

混合粒径からなる土石流の構成則

京都大学防災研究所 正員 江頭 進治

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男

(財)砂防・地すべり技術センター 正員○高濱淳一郎

1. はじめに 一様砂を対象として導かれた江頭・芦田¹⁾による土石流の構成則を混合砂に拡張して、流速分布式、濃度分布式を導いた。ついで、水路実験により、2粒径からなる土石流の2次元等流状態における流速分布及び各粒子の濃度分布を測定し、理論式との比較検討を行なった。

2. 構成則 図-1に示すような2次元等流について考える。コントロールボリュームにおいて粒径 d_k ($k=1 \sim n$) の粒子濃度を c_k 、混合砂全体の濃度を c_t とする。応力を江頭・芦田¹⁾の議論にしたがって評価する。すなわち

$$\Phi = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (1) \quad \Phi = \Phi_y + \Phi_f + \Phi_g \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial p_w}{\partial z} + \frac{\partial p_s}{\partial z} + \frac{\partial p_d}{\partial z} \quad (3)$$

ここに、 Φ_y は粒子間摩擦による散逸、 Φ_f は間隙流体の乱れによる散逸、 Φ_g は粒子衝突による散逸であり、 p_w は間隙水圧、 p_s は粒子骨格応力、 p_d は粒子衝突にもなう圧力である。

ここで、江頭・芦田¹⁾が応力を評価する際に用いた粒子配列を混合砂に対して図-2のように導入する。ここに、 ℓ_f は粒子間隙のスケールであり、 ℓ_g は粒子中心間の距離である。 ℓ_f 、 ℓ_g ともに場の平均量を想定し、次式で与える。

$$\ell_f = \sqrt{k_f} \left(\frac{1-c_t}{c_t} \right)^{1/3} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k/c_t}{d_k^3} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

$$\ell_g = \left(\sum_{k=1}^n \frac{\pi/6}{c_k/d_k^3} \right)^{1/3} \quad (5)$$

図-2及び式(4)、(5)より、応力を江頭・芦田¹⁾が用いた方法にしたがって評価すれば、

$$\tau = p_s \tan \phi_s + \rho k_f \frac{(1-c_t)^{5/3}}{c_t^{2/3}} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k/c_t}{d_k^3} \right)^{-2/3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (6)$$

$$+ k_g (1-e^2) \sigma \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{2c_i c_j / c_t^2}{d_i^3 + d_j^3} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k/c_t}{d_k^3} \right)^{-5/3} c_t^{1/3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \cos \theta \left\{ 1 + \frac{(\sigma/\rho - 1)}{1 + \alpha} c_t \right\} \quad (7)$$

$$+ k_g e^2 \sigma \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{2c_i c_j / c_t^2}{d_i^3 + d_j^3} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k/c_t}{d_k^3} \right)^{-5/3} c_t^{1/3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

ここに、 ρ 、 σ は水及び粒子の密度、 ϕ_s は粒子の静止摩擦角、 e は反発係数である。上式の誘導において、衝突に伴う散逸については2体衝突として扱っている。すなわち、粒径 d_i の粒子と粒径 d_j の粒子について、1回の衝突で失うエネルギー及び単位時間、単位体積あたりの衝突回数から散逸量を評価する。これを全ての粒径の組合せについて行い、全体の散逸量を評価した。上式を一様砂に適用すれば、一様砂の構成則¹⁾と一致するので、係数 k_f 、 k_g 、 α は一様砂の場合と同じ $\sqrt{k_f} = 0.5$ 、 $k_g = 0.0828$ 、 $\alpha = 0.25$ とする。

式(6)、(7)を2次元等流の運動量式に適用すれば、流速及び濃度分布を規定する式が次のように得られる。

$$\frac{\partial u'}{\partial z'} = \left\{ \sum_{k=1}^n \frac{c_k}{c_t} \left(\frac{h}{d_k} \right)^3 \right\}^{1/3} \left\{ \frac{\int_z^1 (G-Y) dz'}{f_{mf} + f_{mg}} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

Shinji EGASHIRA, Kazuo ASHIDA, Jun-ichiro TAKAHAMA

ここに、 $u' = u/\sqrt{gh}$, $z' = z/h$

$$f_{mf} = k_f \frac{(1 - c_t)^{5/3}}{c_t^{2/3}} \quad f_{mg} = k_g \sigma / \rho (1 - e^2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{2c_i c_j / c_t^2}{d_i^3 + d_j^3} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k / c_t}{d_k^3} \right)^{-1}$$

$$G = \{(\sigma / \rho - 1) c_t + 1\} \sin \theta$$

$$Y = \frac{1}{1 + \alpha} (\sigma / \rho - 1) c_t \cos \theta \tan \phi_s$$

$$-\frac{\alpha}{1 + \alpha} (\sigma / \rho - 1) c_t \cos \theta = k_g c^2 \sigma \frac{\partial}{\partial z} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{2c_i c_j / c_t^2}{d_i^3 + d_j^3} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k / c_t}{d_k^3} \right)^{-1} \right. \\ \left. \left\{ \sum_{k=1}^n \frac{c_k}{c_t} \left(\frac{h}{d_k} \right)^3 \right\}^{-2/3} c_t^{1/3} \left(\frac{\partial u'}{\partial z'} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$\theta = 20^\circ$

$d_s = 0.144(\text{cm})$ $d_l = 0.379(\text{cm})$

$q_m = 205.3(\text{cm}^2/\text{s})$ $C_{ml} = 0.297$

$C_{ms}/C_{ml} = 0.49/0.51$

3. 適用例 図-3には2粒径($d_s = 0.144$

cm , $d_l = 0.379\text{cm}$) かなる混合砂

の2次元等流における流速・濃度分布の

実験値と厳密解(式(8)、(9)の連立解)

の一例が示してある。流速分布につ

ては、近似解(式(8)を各粒径の濃度

を一樣として計算)も示してある。な

お、計算に用いたパラメータは

$\sigma = 2.65$, $\phi_s = 38.5^\circ$, $\epsilon = 0.85$ で

ある。図中では小粒子、及び大粒子に

関する実験値をそれぞれ小さな丸、大

きな丸で、混合砂全体に関する実験値

は四角で示してある。実験に用いた勾配は $\theta = 16^\circ$, 18° , 20° , 25°

であり、混合砂全体の濃度は $\theta = 25^\circ$ においてほぼ一樣であり、勾配の減

少に伴い上層において濃度が小さくなってゆく(順勾配)。粒径別にみれば、大粒子の濃度はほぼ一樣であったが、中には上層に向かって濃度が大きくなるケース(逆勾配)もあった。一方、小粒子の濃度は順勾配となっており、勾配が小さいほど分級は著しい。厳密解の濃度分布の特性を調べると、勾配が大きく、粒径比が小さい場合には、各粒子の濃度はほぼ一樣で、分級はあまり生じていない。そして、勾配の減少、粒径比の増大に伴って、小粒子の濃度は順勾配へ移行し、大粒子の濃度は図-3に示すよう

な中ぶくらみの分布形となり、分級は顕著になってゆく。

図-3 流速・濃度分布に関する実験値及び理論値

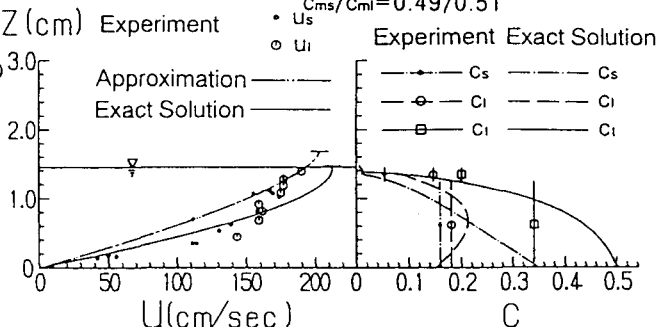


図-3 流速・濃度分布に関する実験値及び理論値

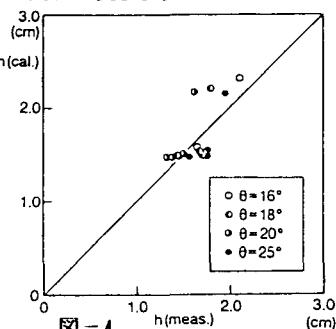


図-4 流動深に関する実験値及び厳密解

図-4には流動深に関する厳密解と実験値が示してある。図からわかるように両者はよく対応している。また、近似解についても実験値との比較を行なった結果、両者の対応はよいものの、厳密解の方が適合性は優れていた。比較のため平均粒径を用いて一樣砂の構成則¹⁾によって流動深を計算してみると、総じて計算値の方が実験値より大きくなり、抵抗が大きめに算定された。

4. おわりに 本報では2粒径かなる混合砂を対象とした解析にとどまったが、今後、より一般的な混合砂かなる流れについても理論的、実験的に検討してゆくつもりである。

参考文献 1) 江頭・芦田・矢島・高浜: 土石流の構成則に関する研究、京大防災年報、32号B-2、1989