

II-220

泥流の応力構造に関する研究

京都大学 防災研究所 正 員 江頭 進治
 京都大学 大 学 院 学生員 佐藤 隆宏
 京都大学 大 学 院 学生員 千代 啓三

1. はじめに 泥流の流れの抵抗は流量、勾配、粒子濃度および粒子の物理的特性に依存することが知られている。本研究では微細砂（電気化学的な粒子間力が無視できる）と水との混合物の流れを対象として開水路実験を行ない、その結果に基づいて応力モデルを提案している。

2. 実験結果の意義 幅10cm、長さ4mの矩形断面開水路において、中央粒径0.017cm、比重2.66の微細砂と水との混合物の流れを作り、流れの抵抗、流速分布、濃度分布、トレーサの拡散係数および移動床における平衡河床勾配等を測定した。平衡河床勾配以外は、全て固定床実験である。実験方法、条件等は文献¹⁾に示されている。これらの実験結果を要約すれば次のようである。(1) 粒子濃度が10数パーセントを越えると流れの抵抗は増加する(図-1)。(2) 流速分布は粒子濃度が増加するに伴い、対数型分布から変曲点を持つような分布形に遷移する(図-2)。(3) 拡散係数は粒子濃度の増加に伴い減少する。(4) 濃度の鉛直分布は、粒子濃度の増加に伴い一様化する。(5) 平衡河床勾配は、砂粒子が層流的な運動をする土石流の場合よりも小さくなる(図-3)。

以上の結果は、対象としている流れが浮遊砂流としての面と、土石流としての面を持っていることを示しており、粒子濃度が増加するとレイノルズ応力が減少する一方において、粒子の静的摩擦力や衝突力などの粒子間応力が卓越することを示唆している。

3. 応力モデル 上述の実験事実を説明するため、図-4のような応力モデルを考える。すなわち、流れの領域はレイノルズ応力が卓越した上層（厚さ h_1 ）と粒子が層流的な挙動をする下層（厚さ h_2 ）からなり、上層は対数型分布に従い、下層は土石流に関する江頭らの応力モデル²⁾に従うものとする。ここで、粒子濃度はとりあえず一様としておく。

下層（ $0 \leq z \leq h_2$ ）のせん断応力は、江頭らによれば、

$$\tau = \tau_y + \tau_f + \tau_g$$

$$= p_s \tan \phi_s + k_f \rho d^2 \frac{(1-e)^{5/3}}{c^{2/3}} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + k_g \sigma (1-e^2) d^2 c^{1/3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (1)$$

ここに、 $\tau_y = p_s \tan \phi_s = \rho(\sigma/\rho - 1)g \cos \theta \tan \phi_s c (h_2 - z)/(1 + \alpha)$ 、 ϕ_s : 粒子摩擦角、 d : 粒子径、 e : 粒子反発係数、 σ : 粒子密度、 ρ : 水の密度、 $k_g = 0.0828$ 、 $\sqrt{k_f} = \exp(9.3c - 2.1)$ である。下層では、式(1)に示すように粒子間摩擦力(τ_y)のため流動応力が減少する。この応力が濃度が増加すると変曲点を持つような流速分布をもたらす。

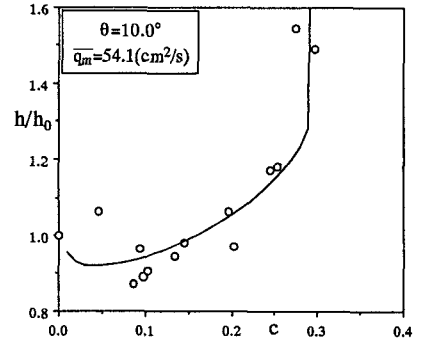


図-1 流動深と濃度

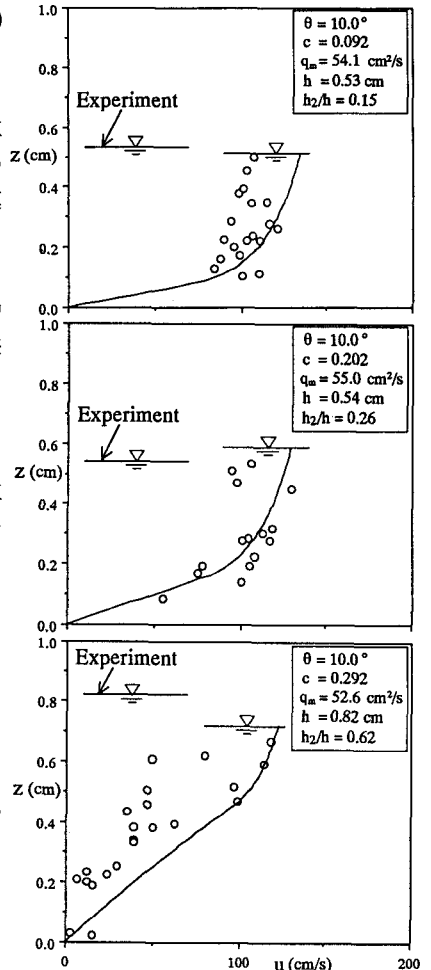


図-2 流速分布

下層の厚さは、粘性底層との相似性を考えて、次式で推定する。

$$u_* h_2 / \nu_a = \delta_* \quad (2)$$

ここに、 ν_a は見かけの動粘性係数であり、 $\nu_a = gh \sin \theta / (\partial u / \partial z)$ である。式(1)の速度勾配をこれに代入して、式(2)を解けば、層厚比に関する次式を得る。

$$\frac{h_2}{h} \left[1 - \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \frac{h_2 \tan \phi_s}{h \tan \theta} \frac{1}{1 + \alpha} \right]^{1/2} = \delta_* \sqrt{f_f + f_g} \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\}^{-1/2} \frac{d}{h} \quad (3)$$

ここに、 $f_f = k_f(1 - c)^{5/3} / c^{2/3}$ 、 $f_g = k_g(\sigma/\rho)(1 - e^2)c^{1/3}$ である。

下層の流速分布は式(1)により容易に求められる。上層のそれも含めて結果のみを示すと次のようである。

$$\frac{u(z)}{\sqrt{gh_2}} = \frac{2}{3} \frac{1}{B \sqrt{f_f + f_g}} \left[\left\{ A - B \left(1 - \frac{z}{h_2} \right) \right\}^{3/2} - (A - B)^{3/2} \right] \quad (0 \leq z \leq h_2) \quad (4)$$

$$\frac{u(z)}{u_{*i}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0 - h_2}{z_0} \right) + \frac{u(h_2)}{u_{*i}} \quad (h_2 \leq z \leq h (= h_1 + h_2)) \quad (5)$$

ここに、 $A = \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} \frac{h_2 u_{*i}^2}{gd^2}$ 、 $B = \left(\frac{h_2}{d} \right)^2 \left[(\sigma/\rho - 1)c \frac{\tan \phi_s}{1 + \alpha} - \{(\sigma/\rho - 1)c + 1\} \tan \theta \right] \cos \theta$

$u_{*i} = \sqrt{gh_1 \sin \theta}$ 、 $u(h_2) = \frac{2}{3} \frac{1}{B \sqrt{f_f + f_g}} \left\{ A^{3/2} - (A - B)^{3/2} \right\}$ 、 $z_0 = \frac{1}{\kappa} \left\{ \frac{f_f + f_g}{(\sigma/\rho + 1)c_1 + 1} \right\}^{1/2} d$

平衡河床勾配 θ_e は、式(1)と外力とを等置し、 $z = 0$ において $\partial u / \partial z = 0$ 、 $\alpha = 0$ とおけば次のように得られる。

$$\theta_e = \arctan \left\{ \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \frac{h_2 \tan \phi_s}{h} \right\} \quad (6)$$

式(4)、(5)を式(3)を用いて積分して平均流速を求め、さらに連続式を併用して求められる流動深を図-1に示し、流速分布を図-2に示している。ここで、式(2)の δ_* は $\delta_* = 7.8$ としている。流動深および流速分布ともに、本モデルによってほぼ適切に評価されている。

図-3には、平衡河床勾配に関する計算値を示している。計算結果によれば、全流動深の6～7割程度が層流的な挙動をしていることを示している。比較のため、固定床の流速分布のうち、移動床に最も近いと思われる図-2の第3図の h_2/h の計算値をみると0.62であり、これを図-3の上でみると移動床のデータ群の中に位置することが分かる。これは、二層モデルの妥当性を示唆するものである。

4. あとがき 本研究により、微細砂を高濃度に含む流れに関する理解がかなり深められた。ただし、応力構造、特に式(1)の第2項および式(2)の δ_* については検討の余地がある。今後、浮遊砂流、掃流砂流、土石流を含めてこの種の流れの理解を深めたい。

参考文献 1)江頭・芦田・田野中・佐藤：水工学論文集，37，1993，pp.517-522.

2)江頭・芦田・矢島・高濱：京大防災研究所年報，第32号B-2，1989，pp.487-501.

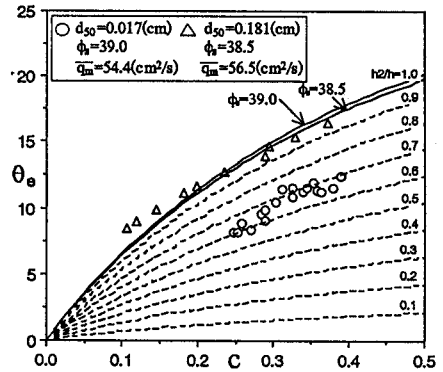


図-3 平衡河床勾配

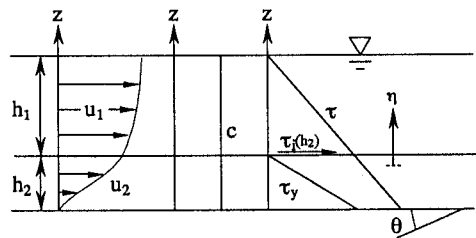


図-4 応力モデル