

筑波大学 生物資源学類 ○荻原美香
筑波大学 農林工学系 宮本邦明

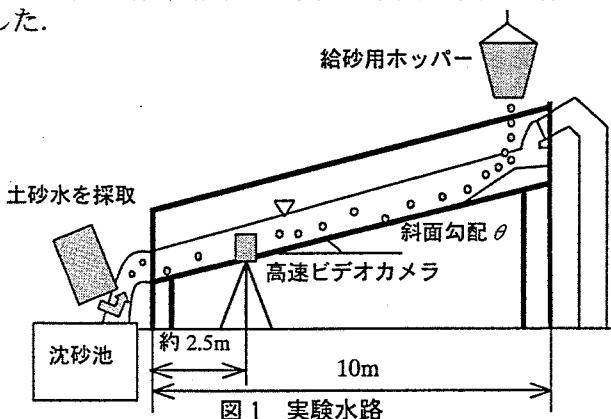
1. はじめに

土砂災害を防止・軽減するためには土砂を含む流れの流動機構を解明する必要がある。現在までに数多くの実験的・理論的研究がなされ、流れの構成則についてもいくつか提案されている。

急勾配区間で見られる土石流は、勾配が緩くなるに従い土砂流から掃流砂・浮遊砂を含む流れへと連続的に推移してゆくことが知られているが、流れの構成則はその全体において流れの特性を説明できなければならない。江頭らの構成則¹⁾をベースとした研究では移動床条件での土砂流動機構の解明は進んでいるが、固定床条件、特に緩い勾配条件(12°未満)についての解明は不十分である。そこで本研究では、固定床・緩勾配条件で土砂流の実験を行い、集合流動層に着目した解析を行い、江頭らの構成則を用いた移動床理論と比較することにより、流れの特性の基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 実験方法及び条件

実験に用いた水路は、図1に示す長さ10m・幅10cmの可変勾配水路である。水路の上流端から一定流量で給水するとともに、ホッパーを用いて給砂を行った。流れが定常になったことを確認した上で、水路下流端から約2.5mの位置に設置した高速ビデオカメラにて撮影(500コマ/秒)、このとき水路下流端にて流れを採取し、流量Q、流砂量q_{sr}、土砂輸送濃度c_tを測定した。水路勾配、給砂量を変えて同様の実験を繰り返した。



実験条件を表1に示す。

表1 実験条件

実験水路	長さ L = 10m 幅 B = 10cm 勾配可変の直線水路
実験砂	平均粒径 d = 0.146 cm の一様な砂
給砂	水路上部に設置したホッパーから給砂。 給砂がスムーズに行えるよう、砂の落下地点に勾配をつけた。
水路床	実験砂と同粒径の砂を接着剤で固定した板を、水路床全体に渡って敷き詰め、固定床とした。
給水量	Q = 5.0 ℓ/s
水路勾配	θ = 5, 7, 10°

3. 固定床上の土砂流の特性

固定床上の土砂流の集合流動層の流速分布は、江頭らの構成則を用いると、集合流動層の粒子濃度分布が深さ方向に一様であると仮定して近似的に次式で表される。

$$\frac{u(\eta)}{u_*} = \frac{2}{3} \frac{h}{d} \frac{\sqrt{G-Y}}{\sqrt{f_d + f_f}} \left\{ \left(\eta_s + \frac{1-\eta_s}{G-Y} \right)^{3/2} - \left(\eta_s - \eta + \frac{1-\eta_s}{G-Y} \right)^{3/2} \right\} \quad \cdots (1)$$

$$G = c_s (\sigma/\rho - 1) + 1 \quad Y = (c_s/c_s)^{1/5} c_s (\sigma/\rho - 1) (\tan \phi_s / \tan \theta)$$

$$f_f = k_f (1 - c_s)^{2/3} \quad f_d = k_d \sigma / \rho (1 - e^2)^{1/3}$$

$$\eta_s = h_s / h \quad \eta = y / h$$

u(η) : 河床からの無次元高さ η での流速

c_s : 集合流動層の土砂濃度 φ_s : 粒子の内部摩擦角

c_s : 静止堆積層の土砂濃度 e : 粒子の反発係数

ρ : 間隙流体の質量密度 σ : 粒子の質量密度

h_s : 集合流動層の厚さ h : 流れの全水深

k_f, k_d : 定数(0.0828, 0.16) u_{*} : 摩擦速度

移動床の理論河床では、外力の全せん断力と固体摩擦応力が等しく(τ(0)=τ_r)、また土砂濃度は地山の静止堆積濃度に等しいから(c(0)=c_s)、集合流動層の平均土砂濃度c_sはc_s=c_s/2とおくことができる。一方、固定床ではこの条件は成り立たず、c_s<c_s/2である。したがって、移動床に特有の集合流動層厚に関する次式も成り立たない。

$$\eta_s = \frac{\tan \theta}{c_s (\sigma/\rho - 1) (\tan \phi - \tan \theta)} \quad \cdots (2)$$

すなわち固定床の場合、c_sとη_sは式(2)で表されるよう互いに従属な関係ではなく、流速分布、集合流動層厚を同時に満たすように定まる。

4. 実験結果と考察

高速ビデオカメラで撮影した映像から流速分布を求めた一例を図2の黒丸に示す。固定床の場合 c_s と η_s は互いに独立であるから、理論から得られる値が次にあげる2条件において実験結果と適合するように、c_s と η_s の組み合わせを探索して求める。

[条件Ⅰ] 流速分布の一一致

図2に示す実験から得られた流速分布(図中の黒丸)と、(1)式から得られる流速分布(図中の太実線)とが一致するように、(1)式に代入するc_sとη_sの組み合わせを求める。

[条件Ⅱ] 流砂量の一一致

実験から得られた流砂量q_{sr}が、以下の手順で理論から得られる流砂量q_sと等しくなるc_sとη_sの組み合わせを求める。

まず、式(1)を変形して求めた式(3)より、集合流動層の単位幅流量Q_sを求める。

$$Q_s = \frac{2h}{3d} \frac{\sqrt{G-Y}}{\sqrt{f_d + f_f}} u_* \left\{ h_s \left(\eta_s + \frac{1-\eta_s}{G-Y} \right)^{3/2} + \frac{2}{5} h \left[\left(\frac{1-\eta_s}{G-Y} \right)^{3/2} - \left(\eta_s + \frac{1-\eta_s}{G-Y} \right)^{3/2} \right] \right\} \quad \cdots (3)$$

次いで、次式より流砂量q_sを求める。

$$q_s = B c_s Q_s = B c_s \frac{c_s Q_s}{c_t} \quad \cdots (4)$$

こうして、条件 I・II が同時に満たされた流速分布の一例を図 2 に示す。図中の η_s は流速分布と流砂量に合うように定められた c_s と η_s の組み合わせの中の η_s である。

4.1 集合流動層の水深 h_s と河床勾配 θ との関係

図 3 は集合流動層の水深 h_s と河床勾配 θ との関係を示したものである。図中には参考のため移動床条件での実測値を黒丸で載せている²⁾。白抜きのひし形は、今回の固定床条件での実験から得られた η_s である。曲線は、移動床条件での理論式(2)に、今回の実験条件の値を代入した理論値である。

移動床の場合、勾配が $12\sim15^\circ$ 以上になると $h_s/h = 1$ となって土石流となる。 $12\sim15^\circ$ 未満では $h_s/h < 1$ となり、土砂流・掃流砂へと遷移する。移動床条件と固定床条件を比較すると、勾配 5° の緩勾配では固定床の値が移動床の値を上回っている。しかし、勾配が急になるに従い、固定床の値が移動床の値を下回るようになる。

4.2 集合流動層の土砂濃度 c_s と河床勾配 θ との関係

図 4 は集合流動層の土砂濃度 c_s と河床勾配 θ の関係を示したものであり、図中の数値は輸送濃度 c_t である。移動床の場合、集合流動層の土砂濃度 c_s は、地山の静止堆積濃度 $c_* = 0.52$ の $1/2$ に近似されることが知られている(図中の実線)。これは輸送濃度や河床勾配によらず一定である。

一方で、固定床の場合は移動床の 0.26 よりはるかに小さな値をとる。また、輸送濃度 c_t が増えると集合流動層の土砂濃度 c_s は増加していることがわかる。急勾配であればあるほど、移動床が発生する限界の土砂濃度が高く、その分輸送濃度 c_t も大きくなる。

4.3 河床における全せん断力 $\tau(0)$ とクーロン摩擦力 τ_y の比と河床勾配 θ 、輸送濃度 c_t との関係

図 5 は河床における全せん断力 $\tau(0)$ とクーロン摩擦力 τ_y の比と、河床勾配 θ との関係を示したものである。また、図中の数値は輸送濃度 c_t である。移動床の場合、輸送濃度 c_t や河床勾配 θ によらず一定の値 $\tau(0) = \tau_y$ であるので次式が常に成り立っている。

$$\tau_y / \tau(0) = 1 \quad \cdots (5)$$

一方固定床の場合、河床勾配 θ または輸送濃度 c_t が増加すると $\tau_y / \tau(0)$ も増加する。また、常に次の範囲に収まる。

$$\tau_y / \tau(0) < 1 \quad \cdots (6)$$

5. おわりに

固定床上の土砂流の流動機構について実験的に検討した。その結果、 η_s や c_s 、クーロン摩擦力 τ_y の大きさなど、移動床上のそれと異なる特性を持つことが示された。今後は厳密解と比較し、流れの特性を評価する必要がある。

参考文献 :

- 1) Egashira, S. et al.: Constitutive equation of debris flow and their applicability, Proc. of 1st Int. Conf. W.R.E.D./ASCE, pp.340-349, 1997
- 2) 宮本邦明：流砂の力学と固液混相流、第 5 回オーガナイズド混相流フォーラム—混相流の複雑構造—講演論文集、日本混相流学会、pp.33 - 40, 2001

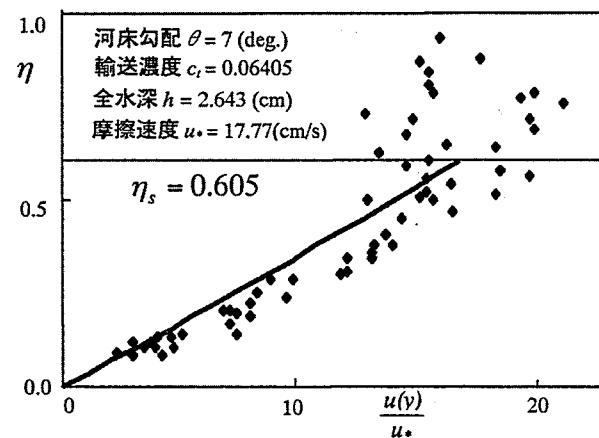


図 2 式(1)の理論曲線と実測の流速分布との比較

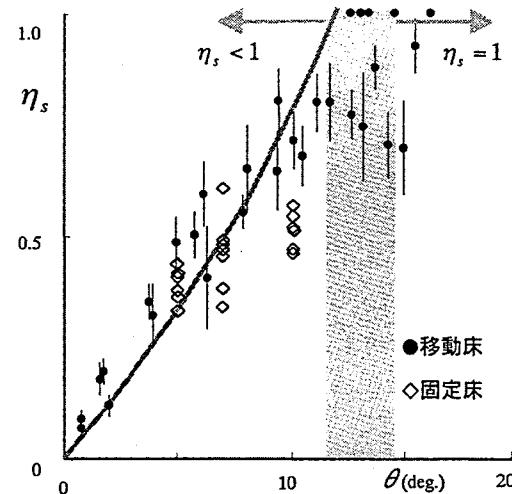


図 3 集合流動層厚と河床勾配との関係

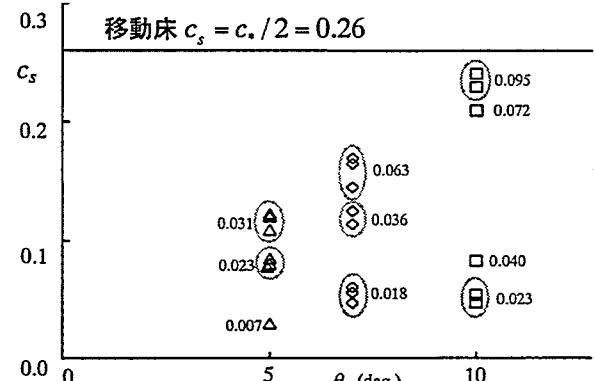


図 4 集合流動層の土砂濃度と河床勾配との関係

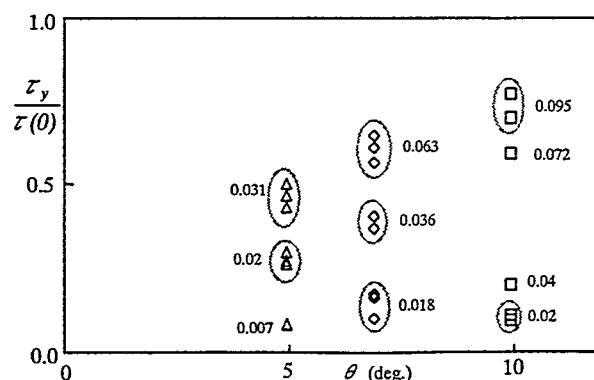


図 5 河床における全せん断力とクーロン摩擦力の比と河床勾配との関係