

II-213

急勾配水路における流砂量と抵抗則

九州大学工学部 正 員 〇橋本 晴行

九州大学工学部 正 員 平野 宗夫

1. はじめに

掃流砂と土石流との中間的な流砂形態に掃流状集合流動がある。これは、上部に土砂濃度の薄い水流層が、下部には土砂濃度の大きな高濃度層が存在し、あたかも2層流のような流況を呈することで知られている。このような流れについては従来よりいくつかの研究があるが^{1), 2), 3)}、流砂量と流れの抵抗則を同時に説明するまでには至っていない。著者らはこれまで高濃度層に着目して、その特性を調べる実験を行ってきたが⁴⁾、本研究においては、2層流モデル(図-1)を考え、まず高濃度層について前報^{2), 4)}の成果を基に、土砂濃度、流速分布を規定する式を誘導する。次に、水流層について流速分布式を導き、最後に、流速係数と流砂量の評価式を求め、実験と比較する。

2. 理論的考察

(1) 高濃度層

高濃度層において、平均流の方向(x方向)については固・液両相の、垂直方向(z方向)については固相の力のつりあい式を立てると次のようになる。

$$x\text{方向: } \tau_{zx} + \tau_w = \int_{h_d}^h \rho g \sin \theta_0 dz + \int_z^{h_d} \{ \sigma C + \rho(1-C) \} g \sin \theta_0 dz \quad (1)$$

$$z\text{方向: } \tau_{zz} + p = - \int_z^{h_d} (\sigma - \rho) C g \cos \theta_0 dz \quad (2)$$

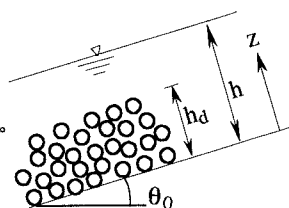


図-1 流れの模式図

ここに τ_{zx} 、 τ_{zz} は衝突応力、 p は接触応力で、前者は $\tau_{zx}/\tau_{zz} = \alpha$ の関係がある⁵⁾。また τ_w は間隙水の乱れによるレイノルズ応力である。式(1)、(2)において底面 $z=0$ での釣り合いを考え、無次元掃流力 τ^* が無次元限界掃流力 τ_{*c} 近傍となる場合も考慮し、さらに $C_d = \left(\int_0^{h_d} C dz \right) / h_d$ とおくと

$$C_d = \tau^* \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau^*} \right) \frac{1}{(\alpha - \tan \theta_0) \cos \theta_0} \frac{d}{h_d} \quad (3)$$

式(1)における間隙水のレイノルズ応力は混合距離モデルを用いると

$$\tau_w = -\rho(1-C_d) \overline{u_w w_w} = \rho(1-C_d) l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (4)$$

ここに、混合距離は、実験結果から、高濃度層内ではほぼ一定で $l = \alpha h_d$ 、水流層内では $l = \kappa(z - h_d) + \alpha h_d$ なる関係式が得られる。ここに α は比例定数で $\alpha = 0.1$ 、また κ はカルマン定数で $\kappa = 0.4$ である。

粒子間の衝突応力は土石流に対して与えられた式⁵⁾を用いて

$$\tau_{zx} = K_{zx} \sigma d^2 F(C_d) \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (5)$$

式(4)、(5)を式(1)に代入すると、高濃度層内の流速分布式が得られる。さらに積分すると、高濃度層内の断面平均流速 $\overline{u_d}$ が求められる。ここに濃度分布は一様とした。

さて、高濃度層の層厚 h_d の評価が問題となるが、ここでは前報⁴⁾の成果を用いる。すなわち、実験結果より、無次元層厚 h_d/h は勾配 θ_0 とともに直線的に増加し、 $\theta_0 \approx 14^\circ$ で $h_d/h = 1$ となる。また、粒子の水中比重を s 、粒径を d とすると、無次元限界掃流力 $\frac{h \sin \theta_0}{s d} \approx 0.055$ より決定される移動限界勾配 $\sin \theta_0 = 0.055 s \frac{d}{h}$ の近傍では、砂の移動層厚は $h_d = ad$ となる。ここに a は実験係数である。 $h/d = 5 \sim 30$ では、 $\tan 14^\circ \gg 0.055 s \frac{d}{h}$ であることを考慮すると、 h_d/d は次式で表される。

$$\frac{h_d}{d} = \frac{\tau^* - \tau_{*c}}{\tau_{*Dc}} \left(\frac{h}{d} - a \right) + a \quad (6)$$

ここに $\tau_* = \frac{h \sin \theta_0}{s d}$ 、 $\tau_{*c} = 0.055$ 、 $\tau_{*Dc} = \frac{h \sin 14^\circ}{s d}$ 、 $s = \frac{\sigma - \rho}{\rho}$ である。また係数 a は $a=2$ が適している。

(2) 水流層

水流層においては、流れ方向の方程式は

$$\rho l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 = \rho g \sin \theta_0 (h - z) \quad (7)$$

これを積分すると、水流層内の流速分布式を得る。さらに積分し、水流層内の断面平均流速 $\bar{u}_u$ が得られる。

(3) 全層

断面全体の平均流速を $\bar{u}$ とすると、流速係数は

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \eta_d \frac{\bar{u}_d}{u_*} + (1 - \eta_d) \frac{\bar{u}_u}{u_*} \quad (8)$$

また、輸送濃度 C_T および断面平均濃度 $\bar{C}$ はそれぞれ次式で表される。

$$C_T = C_d \eta_d \frac{\bar{u}_d}{u_*} \quad (9) \quad \bar{C} = C_T \bar{u} / \bar{u}_d \quad (10)$$

図-2は流速係数について式 (8)と実験との比較を示したものである。両者は概ね一致している。

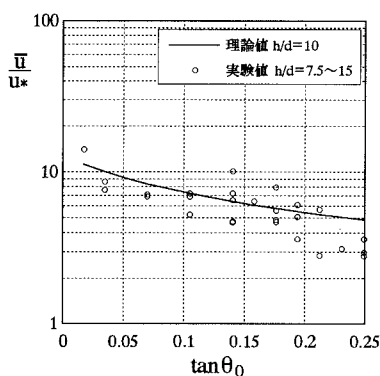


図-2 流速係数

高濃度層内の濃度 C_d および平均流速 $\bar{u}_d$ を用いると、

単位幅当りの流砂量 $q_s = C_d h_d \bar{u}_d$ となり、無次元流砂量式は

$$\frac{q_s}{\sqrt{s g d^3}} = \frac{2}{3} \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \frac{h}{d} \frac{1}{(\alpha - \tan \theta_0) \cos \theta_0} G \quad (11)$$

ここに、 G は h/d 、 C_d 、 η_d 、 σ/ρ の関数であるが、ほぼ h/d のみに依存し $G = 7 \left(\frac{h}{d} \right)^{-1}$ の近似式で表すことができる。これを式 (11) に代入すると、流砂量の近似式

$$\frac{q_s}{\sqrt{s g d^3}} = \frac{14}{3} \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \frac{1}{(\alpha - \tan \theta_0) \cos \theta_0} \quad (12)$$

が得られる。近似式 (12) と実験とを比較したものが図-3である。無次元流砂量の評価式として式 (12) で十分与えられることが分かる。

3. おわりに

以上、掃流砂から掃流状集合流動の領域における抵抗則と流砂濃度の理論的考察を行い、流砂量の近似式を求めた。

参考文献 1)高橋保, 京大防災研年報, 1982. 2)橋本晴行・椿東一郎・平野宗夫, 第30回水理講演会論文集, 1986. 3)江頭進治・芦田和男・高浜淳一郎・田野中新, 京大防災研年報, 1990. 4)河野通齊・平野宗夫・橋本晴行・金子泰利・川口哲弘, 土木学会第48回年次学術講演会, 1993. 5) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司, 土木学会論文報告集, 1982.

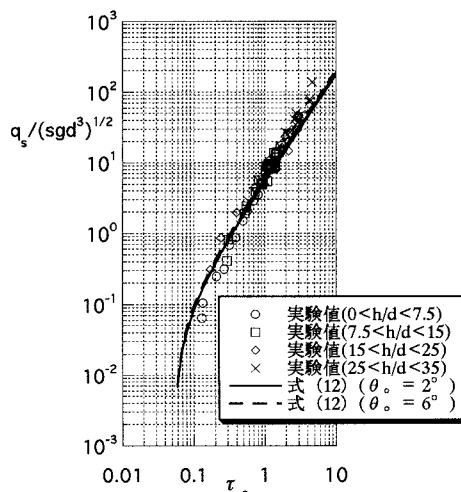


図-3 流砂量