

立命館大学理工学部 正員 江頭 進治
電力中央研究所 正員 〇佐藤 隆宏
京都大学大学院 学生員 千代 啓三

1. はじめに 従来の研究によれば、粗粒子を高濃度に含む流れ（土石流）と微細砂を高濃度に含む流れ（泥流）では流れの構造が異なり、前者は層流的挙動で流れ、後者は乱流的挙動で流れるとされている。本研究は、粒径の違いが流れの構造に与える影響を調べることを目的としている。

2. 実験結果 粒径 d ; 0.017, 0.030, 0.066, 0.201 cm、比重 σ/ρ ; 2.65、内部摩擦角 ϕ_s ; 38.5~39.0° の非粘着性一様粒径砂粒子を用いて、幅 9.8 cm、長さ 4.0 m の矩形断面開水路において移動床および固定床実験を行い、平衡河床勾配、流速分布、濃度分布等を測定している。図-1 に、粒径、濃度による平衡河床勾配の変化¹⁾を示す。ここに実線は、江頭・芦田²⁾による粗粒子を高濃度に含む流れの構成則より導かれる平衡河床勾配の計算値であり、次式で表される。

$$\theta_e = \arctan \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan \phi_s \quad (1)$$

これらによると、粒径が大きい場合には、層流的挙動と仮定して導いた計算値でほぼ適切に評価されている。しかし粒径が小さくなるにつれて、実験値はそれよりも小さくなる。このことは粒径が小さくなるにつれて粒子骨格応力 (p_s) が小さくなることを示している。図-2 に同程度の濃度での各粒径の移動床上の流速分布、図-3 には固定床上の流速分布・濃度分布を示す。これらによると、粒径が小さいと上層において乱れが大きくなる一方、下層では粒径の大小によらず粒子間応力が卓越した流れの構造をしていることが分かる。

以上より、粒径が小さい場合には、流れの場そのものが乱れることによってエネルギーを散逸し、それは上層でより顕著である。そして乱れが大きな上層に存在する粒子は粒子骨格応力に寄与せず、結果的に平衡河床勾配が小さくなると考えられる。

3. 応力モデル 以上の実験結果に基づき、砂粒子を高濃度に含む流れを、下層の粒子間応力が卓越する層 ($0 < z < h_2$) と、上層の乱れが卓越する層 ($h_2 < z < h$) に分けて考える（図-4）。そして下層では粒子間摩擦による散逸 (τ_v)、粒子の非弾性衝突による散逸 (τ_g)、間隙水の乱れによる散逸 (τ_f) によってエネルギー散逸がなされるとして、粗粒子を高濃度に含む流れを対象として導かれた構成則²⁾に改良を加え³⁾、これを適用すると、下層の運動量保存則は次式となる。

$$0 = g \sin \theta + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ p_s \tan \phi_s + \rho (f_f + f_g) d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$0 = -g \cos \theta - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial}{\partial z} \{ p_w + p_s + p_d \} \quad (3)$$

$$p_d/p_s = \alpha = \left\{ \rho f_{pg} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \right\} / p_s = k \{ (c_* - c) / c_* \}^n \quad (4)$$

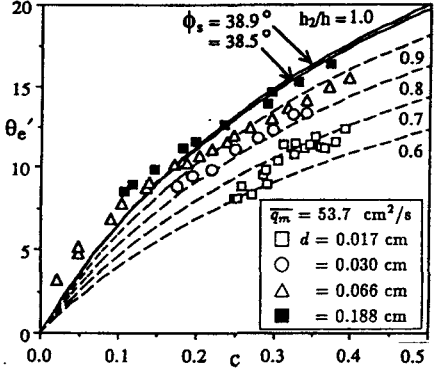


図-1 平衡河床勾配

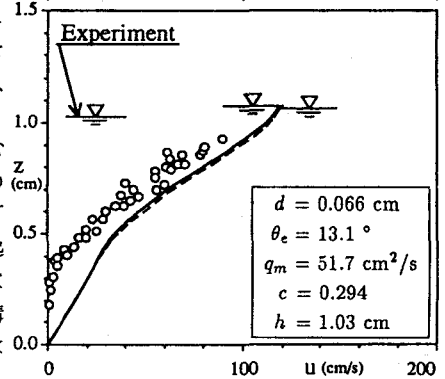
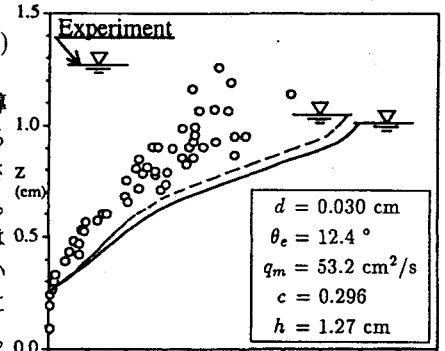


図-2 移動床上流れの流速分布

ここに、 $\rho_m = \rho \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\}$ 、 $f_f = k_f(1 - c)^{2/3}c^{1/3}$ 、 $f_g = k_g(1 - e^2)(\sigma/\rho)c^{1/3}$ 、 $f_{pg} = k_g e^2(\sigma/\rho)c^{1/3}$ 、 $k_g = 0.0828$ 、 $e = 0.85$ 、 $k_f = 0.56$ 、 $n = 1.5$ 、 $k = 0.71$ 、 $c_* = 0.60$ 。そして、下層の流速分布・濃度分布は上式より次式となる。

$$(f_f + f_g + f_{pg} \tan \phi_s / \alpha) \left(\frac{\partial u'}{\partial z'} \right)^2 = \left(\frac{h_2}{d} \right)^2 \left[\{(\sigma/\rho - 1)c_1 + 1\} (h_1/h_2) \sin \theta + \int_{z'}^1 G dz' \right] \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial u'}{\partial z'} \right)^2 \frac{\partial c}{\partial z'} = \left(\frac{h_2}{d} \right)^2 \frac{G - Y - a_2(1 - c)^{2/3}c - a_3c}{\frac{2}{3}k_f \left(\frac{c}{1 - c} \right)^{1/3} + \frac{n}{1 + \alpha} \frac{f_f + f_g - f_{pg} \tan \phi_s}{c_* - c}} \quad (6)$$

ここに、 $u' = u/\sqrt{gh_2 \sin \theta}$ 、 $z' = z/h_2$ 、 $G = \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} \sin \theta$ 、 $Y = (\sigma/\rho - 1)c \cos \theta \tan \phi_s / (1 + \alpha)$ 。

また上層には、流れ場に対して対数型流速分布形を、濃度場に対して拡散方程式を適用した。結果のみを示せば次式となる。

$$\frac{u(z)}{u_{*i}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z + \zeta_0 - h_2}{\zeta_0} + \frac{u(h_2)}{u_{*i}} \quad (7)$$

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{\eta_0}{z + \eta_0 - (h - h_a)} \right)^{w_0 / \kappa u_{*a}} \quad (8)$$

層厚比 (h_2/h) に関しては、二層モデルに基づくと平衡河床勾配は次式となる。

$$\theta'_e = \arctan \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \frac{h_2}{h} \tan \phi_s \quad (9)$$

式(1)、(9)より層厚比は $h_2/h = \tan \theta'_e / \tan \theta_e$ と表されるので、 θ'_e を実験的に調べて h_2/h を決定する。図-5 は、 h_2/h と $\{\rho_m / \rho(f_f + f_g)\}^{1/2} (h/d)$ (慣性力と流動応力の比) との関係を見たものである。なお、図-1 に、式(9)より求められる計算値を点線で示す。

図-2、3 に、これらから求められる流速分布・濃度分布を実線で示す。これらによると粒径 0.066 cm の実験値に関してはほぼ適切に評価されているものの、粒径 0.030 cm の実験値に関しては流動深の評価が小さい。すなわち散逸応力の評価が過小で、別の散逸応力を考慮しなければならない。

そこで純粘性応力 ($\tau_v = \mu(1 - c + k_v c^{1/3})(\partial u / \partial z)$) を考慮し、流速分布・濃度分布を求めた。その結果を図-2、3 に点線で示す。これらより粒径 0.030、0.066 cm の実験値とも流動深に関してはほぼ適切に評価されているものの、粒径 0.030 cm の流速分布に関しては実験値は上層においてもっと乱れのあることを示している。

4. おわりに 砂粒子を高濃度に含む流れは、下層でのエネルギー散逸構造は粒径によらず同様であるが、上層では粒径の違いによる影響が現れる。そこで上層に場の乱れによるエネルギー散逸を考えた二層モデルによりこれらの流れを説明した。しかし層厚の決定機構に関しては未だ検討の余地があり、今後、これについて研究を進めたい。

参考文献

- 1) 江頭・芦田・田野中・佐藤; 微細砂を高濃度に含む流れの特性, 水工学論文集, 第 37 巻, 1993
- 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, 第 32 号 B-2, 1989
- 3) 佐藤隆宏; 砂粒子を高濃度に含む流れの構造, 京都大学修士論文, 1994

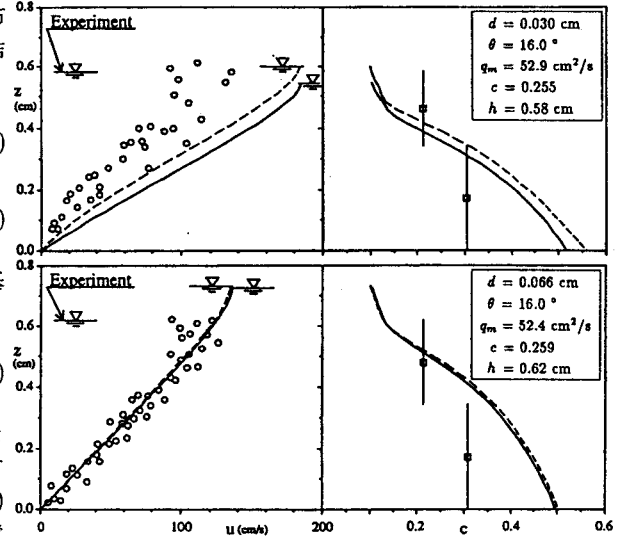


図-3 固定床上流れの流速分布・濃度分布

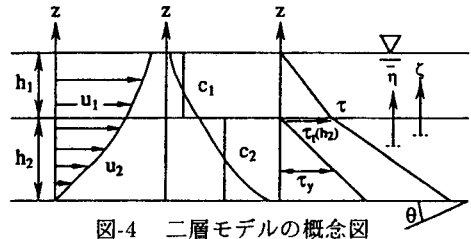


図-4 二層モデルの概念図

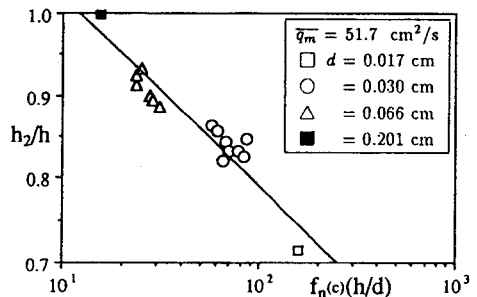


図-5 層厚比と流動応力に関するパラメータ