

泥流の構成則に関する研究

京都大学防災研究所 正 員 江頭 進治 河川環境管理財団 正 員 芦田 和男
三菱総合研究所 正 員 〇田野中 新 京都大学 大学院 学生員 佐藤 隆宏

1. はじめに 微細砂を高濃度に含む泥流を対象として、水路実験を行い構成則について議論する。水路実験は、流動深と濃度の関係、濃度分布、流速分布、平衡勾配等について行った。実験については本概要集の”泥流の流速分布・濃度分布に関する実験的研究”¹⁾に記されている。

2. 平衡勾配 土石流に関する江頭・芦田らの研究²⁾によれば運動方程式は次式で与えられる。

$$d^2(f_f + f_g) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = g \sin \theta \int_z^h \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c + 1 \right\} dz - \frac{\tan \phi_s}{1 + \alpha} g \cos \theta \int_z^h \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c dz \quad (1)$$

ここに、 σ は砂粒子密度、 ρ は水の密度、 d は粒径、 ϕ_s は砂粒子の摩擦角、 c は体積濃度、 α は定数で土石流においては $\alpha = 0.25$ である。 f_f 、 f_g は以下のである。

$$f_f = k_f \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}}, \quad f_g = k_g \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) c^{1/3}$$

ここに、 $\sqrt{k_f} = 0.5 \sim 1.0$ 、 $k_g = 0.0828$ 、 e は反発係数で $e = 0.85$ としている。

平衡勾配は流れが堆積も侵食もしない勾配であって、以下のように誘導できる。式(1)より、 $c(z) = \text{const.}$ と仮定し、河床面($z = 0$)で $u = 0$ 、 $\partial u / \partial z = 0$ である。さらに、河床面では $\alpha = 0$ として θ について解くと平衡勾配 θ_e に関する次式を得る。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan \phi_s \quad (2)$$

水路実験は、 $D_{50} = 0.016 \text{ cm}$ の微細砂を用いてつくった泥流に $D_{50} = 0.34 \text{ cm}$ の粗礫を混入して流すことにより行った。水路勾配をほぼ 7° に設定し、下流端に、勾配可変の小水路を接続して 7° より緩くしておく。小水路には堰が取り付けられているため堆積が起こる。ある程度の堆積長が得られ、定常状態となったところで河床勾配を測定した。ここで、泥流の濃度を c_f とすれば流体の見かけ上の密度 ρ_m は $\rho_m = \rho + (\sigma - \rho)c_f$ である。これを式(2)に適用して求めた平衡勾配と実験結果を比較したものが図-1である。ここで、 $\tan \phi_s$ は粗礫の値($=0.795$)を使っている。これによれば、ほぼ10%までは式(2)で表されているものの c_f の大きいところでは適合性が悪くなっている。これは、微細砂は10%程度までは浮遊しているが、それ以上では乱れが抑制され、これに代わる別の形の応力が卓越してくることを示唆している。

3. 応力モデル 文献1)および平衡勾配の実験結果を参考にして、泥流の応力モデルとして次のようなものを考える。

$$\tau = \tau_y + \tau_w \quad (3)$$

ここに、 τ_y は江頭・芦田²⁾による降伏応力、 τ_w は壁面乱流による応力であり、それぞれ以下のである。

$$\tau_y = \frac{\tan \phi_s}{1 + \alpha} \rho g \cos \theta \int_z^h (\sigma/\rho - 1) c dz, \quad \tau_w = \rho_m \ell^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (4)$$

一方、外力は次のようである。

$$\tau = \rho g \sin \theta \int_z^h \{ (\sigma/\rho - 1) c + 1 \} dz \quad (5)$$

式(4)、(5)を式(3)に代入し、壁面乱流の項については乱れの混合距離 ℓ を $\ell = \kappa_0 z$ ($\kappa_0 = 0.4$)と仮定すれば、速度勾配に関して次式が得られる。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \alpha} \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c \frac{\tan \phi_s}{\tan \theta} \right\}^{1/2} \frac{U_*}{\kappa_0 z} \quad (6)$$

これより、流速分布が次のように得られる。

Shinji EGASHIRA, Kazuo ASHIDA, Shin TANONAKA, Takahiro SATO

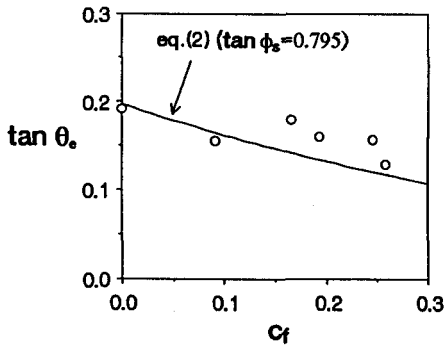


図-1

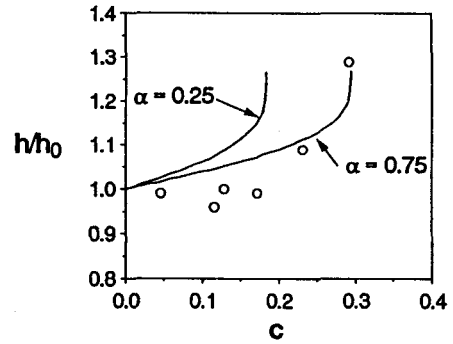


図-2

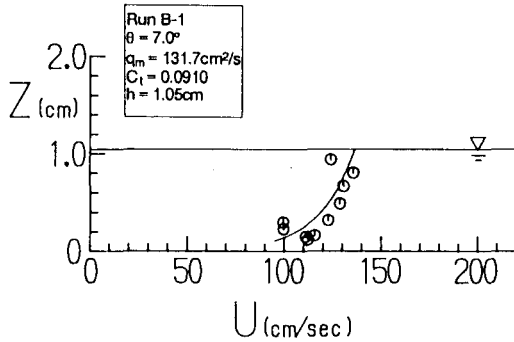


図-3(a)

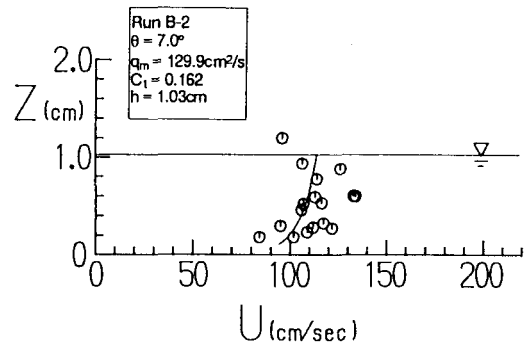


図-3(b)

$$\frac{u(z)}{U_*} = A_r + \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \alpha \rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \right\}^{1/2} \frac{1}{\kappa_0} \ln \frac{z}{k_s} \quad (7)$$

また、平均流速 U は次のようになる。

$$\frac{U}{U_*} = A_r - \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \alpha \rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \right\}^{1/2} \frac{1}{\kappa_0} \left(1 - \ln \frac{h}{k_s} \right) \quad (8)$$

式(8)より、一定流量 q_m について濃度と流動深の関係が得られる。実験値¹⁾とその比較を行ったものが図-2に示されている。ここに、 $A_r = 8.5$ 、 $k_s = 0.114 \text{ cm}$ としている。実験条件は $\theta = 7^\circ$ 、全流量 $q_m = 123.9 \text{ cm}^2/\text{s}$ のものである。 $\alpha = 0.25$ では $c = 18\%$ 程度で発散し、降伏応力が過大であるが、 $\alpha = 0.75$ とすれば傾向がよく表される。流速分布に関して式(7)と実験値を比較したものが図-3(a)(b)である。 $\alpha = 0.25$ としているため $c = 18\%$ までのケースにしか適用できないが適合性は良好である。

4. おわりに 文献1)および粗礫を含む泥流の平衡勾配の実験から、高濃度の領域では乱れを抑制する応力の存在が支配的であることが分かった。泥流の構成式として、降伏応力と壁面乱流による応力を考慮したモデルを提案した。降伏応力については過大になる傾向にあり、 α について検討が必要である。壁面乱流については乱れの混合距離 l の評価に問題が残される。しかしながら、これらの応力をベースとしたモデルで泥流の構成則が得られる可能性が大きい。

謝辞 本実験の流速分布測定においては、近畿大学理工学部江藤剛治先生の御協力により超高速ビデオカメラを使用させて頂いた。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献 1) 江頭・芦田・田野中・佐藤：泥流の流速分布・濃度分布に関する実験的研究，関西支部概要集，1992，2) 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32号B-2, 1989