

財団法人 砂防・地すべり技術センター ○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形となっている。しかし、山地河川において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。

以上のような考えのもとに行った筆者ら²⁾のこれまでの研究により、相対水深(水深/粗度高さ)が小さいほど粗度の影響により底面摩擦抵抗が増大すること、その傾向は土砂濃度 c が高いほど顕著であることが明らかとなっている。さらに、粗度層と上層からなる2層モデルを提案して、粗度層におけるエネルギー散逸量を既存の構成則と同様の方法で評価すると、定性的な粗度の影響は再現可能であることも明らかとなっている³⁾。

本研究では2層モデルに衝突角や反発係数に関する検討を行い、改良を加えることにより粗度の影響の定量的評価が可能なモデルを構築することを目的としている。

2. 2層モデル概要

2層モデルは上層と粗度層からなり、その境界は粗度高さ ks である。上層には既存の構成則をそのまま適用し、粗度層のエネルギー散逸量を既存の構成則と同様の方法で評価する。この評価にあたって考慮した点は次の4点である。①粗度の大きさ(高さ)の違いにより粒子の衝突速度が異なる。②粗度間隔の違いにより衝突回数が異なる。③粗度間隔の隙間の大きさの違いにより衝突角が異なる。④粗度は底面に固定されているため、上層とは衝突条件が異なるため反発係数が異なる。

まず①②の考え方から粗度層のエネルギー散逸量を評価する。衝突速度は粗度高さ ks における粒子速度 $u(ks)$ であり、衝突回数 N は粗度間隔比 β を用いて粗度間隔を βks と表せば $N=u(ks)/\beta ks$ となる。以上から既存の構成則と同様の方法で粒子の非弾性衝突の項を評価する。それにより、底面せん断応力は次式となる。

$$\tau_0 = \left(\frac{c}{c_*}\right)^{1/5} (\sigma - \rho)hc \cos\theta \tan\phi_s + \frac{1}{2}(1-e^2) \left(\frac{\pi}{6}\right)^{2/3} c^{2/3} \sigma \sin^2 \alpha_i \frac{d}{\beta ks} u(ks)^2 + \rho k_f \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}} \frac{d^2}{ks^2} u(ks)^2 \quad \dots (1)$$

ここに、 τ_0 は底面せん断応力、 c は土砂濃度、 c_* は充填状態の粒子濃度、 σ は粒子密度、 ρ は水の密度、 h は水深、 θ は水路勾配、 ϕ_s は粒子の摩擦角、 e は粒子の反発係数、 α_i は粒子の衝突角、 d は粒子径、 k_f は間隙水の乱れのパラメータである。

③に関しては、図1のような粒子の最大衝突角 α_{max} と α_i が正の相関にあると考え、実験条件から α_{max} を算出し、 $d=ks$ の条件の時に α_i が上層と同じ 30° となるように次式で与えた。

$$\sin \alpha_{max} = \frac{\beta ks}{d + d_{ks}} \quad \dots (2) \quad \alpha_i = \alpha_{max} - 13.4^\circ \quad \dots (3)$$

④に関して、土石流の構成則における反発係数 e は、粒子・流体間の相互作用によるエネルギー散逸を含めた値であるが⁴⁾、粗度粒子は底面に固定されているため衝突直後の粒子・流体間の相互作用によるエネルギー散逸分は流体内部の粒子同士の衝突よりも大きくなると考えられる。よって、粗度部分においては流動層よりも小さな値を e に適用することが適当であると考えた。

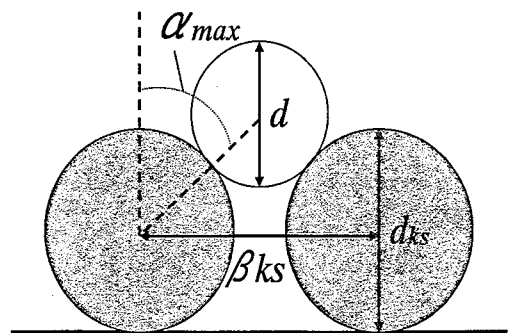


図1 最大衝突角模式図

3. 2層モデルの適用性の検討

まず①②の考え方から評価されたモデルの定性的な適用性について検討する。図2は筆者ら²⁾が定義した流体の抵抗値の指標である f' と相対水深の関係の図である。 f' は粗度の影響がなく構成則に一致するならば同じ土砂濃度では一定値となり、粗度の影響によりエネルギー散逸量が増大する場合は f' が増大することになる。図の計算値は濃度区分ごとの中央濃度で計算している。相対水深が小さいほど流れの抵抗が増大するという実験結果に対して、計算結果も定性的には同様の結果を示している。しかしながら、実験結果の相対水深による変化に対して計算結果の変化は小さく、定量的な評価には至っていないことがわかる。

ここで、図2の計算値は水深と土砂濃度に平均的な値を与えているので個別の実験値とは必ずしも完全には対応しない(実験条件により水深や濃度が異なる)。そこで、定量的評価について詳細に検討を行うため、各実験条件に関して個別に f' を計算して実験値と計算値を比較した(図3)。ks3, ks5, ks7 はそれぞれ 3, 5, 7mm 程度の砂礫粗度である。横軸の実験値の変化に対して、縦軸の2層モデルによる計算値がそれを再現できていないことが見てとれる。

以上より、衝突速度と衝突回数を考慮して誘導したモデルは粗度の影響を定性的には再現可能だが、定量的な評価には至らないことから③④の衝突角、反発係数の考え方を導入する必要があるといえる。

そこで、衝突角には式(2)、(3)を適用して反発係数には上層の 0.775 よりも小さい 0.4 を適用して計算した結果が図4である。実験値と計算値がほぼ1対1に対応していることが見てとれる。このように、2層モデルに衝突角や反発係数の考え方を導入することにより、実験結果で示された粗度の影響をほぼ再現可能となった。

5. まとめ

土石流に及ぼす粗度の影響を再現するためにこれまでの研究で2層モデルを提案していたが、定量的な評価には至っていなかった。そのため、本研究ではこの2層モデルに衝突角、反発係数の違いという考え方を導入した結果、定量的な評価が可能となった。実際の衝突角の値や反発係数の値に関しては今後の詳細な検討を必要とするが、粗度の影響を定量的にも再現可能なモデルが構築された。

6. 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) 鈴木・堀田: 砂防学会研究発表会概要集, 248-249, 2004,
- 4) 宮本: 立命館大学学位論文, pp.39-72, 1985

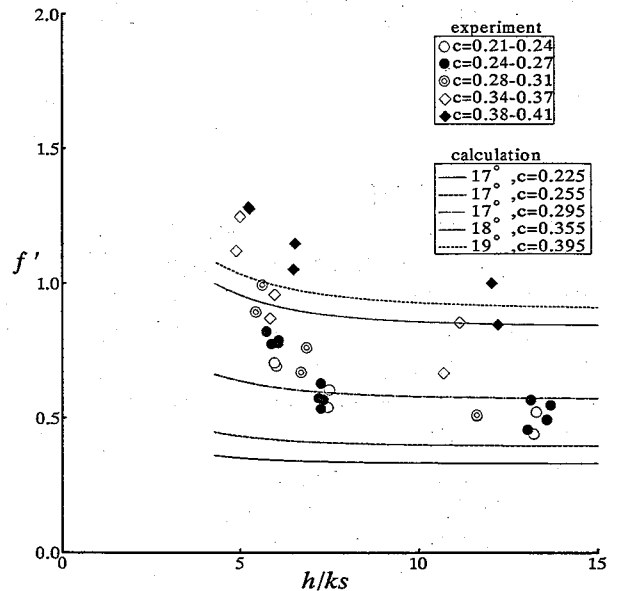


図2 h/ks と f' の関係 (実験値と計算値)

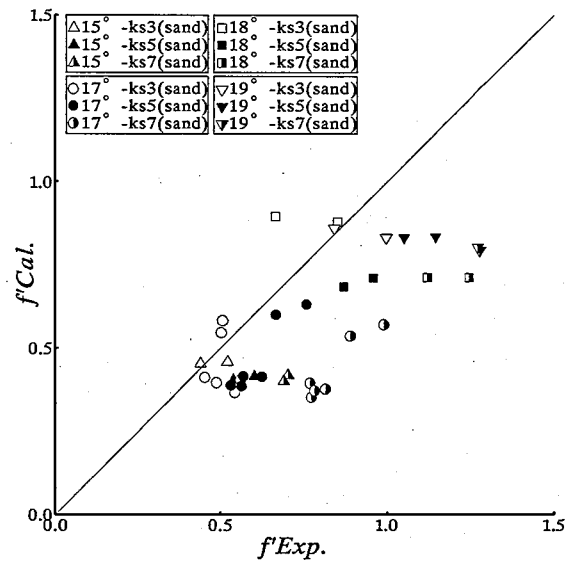


図3 f' の実験値と計算値の関係
衝突角と反発係数の違いを考慮しない場合

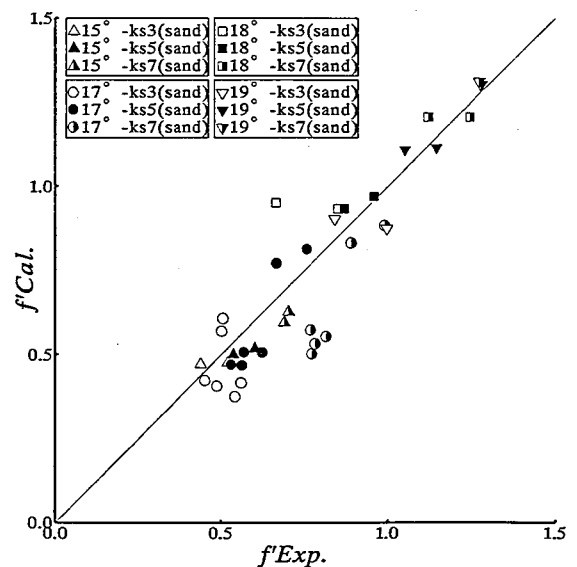


図4 f' の実験値と計算値の関係
衝突角と反発係数の違いを考慮した場合