

混合粒径からなる土石流の流速および濃度分布に関する数値計算

京都府立大学大学院 ○宮下剛

京都府立大学 高濱淳一郎

1. はじめに

土石流は様々な粒径の砂礫で構成されており、石礫型土石流では逆グレーディングによって流速の速い流れの表面に大きな礫が集まることで、先頭部に巨礫が集中し、構造物に甚大な被害をもたらす。現在の土石流を対象としたシミュレーションでは一様粒径を対象とした構成則に基づいており、混合粒径を対象とする場合は、平均粒径を用いて実施されている。混合粒径土石流に関する研究には、2 粒径の土石流の先頭部において各粒径の土砂濃度の時間変化を検証した例^{1),2)}があるが、土砂濃度の鉛直分布に関する研究は少ない。

本研究では、固定床上の 2 粒径の土石流の水路実験³⁾によって得られた流速および濃度の鉛直分布のデータの持つ特徴から大粒径の濃度分布を一様濃度とみなし、江頭ら³⁾によって提案された混合粒径土石流の構成則を用いて、計算した流速分布から流動深を求め、水路実験結果と比較し、妥当性の検証を行った。

2. 混合粒径土石流の構成則への拡張

土石流の流速および濃度の鉛直分布は定常状態を対象とした構成則をもとにして得られる。まず、一様粒径土石流の構成則⁴⁾を基に導かれた混合粒径土石流の構成則³⁾を以下に示す。粒子による圧力に関しては江頭らの議論⁴⁾を導入している。

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

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

$$p = \rho g (h - z) \cos \theta + (\sigma - \rho) \left(\frac{c_t}{c_*} \right)^{1/5} g \cos \theta \int_z^h c_t dz$$

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

ここに、 σ : 砂粒子の密度、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 ϕ_s : 砂粒子の摩擦角、 d : 粒径、 k_g, k_f : 実験定数
 c_t : 砂礫全体の体積濃度、 c_* : 静止堆積層の体積濃度
 e : 反発係数 h : 流動深、 c_i, c_j : 各粒径の濃度、

d_i, d_j : 各粒径の粒径 である。

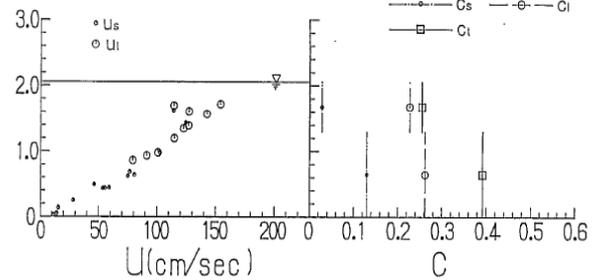
3. 固定床上の 2 粒径の土石流の水路実験³⁾

本研究のデータとして用いた実験水路³⁾は幅 10.5cm、長さ 6m の水路で下流側 1m には土石流を鉛直方向に分割して採取できる装置を取り付けたものである。河床に 0.263cm の砂粒子を張り付けた粗度を設けた固定床水路で単位幅流量が $200 \text{ cm}^2/\text{s}$ となるように上流から一定量の給水と給砂を行い、平衡状態を得たのち、下の表—1 のように小粒径と大粒径の輸送濃度 c_{ms}, c_{ml} を変え、実験データとした。

表—1 実験条件の例

RunNo.	θ (deg)	c_{mt}	c_{ms}	c_{ml}	c_{ms}/c_{ml}
1-1-1	16	0.302	0.302	0.000	1.00/0.00
1-1-2		0.303	0.230	0.073	0.75/0.24
1-1-3		0.297	0.146	0.151	0.49/0.51
1-1-4		0.300	0.078	0.224	0.25/0.75
1-1-5		0.301	0.000	0.301	0.00/1.00

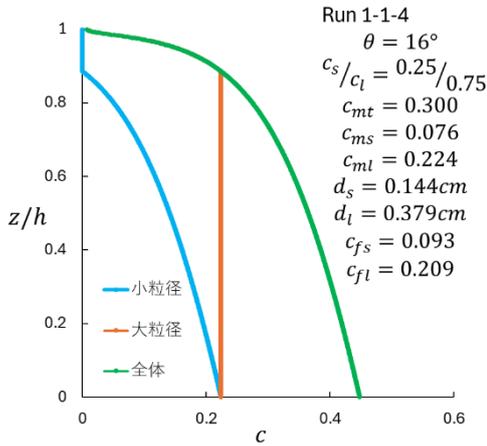
共通の条件として小粒径の粒径 $d_s = 0.144 \text{ cm}$ 、大粒径の粒径 $d_l = 0.379 \text{ cm}$ 、である。加えて、水路勾配を $\theta = 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ と変え、実験を行った。

図—1 流速および濃度分布の実験値(Run1-1-4)³⁾

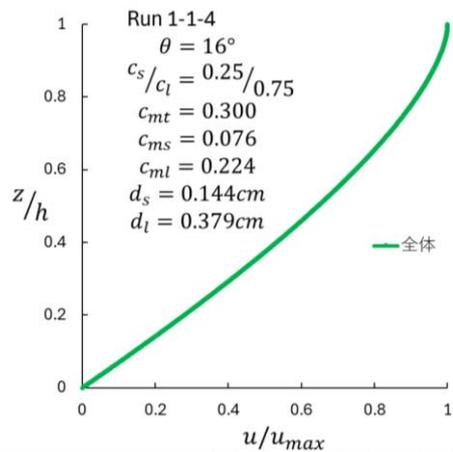
図—1 は実験結果の一例であり、すべての実験を通して、小粒径と砂礫全体の濃度分布は河床から自由表面に向かって減少する順勾配となっており、大粒径の濃度分布はほぼ一様となっていた。

4. 2 粒径の土石流の流速および濃度分布に関する数値計算

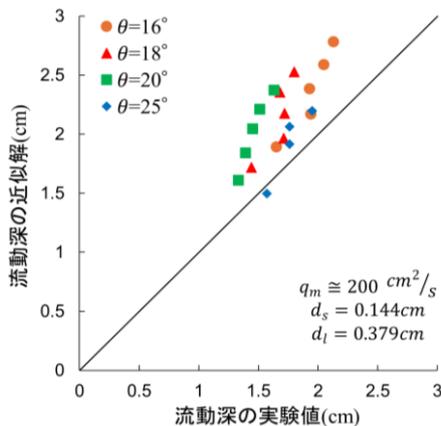
2 粒径の土石流の流速および濃度分布を以下の方法で近似的に計算した。まず、水路実験で得られた全粒径に対する輸送濃度を満たすように砂礫全体の濃度分布を一様粒径の構成則⁴⁾から数値計算した。ここで、一様粒径の濃度分布式は粒径の影響を受けない。つぎに、図—1 に示した実験結果の傾向から 2 粒径の濃度分布について大粒径の



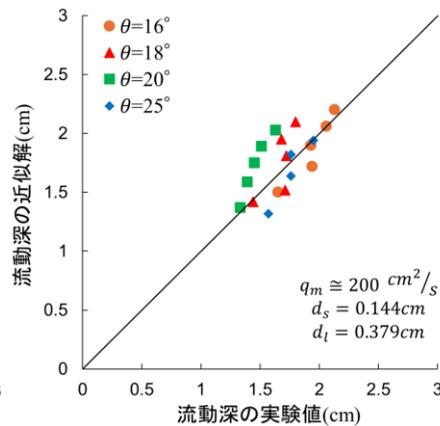
図—2 各粒径の濃度分布の近似解



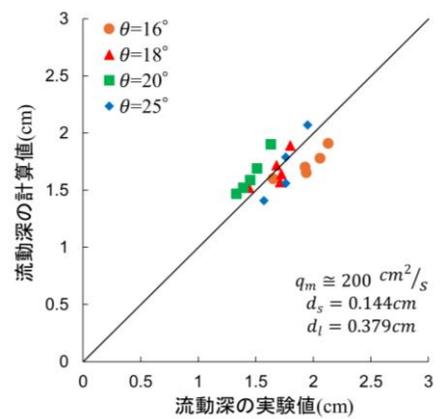
図—3 図—2 の濃度分布から求めた流速分布



図—4 流動深に関する実験値と流動深の近似解 1 に関する比較



図—5 流動深に関する実験値と流動深の近似解 2 に関する比較



図—6 流動深に関する実験値と流動深の計算値に関する比較

濃度の扱いについては、過去の実験³⁾から大粒径の濃度を一様に与え、残りを小粒径の濃度として与えて、この濃度分布から混合粒径土石流の構成則を用いて流速分布を計算した。図—2 図—3 は 2 粒径の土石流の濃度分布と流速分布である。(cf: 輸送濃度の計算値)

得られた濃度分布・流速分布の計算値は実験結果を概ね満たしていることがわかる。

次に流動深を比較する。図—4 は流動深に関する実験値と一様粒径の流速分布の近似解に輸送濃度を用いた平均粒径 d_m を適用した流動深(近似解 1)に関する比較である。図—5 は流動深に関する実験値と一様粒径の構成則による濃度分布に平均粒径 d_m を適用して計算した流動深(近似解 2)に関する比較である。図—6 は流動深に関する実験値と 2 粒径の濃度分布に混合粒径の構成則を適用し得られた流動深(計算値)に関する比較である。一様粒径の濃度分布式を用いた場合も、実験を説明できているようである。しかし、図—6 の流動深の計算値は各粒径の濃度分布を求めているため逆グレーディングも説明できている。

5. まとめ・展望

本研究では 2 粒径からなる土石流の流速分布・流動深を大粒径の濃度を一様として与え、残りを小粒径の濃度とする近似的な扱いとしたが、計算結果は実験結果と良好な一致を示した。

今後は混合粒径土石流の構成則を用いて、流速分布・濃度分布に関する厳密解の計算、および移動床における混合粒径土石流の実験等を実施することで、妥当性の検証を行い、今後の混合粒径土石流の研究の発展に寄与したい。

参考文献

- 1)岩田ら(2013)：混合粒径土石流における分級現象が流動特性に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.66，No.3，p.13-23
- 2)和田ら(2015)：土石流先頭部における大粒子集積に影響を及ぼす要素に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.67，No.6，p.56-63
- 3)江頭ら(1991)：土石流に及ぼす混合砂の影響，第 40 回砂防学会研究発表会概要集，p.2-5
- 4)江頭ら(1997)：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，第 41 巻，p.789-794