

粘土スラリーを間隙流体とする土石流の流動機構

京都大学防災研究所 正会員 高橋 保

京都大学防災研究所 正会員 中川 一

京都大学大学院 学生員 ○小林幸一郎

1 はじめに 微細粘土粒子が土石流の流動機構に与える影響としては、間隙流体が高密度になることによる効果と間隙流体の粘性が高くなることによる効果の2つが考えられる。ここでは、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、見かけの粘性の増大機構について考察し、粗粒子濃度分布および流速分布を求、この結果を実験によって検討し、式中のパラメーターを決定している。

2 流動機構の理論的展開 粒子同士の衝突効果に比べて粘性効果が卓越する流れにおいても、固体粒子が充填濃度 c_* よりも小さい状態で定常的に流れているものとすれば、粒子を分散させる何らかの圧力が作用している。この圧力は粒子群のせん断の際に生じ、 $g(\lambda)\mu_f(du/dz)$ と書くことができるものとする。すなわち、

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

である。ただし、 μ_f は間隙流体の粘性係数、 c は粗粒子体積濃度、 ρ は間隙流体の密度、 h は流動深、 θ は水路勾配、 u は流速である。一方、主流方向の応力のつり合いは

$$\tau = \{f(\lambda) + \Phi g(\lambda)\}\mu_f \frac{du}{dz} = g \sin \theta \int_z^h \{(\sigma - \rho)c + \rho\}dz \quad (2)$$

で与えられるものと仮定する。ここに Φ は定数である。 $f(\lambda)$ は粗粒子が高濃度に分布していることによって有効間隙が減少するために見かけ上粘性係数が増大する効果に対応しており、 $\Phi g(\lambda)$ は粗粒子が相対運動することによって生じる分散圧力による効果に対応している。森・乙竹¹⁾の考察を $f(\lambda)$ に適用して $f(\lambda) = 3/\{1/c - 1/c_*\} = 3c_*/\{(1/\lambda + 1)^3 - 1\} \doteq c_*\lambda$ 、 $g(\lambda) = c_*\lambda^2$ と仮定し、これらを式(1)、(2)に代入すると、

$$\frac{\tau}{p} = \Phi + \frac{1}{\lambda} = (\Phi - 1) + \left(\frac{c_*}{c}\right)^{1/3} \quad (3)$$

が成立する。さらに式(1)、(2)より、 $Y = z/h$ として、

$$\int_1^Y cdY = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\Phi - 1 - \tan \theta + (c_*/c)^{1/3})}(Y - 1) \quad (4)$$

を得る。両辺を Y で微分し、 c についての微分方程式を解くと、

$$\frac{|c - c_\infty|}{c} = \frac{|c_b - c_\infty|}{c_b}(1 - Y)^{3(\Phi - \tan \theta)}, \quad c_\infty = \rho \tan \theta / (\sigma - \rho)(\Phi - \tan \theta) \quad (5)$$

のようにして濃度分布形が得られる。ここに c_b は $z = 0(Y = 0)$ での底面濃度である。なお、 $c_b = c_\infty$ のとき Y に関係なく $c = c_b = c_\infty$ となり、 $c < c_\infty$ のとき Y に関係なく $c_b = c$ となる。

つぎに、式(5)のような濃度分布形のもとで平均流速分布を求める。式(2)より、

$$c_*\lambda(1 + \Phi\lambda)\mu_f \frac{du}{dz} = g \sin \theta(\sigma - \rho) \int_z^h cdz + \rho g \sin \theta(h - z) \quad (6)$$

であり、 $Y = z/h$ 、 $U = u/u_*$ のようにして無次元化すると

$$\frac{dU}{dY} = \frac{\rho u_* h}{c_* \mu_f} \cdot \frac{\Phi}{\Phi - \tan \theta} \cdot \frac{1}{\lambda(1 + \Phi\lambda)}(1 - Y) \quad (7)$$

のようになる。これを次のように近似化する。

$$\frac{dU}{dY} = \frac{\rho u_* h}{c_* \mu_f} \cdot \frac{\Phi}{\Phi - \tan \theta} \cdot \frac{1}{\Phi} \cdot \frac{1}{\lambda^2}(1 - Y) \quad (8)$$

濃度分布式(5)に λ を代入し、 $Y=0:U=0$ のもとで積分すると

$$U = \frac{\rho u_* h}{c_f \mu_f} \cdot \frac{1}{\Phi - \tan \theta} \cdot \left[\frac{a^2}{2} \{1 - (1-Y)^2\} - \frac{2ab}{3(\Phi - \tan \theta) + 2} \{1 - (1-Y)^{3(\Phi - \tan \theta) + 2}\} + \frac{b^2}{6(\Phi - \tan \theta) + 2} \{1 - (1-Y)^{6(\Phi - \tan \theta) + 2}\} \right] \quad (9)$$

$$a = \left(\frac{c_*}{c_\infty} \right)^{1/3} - 1, \quad b = \frac{1}{3} \left(\frac{c_*}{c_\infty} \right)^{1/3} \left(1 - \frac{c_\infty}{c_b} \right)$$

のように流速分布式を表わすことができる。 $c_b \leq c_\infty$ のとき、濃度は全流動深にわたり一定となり、式(7)の関係が成り立つ。 $Y=0:U=0$ のもとでこの微分方程式を解けば、

$$U = \frac{\rho u_* h}{c_* \mu_f} \cdot \frac{\Phi}{\Phi - \tan \theta} \cdot \frac{1}{\lambda(1 + \Phi \lambda)} \left(Y - \frac{1}{2} Y^2 \right) \quad (10)$$

のような流速分布形になる。

3 実験概要 $d_m = 3.18\text{mm}$ ではば一樣な粒径の硅砂と高濃度のカオリン粘土スラリーを混合して実験材料とし、長さ4m、幅5cm、深さ20cmの水路に実験材料を定常的に供給して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。粗粒子濃度、カオリン粘土の濃度、勾配の3つの条件を変化させて行った。

また、流速分布式が実験値に合うように Φ を逆算して Φ と λ の関係を調べた。

4 実験結果への適合性 実験により得られた流速分布形を図-1に示す。図中には実験結果によく合うように Φ の値を決定した場合の流速分布形が点線で描かれている。このようにして Φ を求めると、どの実験ケースにおいても c が c_∞ よりも小さくなるため、全流動深にわたって一樣な濃度分布で流れているものとみなされる。求めた Φ と λ との関係を表わしたものが図-2であり、この図には本実験と同じ粘性領域で行われた高橋・藤井²⁾の実験データもプロットされている。図-2から平均的な傾向をとれば、 $\Phi = \lambda^{-0.5}$ という関係を得ることができ、これを流速分布式に代入すると、

$$U = \frac{\rho u_* h}{c_* \mu_f} \cdot \frac{1}{\lambda^{-0.5} - \tan \theta} \cdot \frac{1}{\lambda^{1.5}(1 + \lambda^{-0.5})} \left(Y - \frac{1}{2} Y^2 \right) \quad (11)$$

のような流速分布式が得られる。この式から得られた流速分布形を図-1の実線で示す。 $\Phi = \lambda^{-0.5}$ から大きくかけ離れた一部のデータを除けば、実験結果に近い値が得られているようである。

5 おわりに 濃度分布を考慮にいれた流速分布式を導いたが、 Φ の値は流速に対して敏感に変化するため精度がやや悪いこと、濃度分布を測定する方法が確立されていないことなど、問題点や不明な点は残された。

<参考文献>

1) 森・乙竹:懸濁液の粘度について, 化学工学, 第20巻, 第9号, 1956.

2) 高橋・藤井:流下域の土石流の制御法に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-2, 1988.

