

## 論文審査の結果の要旨

申請者氏名 鈴木 拓郎

---

本論文は、土石流の流れに及ぼす河床粗度の影響を明らかにするために、条件の異なる粗度を用いた水路実験を行い、粗度の影響を定性的、定量的に明らかにするとともに、そのような影響を評価可能なモデルを構築することを目的として行われた。

第 1 章では、これまで行われてきた土石流の構成則に関する研究、山地河川の河床条件に関する研究のレビューを踏まえて、本研究の位置付けと目的について記述している。現在用いられている土石流の構成則は、流れ中の粒子相互作用を連続体の構成方程式の中に適用するという方法で導かれており、河床粗度などの境界条件を含まないが、実際に土石流が流れる山地河川においては流下する土石流とは独立に存在する河床条件があるので、粗度の影響を実験的に明らかにし、それをモデル化することの必要性を示した。

第 2 章では本研究の解析の基となる水路実験について説明した。水路実験には砂礫を用いた砂粗度、断面が長方形の角棧粗度、断面が半円の円棧粗度の 3 種の形状を用いている。本研究での対象は固定床の石礫型土石流であるため、相対水深と抵抗係数の関係が石礫型土石流の領域にあるように考慮した上で、勾配や流量に関して既往研究より多様な条件下で実験を行った。

第 3 章では、江頭らの構成則において修正を要する点を指摘し、修正を加えた上で、一様砂の実験結果をもとに構成則の適用性の検討を行った。修正点は江頭らの構成則の間隙水乱れの項においてであり、間隙水の乱れによるせん断応力  $\tau_f$  の中で  $(1-c)$  を乗じている分を除いた。ここに、 $c$  は土砂濃度である。また、河床粗度と流下土砂の粒径が等しい条件化の構成則の適用性について、底面におけるせん断応力を算出し、実験結果から算出される外力と比較したところ、せん断応力を過大評価していることが明らかとなった。土砂濃度が小さいほど大きくなる成分は間隙水の乱れの項しかないことから、せん断応力の過大評価の原因は間隙水の乱れの項が原因であると結論付け、乱れの混合距離と間隙スケールの比のパラメータである  $k_f$  を修正し、実験結果から逆算した結果をもとに  $k_f$  を濃度の関数とした。

第 4 章では、修正した構成則に基づいて粗度条件の違いによる影響を定量的、定性的に明らかにした。河床粗度が大きくなるにしたがって従来の構成則による理論値との差が変化した。粗度による水深の差は土砂濃度や流量によっても異なることから、それを統一的に整理するため摩擦抵抗係数  $f$  を変形して  $f'$  という新しい指標を定義した。 $f'$  は土石流の構成粒子の材料が一定ならば構成則による  $f'$  の理論値は  $K(c)$  という濃度のみの関数となるが、相対水深が小さいほど大きく  $f'$  が  $K(c)$  から大きくずれること、相対水深が大きくなるにした

がって  $f$  が  $K(c)$  に収束することを明らかにした。また粗度の形状による粗度の影響の違いは、粗度間隔比による衝突回数の違いと対応しており、粗度の影響を評価する上で粗度間隔比が重要な支配要因であることが示唆された。

第 5 章では、4 章で明らかとなった粗度の影響を評価するために上層と粗度層からなる 2 層モデルを提案した。このモデルでは、粗度高さにおける粒子速度  $u(ks)$  から 1 回分の衝突によるエネルギー散逸量を評価しており、粗度間隔比  $\beta$  から衝突回数を評価した上で粒子の占有体積を考慮して粒子の非弾性衝突による項や、粗度の大きさと流れ中の粒子径の比から求められた衝突角が含まれている。砂粗度において勾配  $\theta$  ( $^{\circ}$ )、流量  $Q$  ( $cm^2/sec$ )、輸送濃度  $c$ 、構成粒子の粒径  $d$  ( $cm$ ) が一定の条件下で粗度の高さ  $ks$  を変化させて、水深の値を計算したところ、既存の構成則では一定値と計算されるが、2 層モデルでは粗度が大きいほど水深は大きな値となるという計算結果が得られた。それは、勾配が同じであれば土砂濃度が高いほど、土砂濃度が同じであれば勾配が小さいほど、顕著になる。このモデルにより、粗度が大きくなると土石流の運動エネルギーは小さくなり、到達時間（ある一定の距離を流下するのに要する時間）は長くなるという定性的な関係のみならず、例えば相対水深が 10 程度の流れで、粗度の大きさが流れ中の粒子の 2.5 倍程度の大きさだと、衝撃力は一様砂の場合の 0.8 倍程度、到達時間は 1.1 倍程度になるという定量的関係を明らかにした。

第 6 章では前章までの結果を総括し結論とした。本研究により示された粗度の影響は、土石流の数値シミュレーションによる砂防計画などに対する非常に重大な問題提起であり、構築されたモデルは、今後の砂防計画に大きな役割を果たすことが期待される。

以上のように、本研究は学術上のみならず応用上も価値が高い。よって審査委員一同は、本論文が博士（農学）の学位を授与するにふさわしいと判断した。