

II-221

掃流状集合流動における高濃度層の特性

九州大学大学院 学生員○河野通齊 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 五洋建設(株) 正 員 金子泰利
佐藤工業(株) 正 員 川口哲弘

1. まえがき

比較的粗粒な粒子を河床に敷き詰め、上流より水流を供給すると、まず、2°程度の水路勾配では粒子は河床上を転動・滑動したり、跳躍したりして移動し、いわゆる掃流の流砂形態を示す。次に水路勾配を14°程度の勾配に設定すると、粒子は水面まで高濃度に分散し土石流として移動する。一方、それらの中間的な勾配になると、流れの下層には粒子が密集して高濃度層を形成し、上層はほぼ水流のみとなり、あたかも2層流のような流況を示す。いわゆる掃流状集合流動と呼ばれる現象がこれである。掃流状集合流動については若干の研究^{1), 2), 3)}があるが、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のが現状である。本研究は、掃流状集合流動の高濃度層に着目し、濃度と層厚及び流速分布について調べたものである。

2. 実験内容

2.1 実験方法

使用した水路は長さ12m、幅12.5cm及び長さ7m、幅20cmの変勾配水路である。水路に河床材料を敷き、所定の勾配 θ_0 に設定した後、上流端より水を供給して流れを発生させた。発生した流れには比重約1の中立粒子をトレーサーとして流し、これを側方より16mmカメラや高速度ビデオを用いて撮影した。撮影された画像を解析し、水深や流速分布を求めた。また、下流端で流れを採取することにより、単位幅当りの全流量 q 、や土砂の輸送濃度 C_T を求めた。用いた材料の粒径 d 、及び単位幅当りの供給水量 q_{w0} 、水路勾配 θ_0 などの実験条件は表-1に示す。

2.2 実験結果

撮影された16mmフィルムやビデオから流れを観察すると、流れの上部は粒子濃度が薄く、追跡可能な粒子は少ないのに対して、下部は比較的粒子濃度が濃く追跡も容易である。これらの粒子を追跡してみると、水路傾斜角 $\theta_0 \approx 1^\circ \sim 4^\circ$ では、粒子は河床と相互作用を及ぼしあいながら移動し掃流砂とみなされるのに対して、 $\theta_0 \approx 5^\circ \sim 10^\circ$ では水

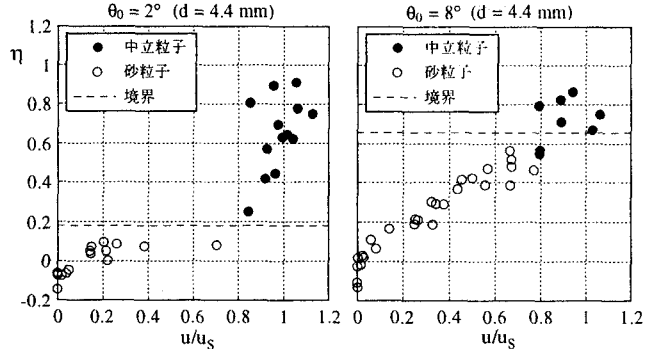


図-1 流速分布

流層と高濃度層の2層に分離したような流れを呈し、掃流状集合流動の挙動を示す。

このような流れにトレーサーとして中立粒子を投入すると、大部分は高濃度の砂礫粒子層に妨げられて上部にとどまり、水流層内を移動する。図-1は、中立粒子と砂礫粒子を追跡して求めた流速分布である。ここに η は水深で無次元化した高さである。水流層ではバラツキが大きいものの、比較的一様な分布を示すのに対して、高濃度層では顕著な速度勾配を示す。このような層の厚さ h_d を読み取り、水深で無次元化した結果を図-2に示す。無次元厚さは勾配とともに直線的に増加し、 $\theta_0 \approx 14^\circ$ 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 $h \sin \theta_c (sd) \approx 0.05$ より決定される移動限界勾配 $\sin \theta_c = 0.05s(d/h)$ の近傍では、砂の移動層厚は $h_d = ad$ (a は係数で $a \approx 1$) となっているものと考えられる。以上のことから h_d について実験曲線が次式のように求まる。

$$\frac{h_d}{h} = \frac{1 - a \frac{d}{h}}{0.249 - 0.55s \frac{d}{h}} \left(\tan \theta_0 - 0.55s \frac{d}{h} \right) + a \frac{d}{h} \quad (1)$$

図-3は、粒子の輸送濃度 C_T と水路勾配の関係を示す。図中の高濃度層の輸送濃度 C_{dT} は

$$C_{dT} = (q_i/q_{dT})C_T \quad (2)$$

より求められたものである。ここに q_i は全流量、 q_{dT} は高濃度層の流量である。 C_T は流れを下流端で採取して求められ、 q_i/q_{dT} は側方より流速分布を測定し、それを積分して求められる。高橋¹⁾や江頭ら³⁾は、高濃度層は勾配に無関係に $C_{dT}=0.3$ の一定値を保持するとしているが、明らかに C_{dT} は一定ではなく勾配とともに増加し、 $\theta_0 \div 10^\circ$ からは、 $C_{dT} \div 0.3$ に漸近する。一方、砂の移動限界勾配 $\tan \theta_0$ 付近では C_{dT} は減少する。

2. 3 考察

高濃度層における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

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

ここに、左辺第一項の σ_{zx} は粒子間応力、第二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。

粒子間応力は、例えば椿・橋本・末次⁴⁾の式を用いると

$$\sigma_{zx} = K_{zx} \sigma d^2 F(C) \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (4)$$

とおける。ここに、 $K_{zx} = (\pi/6)(0.0762 + 0.102\mu)\beta^2 k_M$

$$F(C) = (C/C_*)^2 / (1 - C/C_*) \quad \beta = 1.15 \quad k_M = 5 \quad \mu = 0.05$$

次に、間隙水のレイノルズ応力は、混合距離モデルを適用すると

$$-\rho(1-C)\overline{u_w'w_w'} = \rho(1-C)l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (5)$$

となる。ここでは測定された流速分布から混合距離 l を逆算し、その特性を調べてみる。式(4)、(5)を式(3)に代入し、 l を求めると

$$l = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{d}{dn} \frac{u}{u_*} \right)^2} \frac{1}{1-C} \left\{ (1-\eta_d) + \left(\frac{\sigma-\rho}{\rho} \right) (\eta_d - \eta) \right\} - K_{zx} \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{d}{h} \right)^2 \frac{F(C)}{1-C}} \quad \dots (6)$$

となる。上式において $C=0$ とおくと、上部水流層における混合距離が得られる。その結果の1例を図-4に示す。混合距離 l 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したがい大きくなっていることが分かる。

3. あとがき

掃流状集合流動における高濃度層において、その濃度 C_{dT} は勾配とともに増加し、 $\theta_0 \div 10^\circ$ 付近から $C_{dT} \div 0.3$ に漸近する。また h_d/h は水路勾配 θ_0 に対し直線的に増加し、 $\theta_0 \div 14^\circ$ で $h_d/h=1$ になる。一方、測定された流速分布から混合距離 l を求めると、 l は高濃度層ではほぼ一定な値になるが、水流層では水面に近づくに従って高濃度層における値から増加していく。今後、これらの成果を基に流砂量や抵抗則について検討していく予定である。

参考文献 1) 高橋保, 京大防災研年報, 第25号B-2, 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・高濱淳一郎・田野中新, 京大防災研年報, 第33号B-2, 1990.

4) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司, 土木学会論文報告集, No.317, 1982.

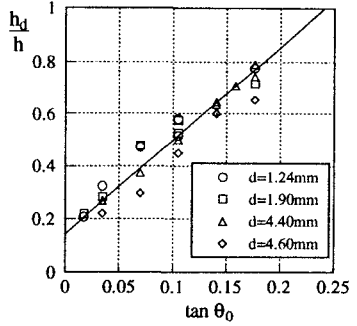


図-2 無次元層厚

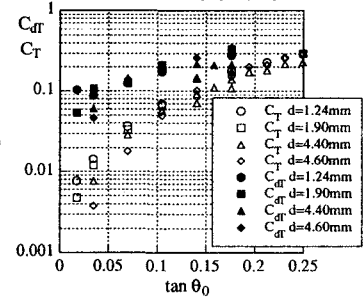


図-3 濃度と水路勾配との関係

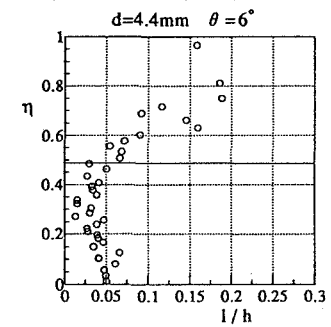


図-4 混合距離