

掃流状集合流動における流砂量と抵抗則

九州大学工学部 ○学生員 寺中考司 九州大学工学部 正 員 平野宗夫
九州大学工学部 正 員 橋本晴行 九州大学大学院 学生員 河野通斉

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高い層(図-1)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いくつかの研究があるものの^{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^{2)・4)}、本研究ではそれらの成果を基にしてまず高濃度層の特性を明らかにする。ついで流砂量と抵抗則について考察を行なう。

2. 高濃度層の特性

図-2は、高濃度層の厚さ h_d と勾配との関係を示したものであるが、無次元層厚 h_d/h は勾配とともに直線的に増加し、 $\theta_0=14^\circ$ では $h_d/h=1$ となるようである。一方、粒子の水中比重を s として無次元移動限界掃流力 $\tau_{*c}=h \sin \theta_c / (sd) = 0.05$ より決定される移動限界勾配 $\sin \theta_c = 0.05sd/h$ の近傍では砂の移動層厚は $h_d=ad$ (a は係数で $a=2$)となっているものと考えられる。以上のことから h_d について次のような実験式が求められる。

$$\frac{h_d}{h} = \frac{1 - a \frac{d}{h}}{0.249 - 0.055s \frac{d}{h}} (\tan \theta_0 - 0.055s \frac{d}{h}) + a \frac{d}{h} \quad (1)$$

図-3は粒子の輸送濃度と水路勾配の関係を示す。高濃度層の輸送濃度 C_{dT} は $C_{dT}=(q_l/q_{dl})C_T$ より求められたものである。ここに q_l は全流量、 q_{dl} は高濃度層の流量である。 C_{dT} は勾配とともに増加し、 $\theta_0=10^\circ$ からは0.3の値に漸近する。一方、 $\theta_0 \leq 4^\circ$ では C_{dT} はデータ数が少ないが、無次元掃流力 τ_* に規定されて減少するようである。すなわち

$$\begin{aligned} 4^\circ \leq \theta_0 \leq 14^\circ & \quad \text{では} & C_{dT} &= 1.2 \tan \theta_0 \\ \theta_0 \leq 4^\circ & \quad \text{では} & C_{dT} &= 2(\tau_* - \tau_{*c})^2 \end{aligned} \quad \} (2)$$

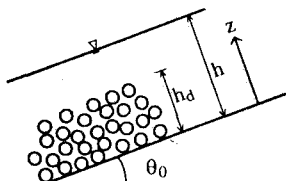


図-1 流れの模式図

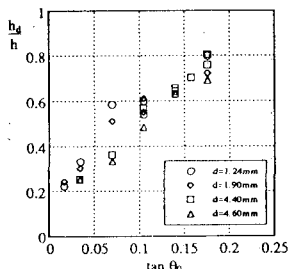


図-2 高濃度層の無次元層厚

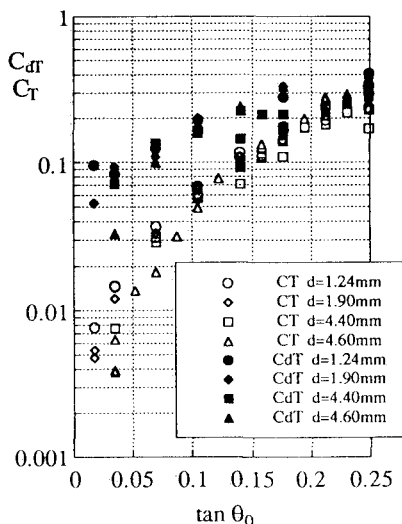


図-3 高濃度層の輸送濃度と勾配との関係

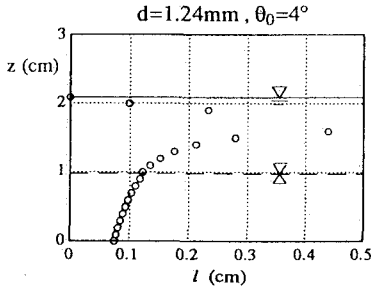


図-4 混合距離の分布

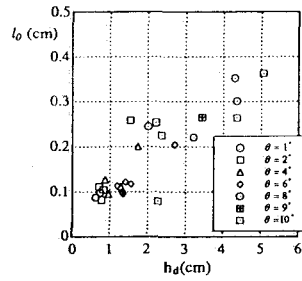


図-5 高濃度層内の混合距離

次に、間隙水のレイノルズ応力について混合距離モデルを適用し、混合距離 l について考察する。等流状態における流れ方向の運動方程式を求めると、高濃度層では

$$\sigma_{zx} - \rho(1-C)\overline{u_w w_w} = \rho g \sin \theta_0 \{ (h-h_d) + \frac{(\sigma-\rho)C+1}{\rho}(h_d-z) \} \quad (3)$$

ここに、左辺第1項は粒子間応力、第2項は間隙水の乱れによるレイノルズ応力である。また C は粒子濃度である。粒子間応力については椿・橋本ら⁵⁾の式を用いる。間隙水のレイノルズ応力は、次式を用いる。

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

式(3)において濃度 C は C_{dT} で近似し、速度勾配 du/dz には流速分布の実験値を用いると混合距離が求められる。その結果の1例を図-4に示す。混合距離は高濃度層ではほぼ一定であるのに対して、水流層では高濃度層から離れるに従い、大きくなる事が分かる。高濃度層内の混合距離 l_0 を層厚 h_d に対して示したものが図-5である。混合距離は層厚とともに増加することが分かる。これらのことから混合距離は

$$0 \leq z \leq h_d \text{ では } l = l_0 = a_l h_d \quad (5) \quad h_d \leq z \leq h \text{ では } l = l_0 + \kappa(z-h_d) \quad (6)$$

と表せる。ここに $a_l = 0.08$ 、 κ はカルマン定数である。

3・流砂量と抵抗則

高濃度層 $0 \leq z \leq h_d$ では式(3)が成立する。式(3)において、 h_d については式(1)、 C については式(2)、レイノルズ応力については式(4)、混合距離については式(5)をそれぞれ用いると高濃度層内の流速分布が得られる。それを積分すると高濃度層内の断面平均流速が次式

$$\frac{\bar{u}_d}{u_*} = \frac{h}{d} G \left(\frac{\sigma}{\rho}, C_{dT}, \eta_d, \frac{h}{d} \right) \quad (7)$$

ここに G は関数形である。一方、水流層 $h_d \leq z \leq h$ においては流れの運動方程式は次式となる。

$$\rho l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 = \rho g \sin \theta_0 (h-z) \quad (8)$$

ここに混合距離としては式(6)を用いる。これから水流層の流速分布が得られ、それを積分して、式(7)を用いると断面平均流速 $\bar{u}$ を求めることができる。これから流砂濃度 C_T 、流砂量 q_s は

$$C_T = C_{dT} \eta_d \left(\frac{\bar{u}_d}{\bar{u}} \right) \quad (9) \quad \frac{q_s}{u_* d} = \frac{h}{d} \eta_d C_{dT} \frac{\bar{u}_d}{u_*} \quad (10)$$

として求めることができる。ここに $\eta_d = h_d/h$ である。いずれも勾配 $\tan \theta_0$ と h/d の関数であることが分かる。計算結果については講演時に述べる。

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) 河野通斉・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.