

II-292

泥流の抵抗則に関する研究

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

1. はじめに

泥流は、構成材料の粗粒な土石流とは異なった流速分布や抵抗則を示すことが知られている^{1),2)}。新井・高橋¹⁾は土石流に特有な粒子間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、その特性の説明を試みたが、境界条件の導入に問題を残している。一方、著者らは、前報³⁾において泥流の内部構造について検討を加え、泥流には、連続流体の壁乱流の内層に類似して、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ことを明らかにした。

本研究は、このような成果を基に、泥流の流速分布や抵抗則について定量的な検討を行ったものである。

2. 流速分布

著者らは⁴⁾、最近、土石流の流況を論じる上で重要な無次元量として、運動方程式における慣性項と粒子間応力項との比を表わすパラメータ $L/d/(F(C))^{1/2}$ を導入した。ここに L は代表長さ、 $F(C)$ は濃度 C の増加関数である。これをもとに、前報³⁾では、長さスケールとして底面からの高さ z を選ぶと、土石流や泥流の流速分布は濃度 C と無次元距離 z/d により普遍表示されることを推察した。さらに実験との比較から、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し

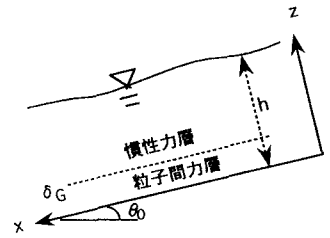


図-1 流れの模式図

(図-1)、前者は直線的な流速分布を、後者は対数的な流速分布をそれぞれ示すことを明らかにした。

以上のことから、本研究では図-1のようなモデルを考え、さらに、濃度の関数項と z/d とを分離せずに結合した無次元距離 $(z/d)(\rho_t/\sigma/(F(C)))^{1/2}$ を導入し、流速分布は次のように普遍表示されるものとする。

$$\frac{u}{u_*} = f\left(\frac{z}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}\right) \quad (1)$$

さて、高速・高濃度の2次元等流状態の流れを考える(図-1)。このような流れにおいては粒子間応力とレイノルズ応力が支配的であると考えられ、前者としては椿・橋本らの式⁵⁾を、後者としては混合距離モデルをそれぞれ用いると、次のようなつりあい式が得られる。

$$K_{zx}\sigma d^2 F(C) \left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \rho_t l^2 \left(\frac{du}{dz}\right)^2 = \tau_0 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \approx \tau_0 \quad (2)$$

ここに、簡単のため濃度分布は一様とし、 $\tau_0 = \rho_t u_*^2$ である。また、底面付近を考え、右辺の z/h を1に対して無視する。

まず、底面のきわめて近傍の層、つまり粒子間力層を考える。ここでは、粒子間力が卓越し、レイノルズ応力は無視される。したがって式(2)は

$$K_{zx}\sigma d^2 F(C) \left(\frac{du}{dz}\right)^2 = \tau_0 \quad (3)$$

となり、境界条件として底面 $z=0$ で $u=0$ を用いると、流速分布は直線分布を得る。すなわち

$$\frac{u}{u_*} = \frac{\xi}{\sqrt{K_{zx}}} \frac{z}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \quad (4)$$

となる。ここに ξ は補正係数で、濃度分布を一様としたことによる補正である。したがって濃度によって変化し、椿・橋本らの式との比較から、 $C=0.25 \sim 0.5$ に対応して $\xi=0.35 \sim 0.5$ となる。 ξ の変化は大きくないので、以下では $\xi=0.4$ の一定値を用いることにする。

次に、レイノルズ応力の卓越する慣性力層を考え、左辺では第2項のみを考え、 $l = \kappa z$ とおくと

$$\rho_t(\kappa z)^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 = \tau_0 \quad (5)$$

となり、これを解くといわゆる対数則を得る。すなわち

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \right) + B, \quad B = \frac{u_{\delta}}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \right) \quad (6)$$

となる。ここでは、上の考察から、無次元距離 $(z/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2}$ を導入した。ここに粒子間力層の厚さを δ_G として、 $z = \delta_G$ で $u = u_{\delta}$ とおいた。 u_{δ} は式(4)より得られる。したがって B は無次元厚さ $(\delta_G/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2}$ の関数となる。

さて問題は粒子間力層の厚さ δ_G の評価であるが、ここでは後述の図-3のような実験値から無次元厚さ $(\delta_G/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2} = 15$ が得られ、この値を普遍定数として用い、 δ_G を評価することにする。図-2にその計算結果を示す。粒子間力層の厚さは濃度とともに大きくなることが分かる。

図-3は、 $\sigma/\rho = 2.65$, $C = 0.3$, $\xi = 0.4$, $\delta_G/d = 14.1$, $\kappa = 0.4$ において計算した結果と実験との比較である。実験値は全てほぼ一定な濃度 $C \approx 0.3$ の条件下で得られたものであるため、無次元高さとしては簡単な z/d をもちいた。両者は良く適合していることが分かる。

3. 抵抗則

まず $(z/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2} \leq (\delta_G/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2}$ においては式(4)を用い、 $(z/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2} \geq (\delta_G/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2}$ では式(6)を用いて、流速分布を積分し、断面平均流速を求めると

(i) $(h/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2} \leq (\delta_G/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2}$ の時

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{2} \frac{\xi}{\sqrt{K_{zx}}} \frac{h}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \quad (7)$$

(ii) $(h/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2} \geq (\delta_G/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2}$ の時

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{2} \frac{\xi}{\sqrt{K_{zx}}} \frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \frac{\delta_G}{h} + \left(\frac{u_{\delta}}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \right) \left(1 - \frac{\delta_G}{h} \right) \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\delta_G}{h} \right) \quad (8)$$

図-4は濃度を一定にした時の流速係数と相対水深との関係について、さらに図-5は相対水深を一定にした時の流速係数と濃度との関係について計算と実験との比較をそれぞれ示したものである。両者は良く適合していることが分かる。

4. おわりに

底面近傍において粒子間力層と慣性力層を考え、それぞれに対して流速分布を導き、さらに断面平均流速を求めた。粒子間力層の厚さの評価では、無次元厚さ $(\delta_G/d)(\rho_t/\sigma/F(C))^{1/2} = 15$ を普遍定数とした。その結果泥流の抵抗則の実験結果をうまく説明することができた。

参考文献

1) 新井・高橋, 土木学会論文集, 1986. 2) 平野・橋本・田崎, 土木学会年次学術講演会, 1989. 3) 橋本・平野・パルー, 土木学会年次学術講演会, 1993. 4) 平野・橋本・福富・田熊・パルー, 水工学論文集, 1992. 5) 椿・橋本・末次, 土木学会論文報告集, No.317, 1982.

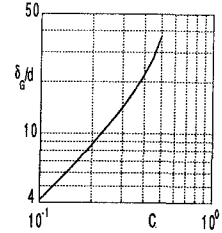


図-2 粒子間力層厚と濃度との関係

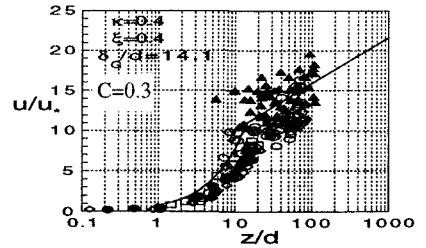


図-3 流速分布

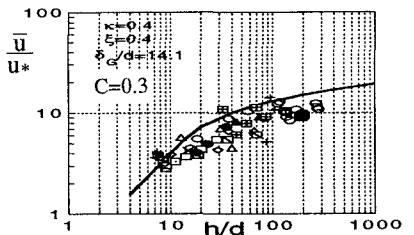


図-4 流速係数と相対水深との関係

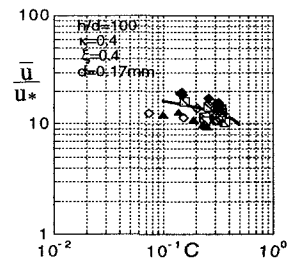


図-5 流速係数と濃度との関係