

掃流状集合流動の流砂量式

京都大学防災研究所 正員 高橋 保
 京都大学大学院 学生員 八木 秀樹
 京都大学大学院 学生員 〇杠 浩史

1. まえがき 掃流状集合流動の流動機構を解明することは、土石流扇状地の2次侵食による災害の防止、軽減に大きな役割を果たす。そこで本研究では、均等粒径からなる材料を用いて掃流状集合流動に関する実験を行ない、流砂量式、抵抗則、および濃度式について考察する。さらに従来の土石流および掃流の場合の式との比較検討を行なう。

2. 掃流状集合流動の流砂量

2-1 流動機構 いま掃流状集合流動を図1のように表わすと河床に作用するせん断力は次式のようななる。

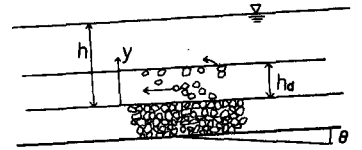


図1 掃流状集合流動

$$\tau_0 = (\sigma - \rho) C_d R_d g \sin \theta + \rho g R_d \sin \theta \quad (1)$$
 ここで σ : 砂礫の密度 ρ : 水の密度 C_d : 流動層中の砂礫の容積濃度 R_d : 流動層の厚さ g : 重力加速度 θ : 河床勾配 R : 水深

平衡状態では作用せん断力とせん断抵抗力が釣り合うから

$$\tau_0 = (\sigma - \rho) C_d R_d g \cos \theta \tan \alpha + \tau_c \quad (2)$$
 が成り立つ。ここに $\tan \alpha$: 動摩擦係数 τ_c : 河床砂の限界掃流力である。土石流では $\tau_c = R_d$, $\tau_c \approx 0$ が成立し

$$C_d (= C_{dc}) = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \alpha - \tan \theta)} \quad (3)$$
 となる。(3)式は θ が小さくなると C_d も小さくなるが、ある限界の濃度 C_{dc} になるともはや粒子が流動層全体に分散することが困難となり、土石流から掃流状集合流動となる。その限界の濃度 C_{dc} は(3)式の θ を土石流の発生限界勾配 θ_c に等しいとしたものと考えられる。高橋¹⁾によると

$$\tan \theta_c = \frac{C_* (\sigma - \rho)}{C_* (\sigma - \rho) + \rho (1 + 1/K)} \tan \phi \quad (4)$$
 であるから $\phi \approx \alpha$ とすると

$$C_{dc} = \frac{\rho \tan \theta_c}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_c)} = \frac{C_*}{1 + 1/K} \quad (5)$$
 となる。流動層の容積濃度が C_{dc} に保たれるとすると(1)式(2)式および(3)式より $R_d/R = \frac{C_{dc}}{C_d} \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_0}\right) \quad (6)$ となる。

2-2 流速分布 粒子流動層にはゲイラタート流体モデルが適用できるとすると、 $y < R_d$ および $y > R_d$ における力の釣り合い式はそれぞれ

$$Q_1 \sigma (\lambda d)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \sin \alpha + \rho Q^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 = \left\{ (\sigma - \rho) C_d (R_d - y) + \rho (R - y) \right\} g \sin \theta \quad (7)$$

$$\rho Q^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 = \rho g (R - y) \sin \theta \quad (8)$$
 ここに Q_1 : 実験定数で経験的に $Q_1 \sin \alpha = 0.02$ であることがわかっている。 $\lambda^2 = 1 / \left\{ (C_d / C_{dc})^{1/2} - 1 \right\}^2$ d : 粒子流動層内での流体の混合距離 d' : $y > R_d$ における流体の混合距離。 $d = K \frac{d'}{K}$, $d' = d + K'(y - R_d)$ と仮定し(7)式(8)式を積分することによって、 $y < R_d$ および $y > R_d$ における流速分布がそれぞれ次式のようにもとまる。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{2R}{3d \left(Q_1 \lambda^2 \sin \alpha + \frac{K^2}{\lambda^2} \right)^{1/2} \left\{ \left(\frac{\sigma - \rho}{\rho} C_d \frac{R_d}{R} + 1 \right) - \left\{ \left(\frac{\sigma - \rho}{\rho} C_d \frac{R_d}{R} + 1 \right) - \left(\frac{\sigma - \rho}{\rho} C_d + 1 \right) \left(\frac{y}{R} \right)^{1/2} \right\} \right\}} \quad (9)$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u|_{y=R_d}}{u_*} + \frac{2}{K'} \left\{ \left(1 - \frac{y}{R} \right)^{1/2} - \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\} - \frac{1}{K} \left(\frac{d}{K R} + 1 - \frac{R_d}{R} \right) \ln \frac{\left\{ \left(1 - \frac{y}{R} \right)^{1/2} + \left(\frac{d}{K R} + 1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\} \left\{ \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} - \left(\frac{d}{K R} + 1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\}}{\left\{ \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} - \left(\frac{d}{K R} + 1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\} \left\{ \left(1 - \frac{y}{R} \right)^{1/2} + \left(\frac{d}{K R} + 1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\}} \quad (10)$$

(5)式(9)式(10)式の中に含まれている定数は $K=2$, $C_{dc}=0.3$, $K'=0.4$ とすると比較的よく実験データと適

Tamotsu TAKAHASHI, Hideki YAGI, Hirofumi YUZURIHA

合することがわかった。これらの値を代入して実験値との比較を行なう。たものが図2である。

2-3 流砂量式 (9)式を積分するとよく R_d における平均流速は次式のようになる。

$$\frac{U_d}{u_*} = \frac{2}{3(0.07 \tan \theta / P + K^2 / \lambda^2)^{1/2} \{ (0-P) C_{dc} / P + 1 \}} \left\{ \left(\frac{0-P}{P} \right) C_{dc} \frac{R_d}{R} + 1 \right\}^{3/2} + \frac{2R}{5R_d \{ (0-P-1) C_{dc} + 1 \}} \left\{ \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{5/2} - \left\{ \left(\frac{0-P}{P} \right) C_{dc} \frac{R_d}{R} + 1 \right\}^{5/2} \right\} \quad (11)$$

(6)式(11)式を用いると単位幅あたりの流砂量は

$$q_{s0} = \frac{g_0}{u_* d} = \frac{0.342 R_d T_*^2}{R \sin^2 \theta} \left\{ \left(\frac{0-P}{P} \right) C_{dc} \frac{R_d}{R} + 1 \right\}^{3/2} + \frac{2R}{5R_d \{ (0-P-1) C_{dc} + 1 \}} \left\{ \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{5/2} - \left\{ \left(\frac{0-P}{P} \right) C_{dc} \frac{R_d}{R} + 1 \right\}^{5/2} \right\} \quad (12)$$

となる。(12)式はかなり複雑であるが $T_* = 0.2 \sim 5$ の範囲で $\left[\right]$ 内の値が R_d/R の約1.1倍になること、および $\theta = 4^\circ \sim 10^\circ$ では $\cos \theta \approx 0.985$ であることに着目すると $q_{s0} = \frac{1.64}{(0.6 - \tan \theta)^2} T_*^2 \left(1 - \frac{T_*}{T_*^*} \right)^2$ (13)となる。(13)式と実験値との比較を図3に示す。ほぼ良好な結果となっている。なお図中の点線は芦田、高橋、水山による山地河川における掃流砂量式を示しているが実験値とかなりの違いがみられ、掃流を対象とした流砂量式を掃流状集合流動に適用するのは適切でないことがわかる。

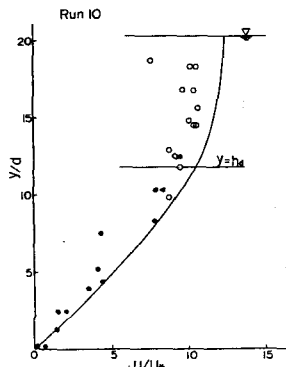


図2 流速分布

3 抵抗則 (10)式を積分すると

$$\frac{U_0}{u_*} = \frac{U_{10} - u_*}{u_*} - \frac{1}{K^2} \left\{ \frac{2 \left(\frac{d}{K^2} + \frac{R_d}{R} \right)}{\left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2}} + \frac{2 \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2}}{\left(\frac{d}{K^2} + \frac{R_d}{R} \right)^{1/2}} + \frac{d}{K^2 \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2}} \right\} \ln \left(\frac{\frac{d}{K^2} + \frac{R_d}{R}}{\left(\frac{d}{K^2} + \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} + \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2}} \right) \quad (14) \text{ となる。}$$

平均流速は $\frac{U}{u_*} = \frac{U_d}{u_*} \frac{R_d}{R} + \left(1 - \frac{R_d}{R} \right) \frac{U_0}{u_*}$ (15)と求めることができ、

(15)式と実験値との比較を行なうたものが図4である。なお破線は $\frac{U}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R_d}{R}$ (16)を示している。(15)式はかなり複雑な式であるため図4の理論曲線に合うような式を考えた結果 $\frac{U}{u_*} = (0.28 + 0.78 \tan \theta) \frac{R_d}{R}$ が得られた。

4 濃度式 濃度は $C = \frac{U_d R_d C_d}{U R}$ で与えられるので(6)式(1)式および(16)式を用いることによってCが計算される。図5中の実線はこれを示しているが実験データとの適合性は良いようである。なお図中に示してある「X」点は掃流状集合流動の適用限界である。さらに図中には土石流の濃度を表わす(3)式と、芦田、高橋、水山の掃流砂式²⁾による流砂濃度も示している。

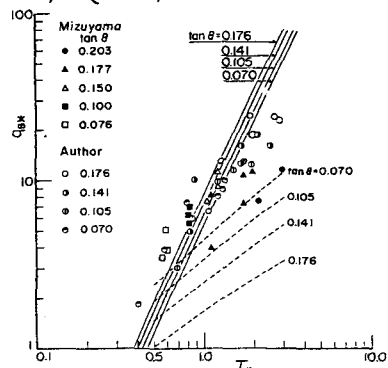


図3 流砂量式

参考文献

1) 高橋保: 土石流の力学的機構
水工学シリーズ 80-A-1

2) 芦田和男、高橋保、水山 高久

山地河川の掃流砂量に関する研究 新砂防 107, 1998

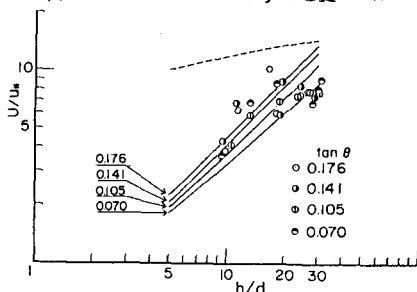


図4 抵抗則

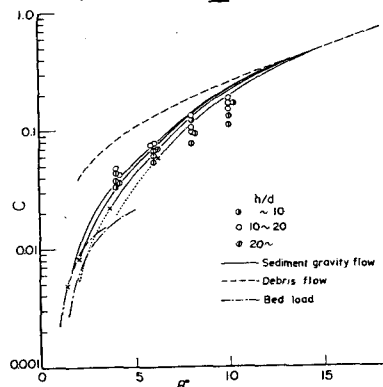


図5 濃度式