

東京大学大学院農学生命科学研究所 ○鈴木拓郎
東京大学大学院農学生命科学研究所 堀田紀文

1. はじめに

土石流の構成則は流体内部における粒子の相互作用などを評価することにより提案されている。粒子の相互作用を河床粗度について考えてみると、土石流が発生する山地河川においてはアーマリングによって河床が巨礫で覆われている場合を考えられる。河床条件の違いは力学的観点からみて特に底面付近の粒子の挙動に影響を及ぼし、それが土石流の流動全体にも影響を及ぼすと考えられる。筆者らは粗度の異なる水路における実験によって、固定床上の土石流の流動が粗度の影響を受けることが示しており¹⁾、相対水深(水深／粗度高)の小さい流れにおいて、底面摩擦の増大に伴う摩擦抵抗係数の増大が見られ、流れ中の土砂濃度が高い場合にこの傾向は顕著であることがわかっている。よって、山地河川を流下する土石流や、流路工の土石流に対する効果を今後評価していく上で、粗度が土石流に及ぼす影響のメカニズムを明らかにすることは重要だと見える。そこで、既往の土石流の構成則に関する研究によって得られた知見によって土石流における粗度の取り扱いについて検討を行う。

2. 実験結果における粗度の影響

条件の異なる粗度を用いた水路実験によって、粗度が大きいほど水深が大きい値をとることが明らかになった¹⁾。これは、粗度部分におけるエネルギー散逸の増大が影響していると考えられることから、摩擦損失に対するエネルギー勾配の比で示される摩擦抵抗係数 f を変形し f' を定義して検討を行った。 f' は土石流の構成則²⁾を適用すると次式のように示される。

$$f' = f \cdot \frac{2\rho_m}{25} \left(\frac{h}{d} \right)^2 = \frac{2gh \sin \theta}{U^2} \frac{2\rho_m}{25} \left(\frac{h}{d} \right)^2 = \frac{4\rho_m gh U \sin \theta}{25U^3} \left(\frac{h}{d} \right)^2 = \frac{4}{25} \cdot \frac{1}{U^3} \left(\frac{h}{d} \right)^2 \Phi = K(c) \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$K(c) = \frac{\alpha}{1-\alpha} k_g \sigma \cdot e^2 c^{\frac{1}{3}} \tan \phi_s + k_g \sigma (1-e^2)^{\frac{1}{3}} + \rho \cdot k_f d^2 \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}}, \quad \alpha = (c/c_*)^{1/5} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで g は重力加速度、 h は水深、 θ は水路勾配、 U は断面平均流速、 ρ_m は土石流の密度、 Φ は全層のエネルギー散逸量、 d は粒径、 k_g は係数で実験から 0.0828、 e は粒子の反発係数、 σ は粒子の密度、 c は粒子濃度、 ϕ_s は粒子間の摩擦角、 k_f は粒子間隙の乱れスケールのパラメータ、 c^* は充填状態での粒子堆積層濃度である。式(1)の右辺の誘導にあたっては、 $\rho_m g h U \sin \theta$ は外部から得られるエネルギーであるため、これと等しい Φ を導入し構成則²⁾を適用した。式中の $K(c)$ は同一の材料粒子の条件下においては濃度 c のみの関数となる。この f' は粗度の影響がなければ式(1)にしたがい $K(c)$ と等しくなる。粗度の影響が大きい場合は式(1)中のエネルギー散逸量が増加し、 f' が $K(c)$ より大きな値をとることになるため、粗度の影響の大きさを $K(c)$ からの f' のずれの大きさとしてみることができる。相対水深 h/ks と f' の関係を図-1 に示す。 h/ks が小さいほど粗度の影響が大きく f' と $K(c)$ のずれが大きくなっていて、 h/ks が大きくなるにしたがって粗度の影響が小さくなり $K(c)$ という一定の値に収束していくことが確認できる。また、土砂濃度が高いほどその傾向が顕著であることがわかる。

3. 粗度の影響の評価

3. 1 粗度の定義

清水において底面粗度が流れに与える影響は、対数分布則における粗度高さ(ks)や、マニングの粗度係数、シェジー係数などによって記述される。いずれもレイノルズ数の大きな流れ(乱流)を対象とした際に用いられており、したがって粘性によるエネルギー散逸が無視出来る領域の流れを扱う。また、水流について粗度を考慮する際、例えば摩擦損失係数 f は h/ks (相対水深)の関数となり、エネルギー散逸については底面粗度において生じる成分が支配的である。

これに対して土石流の場合、現在用いられているモデルは連続体の層流として土石流を取り扱うために、水流とのアナロジーでは粗度の影響を説明することが出来ない。むしろ、構成則を導く際の粒子衝突モデル²⁾³⁾と同様の方法によって議論されると考えられる。図-2のように、均一な粒径 d からなる砂礫によって構成される土石流の底面に d より大きい粒径 d_s の砂礫が固定されているとすると、粒子の衝突条件の変化のみ考慮しても、流れ中と比べて、

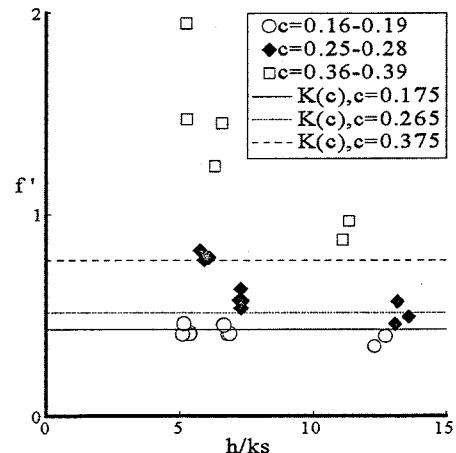


図-1 h/ks と f の関係

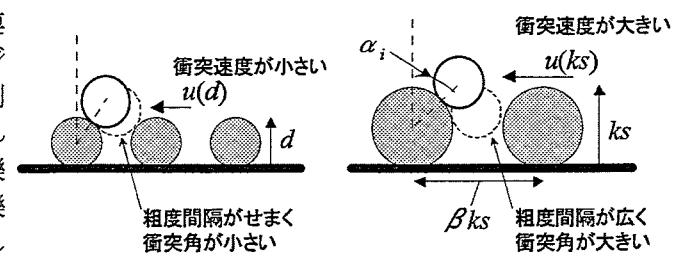


図-3 粗度配列モデル

- (a) 底面近傍の粒子の衝突速度の増大・ $u(ks) > u(d)$ (流速分布形が同一だとして)
 (b) 粗度粒子に対する流動層中の粒子の衝突角 α_i の増大 (底面粒子(=粗度)間隔が広がるため)
 によるエネルギー散逸の増大が生じることが予想される。また、仮に上述のエネルギー散逸のみで土石流における粗度の影響が記述されるとすれば、土石流の粗度は粗度高さ ks と、粗度粒子間距離 βks で定義されることとなる。

3. 2 構成則に基づいた粗度の影響の評価

3. 1 で示した(a)、(b)2つの条件について検討を行う。(a)について土石流の構成則²⁾を導く際に用いられた粒子衝突モデルと同様な方法を用い、以下のような手順で粗度部分を取り扱うことによって、実験結果と比較してどのような結果が得られるかを検証する。

- ① 粗度部分(と底面近傍の粒子)の一層分の衝突・接触によるエネルギー散逸を宮本³⁾と同様の方法で求める。一回の衝突での散逸エネルギー $\phi_{\text{散逸}}$ 、保存エネルギー $\phi_{\text{保存}}$ 、単位時間当たりの衝突回数 N は次式のようになる。

$$\phi_{\text{散逸}} = \frac{1}{2} \left(1 - e^2 \left(\frac{\pi d^3}{6}\right)\right) \sigma (u(ks) \sin \alpha_i)^2 \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$\phi_{\text{保存}} = \frac{1}{2} e^2 \left(\frac{\pi d^3}{6}\right) \sigma (u(ks) \sin \alpha_i)^2 \dots \dots \quad (4) \quad N = \frac{u(ks)}{\beta ks} \dots \dots \quad (5)$$

上式において、流れ中の粒子衝突では $\phi_{\text{散逸}}$ 、 $\phi_{\text{保存}}$ は歪み速度 du/dz の2乗、 N は1乗に比例する³⁾のに対し、粗度部分では $\phi_{\text{散逸}}$ 、 $\phi_{\text{保存}}$ は $u(ks)$ の2乗、 N は1乗に比例する。また N は βks の関数となっている。

- ② 境界を粗度高さ ks とし、 ks より上を土石流の構成則²⁾から求め、①と合わせて全層のエネルギー散逸 Φ とする。
 ③ 水深 h 、濃度 c (水深方向に一定)は与えて、流速分布は3/2乗則を仮定して計算を行う。

- ④ 相対水深 h/ks 、 c を変化させて実験結果との比較を行う。

以上により、図-3のような結果が得られた。図は構成則²⁾によって算出した全層にわたって均一粒径からなる土石流のエネルギー散逸 Φ に対する、上述の二層モデルで算出したエネルギー散逸 Φ' の増分の比 $((\Phi' - \Phi) / \Phi)$ を示したものである。実験結果の解析とは異なり、ここではエネルギー散逸と相対水深 h/ks の関係が示されているが、式(1)にあるように f の誘導にあたり Φ を導入しており、 Φ と f はよく対応したものだといえる。相対水深 h/ks が小さい時エネルギー散逸の増分が大きくなることや、濃度 c が大きくなるとその傾向が強くなる点などは、実験結果とよく対応していると言える。

次に(b)について、衝突角 α_i を変化させた際に、土石流の構成則に基づいて算出した摩擦抵抗係数 f が示す変化を示したのが図-4である。図は、衝突角 α_i を一般に土石流の構成則で採用されている30度を適用したときの摩擦抵抗係数 f を1として、衝突角が変化したときの f の変化 (f') を表している。 α_i が大きくなるにともなって f' も増大していることが見て取れ、流れ中の粒子より大きな粒子が河床に存在し、そこでの衝突角が流れ中より大きくなることによって粗度の影響が現れることが分かる。また、濃度が高いほどその傾向が強くなっている。これは実験結果との対応を支持するものである。

4. おわりに

条件の異なる粗度を用いた水路実験により固定床上の土石流の流動が粗度の影響を受けることが示されていたが、流れ中の砂礫と粗度の相互作用に着目し、構成則とほぼ同様の取り扱いを行うことによって粗度の影響を表現しうることが示唆された。

3. 2 の検討においては、水深、濃度は与えていて、流速は3/2乗則を仮定しているが、エネルギー散逸や摩擦抵抗係数が増大するということは、外部から得られるエネルギーと内部散逸エネルギーがつり合わなくなるということである。定常状態になるには外部から得られるエネルギーと内部散逸エネルギーをつり合わせるように、水深の上昇、濃度分布、流速分布の変化が起こると考えられる。よって、今後は実際に流速分布などを測定する実験を行い、その結果と今回の検討のような条件設定での詳細な計算結果を比較することで、その妥当性について検討を行っていきたい。

5. 参考文献

- 1) 鈴木・堀田：平成14年度砂防学会研究発表会概要集、40-41、2002、2) 江頭・芦田ら：京都大学防災研究所年報、32B-2、487-501、1989、3) 宮本：立命館大学学位論文、39-72、昭和60年9月

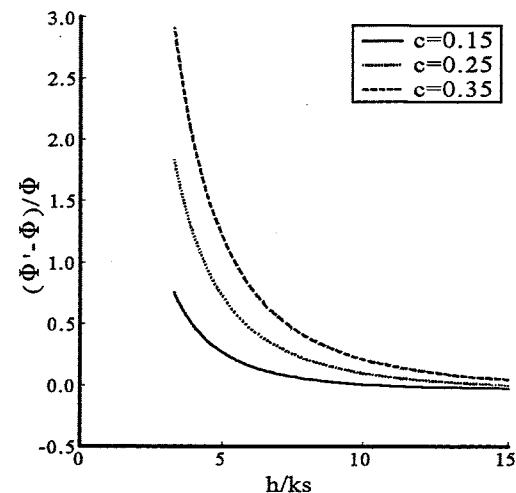


図-3 条件 (a) による計算結果

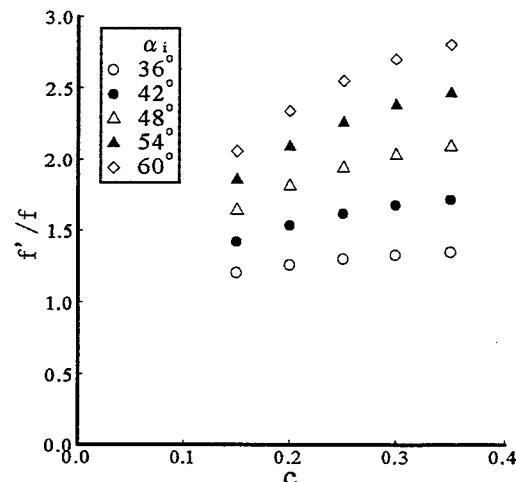


図-4 条件 (b) による計算結果