

京都大学防災研究所 正 員 高橋 保

京都大学大学院 学生員 小林 幸一朗

建設省 正 員 田中 利行

1. はじめに 間隙流体に多量の微細粘土粒子を含む土石流を取り上げ、水路実験を行う。そして、高密度粘土スラリーを間隙流体とする粘性の卓越した土石流の粗粒子分散機構及び、流体中に砂が含まれている事による見かけの粘性の増大機構を考慮して、実験結果の説明を試みる。

2. 実験方法、実験条件 実験は、幅10cm、長さ10m、勾配可変の長方形断面水路に高濃度のカオリン粘土スラリーを所定の流量で流し、中央粒径3.25mmではほぼ様な粒径の砂を添加することによって土石流を発生させ、側面から高速度ビデオカメラで撮影し、流速分布を測定した。勾配、カオリン粘土の濃度、粗粒子濃度の3つの条件を変化させて実験を行った。また、実験に使用した砂を貼り付けた粗度板を水路床として用いた。

3. 実験結果および考察 勾配が16°の実験ケースでは、層流に関する放物線形の流速分布とよく似た流速分布形になっており、濃度分布が一様であると推測される。勾配が12°の実験ケースでは、底面近くで流速勾配が小さく、変曲点を持つような流速分布になっているものがある(図2参照)。このような場合には、砂が水面近くまで分布することができず、下の方が濃くなっているものと推測される。

4. 流動機構の考察 上下の砂粒子層が強制的なせん断変形によって相対的な移動をすると、これらの層を互いに分散させようとする圧力がはたらくものとする。この圧力は粒子が接近し間隙流体を排除する際に生ずると考えられ、粒子濃度が大きいほど大きく、粘性および速度勾配が大きいほど大きくなるとして、 $kc_*\lambda^2\mu_f(du/dz)$ のように表す。したがって、深さ方向の力のつり合い式は、

$$kc_*\lambda^2\mu_f\frac{du}{dz} = (\sigma - \rho)g \cos \theta \int_z^h cdz, \quad \lambda = \left\{ \left(\frac{c_*}{c} \right)^{1/3} - 1 \right\}^{-1} \quad (1)$$

のように表される。ここに、 k は定数、 c_* は砂粒子の充填濃度、 λ は線濃度、 μ_f は間隙流体の粘性係数、 σ は砂粒子密度、 ρ は間隙流体の密度、 θ は水路勾配、 c は砂粒子の体積濃度である。

次に、流下方向にはたらく力のつり合いを考える。土石流に作用するせん断力は間隙流体の粘性によるせん断力と、粒子の接近・接触によるせん断力とに分類されると考える。間隙流体の粘性によるせん断力は、粒子を含むことによる見かけの粘性係数の増加を考慮して、近似的に $\lambda c_*\mu_f(du/dz)$ で表され、粒子の接近・接触に伴うせん断力は、分散圧力を生ずるような粒子近傍の流れによる粘性係数の増加分に対応すると考えられるので、これを $\phi\lambda^2c_*\mu_f(du/dz)$ で表す。したがって、流下方向にはたらく力のつり合い式は、

$$(1 + \lambda\phi)\lambda c_*\mu_f\frac{du}{dz} = g \sin \theta \int_z^h \{(\sigma - \rho)c + \rho\} dz \quad (2)$$

のように表わされる。ここに、 ϕ は定数である。(1)、(2)式より $z/h = Z$ として濃度分布式を導くと、

$$\left| \frac{c - c_\infty}{c} \right| = \left| \frac{c_b - c_\infty}{c_b} \right| (1 - Z)^{3k(\psi - \tan \theta)} \quad (3)$$

$$\psi = \frac{1}{k} \left(\phi + \frac{1}{\lambda} \right) = \frac{1 + \lambda\phi}{k\lambda}, \quad c_\infty = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\psi - \tan \theta)}$$

となる。ここに c_b は底面濃度であり、 c_∞ は平衡濃度である。 $c_b = c_\infty$ のとき $c = c_b$ となり濃度分布は一様になる。濃度分布が一様の場合の流速分布は(2)式より、 $z/h = Z$ として、

$$U = \frac{u_* h}{(1 + \lambda \phi) \lambda c_* \mu_f} \{(\sigma - \rho)c + \rho\} \left(Z - \frac{Z^2}{2} \right) \quad (4)$$

この式の計算結果を図1、2中の実線で示す。濃度分布を考慮した場合の流速分布は、(2)、(3)式より、

$$U = K \left[\frac{a^2}{2} \{1 - (1 - Z)^2\} - \frac{2ab}{3k(\psi - \tan \theta) + 2} \{1 - (1 - Z)^{3k(\psi - \tan \theta) + 2}\} + \frac{b^2}{6k(\psi - \tan \theta) + 2} \{1 - (1 - Z)^{6k(\psi - \tan \theta) + 2}\} \right] \quad (5)$$

ここに、

$$a = \left(\frac{c_*}{c_\infty} \right)^{\frac{1}{3}} - 1, \quad b = \frac{1}{3} \left(\frac{c_*}{c_\infty} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 - \frac{c_\infty}{c_b} \right), \quad K = \frac{\rho u_* h}{c_* \mu_f} \cdot \frac{\psi}{\psi - \tan \theta} \cdot \frac{1}{\phi}$$

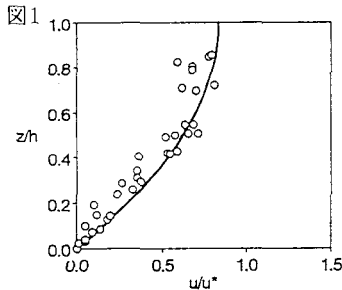
のようになる。

(3)式は c_b が c_∞ より小さいときには、上方の濃度が下層よりも小さくなるような濃度分布になることを示しているが、実際には粒子が分散するにはある程度以上の濃度が必要であると考えられ、平均濃度が小さい場合には、粒子層が全流動層にはわたらず、下方に集中すると考えられる。このような場合、流動層を砂のある部分(Mixture layer)と粘土スラリーのみの層(Fluid layer)に分けて流速分布を求める必要がある。Mixture layerの層厚はその部分の濃度が一定であるとして砂の給砂量と計算による流砂量のつり合い式から求めた。Mixture layerの濃度は、底面濃度と粗粒子が水面まで分布する限界の濃度の平均と仮定している。Mixture layerとFluid layerの水平方向のつり合い式は、

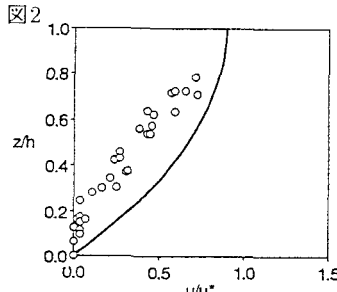
$$(1 + \lambda \phi) \lambda c_* \mu_f \frac{du_1}{dz} = (\sigma - \rho) g \sin \theta \int_z^D c_D dz + \rho g \sin \theta (h - z), \quad \mu_f \frac{du_2}{dz} = \rho g \sin \theta (h - z) \quad (6)$$

ここに、 u_1 はMixture layerの流速、 D はMixture layerの層厚、 c_D はMixture layerの粗粒子濃度、 u_2 はFluid layerの流速である。(6)式から導かれた流速分布を図3中の実線で示す。

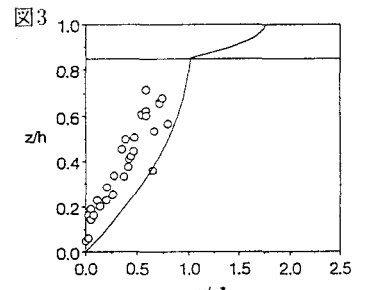
5. おわりに 砂粒子濃度が全層にわたって一様とした場合の流速分布式は、実験結果とよく一致することがわかった。しかし、Mixture layerが生ずる場合、その層内の濃度およびその分布についてはまだよくわかっておらず、分散圧力の仮説とともに今後研究を進める必要がある。



$$\begin{aligned} \theta &= 16^\circ \\ \mu_f &= 157 \text{cps} \\ C_F &= 23.1\% \\ \rho &= 1.370 \text{g/cm}^3 \\ C_L &= 34.3\% \\ h &= 3.5 \text{cm} \\ z_0 &= 0 \text{cm} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \theta &= 12^\circ \\ \mu_f &= 301 \text{cps} \\ C_F &= 24.1\% \\ \rho &= 1.386 \text{g/cm}^3 \\ C_L &= 32.8\% \\ h &= 5.6 \text{cm} \\ z_0 &= 0 \text{cm} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \theta &= 12^\circ \\ \mu_f &= 301 \text{cps} \\ C_F &= 24.1\% \\ \rho &= 1.386 \text{g/cm}^3 \\ C_L &= 28.7\% \\ h &= 4.8 \text{cm} \\ z_0 &= 0 \text{cm} \end{aligned}$$