力 τ_{int} は以下のように表される¹⁾。

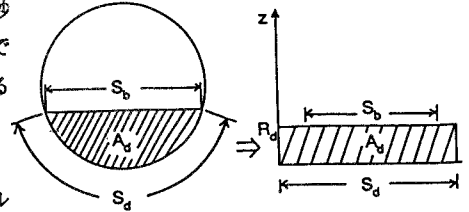


図-1

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

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

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

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

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

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、およ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 $\alpha = 0.25$ 程度である。砂礫層表面支配域における水流の抵抗抗を次式で与える³⁾。

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

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 :砂層と水流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の部分 ($0 \leq z \leq \gamma R_d$) の濃度には静止堆積層濃度 c を使い、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。

$\tau_{ext} = \tau_{int}$ として砂層の流速分布を求め、さらに平均流速を求めると次式を得る。

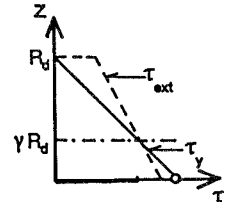


図-2

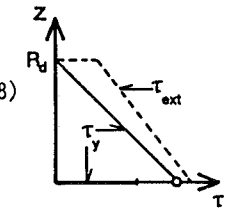


図-3

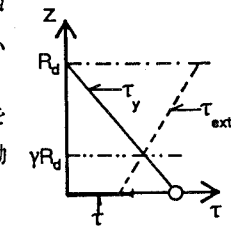


図-4

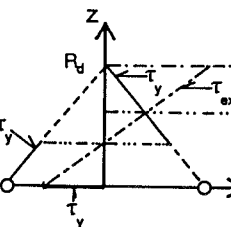


図-5

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

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

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

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

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

ここに、 δ :粘性底層厚、 u_s : $z = \delta$ における流速、 $u_{*e} =$

$\sqrt{(\tau_{ext}(0) - \tau_y(0)) / \rho}$:流動砂層底面における摩擦速度。また、上り勾配

を持つ管路では、せん断力分布は図-4のようになる。この場合には静止砂層上にshear flowが発生し、流動砂層の平均流速は式(10)において $u_s = 0$ したものに等しい。この流動形態は、水平管における掃流¹⁾に相当するものである。 δ は、開水路滑面上の土石流実験¹⁾によれば次のようである。

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

集合流動の発生限界は、 $z = 0$ で $\tau_{ext} = \tau_y$ となる条件から、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、静止砂層上のshear flowと全層集合流動の遷移領域（transition）となる。上り勾配を持つ場合、砂層が逆流することもあり得る。その発生限界は、図-5を参照すれば式(13)の $\tan \phi_{sb}$ を $-\tan \phi_{sb}$ としたものになる。

3.実験と理論の比較 平均粒径 $d = 0.212 \text{ cm}$ 、 $\sigma/\rho = 2.65$ の一樣砂を用い、管径 $D = 6.4 \text{ cm}$ の亚克力製の閉管路で $\theta = -30^\circ$ 、 -45° の実験を行い、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、静止砂層上のshear flowでは、 $\bar{c} = 0.25$ 、partial plug flowでは、plug flowの部分で $c = 0.5$ 、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⁴⁾を行う。shear flowでは、濃度に関する近似式⁴⁾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_i の関係を計算した。図-6、7はそれぞれ $\theta = -30^\circ$ 、 $\theta = -45^\circ$ のときの領域区分、および i_e 、 Q 、 c_i の間の関係を示すとともに実験データを示したものである。土砂輸送形態の区分、および i_e 、 Q 、 c_i の関係ともに、両者はかなりよく一致している。ただし、 $\theta = -45^\circ$ の場合、 c_i に関する計算値は実測値より小さくなっている。それは、傾斜角が大きくなると砂粒子は管路断面に一樣に分散しようとするのに対し、本モデルでは、それを考慮していないからである。

4)おわりに 以上、示したように、水平、あるいは勾配の緩い管路での土砂輸送現象は、評価できるようになったと思われる。今後、垂直管路や浮遊砂を対象とした研究を進めたい。参考文献 1)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。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・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。4)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。

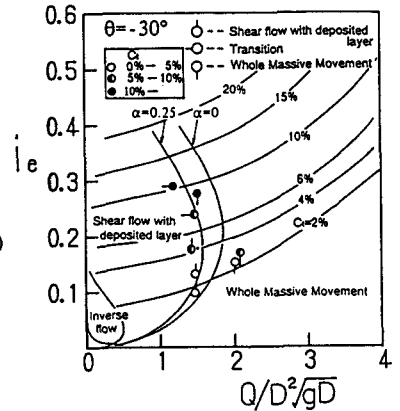


図-6

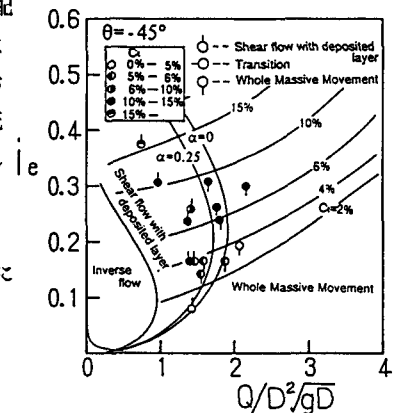


図-7