

泥流の内部構造について

九州大学工学部 正 員○橋本晴行

九州大学工学部 正 員 平野宗夫

九州大学大学院 学生員 パルー・ムハマド・サレー

1. はじめに

濃度を一定に保持した状態で、構成材料の粗粒な土石流から細粒の、いわゆる泥流へと遷移すると、その抵抗則や流速分布が変化することが知られている^{1)・2)}。これについては、新井、高橋¹⁾は泥流において粒子間の衝突応力と同様に乱流混合によるレイノルズ応力も重要だとして、両者を考慮した考察を行い、抵抗則や流速分布の変化を説明している。一方、著者ら³⁾は土石流などの高濃度流の運動を規定する無次元パラメーターとして、代表長さ・粒径比および土砂濃度を導き、上述の抵抗則の変化について考察を加えている。本研究はその延長上にあるもので、土石流や泥流の流速分布を調べ、その内部構造について検討を行ったものである。

2. 高速・高濃度流を規定するパラメーター

高速・高濃度流の2次元定常流の運動方程式は次式によって与えられる。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_t} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_t} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \quad (1)$$

ここに、座標は図-1のように定義している。また ρ_t は流れの密度、 p は流れの重力成分や粒子間の接触力⁴⁾を含む圧力、 τ_{zx} 、 τ_{xx} は粒子間の衝突応力である。間隙水の乱れによるReynolds応力は、粒子間応力に比較して微小だとして無視している。

粒子間の衝突応力については多くの式が提案されているが、ここでは土石流や乾燥粒子流に適用可能な椿・橋本ら⁴⁾の式を基に、次のようにおく。

$$\tau_{zx} = K_{zx} \sigma d^2 F(C) \left(du/dz \right)^2 \quad (2)$$

$$\tau_{xx} = K_{xx} \sigma d^2 F(C) \left(du/dz \right)^2 \quad (3)$$

ここに、 σ は粒子密度、 d は粒子の径、 $F(C)$ は粒子の体積濃度 C の関数で、例えば椿・橋本ら⁴⁾は C を粒子の最密充填濃度として

$$F(C) = \frac{(C/C^*)^2}{1 - (C/C^*)} \quad (4)$$

のように導いている。これは濃度 C の増加関数である。

さて、式(1)における各項のオーダー比較を行ってみよう。 U を流れの代表流速、 L を代表長さとする、慣性項は U^2/L 、衝突応力項は $d^2 F(C) U^2/L^3$ と見積られるので、その比をとると

$$\frac{\text{慣性項}}{\text{粒子間衝突応力項}} = \frac{U^2/L}{d^2 F(C) U^2/L^3} = \frac{1}{F(C)} \left(\frac{L}{d} \right)^2 \quad (5)$$

となる。従って、無次元量 L/d と C が、高濃度流を規定する重要なパラメーターであることがわかる。即ち、濃度 C が大きく、 L/d が小さな値を取る時、粒子間応力が卓越し、その逆の場合は慣性項が卓越することになる。代表長さ L としては、開水路高濃度流の摩擦抵抗を考える場合は水深 h が最適であろう。

著者ら²⁾は、河床材料として種々の粒径の均一な砂・礫を用いて、土石流や泥流を発生させる実験を行い、抵抗則や流速分布を系統的に調べた。その結果、流速係数 $\bar{u}/u_*$ と相対水深 h/d との関係について図-2を得た。

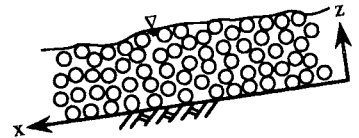


図-1 座標の定義

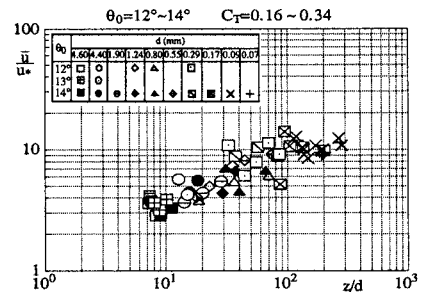


図-2 流速係数と相対水深との関係

h/d の小さい領域では $\bar{u}/u_*$ は h/d にほぼ比例するのに対して、 h/d の大きい領域では $\bar{u}/u_*$ は h/d にほぼ無関係になっている。これは、式（5）によれば、前者では粒子間の衝突応力が支配的であるのに対して、後者では慣性力が支配的となっているためと考えられる。

3. 泥流の内部構造に関する考察

図-3は、ほぼ一定な輸送濃度 C_T のもとで、種々の粒径の砂・礫を用いて行った移動床上における土石流・泥流実験の流速分布を片対数紙上にまとめて示したものである。ここに、底面からの無次元距離として、濃度がほぼ一定であると考えられるので、 z/d を採用した。当然、粗粒な粒子を用いた土石流では z/d の小さい領域にデータが集中し、微細砂を用いた泥流では z/d の大きい領域にデータが集中している。図-3から、無次元流速分布 $\bar{u}/u_*$ は底面からの無次元距離 z/d によって関連づけられ、一般的には式（5）を参考にすると

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = f\left(\frac{z}{d}, C\right) \quad (6)$$

と表されるものと考えられる。また同図から、 z/d の小さい、底面近傍では直線的な流速分布を示すのに対して、 z/d の大きい、底面から離れた領域では、パラッキが大きいものの、対数的な分布を示すことが分かる。

即ち

$$\frac{z}{d} \leq \frac{\delta_G}{d} = 10 \sim 20 \text{ においては}$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} \propto \frac{z}{d} \quad (7)$$

$$\text{となり、} \frac{z}{d} \geq \frac{\delta_G}{d} \text{ においては}$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} \propto \ln \frac{z}{d} \quad (8)$$

となっている。これは連続流体における壁乱流の内層と同様な特徴となっており、粘性底層と慣性底層に対応して、それぞれ粒子間応力の卓越する粒子間力層と、レイノルズ応力の卓越する慣性力層が存在するものと考えられる。またその遷移領域では粒子間応力とレイノルズ応力の共存する緩和層が存在することが推察される。このような特性を模式的に示すと図-4のようになる。これから図-2の抵抗則の特性を理解することができよう。即ち、 h/d の小さい土石流では流れの大部分を粒子間力層が占有しているのに対して、 h/d の大きい泥流では流れの大部分を慣性力層が占めた結果である。

4. おわりに

連続流体における壁乱流の内層に類似して、泥流では粒子間応力の卓越する粒子間力層とレイノルズ応力の卓越する慣性力層とが存在することが推察された。今後、これを基に土石流から泥流への抵抗則の変化などについて定量的な検討を加えていく予定である。

参考文献 1) 新井・高橋，土木学会論文集，第375号／Ⅱ-6，1986。

2) 平野・橋本・田崎・峯・高尾・八尋，土木学会第44回年次学術講演会，1989。

3) 平野・橋本・福富・田熊・バルー，水工学論文集，第36巻，1992。

4) 椿・橋本・末次，土木学会論文報告集，No.317，1982。

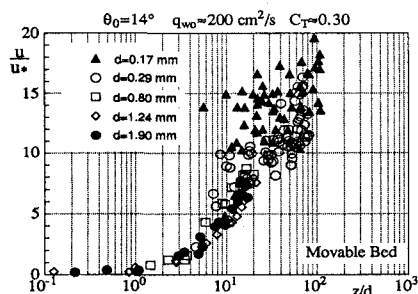


図-3 土石流・泥流の流速分布

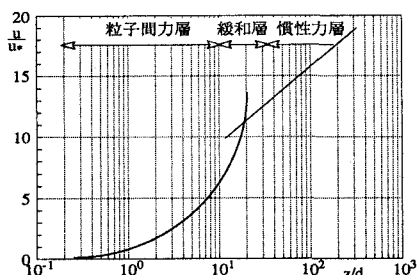


図-4 流速分布の模式図