

急勾配水路における浮流砂濃度分布に関する実験的研究

九州大学大学院 ○学生員 寺中 孝司
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

1. はじめに

浮流砂は掃流砂と並び代表的な流砂形態である。浮流砂を考える際、基準点濃度は重要なパラメータとなるが、その定義についてはまだ明らかになっていない。本研究は浮流砂と泥流との中間的な領域を対象にしたもので、流れの底面付近には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層モデルを適用し¹⁾、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する。まず水路勾配を 0.61° から 6.0° まで変化させて移動床実験を行い、濃度分布を測定し、Rouse分布と比較する。次に、釣り合い式より基準点濃度の評価式を導き、実験値との比較を行う。

2. 実験方法

実験に使用した水路は、全長12m、幅12.5cmの可変勾配水路で、上流側7mは移動床、下流側5mはベニヤ板の滑面固定床とした(図-1)。河床材料としては粒径 $d=0.17, 0.29, 0.55\text{mm}$ 、密度 $\sigma=2.61\sim 2.65\text{g/cm}^3$ の砂を用いた。実験では上流端より単位幅流量 q_{w0} の水を供給し、移動床部で水と砂の混相流を発生させ、固定床上を流下させた。

濃度分布の測定は、下流端から1.0mの位置に円管を設置してサイフォン方式で採水して行った。用いた円管は内径4mm、外径5mm、または内径5mm、外径7mmの銅製で、中心間隔1cmで垂直方向に3本、または4本配置した。水深は小さく、1回の実験につき2～4点の計測ができるだけである。従って同じ条件で吸水口の高さを変えて4回程度実験を繰り返す。採取後、水と砂の全体的積 V_t と砂粒子の乾燥重量 W_s を測定し、濃度 $C=W_s/(\sigma V_t)$ を求めた。同時に下流端においても流れを採取し、輸送濃度 C_T や水と砂を合わせた単位幅流量 q_t を求めた。また水深 h は、下流端から1mの地点において水路側方よりVTRカメラを用いて流れを撮影し、求めた。実験条件を表-1に示す。

3. 実験結果と考察

(1) 基準点高さ

橋本・平野¹⁾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 $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ を導き、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(図-2)、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。

$$\frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} = 15 \quad (1)$$

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²⁾。

(2) 濃度分布

図-3は濃度分布の実験結果の一部を示す。ここに基準点濃度 C_s は粒子間力層厚の高さにおける濃度を示すもので、粒子間力層内では一様濃度 C_s とすると、式(1)において C を C_s とし、実験値の回帰曲線を用いて式(1)を満足するような δ_G と C_s を内挿により求めた値である。一方、図中の実線はRouse分布曲線を示す。すなわち次式

$$\frac{C}{C_s} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^z \quad (2)$$

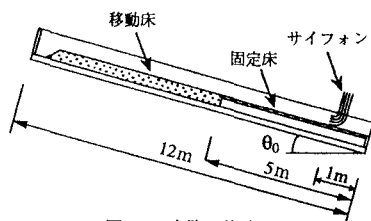


図-1 水路の模式図

表-1 実験条件

d (mm)	σ (g/cm ³)	q_{w0} (cm ³ /sec)	θ_0 ($^\circ$)	C_T	q_t (cm ³ /sec)	h (cm)
0.17	2.61	333	0.61	0.00657	340	3.89
			6.0	0.187	432	2.28
0.29	2.65	333	0.61	0.00298	328	4.17
			6.0	0.154	466	2.32
0.55	2.65	333	0.61	0.00134	338	4.65
			6.0	0.109	425	2.47

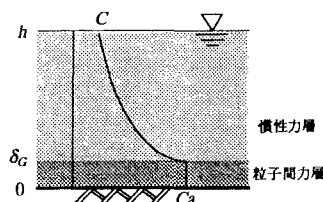


図-2 流れの模式図

により求めた曲線である。ここに a は基準点高さで $a = \delta_G$ とおいた。また w_0 を粒子の沈降速度、 κ を Karman 定数、 u_* を摩擦速度として $Z = w_0 / (\beta \kappa u_*)$ である。 β は $\beta = 1.2$ 、 $\kappa = 0.4$ とした。 w_0 は Rubey の式を用いた。また、図-4は、基準点高さ a として従来より用いられている $a = 0.05h$ における基準点濃度を用いて正規化した実験値と Rouse 分布曲線との比較を示す。図-3と4とを比較すると、 6.0° の急勾配では図-3の Rouse 分布曲線と実験値が、 0.61° の緩勾配では図-4の Rouse 分布曲線と実験値がそれぞれ良く適合しており、その境界は 1.9° であることが分かった。すなわち基準点高さとしては、 1.9° 以下の低い勾配では5%水深を、 1.9° 以上の急勾配では粒子間力層厚をそれぞれ用いると Rouse 分布曲線との適合性は良好となる。

(3) 基準点濃度

以上の成果から、粒子間力層内では一様濃度 C_s とし、慣性力層では粒子は浮遊し、濃度分布が存在するものと考え、粒子間力層における力の釣り合い式は次式となる。

$$\tau_{zx} + \tau_w = \int_{\delta_G}^h \rho_l g \sin \theta_0 dz + \int_{\delta_G}^h \{ \sigma C_a + \rho (1 - C_a) \} g \sin \theta_0 dz \quad (3)$$

$$\tau_{zz} - p = - \int_{\delta_G}^h (\sigma - \rho) C_a g \cos \theta_0 dz \quad (4)$$

ここに τ_{zx} 、 τ_{zz} は粒子間応力、 p は接触応力であり、前者は $\tau_{zx} / \tau_{zz} = -\alpha$ の関係がある²⁾。さらに τ_w は間隙水の応力である。上式において $z=0$ で $p=p_0$ 、 $\tau_w = \tau_{w0} = \rho u_*^2$ とおき、また $\tau_w = u_*^2 / (sgd)$ であり、さらに $\tau_{w0} = \tau_c$ 、 $p_0 = 0$ と仮定すると基準点濃度は次式で表される。

$$C_a = \frac{\tan \theta_0}{(\sigma / \rho - 1)(\alpha - \tan \theta_0) \frac{\delta_G}{h}} \left\{ \frac{\rho_l}{\rho} \left(1 - \frac{\delta_G}{h} \right) + \frac{\delta_G}{h} - \frac{\tau_c}{\tau_w} \right\} \quad (5)$$

ここに $\bar{C}$ を上層における断面平均濃度として $\bar{p}_l = \sigma \bar{C} + \rho (1 - \bar{C})$ である。また $\tau_w = u_*^2 / (sgd)$ 、 $\tau_c = 0.05$ である。また $\bar{C}$ は Rouse 分布を仮定すると、

$$\bar{C} = \frac{1}{h - \delta_G} \int_{\delta_G}^h C dz = \frac{C_a}{h - \delta_G} \int_{\delta_G}^h \left(\frac{h - z}{z} \frac{\delta_G}{h - \delta_G} \right)^2 dz \quad (6)$$

として与えられる。

図-5は、式(5)の計算と実験値との比較を示している。ここに式(5)は C_s について複雑な式となっており、その計算値は反復法により求められた。計算結果は実験値より大きな値を示しているが、概ね実験結果の傾向を説明している。

4. おわりに

以上、急勾配水路における浮流砂について移動床実験を行い、粒子間力層の濃度を基準点濃度とし、Rouse 分布と比較した。また、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層モデルを考え、粒子間力層での釣り合い式より基準点濃度の評価式を導き、実験値と比較した。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，No.317，1982。

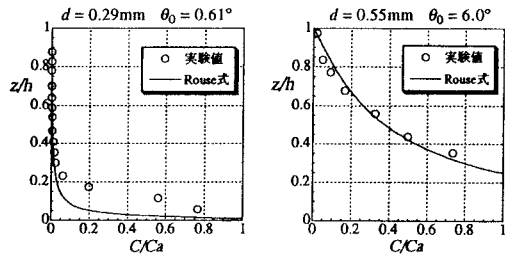


図-3 濃度分布 ($a = \delta_G$)

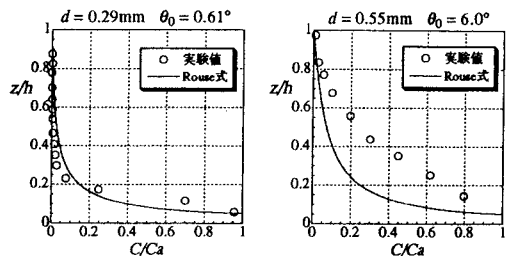


図-4 濃度分布 ($a = 0.05h$)

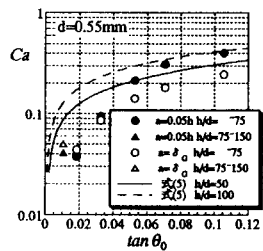
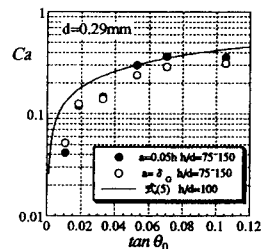


図-5 基準点濃度の実験値と式(5)の比較