

II-291

砂粒子高濃度流における粒子径の影響

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

1. はじめに 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実験を行い、平衡河床勾配、流動深、流速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 に無次元掃流力($\tau_* = gh \sin \theta / (\sigma/\rho - 1)gd$)と抵抗係数($f = 8(u_* / \bar{u})^2$)の関係を示す。ここに実線は、前述の江頭・芦田²⁾による h/d ごとの抵抗係数の計算値である。これらによると粒径が小さくなるにつれて、層流的挙動と仮定して導いた計算値よりも抵抗が大きくなることが分かる。図-3 に同程度の濃度での各粒径の移動床上の流速分布を示す。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、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_y)、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。

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

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

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

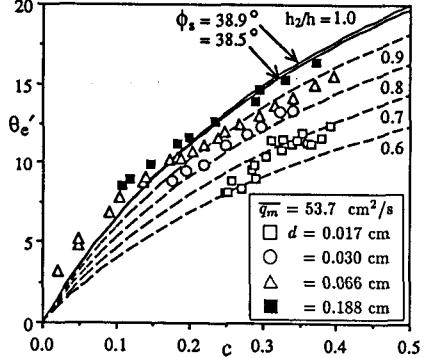


図-1 平衡河床勾配

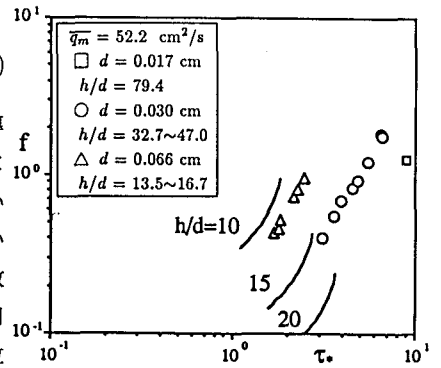


図-2 抵抗係数と無次元掃流力

ここに、 $\rho_m = \rho \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\}$ 、 $f_f = k_f(1 - c)^{2/3}c^{1/3}$ 、 $f_g = k_g(1 - e^2)(\sigma/\rho)c^{1/3}$ 、 $f_{pg} = k_g e^2(\sigma/\rho)c^{1/3}$ 、 $k_g = 0.0828$ 、 $e = 0.85$ 、 $k_f = 0.40$ 、 $n = 1.5$ 、 $k = 0.38$ 、 $c_* = 0.60$ 。そして、移動床上における下層の流速分布に関する第1次近似解は上式より次式となる。

$$\frac{u(z)}{\sqrt{gh_2}} = \frac{2}{3} \frac{1}{B} \frac{1}{\sqrt{f_f + f_g}} \left\{ A - B \left(1 - \frac{z}{h_2} \right) \right\}^{3/2} \quad (5)$$

ここに、 $A = \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} \frac{h_2 u_{*i}^2}{gd^2}$ 、 $B =$

$$\left(\frac{h_2}{d} \right)^2 \left[(\sigma/\rho - 1)c \frac{\tan \phi_s}{1 + \alpha} - \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} \tan \theta \right] \cos \theta$$

また、上層には対数則型流速分布形を適用し、次式のようになる。

$$\frac{u(z)}{u_{*i}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z + \zeta_0 - h_2}{\zeta_0} + \frac{u(h_2)}{u_{*i}} \quad (6)$$

層厚比 (h_2/h) に関しては、次のように議論する。二層モデルに基づく平衡河床勾配は次式となる。

$$\theta'_e = \arctan \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \frac{h_2}{h} \tan \phi_s \quad (7)$$

式 (1)、(7) 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。図-1 に式 (9) より求められる計算値を点線で示す。

図-3 に、以上の議論より求められる流速分布を実線で示す。これらによると粒径 0.066 cm の実験値ではほぼ適切に評価されているものの、それ以下の粒径では流動深が小さく算定されている。

そこで純粘性応力 ($\tau_v = \mu(1 - c)/(1 - k_v c^{1/3})(\partial u / \partial z)$, $k_v = 1.24$) を考慮し流速分布を求めた。その結果を図-3 に点線で示す。この結果、純粘性応力を考慮することにより、河床近傍に関してはエネルギー散逸の評価が改善された。しかし実験値は、上層においてもっと乱れが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。今後は、層厚の決定機構を含めて、場の乱れが卓越する流れに関して研究を進めたい。

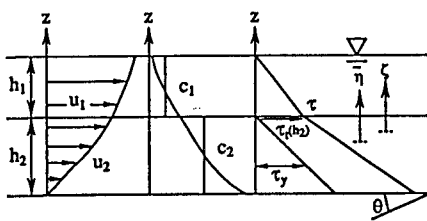


図-4 二層モデルの概念図

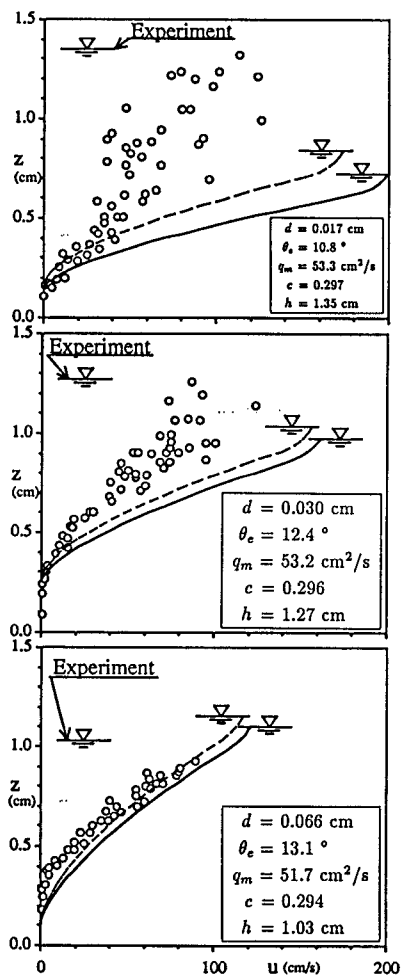


図-3 移動床上流れの流速分布

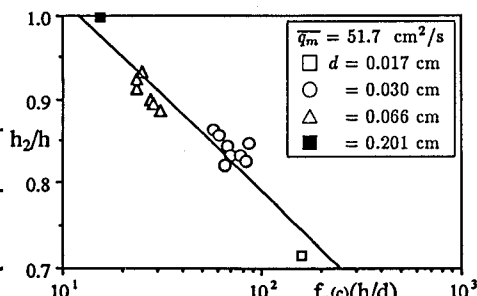


図-5 層厚比と流動応力に関するパラメータ

- 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