

1. はじめに

土石流に関する研究を進める上で水路実験は有用な手段とされて多く行われているにも関わらず、相似則について検討された例は少ない。特に流れを取り扱う上で重要なレイノルズ数に関しては、その相似性は勿論、流れが層流から乱流へと遷移する際どのように変化するのも明確になってはいない。

以上を踏まえ、本研究では土石流におけるレイノルズ数をひとまず単純に水とのアナロジーから求めて検討を行った。

2. 土石流の層流と乱流

土石流における層流と乱流を、構成粒子の流線に着目して図1のように考える。現在、層流状態の土石流に関しては従来からの構成則の研究¹⁾によってある程度の知見が得られている。しかしながら、流れがどの領域で乱流となるかなどは明らかになっていない。

レイノルズ数についての検討を行うにあたって、土石流の流れを概観するために既往の水路実験のレビューを行った²⁾。図2は抵抗係数 f と相対水深 h/d (d は構成粒子の代表粒径)の関係を示している。開水路において f は

$$f = \frac{2ghi}{U_0^2} \tag{1}$$

と表せる。ここで g は重力加速度、 h は水深、 i は水路勾配、 U_0 は平均流速である。また、芦田ら³⁾によれば、土石流の構成則に基づいて f は

$$f = \frac{25}{4} \left\{ k_g \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) c^{1/3} + k_f \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}} \right\} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \tag{2}$$

と相対水深の2乗に反比例する形で示される。ここで k_g は係数で実験から0.0828、 σ は粒子密度、 ρ は清水の密度、 e は粒子の反発係数、 c は濃度、 k_f は形状係数である。(2)式に各値を代入して図2に示し、同時に清水の乱流における f と相対水深 h/ks (ks は粗度)も示した。

図2から、全体的に相対水深が大きくなるにつれ f が小さくなっていくことが分かる。相対水深の小さいところでは式(2)によって示される領域に分布するが、相対水深が大きくなるにつれて清水の乱流の挙動に近づく。また、その際必ずしも濃度が小さい訳ではない。

3. 土石流におけるレイノルズ数

土石流のせん断応力は、江頭ら¹⁾によれば

$$\tau = \tau_s + \tau_d + \tau_f \tag{3}$$

となり、ここで τ_s は粒子の接触によるせん断応力、 τ_d は粒子の衝突によって生じるせん断応力、 τ_f は間隙流体におけるレイノルズ応力である。式(3)は結局 $\tau = \mu'(du/dz)^2$ という形に整理でき、 μ' は

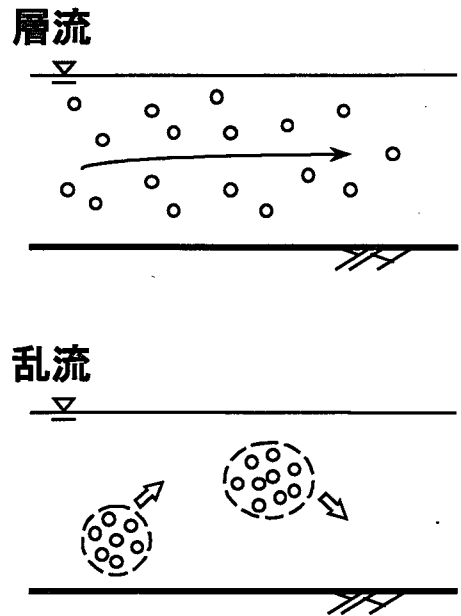


図1 土石流の層流・乱流の概念図

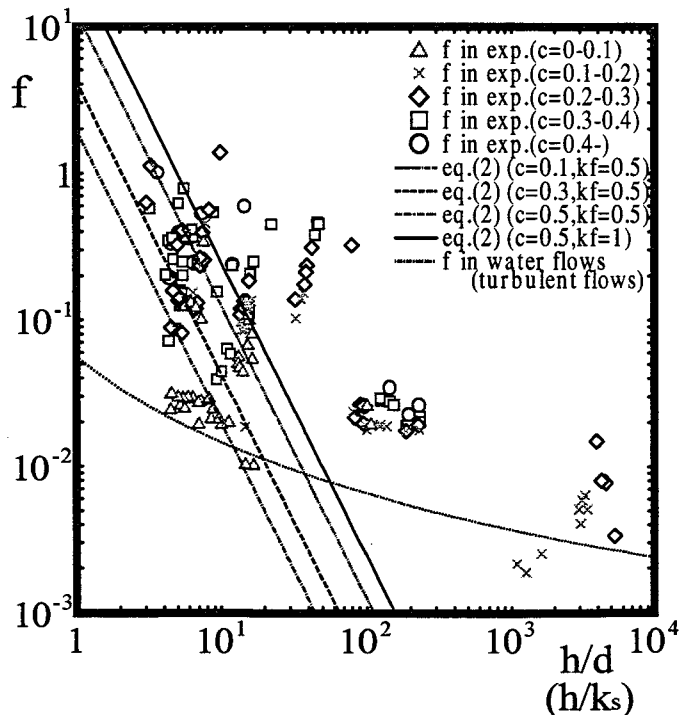


図2 抵抗係数 f と相対水深による土石流の領域分布図

$$\mu' = k_g \sigma e^2 d^2 c^{1/3} \frac{(c/c_*)^{1/5}}{1-(c/c_*)^{1/5}} \tan \phi_s + k_g \sigma (1-e^2) d^2 c^{1/3} + k_f \rho \frac{(1-c)^{3/5}}{c^{2/3}} d^2 \quad (4)$$

となる。ただし c_* は堆積層の濃度で、 $\tan \phi_s$ は砂粒子の内部摩擦角である。式(3)において流動に関与するのは τ_d と τ_f のみであるとの考えもあり、式(2)も $f = (\tau - \tau_s)_{z=0} / \rho v^2$ として求められている。

ここでは、 μ' を土石流の粘性係数として取り扱ってレイノルズ数を定める。バッキンガムの π 定理に基づき、水流でのレイノルズ数に倣って μ' 、 U_0 、 ρ_m (土石流の密度)、 h から無次元数を求めると

$$Re_{s1} = \frac{\rho_m h^2}{\mu'} \quad (5)$$

となる。 μ' の次元が水の粘性係数と異なるため式(5)からは U_0 が消えて、慣性応力と粘性応力の比になっていない。そこで式(5)に無次元速度 U_0/u_* (ただし $u_* = \sqrt{ghi}$) を乗じたものが式(6)である。

$$Re_{s2} = \frac{\rho_m U_0 h}{\mu'} \sqrt{\frac{h}{gi}} \quad (6)$$

水流におけるレイノルズ数とのアナロジーが成り立つなら、土石流のレイノルズ数も層流において $f \sim Re^{-1}$ 、乱流で f は Re に関係無くほぼ一定の値を取ることが期待される。式(5)より f と Re_{s1} の関係を求めると

$$f = \frac{2ghi}{U_0^2} = \frac{2\tau_{z=0}}{\rho_m U_0^2} = \frac{25}{2} Re_{s1}^{-1} \quad (7)$$

となり、理論的には土石流の層流においても $f \sim Re_{s1}^{-1}$ となることが分かる。ただし、式(7)においては流速分布が 3/2 乗則 (固定床での土石流の流速分布) に従うことを仮定している。

4. 実験

上で議論を行った土石流のレイノルズ数について検討するため実験を行った。実験は全長 10m、幅 10cm、勾配 13° の水路において固定床の条件で、 $d_{50} \doteq 3, 1, 0.2\text{mm}$ の 3 種の砂粒子について流量を変えて行っている。また、粗度として路床に約 3mm の砂粒子をはりつけたケースと粗度無しでのケースについても実験を行っている。実験結果から求めた f と Re_{s1} の関係を式(6)を図 3 に示す。実験ケース間のばらつきが大きいですが、各ケースについて見た場合には、おおむね $f \sim Re_{s1}^{-1}$ とみなせる事が分かる。また、 $d_{50} \doteq 0.2\text{mm}$ のケースでは Re_{s1} が大きくなるが f は Re_{s1} に関係無くほぼ一定の値を取る。これはこの領域で流れが乱流であるためだと考えられる。

また、式(6)から f と Re_{s2} の関係を求めると、若干ばらつきは減少するもののほぼ図 3 と同様な結果であった。

5. おわりに

水とのアナロジーから土石流のレイノルズ数を導いて実験結果と比較したところ、流れを統一的に説明するまでには至らなかったがある程度現象を反映していることが分かった。今後さらに考察を加え、より幅広い実験条件により検討していきたい。

参考文献

1)江頭,宮本ら:水工学論文集,第41巻,pp.789-794,1997,2)堀田:平成10年度砂防学会研究発表会概要集,pp.364-365,3)芦田,江頭ら:京大防災研年報,第31号,B-2,pp.411-422,1988

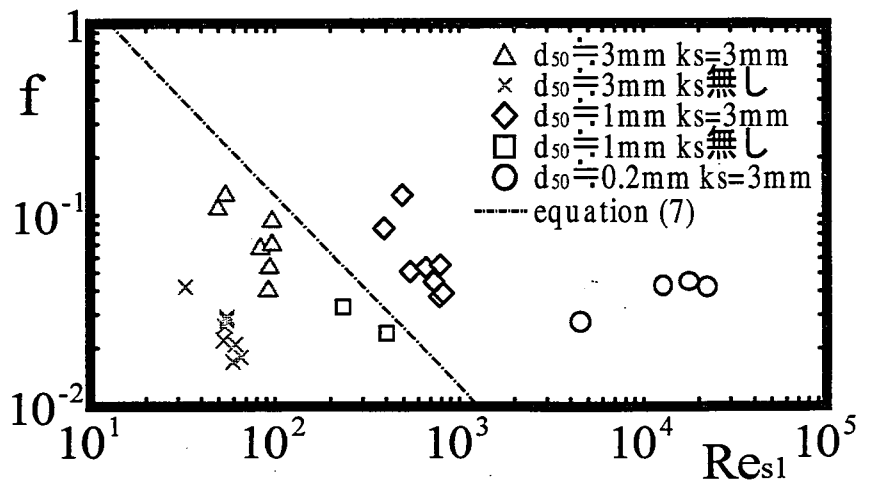


図 3 土石流における抵抗係数と Re_{s1} (式(5))の関係