

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

1. 背景及び目的

現在幅広く用いられている江頭ら¹⁾の土石流の構成則は、流体内部のエネルギー散逸を粒子の非弾性衝突、粒子摩擦、粒子間隙の水の乱れの3つのプロセスから評価し全層に適用しているため、河床粗度など境界条件の影響を評価できない。しかし、山地河川ではアーミングにより河床に巨礫が存在する場合など土石流の流下に伴う河床条件の変化が考えられる。河床条件が異なれば粗度部分における粒子相互作用によるエネルギー散逸機構も異なると考えられる。

以上のような考えから、筆者ら²⁾のこれまでの研究において大きさの異なる3種類の粗度 (ks3, ks5, ks7 : それぞれ平均粒径 d (cm) が 0.294, 0.553, 0.669) を用いた水路実験を行い、その実験結果を摩擦損失に対するエネルギー勾配の比である抵抗係数 f を変形して定義した f' を用いて検討を行った。 f' は実験値より算出される係数であるが、構成則による理論値は $K(c)$ という濃度の関数となるので、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事ができる。この検討より以下のことが明らかとなった。

- ・ 相対水深 (水深/粗度高さ) が小さいほど粗度の影響による底面摩擦抵抗の増大に伴い f' が増大し、相対水深が大きくなると粗度の影響が小さくなり $K(c)$ に収束する。
- ・ この傾向は土砂濃度 c が高いほど顕著である。

この結果は粗度の影響を説明できる流動モデルを構築する必要性を示すものである。そこで本研究では河床粗度上でのエネルギー散逸機構の違いに注目し、粗度部分における粒子の相互作用を従来の構成則と同様に評価してエネルギー散逸式を誘導した。また、これまでの研究で明らかとなった粗度の影響を表現し得るかの検討を行いその妥当性を検証した。

2. 粗度の影響の評価方法

本研究では底面から粗度高さ ks までを粗度層、それより上を上層とする2層モデルを考える。上層には従来の構成則を適用し、粗度層については図1のような粗度配列を考え、次の点に注目してエネルギー散逸式を誘導する。①流れ中の最下層の粒子が粗度粒子に衝突する速度は粗度高さ ks における流速 $u(ks)$ であり、粗度の大きさにより衝突速度が異なる。②粗度が大きいと粗度間隔が大きくなるため、衝突角 α が増大する。

①について、1回の衝突で散逸されるエネルギーは $u(ks)$ の2乗に比例する形で示される。また、単位時間当たりの衝突回数 N は粗度間隔を βks とすれば $u(ks)/\beta ks$ と表せる。これをもとに宮本³⁾と同様の方法で、粒子の非弾性衝突、粒子間摩擦によるエネルギー散逸量を評価する。また、間隙水の乱れによる項は従来の構成則を用いることにする。以上より、粗度層 ($z=0\sim ks$) におけるエネルギー散逸量 Φ_{ks} を誘導すると、次式のように示される。

$$\Phi_{ks} = K_{ks} \cdot u(ks)^3 \quad \dots \text{式(1)}$$

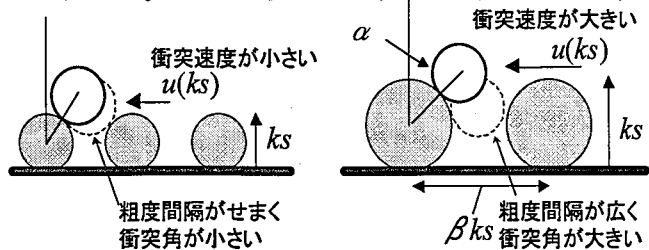


図1 粗度配列モデル

$$K_{ks} = \underbrace{\frac{1}{2} \frac{(c/c_*)^{1/5}}{1-(c/c_*)^{1/5}} e^2 \sin^2 \alpha \cdot \sigma \cdot c \cdot \tan \phi_s}_{\text{粒子間摩擦項}} \frac{1}{\beta^2} + \underbrace{\frac{1}{2} (1-e^2) \sin^2 \alpha \cdot \sigma \cdot c \cdot \frac{1}{\beta}}_{\text{粒子非弾性衝突項}} + \underbrace{\rho k_f d^2 \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}} \frac{1}{ks^2}}_{\text{間隙水乱れ項}} \quad \dots \text{式(2)}$$

ここで、 c_* は充填状態における粒子濃度、 c は粒子濃度、 e は反発係数、 σ は粒子比重、 ϕ_s は粒子の摩擦角、 ρ は水の密度、 d は粒子径、 k_f は係数である。

②について、ks3, ks5, ks7 の粗度高さ ks (cm) はそれぞれ 0.216, 0.405, 0.520、粗度間隔の比 β は 1.87, 1.64、

1.81 である。これより、 $d=0.294\text{cm}$ の砂礫粒子との最大衝突角を算出すると 43.5° 、 51.8° 、 78.0° となる。よって、衝突角 α には ks3、ks5、ks7 の順に大きな値（特に ks7 に関しては大きな値）が適用されると考えられる。

3. 結果及び考察

2①で誘導した式の妥当性を検証するため、 $h=3\text{cm}$ 、 $d=0.294\text{cm}$ という実験条件と同程度の条件下で f' を計算した（図2）。衝突角には構成則で適用している 30° を用いている。 f' はエネルギー散逸量を比として表したものである。実験結果²⁾と比較すると、定量的な評価には至らないが、相対水深 h/ks が小さいほど f' が増大していること、濃度が高いほどその傾向が顕著であることなど実験結果と同様の傾向を表現できていることがわかる。

次に衝突角の設定によりエネルギー散逸量の絶対量の評価が可能であるかについて検討を行う。2層モデルが適用でき、上層が構成則に従っているとすると流量 Q 、 h 、 c の実験結果から $u(ks)$ 、 Φ_{ks} が算出できる。式(1)より、 Φ_{ks} を $u(ks)$ の3乗で割り K_{ks} の値を計算する。 K_{ks} は粗度層のエネルギー散逸量の絶対量を評価する係数である。前述の方法で実験結果から計算した K_{ks} と濃度 c との関係を図3に、式(2)による K_{ks} の計算値を図4に示す。まず実験結果をみると、どの粗度についても濃度の上昇に伴い K_{ks} が増大していることがわかる。そして、その増大傾向は粗度が大きいほど強いことがわかる。 K_{ks} の計算値は、濃度の上昇に伴い大きな値をとることになるが、濃度が大きくなると粒子間摩擦項と粒子衝突項が卓越し間隙水乱れ項が無視できるため、 α が同値の場合は粗度が異なっても濃度の上昇に伴いほぼ一定値に収束することになる。よって、実験結果における粗度による上昇傾向の違いを説明することができない。しかし、 α に大きな値を適用すると K_{ks} の上昇傾向が強くなるため、2②で検討した最大衝突角に応じて α を与えれば実験結果における上昇傾向の違いを説明できることがわかる。理論値と実験値で濃度に対する K_{ks} の変化がずれているが、これは濃度分布の測定が困難なため実験値の濃度軸に輸送濃度を用いているためである。濃度分布を考えれば底面近傍の濃度は輸送濃度よりも大きくなり、図3のプロットは全体的に右へ移動するはずである。以上より、より厳密な定量的評価には濃度分布の検討が必要だが、衝突角の設定により粗度層のエネルギー散逸量を実次元で評価することが可能であることが明らかとなった。

4. まとめ

既存の構成則の枠組みで粗度の影響を評価するために粗度層と上層からなる2層モデルを提案した。そして粗度粒子に対する流れ中の粒子の衝突速度の違いに注目し、粗度層におけるエネルギー散逸式を従来の構成則と同様の方法で誘導した。この式の妥当性を検証したところ、実験結果と同様な粗度の影響の傾向を表現できることがわかった。さらに、この2層モデルに衝突角を導入することにより粗度層におけるエネルギー散逸量を実次元で評価できることが明らかとなった。

5. 参考文献

- 1) 江頭・芦田ら：京都大学防災研究所年報，32B-2，487-501，1989，2) 鈴木・堀田・宮本：砂防学会誌，Vol. 56，No. 2，p. 5-13，2003，3) 宮本：立命館大学学位論文，39-72，昭和60年9月

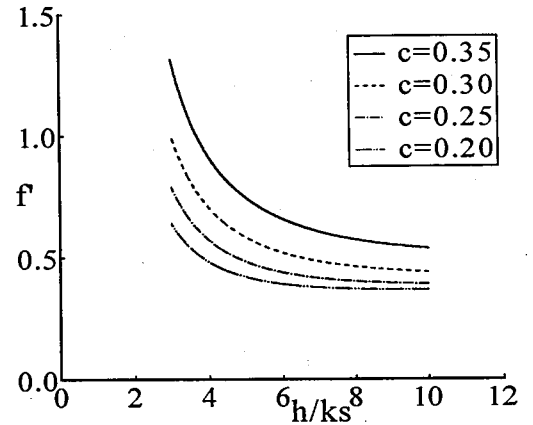


図2 f' 計算値と h/ks の関係

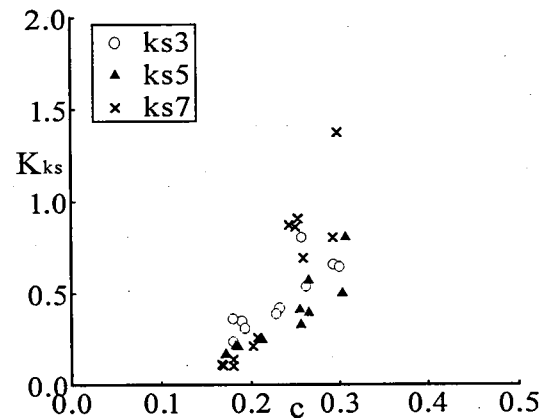


図3 K_{ks} 実験値と濃度の関係

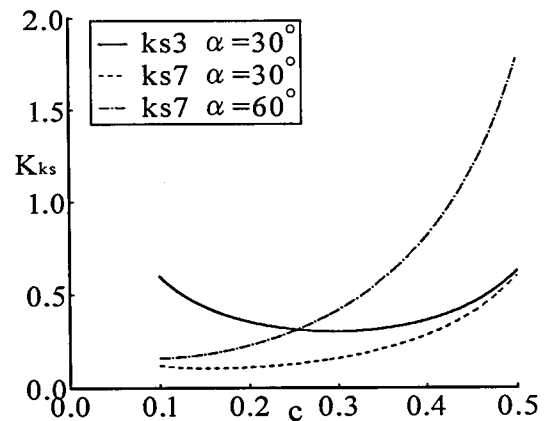


図4 K_{ks} 計算値と濃度の関係