

II-231

固定床における土石流の応力構造

立命館大学大学院

立命館大学理工学部

鳥取大学・地域共同研究センター

学生員 ○伊藤隆郭*

正会員 江頭進治**

正会員 宮本邦明***

1. はじめに 移動床上における土石流の理論河床の位置やそこにおける速度および速度勾配などの運動学的条件は、外力のせん断力が静的な摩擦力と等しくなり、流動応力が0になることより定まる。このことは、移動床上の土石流の流れは、勾配に対して一意に決まることを意味する。それに対して、固定床上の土石流の流れは、勾配、給砂量、砂粒子と河床との摩擦角といった条件に支配される。ここでは、固定床上の土石流の流れの特性を調べ、さらに、その結果から移動床上の土石流の流れとの違いについて検討する。

2. 支配方程式と応力モデル 非圧縮性連続体の2次元等流状態における運動量保存則は、図-1を参考にして、土石流に関する構成則を用いれば次式で与えられる¹⁾。

$$x \text{ 方向: } p_s \tan \phi_s + \rho (f_f + f_d) d^2 (\partial u / \partial z)^2 \\ = \int_z^{h_t} \rho \{ (\sigma / \rho - 1) c + 1 \} g \sin \theta dz \quad (1)$$

$$z \text{ 方向: } p_s + \rho f_{pd} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \\ = \int_z^{h_t} \rho (\sigma / \rho - 1) c g \cos \theta dz \quad (2)$$

$$p_s / (p_s + p_d) = (c / c_*)^{1/n} \quad (3)$$

$$f_f = k_f (1 - c)^{5/3} c^{-2/3}, f_d = k_d (1 - e^2) (\sigma / \rho) c^{1/3},$$

$f_{pd} = k_d (\sigma / \rho) e^2 c^{1/3}$ ここに、 ϕ_s : 砂粒子の内部摩擦角、 θ : 水平となす角、 ρ : 水の密度、 σ : 砂粒子の密度、 c : 砂粒子の体積濃度、 d : 砂粒子径、 e : 反発係数、 g : 重力加速度、 h_t : 全水深、 c_* : 砂粒子の静止堆積濃度、 n : 経験係数 ($n=5$)、 k_f, k_d : 実験定数でそれぞれ0.16、0.0828のようである¹⁾。

3. 流速分布と濃度分布 図-1に示すように、砂粒子が水面まで分散している流れを対象にする。流速分布と濃度分布は、適切な境界条件のもとで、式(1),(2)の p_s に(3)を採用し、これらを数値的に解くことによって求められる¹⁾。ここで、勾配一定の固定床において給砂量を増加させていくと、流速分布、濃度分布および応力分布がどのように変化するかを調べる。なお、簡単のため、砂粒子の内部摩擦角 ϕ_s と砂粒子と固定床との摩擦角は等しいものとし、 $z=0$ における流速の条件として、 $u=0$ を採用する。図-2(a)、(b)および(c)は、全流量が一定のもとで、 c_t を増加させていくときの流速および濃度の分布形、ならびに河床における流動応力を示している。ここに、 c_t は輸送濃度で、 $c_t \equiv \int_0^{h_t} c u dz$

$\int_0^{h_t} u dz$ と定義される。計算では、 $n=5$ 、 $\theta=15.5^\circ$ 、 $\phi_s=34.0^\circ$ 、 $e=0.85$ 、 $c_* = 0.52$ 、 $d=0.201(\text{cm})$ を用いた。また、流速分布と濃度分布には、移動床上のもの太線で載せている。 c_t は、0.1, 0.2と増加させ、0.3以降は0.01ずつ増加させ $c_t=0.4$ まで計算を行っている。まず、河床近傍での流速と濃度の分布形をみる。

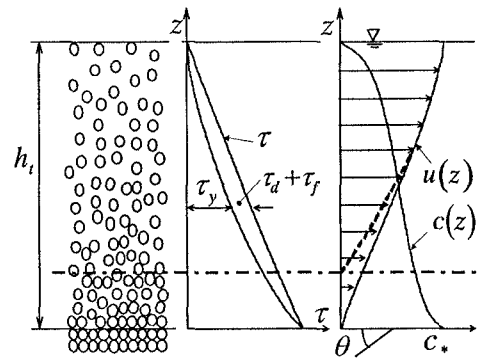
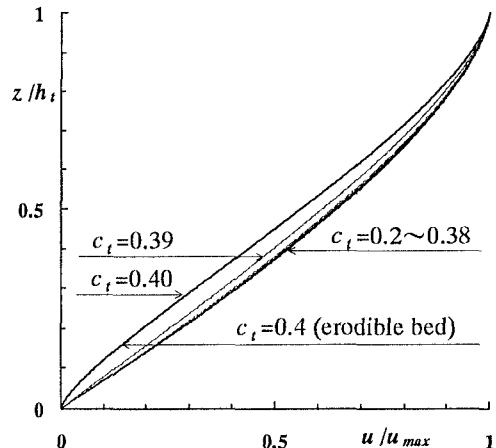


図-1 流れのモデル

図-2(a) 流速分布 ($\theta=15.5^\circ$)

Key words : constitutive relations, flow resistance, debris flow, solid-liquid two phase flow, rigid bed

* 〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1 TEL. 0775-66-1111 FAX 0775-61-2667

** 〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1 TEL. 0775-61-2732 FAX 0775-61-2667

*** 〒680 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101 TEL. 0857-31-5686 FAX 0857-31-5687

$c_t = 0.2 \sim 0.39$ の領域においては、分布形に顕著な差はみられないが、0.39から0.40になるとき、大きい変化が見られる。ここで、 $c_t = 0.4$ のものは、 $\theta = 15.5^\circ$ に対する移動床の分布形である。濃度分布については、底面近傍の濃度に注目すると、 c_t の増加に伴って増加し、 c_* に漸近している。これは、固定床上の底面濃度は、移動床上の底面濃度 ($c_* = \text{const}$) と違い、 c_t によって種々の値を持つことを意味している。これは、また、勾配によって一意的に決まる移動床上の流れとは異なり、固定床上の流れは、特に河床近傍において、異なった応力構造によって支配されていることを示している。このことを、図-1に模式的に示している。すなわち、図中の一点鎖線が固定床の河床を表しており、それより上方が、固定床上の応力分布（流れ）に相当している。次に、河床における流動応力 ($\tau_f + \tau_d$) (図-2(c)) についてみる。ここで、流動応力とは、全せん断力から境界におけるクーロン力を差し引いたものである。底面せん断力は、 c_t の増加に対してほぼ直線的に減少し、 $c_t = 0.39$ から $c_t = 0.40$ にかけて急激に減少する。

4. 固定床と移動床の抵抗則 前節で流速分布と濃度分布が求められた。そこで、求められた流速分布を次式の定義に基づいて、抵抗則の形で表す。

$$v/u_* = \left[\int_0^{h_t} u dz / h_t \right] / \sqrt{g h_t \sin \theta} \quad (4)$$

図-3 は、 c_t をパラメータとして固定床の抵抗を表したものである。図には、条件の等しい移動床の抵抗も示されている。計算条件は、図-2で用いた諸量と同じである。図-3によれば、 $c_t = 0.38$ 辺りまでは、 c_t の増加に対して抵抗の変化は顕著ではないが、 $c_t = 0.39$ と 0.40 の間で抵抗は急激に増加して、移動床 ($c_t = 0.40$) の値に遷移している。この結果は、固定床上の流れ ($c_t = 0.39$) と移動床上の流れ ($c_t = 0.40$) は、 c_t が僅かに異なるだけで、流れの構造がかなり違うことを示している。なお、図-2および図-3の結果は、室内実験等において土石流の構造を検討する際には特別の注意が必要であることを示唆している。
おわりに 固定床上と移動床上の土石流の流れの構造の違いは、河床近傍での応力構造の違いに起因していることが明らかにされた。

参考文献

1) 江頭・宮本・伊藤：水工学論文集、第41巻、pp.789-794、1997

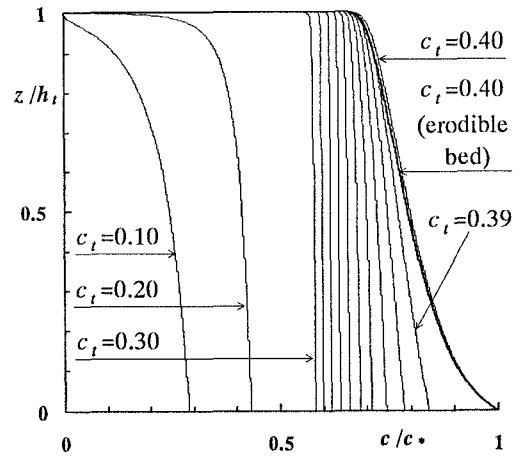


図-2(b) 濃度分布 ($\theta = 15.5^\circ$)

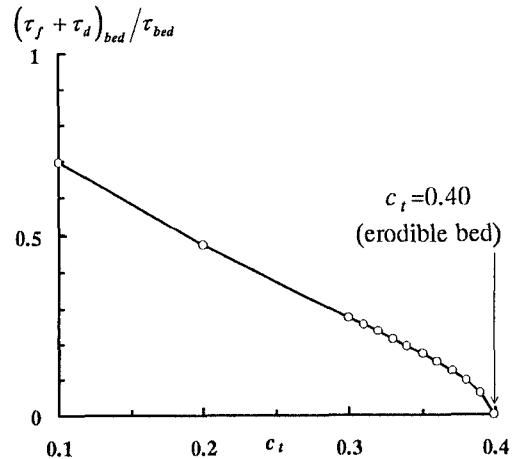


図-2(c) 河床における流動応力 ($\theta = 15.5^\circ$)

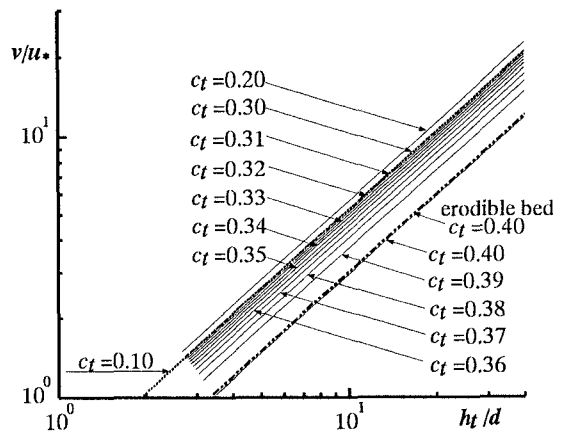


図-3 抵抗則