

二粒径からなる土石流における小粒子の挙動のモデル化

宇都宮大学農学部 ○酒井 佑一

東京大学大学院農学生命科学研究科 堀田 紀文

1. はじめに

一般的に土石流の流動機構は、均一粒径の粒子からなる流れをもとにモデル化された構成則によって記述される。一方、現地で発生する土石流は幅広い粒度分布からなり、混合粒径の効果により均一粒径の場合に比べて流動機構は複雑化する。混合粒径の効果としては、主に分級現象や細粒成分の液相化現象が知られている。混合粒径の効果を単純化して、大小二粒径からなる流れを考えると、小粒子の粒径が比較的大きい場合は固相として振舞い、流下に従って分級を生じるが、比較的小さい場合は間隙水の乱れにより液相化すると考えられる。このような小粒子の挙動の変化は、小粒子の粒径である程度決まると考えられるが、その条件は十分には明らかにされていない。

ここで、均一粒径からなる土石流では、相対水深が大きくなるにつれ、粒子の挙動が層流状態から乱流状態に移移することが分かっている。この際、遷移領域の流れでは下層に層流層、上層に乱流層からなる二層構造をもつことが指摘されており、二層モデルによって表現されている¹⁾。本研究では、二粒径からなる土石流を対象に、均一粒径からなる土石流の二層モデルの考え方を応用することで小粒子の挙動をモデル化し、既往の実験データと比較することで検証する。

2. 均一粒径からなる土石流の二層モデル

均一粒径からなる土石流において、層流から乱流への流れの遷移は以下のように定義される土石流のレイノルズ数を用いて整理できる²⁾。

$$Re_D = \frac{\rho_m / \rho}{K(c)} \left(\frac{h}{d} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 ρ_m は土石流の密度、 ρ は水の密度、 $K(c)$ は土砂濃度 c の関数、 h は流動深、 d は粒径である。既往の実験において限界レイノルズ数 $Re_{Dc} = 3000$ を超えると層流からの遷移が始まる²⁾。遷移域の流れに対しては、下層に層流層、上層に乱流層からなる二層モデル（図 1）によって表現されており、清水乱流の粘性底層とのアナロジーから、下層の層流層の厚さ（以降、粘性底層厚とする） δ に関する無次元数が以下のように定義される¹⁾。

$$N_\delta = \frac{\rho_m / \rho}{K(c)} \left(\frac{\delta}{d} \right)^2 \quad (2)$$

N_δ が一意に決まれば δ を決定できるが、ここでは、ちょうど $\delta = h$ のとき $N_\delta = Re_{Dc}$ とみなせることから $N_\delta = 3000$ とする。 $N_\delta = 3000$ のとき、一般的な土石流の土砂濃度の範囲で $\delta/d = 20 \sim 30$ 程度となる。つまり、 δ は h に依存せず、ほぼ d によって決まる。このとき、流動深に占める粘性底層厚の割合は、 $\delta/h \approx 20 d/h$ と表される。 $\delta/h > 1$ であれば全層が層流となり、 $\delta/h < 1$ ならば上層に乱流層が生じることになる。

3. 二粒径からなる土石流における小粒子の挙動のモデル

ここでは、二粒径からなる土石流において定常状態の流れを対象とする。また、大粒子は常に固相として振る舞うような粒径を想定する。二粒径からなる土石流において、液相化の影響を一旦無視すると、基本的には分級により下層に小粒子が卓越する層が生じ、上層に大粒子が卓越する層が生じると考えられる。実際の分級では、定常状態においても完全に二層に分かれるわけではなく、両層の間に混合層も生じると考えられる。そのような状態でも卓越する粒子の粒径によってその層の応力が決まり、上層に大粒子層、下層に小粒子層からなる二層モデルによ

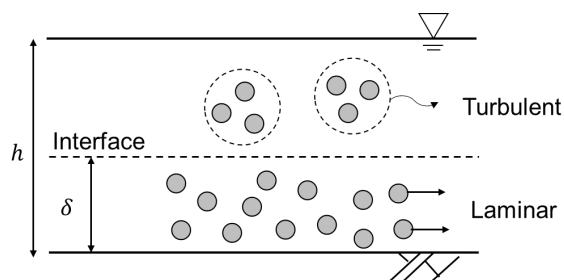


図 1 均一粒径からなる土石流の二層モデル

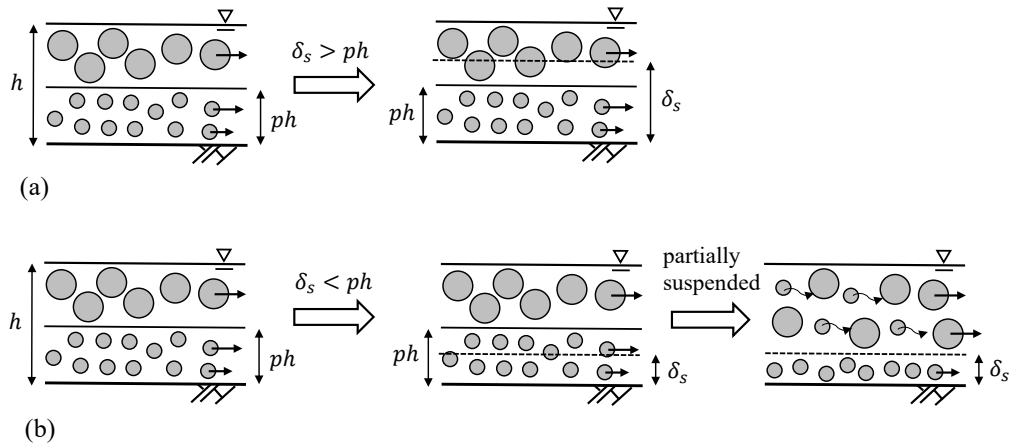


図2 二粒径土石流における小粒子の挙動のモデル：(a) $\delta_s > ph$ の場合は分級、(b) $\delta_s < ph$ の場合は液相化

て近似的に表現できることが指摘されている³⁾。そのため、ここでは分級によって理想的に上層に大粒子層、下層に小粒子層のそれぞれ均一粒径からなる二層に分かれた状態を想定する(図2)。このとき、大粒子と小粒子の混合比を $(1-p):p$ として、鉛直方向に濃度が一定と仮定すると、下層の小粒子層の厚さは ph となる。

この下層の小粒子層が層流状態を維持できるか、もしくは乱れの影響を受けて液相化するかの検討に、均一粒径からなる土石流の二層モデルの考え方を応用する。小粒子からなる流れの粘性底層厚を δ_s とすると、 δ_s は小粒子の粒径 d_s でほぼ決まり、 $\delta_s/d_s \approx 20$ となる。ここで、 $\delta_s > ph$ の場合は、小粒子層が粘性底層内に収まり、層流状態を維持できると考えられる(図2a)。一方、 $\delta_s < ph$ の場合、小粒子層のうち粘性底層内では層流状態を維持できるが、残りの部分は乱れの影響を受けて液相化し、大粒子の隙間に浮遊すると考えられる(図2b)。以上の考え方をもとにすると、液相化割合(小粒子の濃度 C_s のうち液相化した粒子の濃度 C_f の割合)を求めるモデルは、以下のように表される。

$$\frac{C_f}{C_s} = \frac{ph - \delta_s}{ph} = 1 - \frac{1}{p} \cdot \frac{\delta_s}{h} \approx 1 - \frac{1}{p} \cdot \frac{20d_s}{h} \quad (3)$$

(3)式では、小粒子の相対水深 h/d_s に加えて、既往研究⁴⁾での指摘のとおり、混合比 p にも依存する形になっている。

以上のモデルを検証するため、二粒径からなる土石流の既往実験データ⁵⁾に適用する。この実験では、平衡勾配を形成した移動床上の流れに対して、平衡濃度式を適用することでみかけの間隙流体密度を計算し、液相化割合を求めている。既往実験データの液相化割合と(3)式を比較した結果を図3に示す。これをみると、(3)式で表現されている液相化割合の p 依存性については、実験データにおいて明瞭な関係があらわれていないものの、実験データの h/d_s 依存性は(3)式によりよく表現されている。実験データと(3)式での相違点については、モデル自体の仮定の影響だけでなく、移動床上の流れでは流動深の正確な測定が難しいことや、土砂濃度が鉛直方向に大きく変化することなどが影響している可能性もある。これらについては追加の検討が必要であるものの、本研究で提示したモデルは、小粒子の液相化割合の推定にある程度の有効性を持つものと考えられる。

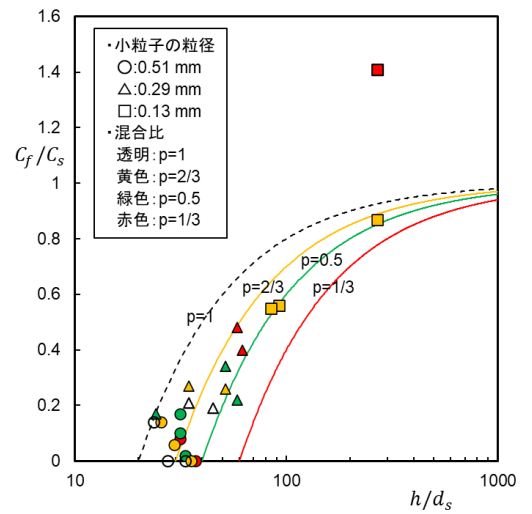


図3 既往実験データの液相化割合と(3)式の比較(大粒子径はすべて2.8 mm)

参考文献：1) 伊藤ら (2007), 水工学論文集, 51, 895–900. 2) 酒井ら (2021), 砂防学会研究発表会, P2-67. 3) 山野ら (1985), 土木学会論文集, 357, 25–34. 4) Sakai et al. (2019), J. Hydraul. Eng., 145(5), 06019004. 5) 中谷ら (2018), 砂防学会誌, 70(6), 3–11.