

急勾配水路における浮流砂濃度分布に関する研究

Concentration Profile of Suspended Sediments in Open-Channel Flow at Steep Slopes

平野宗夫*・橋本晴行**・寺中孝司***

By Muneo HIRANO, Haruyuki HASHIMOTO and Takashi TERANAKA

Experiments of mixture flow of fine sand and water are made in a steep open channel. Concentration profiles of suspended sand are measured. A two-layer model for the mixture flow is proposed; the lower layer of intergranular interactions and the upper layer of turbulent motion. Using the top of the lower layer as the reference level, the concentration profiles are calculated from the Rouse equation. The calculations are in good agreement with the experiments.

Keywords : suspended sediments, mud flow, high concentration, debris flow, sand-water mixture

1. はじめに

急勾配の移動床水路において河床材料として粗粒な粒子を用いると、掃流砂と土石流との中間的な流砂形態として掃流状集合流動が発生する。一方、微細砂を用いた場合には、低濃度の浮流砂流と泥流との中間的な流砂形態として比較的高濃度の浮流砂流が発生する。従来、土石流や掃流状集合流動の流動特性についてはかなり解明されてきたが、浮流砂流と泥流との中間的な領域の流動特性についてはまだ明らかになっていない。

泥流については、著者ら¹⁾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とが流れの底面付近に存在し、粒子間力層厚は粒径や粒子濃度が大きくなるほど大きくなることを明らかにした。一方、浮流砂と泥流との中間的な領域については、江頭・芦田ら²⁾が濃度分布を調べている。彼らは、小さい濃度において濃度分布はRouse分布に従うが、大きい濃度ではRouse分布から外れ、それに適合させるためには粒子拡散係数を大きくとる必要があることを明らかにした。しかしながら基準点濃度として河床から1mmの高さの濃度を選んでおり、その物理的な意味に不明確さが残っている。

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、前報³⁾において導入された粒子間力層と慣性力層の2層モデルを適用し、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する。まず釣り合い式より基準点濃度の評価式を導く。次に、水路勾配を 0.613° から 6.04° まで変化させて実験を行い、濃度分布を測定し、Rouse分布と比較する。最後に基準点濃度について実験値と理論式との比較を行う。

*	正会員	工博	九州大学教授	工学部建設都市工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1)
**	正会員	工博	九州大学助教授	工学部建設都市工学科 (同 上)
***	正会員	工修	日本道路公団	

2. 基準点濃度に関する考察

著者らは前報³⁾において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を取ることで、高濃度流における無次元パラメータ $\frac{L}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ を見出した。ここに、 L は代表長さ、 d は粒子の直径、 σ は粒子密度である。また ρ を水の密度、 C を粒子の体積濃度、 C_* を最密充填濃度として

$$\rho_t = \sigma C + \rho(1 - C) \quad (1)$$

$$F(C) = \frac{(C/C_*)^2}{1 - C/C_*} \quad (2)$$

ここに $C_* = 0.6$ 程度である。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、流速分布は底面からの無次元距離 $\frac{z}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ により普遍表示されることを示した。また粒子間力層厚 δ_G は

$$\frac{\delta_G}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}} = 15 \quad (3)$$

により与えられることを明らかにした。

以上の成果から、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、濃度分布が存在するものとする（図-1）。さらに前者の層では土石流の場合と同様に流れ方向と垂直方向の力の釣り合いから濃度 C_δ が決定され、後者の層では乱れにより粒子は浮遊しているものとする。

このような考察のもとに濃度 C_δ を決定してみよう。粒子間力層における力の釣り合い式は

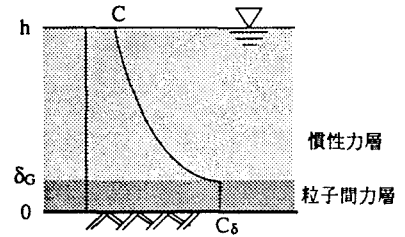


図-1 流れの模式図

$$\tau_{zx} + \tau_w = \int_{\delta_G}^h \rho_t g \sin \theta_0 dz + \int_z^{\delta_G} \{\sigma C_\delta + \rho(1 - C_\delta)\} g \sin \theta_0 dz \quad (4)$$

$$\tau_{zz} - p = - \int_z^{\delta_G} (\sigma - \rho) C_\delta g \cos \theta_0 dz \quad (5)$$

ここに θ_0 は水路傾斜角である。また、 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³⁾。さらに τ_w は間隙水の応力である。

上式において $z=0$ で $p=p_0$ 、 $\tau_w = \tau_{w0} = \rho u_{*w}^2$ とおくと、

$$C_\delta = \frac{\tan \theta_0}{(\sigma/\rho - 1)(\alpha - \tan \theta_0)} \left\{ \frac{\bar{\rho}_t}{\rho} \left(1 - \frac{\delta_G}{h} \right) + \frac{\delta_G}{h} - \frac{\tau_{*w}}{\tau_*} + \frac{\alpha p_0}{\rho u_{*}^2} \right\} \quad (6)$$

となる。ここに $\bar{C}$ を上層における断面平均濃度として $\bar{\rho}_t = \sigma \bar{C} + \rho(1 - \bar{C})$ である。また $\tau_{*w} = u_{*w}^2/(sgd)$ 、 $\tau_* = u_*^2/(sgd)$ である。さらに $\tau_{*w} \approx \tau_{*c}$ 、 $p_0 \approx 0$ と仮定すると

$$C_\delta = \frac{\tan \theta_0}{(\sigma/\rho - 1)(\alpha - \tan \theta_0)} \left\{ \frac{\bar{\rho}_t}{\rho} \left(1 - \frac{\delta_G}{h} \right) + \frac{\delta_G}{h} - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right\} \quad (7)$$

となる。ここに $\bar{\rho}_t$ は $\bar{C}$ の関数、 δ_G/h は式(3)より h/d と C_δ の関数である。また $\bar{C}$ は後述の式(9)から C_δ と δ_G/h および w_0/u_* の関数である。従って上式の C_δ は h/d と水路傾斜角 θ_0 および w_0/u_* の関数となっている。

粒子の浮流層が消滅し、上層が清水となる場合は $\bar{\rho}_t = \rho$ となり、式(7)は掃流状集合流動における高濃度層における粒子濃度を与えることとなる⁴⁾。また濃度分布が一様な場合は $\bar{\rho}_t = \sigma C_\delta + \rho(1 - C_\delta)$ となり、式(7)は

$$C_{\delta} = \frac{\tan \theta_0}{(\sigma/\rho - 1) \left(\alpha \frac{\delta_G}{h} - \tan \theta_0 \right)} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \quad (8)$$

となる。この式は、 $\tau_{*c}/\tau_* = 0$ とくと江頭ら⁹⁾により求められた式とほぼ同様な式となる。

さて、濃度分布については4.1節で述べるが、Rouse分布を仮定すると上層における断面平均濃度は

$$\bar{C} = \frac{1}{h - \delta_G} \int_{\delta_G}^h C dz = \frac{C_{\delta}}{h - \delta_G} \int_{\delta_G}^h \left(\frac{\delta_G}{h - \delta_G} \frac{h - z}{z} \right)^2 dz \quad (9)$$

として与えられる。ここに w_0 を粒子の沈降速度、 κ をカルマン定数、 u_* を摩擦速度として $Z = w_0 / (\beta \kappa u_*)$ である。 β は $\beta = 1.2$ 、 $\kappa = 0.4$ である。

3. 実験方法

実験に使用した水路は、全長12m、幅12.5cmの両側アクリルライト製可変勾配水路であり、上流の7mは移動床、下流の5mはベニヤ板の滑面固定床とした(図-2)。固定床にしたのは、移動床の場合、反砂堆が発生し濃度測定が困難になるからである。河床材料としては粒径 $d = 0.17, 0.29, 0.55$ mm、密度 $\sigma = 2.61 \sim 2.65$ g/cm³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。また一部の実験については水面付近の濃度を測定するために下流端から0.5mの位置にも、内径4mm、外径5mmの円管を1本だけ設置した。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。

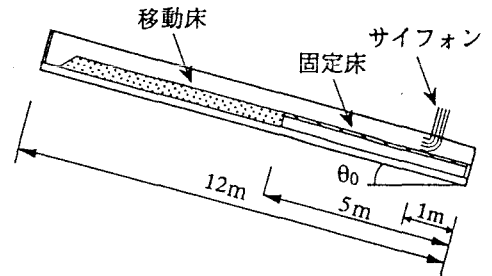


図-2 水路の模式図

表-1 実験条件

d (mm)	σ (g/cm ³)	q_{w0} (cm ³ /sec)	θ_0 (°)	C_T	q_t (cm ³ /sec)	h (cm)
0.17	2.61	333	0.613	0.00657	340	3.89
			6.04	0.187	432	2.28
0.29	2.65	333	0.613	0.00298	328	4.17
			6.04	0.154	466	2.32
0.55	2.65	333	0.613	0.00134	338	4.65
			6.04	0.109	425	2.47

4. 実験結果

4.1 濃度分布

図-3は濃度分布の実験結果を示す。ここに基準点濃度 C_{δ} は粒子間力層における濃度である。これは、式(3)において $\delta_0 = z$ と置くことにより、濃度測定値の回帰曲線 $C = f(z)$ と式(3)との連立解として求められる。一方、図中の実線はRouse分布曲線を示す。すなわち次式

$$\frac{C}{C_{\delta}} = \left(\frac{h - z}{z} \frac{a}{h - a} \right)^2 \quad (10)$$

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。粒子の沈降速度 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、 1.88° 以上の急勾配になると図-3のRouse分布曲線と実験値が、 1.88° 以下の低い勾配では図-4のRouse分布曲線と実験値がそれぞれ良く適合していることが分かる。すなわち基準点高さとしては、 1.88° 以下の低い勾配では5%水深を、 1.88° 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。

江頭・芦田²⁾は濃度が小さい場合はRouse分布に従い、濃度が大きい場合はこれから外れ、Rouse分布に一致させるためには β を大きくとる必要があるとしている。本研究のように粒子間力層厚を基準点高さとして選ぶと、 β の調整の必要はなくなることが分かる。

なお、粒子輸送濃度が大きくなる $d=0.17\text{mm}$ の急勾配 ($\theta_0 \geq 4.04^\circ$) では、Rouse分布曲線との適合性はいずれの場合もあまり良くない。これは、濃度測定値が、この実験の範囲内では実際より過大になっているためと考えられる。

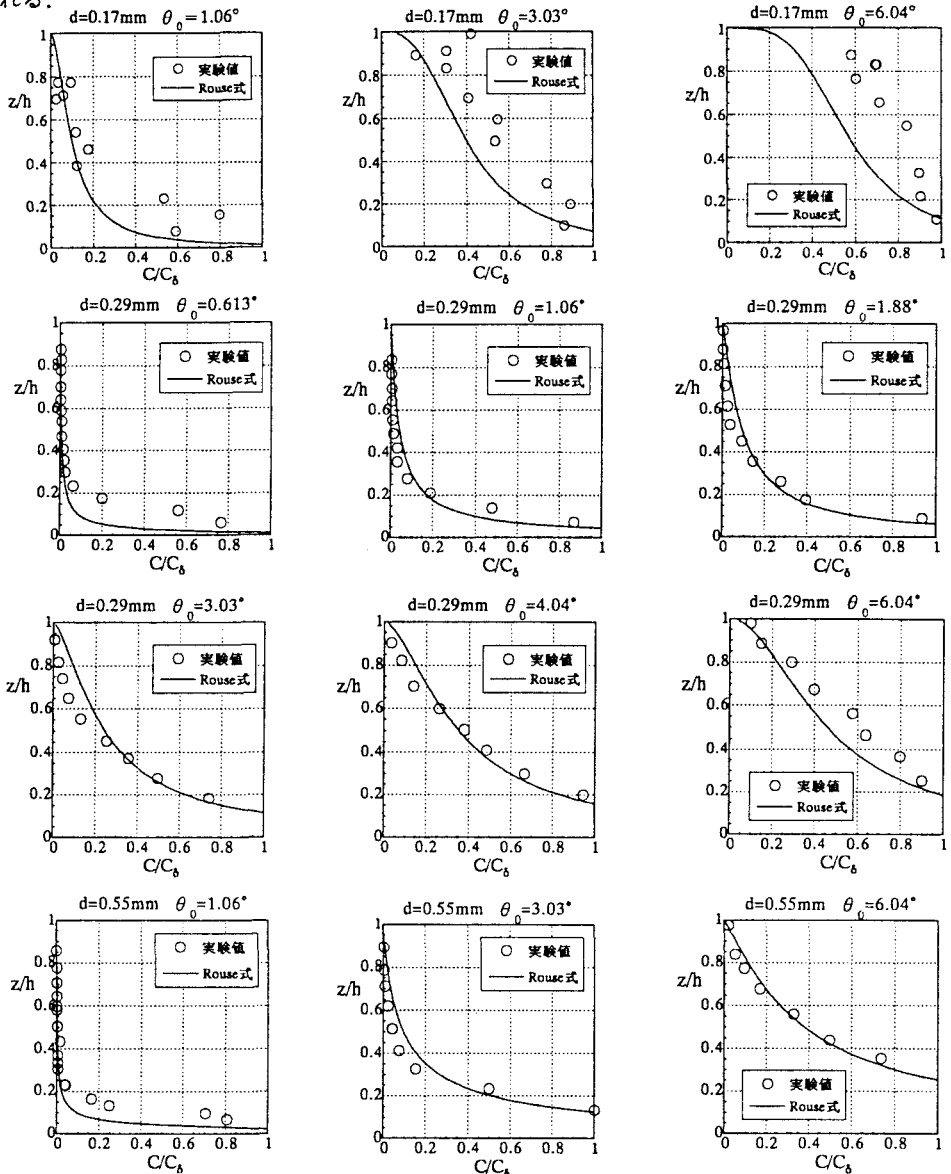


図-3 基準点高さとして粒子間力層厚を用いた場合の濃度分布 ($a = \delta_g$)

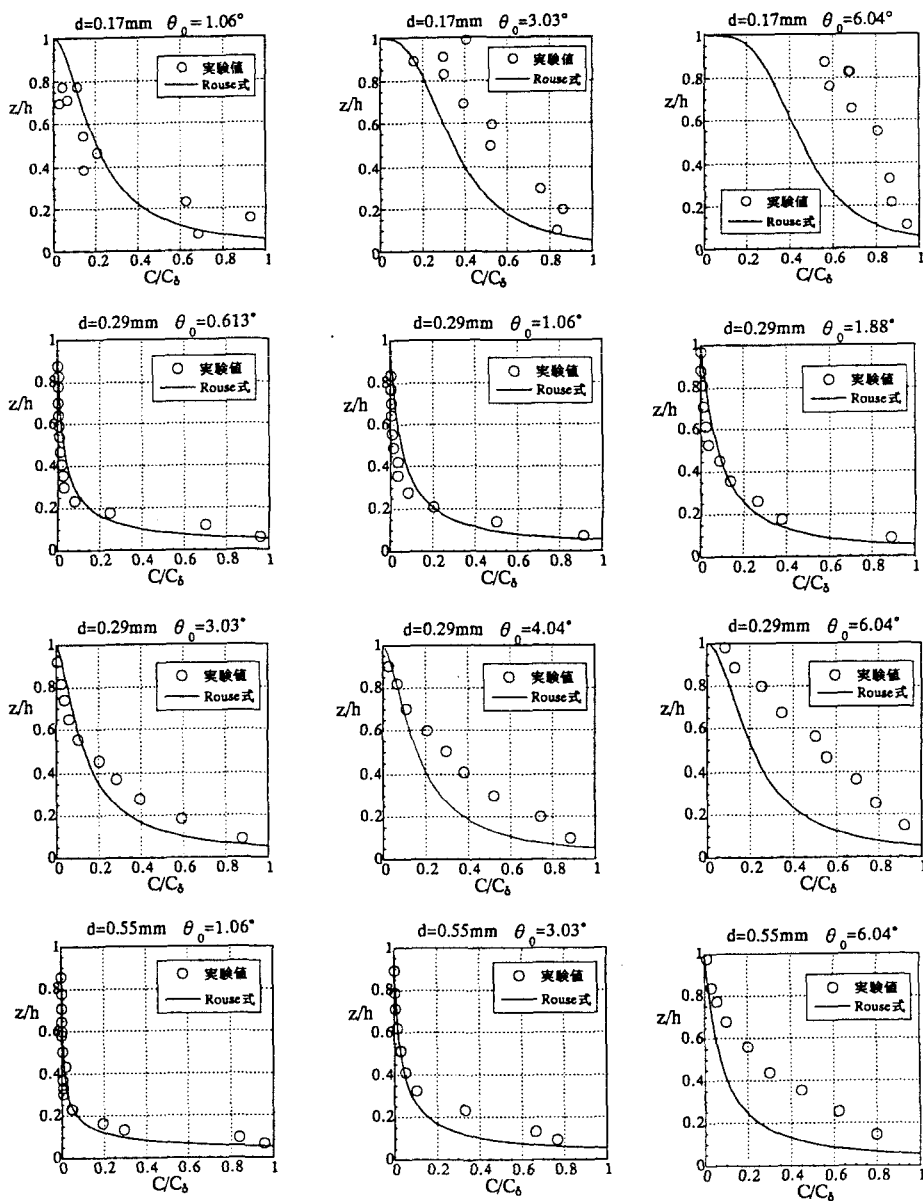


図-4 基準点高さとして5%水深を用いた場合の濃度分布 ($a=0.05h$)

4.2 基準点高さ

基準点高さ a として、従来用いられている $a=0.05h$ と本研究で求められた $a=\delta_G$ との比較を図-5に示す。急勾配になるほど濃度が大きくなるため、粒子間力層の相対厚さが大きくなっている。また粒径が大きくなるほど同様な結果となっている。勾配が 1.88° 付近で両者の基準点高さは一致し、それ以下の勾配では粒子間力層の相対厚さは5%水深よりかなり小さくなる。

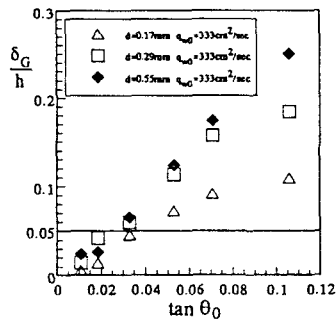


図-5 基準点高さと水路勾配との関係

4.3 基準点濃度

図-6は、式(7)の計算と実験値との比較を示している。ここに式(7)は C_δ 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。また図-7は一樣な濃度分布を仮定した式(8)と実験値との比較を示している。式(8)は式(7)の計算よりさらに大きな値を示し、実験値より過大となっている。

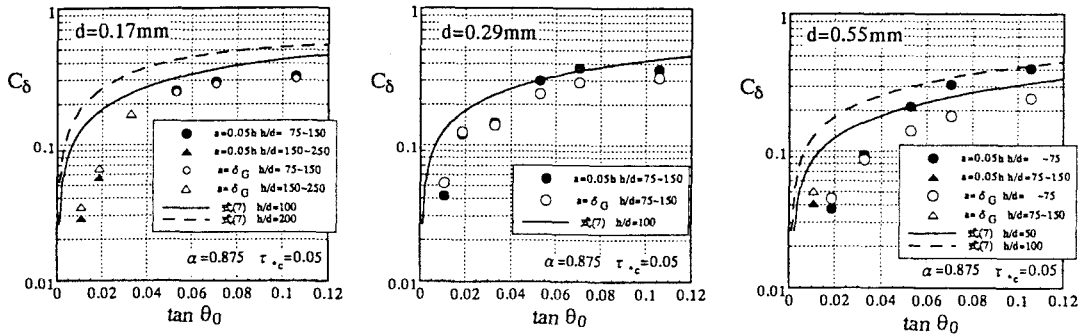


図-6 基準点濃度の実験値と式(7)との比較

5. おわりに

急勾配水路において浮流砂流から泥流へ遷移する領域における砂粒子の濃度分布について調べた。まず、底面付近において一樣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、力の釣り合い式より基準点濃度の評価式を導いた。これは実験値より過大となるが、実験結果の傾向を概ね説明している。次に 1.88° 以下の水路勾配では基準点高さとして5%水深が、 1.88° 以上の勾配では粒子間力層厚がそれぞれ適しており、それらの点の濃度を基準点濃度として用いると濃度分布の実験値はRouse分布曲線に比較的適合することが分かった。

最後に本研究に際しては大学院生の多川博章君、および当時4年生の押村嘉人、玉松潤一郎の両君には実験やデータ整理において多大の助力を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

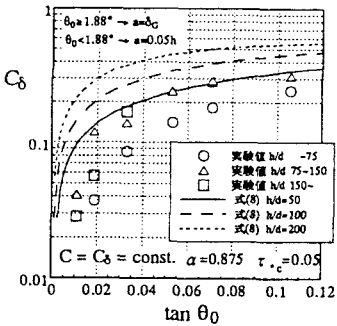


図-7 基準点濃度の実験値と式(8)との比較

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) 江頭進治・芦田和男・田野中新・佐藤隆宏：泥流に関する研究—応力構造—、京都大学防災研究所年報、第35号B-2、1992。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 江頭進治・佐藤隆宏・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。