

京都大学防災研究所 正員 高橋 保

京都大学防災研究所 正員 里深 好文

熊 谷 組

正員○千代 啓三

1. はじめに 一般に土石流では含まれる粒子が全層にわたって層流的に挙動するが、泥流では粒子の乱流的挙動が卓越する。本研究は、下層が層流的に上層が乱流的に挙動する両者の中間的な性質を持つ流れを対象とする。

2. 水路実験 昨年までの実験¹⁾で中央粒径が0.017, 0.030, 0.066, 0.201cmの砂粒子を用いた時の平衡勾配、流速分布などに関するデータが得られている。この結果、以下のことが明らかになった。1) 粒径が小さくなると同流量同勾配でも平衡濃度が大きくなる。2) 流速分布形をみると、粒径が比較的小さい場合、水面付近の測定値がばらつくことから、上層には規模の大きな乱れがあると考えられる。しかし、昨年までの実験が水路長4mの水路を用いていたことから、粒子の沈降過程を観察していた可能性があったので、本研究では10mの水路で、堆積地を侵食させる方法で平衡勾配の測定を行い、昨年度までの実験結果の妥当性を検討した。図-1は、今回行った実験の結果を昨年度までのものと比較したものである。図中の実線は、存在濃度に対する平衡勾配の理論曲線で、式(1)で表される。

$$\theta_c = \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan \phi, \quad (1)$$

図-1によると全般的に昨年までの結果よりも本研究の実験結果の方がやや平衡濃度が大きくなっているが、粒径によって平衡勾配が大きくなる傾向が認められ、本研究でも1)のような現象が確認された。このような平衡濃度の増加は、上層が乱れて粒子が浮遊し、河床に伝達される粒子の存在に基づく応力の減少を考えることによって説明できる。

3. 二層モデル 以上の結果から図-2のようなモデルを考える。すなわち、下層は粒子が層流的に運動し土石流に関する構成則が適用でき、上層は大規模な乱れが発生し、レイノルズ応力と粒子衝突による応力が支配的であるとする。このとき、下層の力のつり合いは、高橋の土石流の構成式²⁾を若干修正して、

流れ方向

$$p_s \tan \phi_s + a_1 \sigma \lambda^2 \sin \alpha d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = \int_z^h \rho \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c + 1 \right\} g \sin \theta dz \quad (2)$$

水深方向

$$p_s + a_1 \sigma \lambda^2 \cos \alpha d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = \int_z^{h_2} \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c g \cos \theta dz = p' \quad (3)$$

ただし、接触応力 p_s が未知数であるので、粒子のもたらす圧力 p' との比で表し、

$$p_s = f(c)p' \quad \text{ここで} \quad f(c) = \frac{c - c_u}{c_u - c_u} \quad (4)$$

ただし、 $c_u = 0.6$, $c_u = 0.5$ 。この時の p_s と p' の関係を図-3に示す。以上の三式から流速と濃度を求めるのであるが、粒子が浮遊しない状態である高さの濃度が20%を下回った場合、掃流状集合流動になるものとしてそれより上の濃度を0%にし、流速は混合距離を $\ell = (z - h_2) + 3d/\lambda$ にして対数則を適用する。

上層の力のつり合いは、

$$a_1 \sigma \lambda^2 \sin \alpha d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \rho \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c + 1 \right\} \ell^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = \int_z^h \rho \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c + 1 \right\} g \sin \theta dz \quad (5)$$

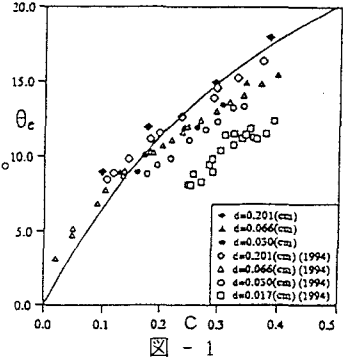


図 - 1

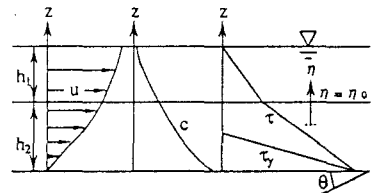


図 - 2

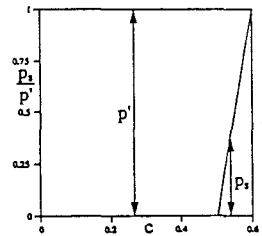


図 - 3

上層の濃度がどのようにして決定されるかは、現時点では検討できていないので、拡散方程式を濃度が連続するという条件で適用し、適用する原点 $\eta = 0$ は対数則と同じであると考えて、次式で表されるものとする。

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{\eta_0}{z + \eta_0 - h_2} \right)^{\frac{w_0}{\kappa u_{*1}}} \quad (6)$$

ただし、

$$\eta_0 = \frac{3d}{\lambda \kappa}$$

ここに c_a は、下層から決まる濃度。また、 $u_{*1} = \sqrt{g h_1 \sin \theta}$

さらに、上層と下層の層厚を決定するための条件が必要となる。これについては、ある高さでの速度の変動成分 $\sqrt{v'^2} (= d/\lambda \cdot du/dy)$ が粒子の集団での沈降速度 $w_f (= w_0(1-c)^{2.3})$ を上回った場合、それより上の高さが浮遊していると考え。ここに、 w_0 は、単一粒子の沈降速度。

$$\sqrt{v'^2} = \frac{d}{\lambda} \frac{du}{dy} \geq \kappa w_f \quad (7)$$

実際には、粒子が層厚のオーダーの乱れを生じるためには、沈降速度の数倍の変動成分が必要と考えられ、

$k = 1.2$ をもちいている。

以上のモデルを用いて、土石流の流速・濃度の分布を初期条件として近似的に計算した結果を中央粒径が0.066, 0.030cmの粒子を含んだ流れの流速分布の測定値¹⁾に適用した結果を図-4に示す。ただし、実験値で流速が非常に小さい範囲は、適用範囲外として無視し、原点を移動している。この結果、粒径が0.066cmの粒子を含んだ流れについては、浮遊する粒子はなかったが、0.030cmの粒子を含む流れでは、浮遊成分が存在し、河床勾配が急になり濃度が大きくなる

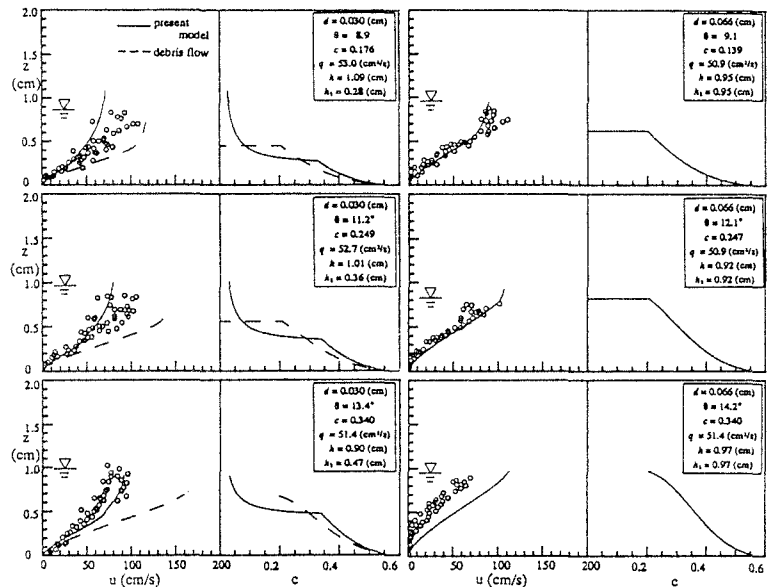


図 - 4

と、下層の層厚が大きくなり次第に土石流に近づく傾向がある。0.030cmの粒子を含む流れについては、比較のため、本モデルでの計算値を実線で、浮遊成分がないとして計算した結果を破線で示している。0.030cmのもので河床勾配が小さいものは抵抗がやや小さく計算されているが、0.030, 0.066cmの両方で全般的な傾向を表現できており、本モデルでの層厚の決定方法は十分妥当であると言える。

4. おわりに 本研究では、土石流と泥流さらにその中間的な流れを统一的に表すモデルを提案し、土石流と中間的な流れに対して適用した。その結果、近似解ではあるが、浮遊成分が存在する流れに対しても存在しない流れに対しても実験値をほぼ説明できた。しかし厳密解が求められておらず、また固定床上の流れへの適用もできていない。今後、これらについても研究を進め、本モデルの適用性を検討していく必要がある。

参考文献 1) 江頭進治, 佐藤隆宏, 千代啓三 ; 砂粒子を高濃度を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, pp. 359-369

2) 高橋 保 ; 土石流の発生と流動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第20号B-2, 1977, pp. 405-435