

急勾配水路における浮流砂を伴う流砂量

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
清水建設（株）	正 員	多川 博章
戸田建設（株）	正 員	増田 考造

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。一方、浮流砂と泥流との間にも中間的な流砂形態の存在が考えられるが、そのような領域における輸送濃度や流砂量の特徴については2-3の研究^{1),2)}があるだけで、定量的な評価までには至っていない。著者らは、従来³⁾より、泥流に対して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の2層構造のモデルを提案しているが、前報⁴⁾においてはさらに、そのモデルを浮流砂と泥流との中間的な領域にも適用し、基準点濃度として粒子間力層の濃度を選び、慣性力層では粒子は浮遊しているものと考え、濃度分布についてRouse分布との適合性を調べた。本研究は、以上の研究を基にして、浮流砂と泥流との中間的な領域における流砂量について調べたものである。

2. 理論的考察

図-1に流れの2層構造の模式図を示す。粒子間力層内では一様濃度 C_δ とし、慣性力層では粒子は浮遊し、濃度分布 C が存在するものとする。従って流砂量式は

$$q_s = C_\delta \bar{u}_\delta \delta_G + \int_{\delta_G}^h C u dz \quad (1)$$

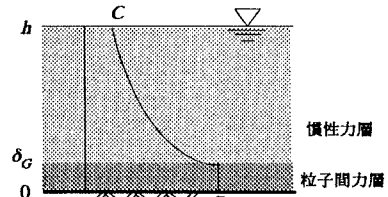


図-1 流れの模式図

となる。ここに $\bar{u}_\delta$ は粒子間力層における層内平均流速、 u は速度分布を示す。この流砂量を評価するためには、粒子間力層厚 δ_G 、および各層内における濃度・速度分布を知る必要がある。

(1) 粒子間力層厚

橋本・平野³⁾は高濃度流の運動方程式における慣性項と粒子間応力項との比から高濃度流を規定する無次元パラメータ $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ を導いた。これを基に、流れの底面近傍においては連続流体の壁面乱流における粘性底層と慣性底層に対応して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それぞれ存在し、粒子間力層厚 δ_G は次式により普遍表示されることを示した。

$$\frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} = 15 \quad (2)$$

ここに、 d は粒径、 σ は粒子密度、 ρ_t は流れの密度で $\rho_t = \sigma C + \rho(1 - C)$ である。 $F(C)$ は砂粒子の体積濃度 C の関数である。浮流砂と泥流との中間的な領域においても粒子間力層厚 δ_G の評価式として式 (2) を用いる。

(2) 速度分布

速度分布の誘導においては、濃度分布は考えずに一様な分布として取り扱い、運動方程式より近似的に次式を得る。

$$1) \text{ 粒子間力層 } \text{すなわち } z \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \leq \frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \text{ では } \frac{u}{u_*} = \frac{z}{\sqrt{K_\alpha}} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \quad (3)$$

$$2) \text{ 慣性力層 } \text{すなわち } z \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \geq \frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \text{ では } \frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} \right) + B \quad (4)$$

ここに B は $\frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ の関数である。また $\frac{1}{\kappa}$ は一様な濃度分布として取り扱ったことによる補正係数で、

泥流の場合 $\frac{1}{\kappa} \approx 0.4$ であることが分かっている³⁾。

浮流砂、泥流、掃流状集合流動、土石流

〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1 TEL 092-642-3288 Fax 092-642-3322

(3) 濃度分布

1) 粒子間力層 粒子間力層における力の釣り合い式から粒子間力層の濃度は次式で表される。

$$C_\delta = \frac{\tan \theta_0}{(\sigma\rho - 1)(\alpha - \tan \theta_0)} \frac{\delta_G}{h} \left\{ \frac{\bar{\rho}_c}{\rho} \left(1 - \frac{\delta_G}{h} \right) + \frac{\delta_G - \tau_{*c}}{h} \right\} \quad (5)$$

ここに、 $\bar{C}$ を上層における断面平均濃度として $\bar{\rho}_c = \sigma\bar{C} + \rho(1 - \bar{C})$ である。また無次元掃流力 $\tau_* = u_*^2/(sgd)$ 、粒子の移動限界無次元掃流力 $\tau_{*c} = 0.05$ である。 δ_G は式(2)より与えられ、 $\bar{C}$ は後述の式(6)より求められる。従って C_δ は相対水深 h/d 、沈降速度・摩擦速度比 w_0/u_* 、水路傾斜角 θ_0 の関数である。

2) 慣性力層 濃度分布を表す式として、簡単のため、Rouse分布の簡便式であるLane-Kalinskeの式

$$\frac{C}{C_\delta} = \exp \left\{ -\frac{6w_0}{\beta\kappa u_*} (\eta - \eta_\delta) \right\} \quad (6)$$

を用いる。ここに w_0 は粒子の沈降速度、 κ はKarman定数、 u_* は摩擦速度である。 $\eta = z/h$ 、 $\eta_\delta = \delta_G/h$ 、 $\beta=1.2$ 、 $\kappa=0.4$ とした。沈降速度 w_0 はRubeyの式を用いる。

(4) 流砂量

式(1)に式(3)～(6)を代入して整理すると

$$\frac{q_s}{\sqrt{sgd^3}} = \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \frac{1}{(\alpha - \tan \theta_0) \cos \theta_0} \frac{\bar{u}_\delta}{u_*} G(\tan \theta_0, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*}) \quad (7)$$

ここに $G(\tan \theta_0, h/d, w_0/u_*)$ は $\tan \theta_0, h/d, w_0/u_*$ の関数である。従って、浮流砂と泥流との中間的な領域における流砂量は $\tan \theta_0, h/d, w_0/u_*$ に依存することが分かる。 $w_0/u_* \rightarrow \infty$ の時、慣性力層における濃度は $C/C_\delta \rightarrow 0$ となり、さらに $G(\tan \theta_0, h/d, w_0/u_*) \rightarrow 1$ となる。その時、式(7)は掃流砂量式⁵⁾と一致することになる。さらに、式(3)を積分して得られた $\bar{u}_\delta/u_* = (1/2)(\xi/\sqrt{K_{xx}})(\delta_G/d)\sqrt{\rho_c/(\sigma C)}$ は掃流砂の $\bar{u}_\delta/u_* \approx 4.7$ ⁵⁾と一致する必要がある、これより補正係数の値として $f=0.343$ を得ることができる。この値は従来より別に得られている値 $f \approx 0.4$ に近いことが分かる。以下の計算では $f=0.343$ を用いることにする。

3. 実験との比較

h/d と w_0/u_* をパラメータとして、式(7)の計算値と実験値との比較を図-2に示す。ここに図中の太線は式(7)を、細線は掃流砂量式⁵⁾を示す。式(7)と実験値は良く合っていることが分かる。細線の掃流砂量式と太線の式(7)との差が浮流砂量の寄与分に相当する。

$G(\tan \theta_0, h/d, w_0/u_*)$ は $\tan \theta_0, h/d, w_0/u_*$ の関数であるが、近似式を求めると次式となる。
 $G = 1 + 0.1(\ln(h/d))^2 (\tan \theta_0)^{-0.8} \exp \left\{ -2.5 \left(\frac{w_0}{u_*} \right)^{0.5} \right\} \quad (8)$

ここに右辺第1項は掃流砂量、第2項は浮流砂量の寄与分である。

4. おわりに

以上、底面付近において一様な粒子濃度の粒子間力層と粒子が浮遊している慣性力層の2層構造のモデルを考え、基準点濃度、速度分布の評価式を基に流砂量式を導いた。その計算値と実験値との比較は良好であった。

参考文献

- 1) 平野宗夫・橋本晴行・田崎武詩他3名：泥流の特性に関する実験的研究，土木学会第44回年次学術講演会，1989。
- 2) 江頭進治・佐藤隆宏・芦田和男・千代啓三：砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす粒子径の影響，京都大学防災研究所年報，第37号B-2，1994。
- 3) 橋本晴行・平野宗夫：泥流の抵抗則に関する研究，水工学論文集，第39巻，1995。
- 4) 平野宗夫・橋本晴行・寺中孝司：急勾配水路における浮流砂濃度分布に関する研究，水工学論文集，第41巻，1997。
- 5) 橋本晴行・平野宗夫：掃流状集合流動の抵抗則と流砂量，土木学会論文集，No.545/II-36，1996。

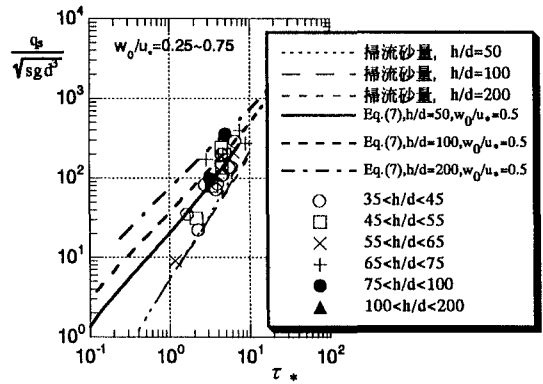


図-2 流砂量