

京都大学 大学院 学生員 八木秀樹
京都大学防災研究所 正会員 高橋 保

1. はじめに

土石流の流動時には、大きな岩石が流れの表面から相当部分露出して流れていく状況が観察され、岩塊が浮遊して流れるという表現がよく使われる。従来も巨礫がどうして輸送されるのか、またどうして浮いたように見えるのかといった問題に対して¹⁾、2,3の研究がなされてきた。ここではダイラタント流体モデルによる解析を試み、あわせて実験的検討を行なう。

2. ダイラタント流体モデルによる解析

図1のように代表粒径 d 、濃度 Cd 、勾配 θ の定常的な土石流に直径 D の球形をした岩塊が吃水 l で浮かんでいる状態を考へる。このとき岩塊に作用する流れと直角方向の力は、岩塊がその底面で土石流を構成する粒径 d の粒子と衝突することによって受ける上向きの反発力と上向きの浮力および下向きの自重である。粒径 d の粒子が粒径 D の粒子に一回衝突することによって及ぼす力は、相対速度を δU とすると、

$$\frac{2r}{1+r} \frac{\pi}{6} \sigma d^3 \delta U \cos \alpha \quad \text{--- (1)}$$

である。ここで、 $r=(D/d)^3$ 、 σ ：粒径 D 、 d の粒子の密度、 α ：衝突条件に基づく角度である。粒径 D の粒子と粒径 d の粒子との単位時間あたりの衝突回数は、粒径 D の粒子の衝突に対する有効面積を A とすれば、

$$(f(\lambda) \delta U / s) \left(\frac{1}{1+s} \right)^2 A \quad \text{--- (2)}$$

とかけると、ここで S ：土石流の平均粒子間距離、 $f(\lambda)$ ： λ の関数、 λ ：線濃度で $\lambda=d/s$ である。 D 粒子の移動速度を $l/2$ の深さの点の土石流速度に等しいと仮定すると

$$\delta U = \left(\frac{l}{2} + s + \frac{d}{2} \right) \frac{du}{dy} = \left(\frac{l}{2} + \frac{d}{2} + \frac{d}{2} \right) \frac{du}{dy} \quad \text{--- (3)}$$

またこのような相対速度で衝突する粒径 D の粒子の有効底面積が、吃水 $l/2$ での断面の直径 B と粒子間距離 S の和を一边とする正方形で示されると仮定すると $B = D \sqrt{1 - (1 - l/b)^2}$ であることから

$$A = \{ D \sqrt{1 - (1 - l/b)^2} + S \}^2 \quad \text{--- (4)} \quad \text{となる。}$$

したがって1個の粒径 D の粒子に作用する力は、(1)と(2)をかけたあわせて

$$f = \frac{2r}{1+r} \frac{\pi}{6} \sigma \cos \alpha \cdot \lambda f(\lambda) D^2 \left\{ \frac{1 - (1 - l/b)^2 + \frac{1}{4} \frac{l^2}{b^2}}{1 + \frac{1}{\lambda}} \right\}^2 \left(\frac{l}{2} + \frac{d}{2} + \frac{d}{2} \right)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad \text{--- (6)}$$

巨礫を含まない場合には、 $D=d$ 、 $l=d$ 、 $r=1$ とすることができて

$$f_0 = \frac{\pi}{6} \sigma \cos \alpha \cdot \lambda f(\lambda) d^4 \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad \text{--- (7)}$$

Baginold²⁾によれば、 $f(\lambda) \propto \lambda$ であり、比例定数を Q_0 とすると

$$f_0 = Q_0 \sigma \cos \alpha \cdot \lambda^2 d^4 \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad \text{--- (8)}$$

となる。したがって単位面積あたりの分散圧力は

$$P_0 = \frac{f_0}{d^2(1+\lambda)^2} = Q_0 \sigma \cos \alpha \cdot \lambda^2 d^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad \text{--- (9)}$$

P_0 は底面が単位面積をもち、高さが $d(1+1/\lambda)$ の直方体に含まれる粒子の水平重量とつりあっているから

$$P_0 = Q_0 (\sigma - \rho) d (1 + 1/\lambda) g \cos \theta \quad \text{--- (10)}$$

が成立する。ここで ρ は水の密度、 g は重力加速度である。(9)、(10)式を用いると(6)式は次のようにかきかえられる。

$$f = \frac{2r}{1+r} \cdot C_d (\sigma - \rho) d^3 \left(\frac{l}{2d} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2} \right)^2 \frac{\left\{ \frac{D}{2d} \sqrt{1 - (1 - l/b)^2} + \frac{1}{\lambda} \right\}^2}{1 + \frac{1}{\lambda}} g \cos \theta \quad \text{--- (11)}$$

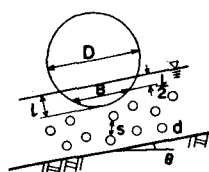


図1. 記号説明図

重力から浮力を差し引いた粒径 D の球の、流れに垂直方向の重さ F は、

$$F = \frac{\pi}{6} \cdot \rho D^3 g \cos \theta - \frac{\pi}{6} \rho D^3 g \cos \theta \left[\frac{2\theta}{\pi} - \frac{1}{3} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{2\theta}{\pi} \right)^3 \right\} \right] \quad (12)$$

とかけろ。↑と F が釣り合うとき浮いて流れる。その条件を C_d をパラメーターにとり、 D/d と ℓ/d の関係として求めて図2に実線で表わした。なお $D = d$ のとき粒子の上下運動を生じないための条件として

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{\frac{\pi}{6}}{C_d} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \quad (13)$$

が必要である。これは Bagmold による $1/\lambda$ の定義

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{C_*}{C_d} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \quad (14)$$

とは多少異なっているが、 C_* (静止堆積層の砂礫の岩礫濃度) は $\pi/6$ に近いのでほぼこの関係は成立していると考えられる。

図2によれば、土石流中の代表粒径 d が一定のとき巨礫の粒径 D が大きいほど浮く部分の割合が多いという結果になる。ただし D/d の大きい範囲では D が大きくなるほど ℓ の値が大きくなるので、流動厚さが小さいときには輸送される最大粒径にも限界があることになる。

3. 実験による検証

実験水路は幅 20cm、長さ 17m の直線水路で、1側面がガラス張りになっている。水路底には粗度として粒径 4mm の礫を貼付してある。実験手順は以下のとおりである。ほぼ均一粒径 $d_{50} = 0.38\text{cm}$ ($\sigma = 2.618/\text{cm}^2$) の砂と清水を用いて水路上部で土石流を発生させ、下流部でその中へ3種類の粒径のビー玉を巨礫として5個ずつ入れて、その挙動を16ミリツネカメラを用いて毎秒 200コマで側面から記録した。なお土石流の総流量はすべて 2ℓ、岩礫濃度 C_d は 0.3, 0.4, 0.5 の3種類で水路勾配を 18° と 20° として全部で5ケースの実験を行なった。ビー玉の粒径は 2.45cm, 1.67cm, 1.31cm の3種類でその密度は 2.60g/cm^3 であった。

実験によると、ビー玉が遊蕩して流れているように見えたが、粒径の小さなもののなかには水面上にあらわれない場合もあった。フィルム解析により水深と吃水を読みとった。水深は各ケースとも約 2cm であった。吃水は各実験ケースごとに平均値をとり図2に示した。この図によると巨礫の粒径と土石流の代表粒径の比 D/d の大きい場合は理論曲線と実験値が比較的良好に一致しているが、 D/d の小さい場合は理論値よりも沈んでいる部分が多くなっている。全体的には D/d が大きいほど ℓ/d が小さくなる傾向が認められる。また今回の実験の範囲では土石流濃度と ℓ/d の間に一義的な関係は認められない。なお水深がビー玉の粒径に比して比較的小さいためにビー玉が底面と衝突して水面から跳び出すことや、乾波列の発生で土石流が非定常になる場合があり、これらを読みとりから除外した。このためデータの数が少ないので多少信頼性に欠ける点があることを付記する。

4. おわりに

本研究では、土石流による巨礫の流送機構をタイラント流体モデルを用いて解析し、粒径の大きい石ほど浮上している部分の割合が多いという結論を得た。その傾向は実験でも認められたが、実験ケースが少ない等の問題があり、この点を引き続いて研究を進める予定である。

参考文献

- 1) たとえば J.D. Rodine, A.M. Johnson; The ability of debris, heavily freighted with coarse clastic materials, to flow on gentle slopes, *Sedimentology*, 23, 1976
- 2) R.A. Bagmold; Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, *Proc. Roy. Soc. London*, A 225, 1954

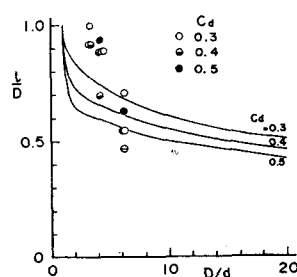


図2. D/d と ℓ/d の関係