

II-271

混合砂からなる土石流の流動機構

砂防・地すべり技術センター 正員○高濱淳一郎

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

1.はじめに 一様砂を対象として導かれた江頭・芦田ら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次元等流状態における流速分布及び濃度分布を測定し、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・芦田ら¹⁾の議論にしたがって評価する。すなわち $\Phi = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ (1) $\Phi = \Phi_y + \Phi_f + \Phi_g$ (2) $\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial p_w}{\partial z} + \frac{\partial p_s}{\partial z} + \frac{\partial p_d}{\partial z}$ (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 は粒子衝突にともなう圧力である。

ここで、江頭・芦田ら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。

$$\ell_f = \sqrt{k_f} \left(\frac{1-c_t}{c_t} \right)^{1/3} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k/c_t}{d_k^3} \right)^{-1/3} \quad (4) \quad \ell_g = \left(\sum_{k=1}^n \frac{\pi/6}{c_k/d_k^3} \right)^{1/3} \quad (5)$$

図-2及び式(4)、(5)より、応力を江頭・芦田ら¹⁾が用いた方法にしたがって評価すれば、 $\tau = p_s \tan \phi_s + \rho k_f \frac{(1-c_t)^{5/3}}{c_t^{2/3}} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k/c_t}{d_k^3} \right)^{-2/3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$

$$+ k_g (1-e^2) \sigma \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{2c_i c_j / c_t^2}{d_i^3 + d_j^3} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k/c_t}{d_k^3} \right)^{-5/3} c_t^{1/3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (6)$$

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

$$+ k_g e^2 \sigma \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{2c_i c_j / c_t^2}{d_i^3 + d_j^3} \left(\sum_{k=1}^n \frac{c_k/c_t}{d_k^3} \right)^{-5/3} c_t^{1/3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

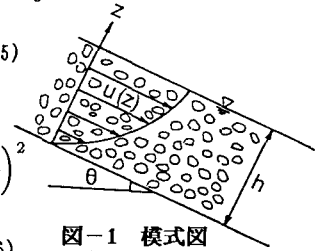


図-1 模式図

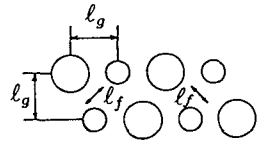


図-2 粒子配列モデル

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。

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

ここに、 $u' = u/\sqrt{gh}$ 、 $z' = z/h$

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

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

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

3. 適用例 図-3には2粒径

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

からなる混合砂の流速・濃度分布の実験値と厳密解（式(8)、(9)の連立解）の一例が示されている。流速分布につ

いては、近似解（式(8)を各粒径の濃度を一様として計算）も示してある。

計算に用いたパラメータは $\sigma = 2.65$ 、

$\phi_s = 38.5^\circ$, $e = 0.85$ である。図中

には小粒子、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、混

合砂全体に関する実験値は四角で示している。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

$\theta = 25^\circ$ においてはほぼ一様であり、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様であったが、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様で、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

の濃度は順勾配の傾向が顕著になり、大粒子の濃度は図-3に

示すように中ぶくらの分布形となり、分級は顕著になってゆく。

また、流動深に関する近似解及び厳密解を実験値と比較し

てみると、近似解、厳密解ともに実験値との対応はよく、厳密

解の方が適合性は優れていた。

実験に用いた7種類の混合砂をそれぞれ4粒径階に分割し、構

成則の適用性を調べてみる。図-4にはこのように分布形を考

慮して計算した流動深に関する近似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。

図-5には比較のために平均粒径を用いて一様砂の構成則¹⁾

によって計算した流動深と実験値が示してある。図からわかる

ように、全般的に計算値の方が実験値より大きくなっており、

平均粒径を用いた場合には抵抗が大きめに算定される。

4. おわりに 今後、広い粒径範囲からなる混合砂の流れにつ

いて、実験的、理論的に検討を進めていくつもりである。

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

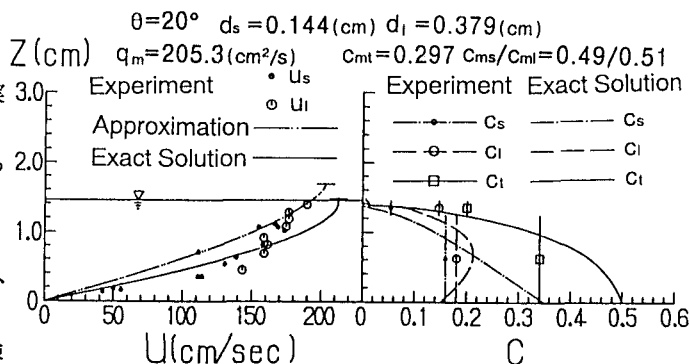


図-3 流速・濃度分布に関する実験値及び理論値

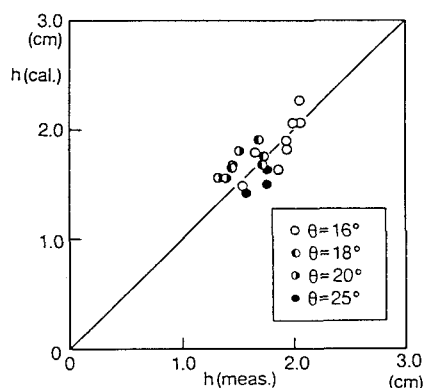


図-4 流動深に関する実験値及び近似解

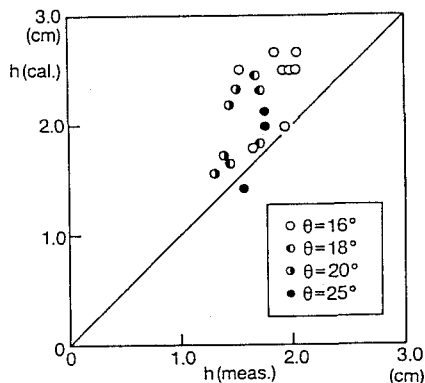


図-5 流動深に関する実験値及び平均粒径を用いた計算値