

II-8

微細砂を高濃度に含む流れの構成則に関する研究

三菱総合研究所 正員 田野中 新
 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
 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流れを対象として、水路実験を行い構成則について検討する。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¹⁾。

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 は以下のものである。

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

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。

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

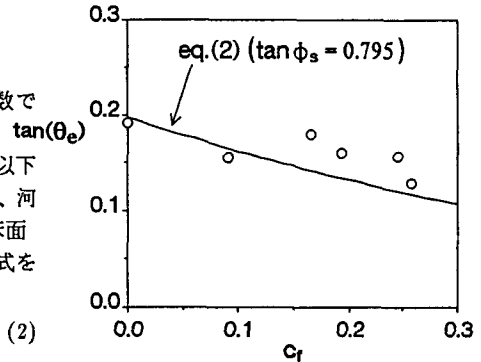


図-1

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、微細砂の濃度を 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)に示す粒子の拡散および平衡勾配の実験結果を参考にして、微細砂を高濃度に含む流れ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・芦田ら²⁾による降伏応力、 τ_w は壁面乱流による応力であり、それぞれ以下のものである。

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

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。

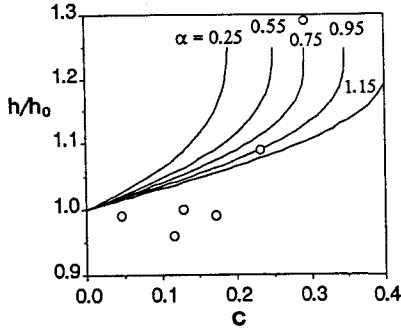


図-2

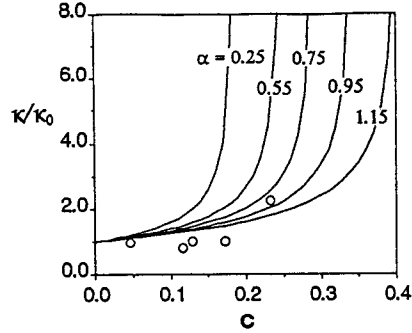


図-3

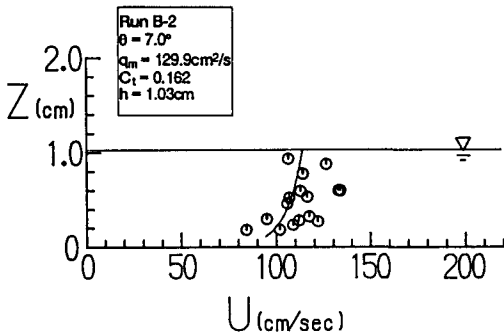


図-4

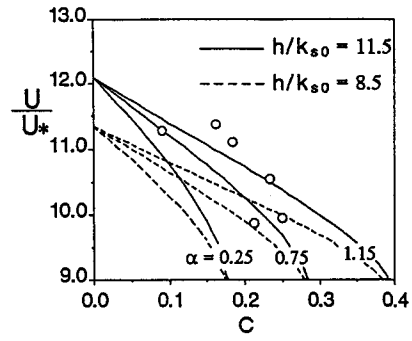


図-5

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

これより、流速分布式が次のように得られる。

$$\frac{u(z)}{U_*} = A_r + \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \alpha} \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c \frac{\tan \phi_s}{\tan \theta} \right\}^{1/2} \frac{1}{\kappa_0} \ln \frac{z}{k_{s0}} \quad (7)$$

また、平均流速 U は次のようになる。

$$\frac{U}{U_*} = A_r - \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \alpha} \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c \frac{\tan \phi_s}{\tan \theta} \right\}^{1/2} \frac{1}{\kappa_0} \left(1 - \ln \frac{h}{k_{s0}} \right) \quad (8)$$

式(8)および連続式より濃度と流動深の関係が得られる。実験値とその比較を行ったものが図-2に示されている。ここに、 $A_r = 8.5$ 、 $k_{s0} = 0.114 \text{ cm}$ 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。また、これと同じ実験について、対数則が成り立つと仮定したときのカルマン定数 κ と濃度との関係を見たものが図-3である。 $\alpha \geq 0.75$ であれば傾向はよく表される。流速分布に関して、式(7)と実験値を比較したものが図-4である。図-5は平均流速に関して、式(8)と実験値を比較したものである。ここで、 h/k_{s0} は実験値の最大値と最小値を用いている。 α が比較的大きな値であれば適合性は良いようである。

4. おわりに

文献1)および粗礫を含む流れの平衡勾配に関する実験より、微細砂濃度の高い領域では乱れが抑制されることが示された。そこで、降伏応力と壁面乱流応力とからなるモデルに基づいて泥流の抵抗などについての解析を試みた。その結果、泥流の応力構造についての見通しは得られた。しかし、降伏応力(α の問題)や乱れの混合距離(κ の問題)の決定機構については、今後の課題として残される。

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グループにより開発された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：微細砂を高濃度を含む流れに関する実験的研究，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，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