

II-216

土石流の流速・濃度分布の同時解

熊谷組 正員 千代 啓三
 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

1. はじめに これまで土石流については研究が進められ、多くの成果が得られている。本研究は移動床・固定床上の土石流の流速と濃度の分布を構成式から厳密に解き、さらに知見を深めることを目的としている。

2. 構成式 図-1のような鉛直2次元の流れを考える。流れ方向と水深方向の力のつりあいは、高橋¹⁾の土石流の構成式を濃度が非常に高い領域では接触応力が働くように修正して次のように表す。

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

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

接触応力 p_s の構造は不明なので粒子のもたらす圧力 p' との比で表し、

$$p_s = f(c) p' \quad \text{ここで} \quad f(c) = \frac{c - c_u}{c_* - c_u} \quad (3)$$

ただし、最密充填濃度 $c_* = 0.6$ 、接触応力が働く下限の濃度 $c_u = 0.5$ とする。

この時の p_s と p' の関係を図-2に示す。以上3式から流速勾配と濃度勾配を導く。

速度勾配
$$\frac{\partial u}{\partial z} = \left(\frac{(\sigma - \rho) g \cos \theta}{a_i \sigma \lambda^2 d^2 \cos \alpha} (1 - f(c)) \int_z^h c dz \right)^{1/2} \quad (4)$$

濃度勾配
$$\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\frac{(\sigma/\rho - 1) c A^2}{\tan \theta} - A}{\frac{\tan \phi_s}{c_* - c_u} \left\{ \frac{c_* + 2c}{3c} \left(\frac{c_*}{c} \right)^{1/3} - 1 \right\} (z' - 1)} \quad (5)$$

$$A = \left\{ \left(\frac{c}{c_*} \right)^{1/3} \tan \phi_s - \tan \theta \right\} - \left\{ \left(\frac{c}{c_*} \right)^{1/3} - 1 \right\} \tan \phi_s f(c)$$

ところで、粒子が集団で移動しているが、流砂量が少なく粒子が水面まで達しない場合を掃流状集合流動(図-1)と呼んでいる。このような場合を考慮して以下のように考える。まず濃度分布については、ある高さでの濃度が20%を下回った場合、それより上の高さの濃度は0%になるものとする。また水流層の流速分布は、対数則に従うものとして、

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\sqrt{g(h-z) \sin \theta}}{\ell} \quad (6)$$

ここで、境界の地点での混合距離は粒子間のスケールであると考え、 $\ell = \kappa(z - h_2) + 3d/\lambda$ で与える。

3. 実験への適用 まず移動床上的流れに対する適用を行う。移動

床の条件から底面濃度 c_{bed} は c_* となるが、 $c_{bed} = c_*$ とすると計算できないためせん断が開始される限界の濃度を底面濃度 c_{bed} として計算する必要がある。ここでは $c_{bed} = 0.59$ として、式(5)より濃度分布を計算する。さらに得られた濃度分布を使って式(4)から流速分布を計算する。中央粒径 $0.201(\text{cm})$ のほぼ一様な砂粒子を用い、河床勾配を $12, 15^\circ$ としたときの移動床上的流れに対する計算値と実験値を図-3で比較する。これによると流速分布についての計算値と実験値はよく適合していると言える。

次に固定床の場合を考える。固定床の場合は底面濃度がわからないので、輸送濃度の計算値が実験値に一

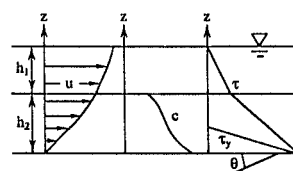


図-1

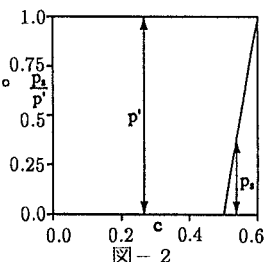


図-2

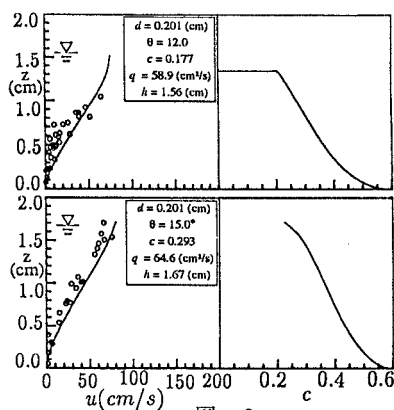


図-3

致するように収束計算を行って底面濃度を決定し、そのときの濃度・流速の分布を計算する。まず、底面濃度によって流速・濃度の分布形がどのように変化するかを調べるため、図-4に水路勾配が $\theta = 20^\circ$ の時、底面濃度に0.3~0.59の値を与えて

計算した結果を示している。ただし、流速 u は表面流速 u_s で、高さ z は水深 h を用いて無次元化している。また図の右には、各パターンで計算された輸送濃度 c_s 、存在濃度 c_e 、水深 h を表にした。図によると底面濃度が0.59から小さくなるにつれて、

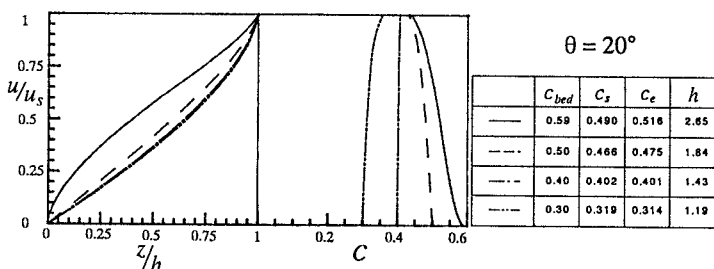


図-4

流速分布は移動床上の流れで見られる変曲点を持つ分布形から $3/2$ 乗則で表される分布形に変化する。一方、濃度分布は次第に様な分布に近づき、ついには水面付近の濃度が河床よりも大きくなる濃度の逆転現象が生じている。この点について詳しく見るために式(5)の右辺に注目する。分母は常に負となるのが分かるので、濃度勾配の符号は分子の符号によって決定される。そこで河床勾配が $12 \sim 21^\circ$ のときの濃度によって分子の値がどのように変化するかを調べた結果を図-5に示す。この図より分かるように、各勾配によって分子が0となる濃度 c_∞ が決まっており、その濃度は勾配が大きいほど大きくなる。濃度の逆転現象は、底面濃度がこの c_∞ よりも小さくなったときに発生する。

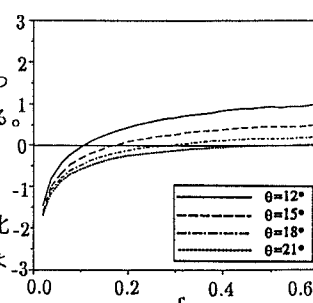


図-5

$$[\text{分子}] = \frac{A}{\sin \theta} \left[p_s \tan \phi_s + a_s \sigma \lambda^2 \sin \alpha d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \{ (\sigma/\rho - 1) c + 1 \} \sin \theta \right] \quad (7)$$

式(5)の右辺の分子は変形すると、上式のようにある濃度で一様な分布を持つと考えたときの式(1)の内力項から外力項を引いた値を意味している。したがって濃度の逆転現象は、物理的には底面濃度で一様である場合を考えたときに外力項が内力項の大きさを上回ることによって生じると説明できる。

計算ではこのような現象が確認されたが、実験的にはこのような現象は濃度分布の計測が困難であるため、江頭らの研究²⁾を除くとほとんど報告がなく、現時点では実際に起こるのか断定できない。したがって今後、濃度分布の計測を行って実験的検討を行う必要がある。図-6では固定床上の流れに対する流速分布の実験値²⁾と計算値の比較を行っている。 $\theta = 18^\circ$ の場合には若干抵抗が大きく計算されているが、ほぼ実験値を説明できている。

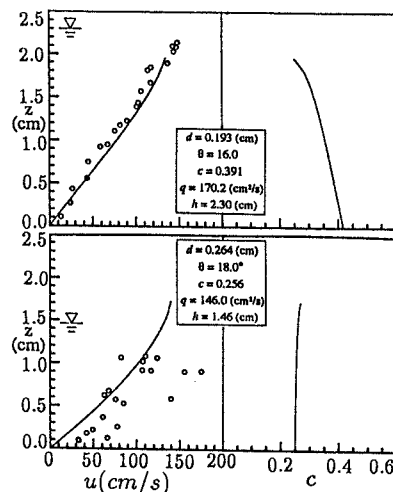


図-6

4. おわりに 接触応力の影響を考慮して、移動床上と固定床上の両方の流れの流速・濃度分布に対する同時解を求めた。流速分布に対する実験値と計算値を比較した結果、計算値はほぼ実験値を説明できた。今後は、濃度分布の計測を待って、本研究の妥当性を確認する必要がある。

参考文献 1) 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

2) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎；土石流の構成則に関する研究，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，1989，PP. 487-501