

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、エネルギー保存則に基づいて、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ている。しかしながら、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が、既存の構成則は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。粗度の大きさなど河床条件が異なれば粗度部分の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る底面摩擦抵抗が増大すること、この傾向は土砂濃度 c が高いほど顕著であることが明らかとなった。さらに、既存の構成則の枠組みで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³⁾。

本研究では2層モデルに関して改良点を加えるとともに、棧粗度に分力計を設置して底面抗力を測定した実験結果より底面応力構造の実態を明らかにし、2層モデルの検証を行った。

2. 実験方法

実験には(財)建設技術研究所の長さ9mの可変勾配水路を用いた。水路は幅10cmに加工してあり、下流側4.5mには棧粗度を貼り付け、水路床は10cm高くしてある。また、下流側から1mの部分にピットを設けていて、ピット内の分力計と棧粗度を固定して抗力 F_x を測定した(図1)。その上部に水深測定用の超音波センサーが設置してある。上流側4.5mに土砂を敷き詰め定期的に水を供給して土石流を発生させ、下流端で採取することで流量 Q と輸送濃度 c を測定した。棧粗度は3種類ですべて幅 b は8mm、間隔 s は8mmとなっており、粗度高さ ks が2, 3, 5mmとなっている(それぞれ ks_2, ks_3, ks_5 とする)。抗力を測定する部分に関しては、A:棧と棧間を1:1に含む部分、B:棧と棧間を2:3に含む部分、C:棧のみ、の3種類である。実験は勾配が15, 17°, 供給する水の流量は1.5~30/secの範囲で行った。

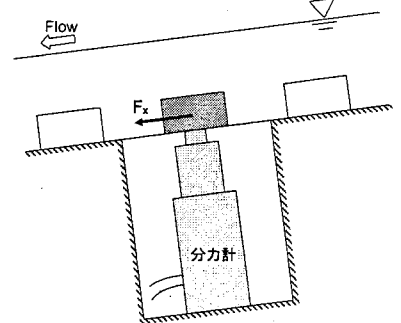


図1 分力計設置図

3. 2層モデル概要

2層モデル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した。上層には既存の構成則を適用した。粗度層については、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 $u(ks)$ であるとし、衝突後の速度を反発係数 e を用いて $e \cdot u(ks)$ として衝突前後の散逸エネルギーを評価していた。しかし、高速ビデオカメラの映像を解析したところ、粗度に衝突する粒子は衝突後に一旦速度が0となった後、再び流れに復帰するとの運動をしていた。つまり、粒子が持っていた運動エネルギーがすべて散逸することになる。単位時間当たりの衝突回数 N は粗度間隔を βks とすれば $u(ks)/\beta ks$ と表せることから、これをもとに宮本³⁾と同様の方法で、粒子の非弾性衝突によるエネルギー散逸量を評価した。粒子摩擦による応力に関して、式(3)の摩擦による圧力 p_s はこれまで衝突による圧力 p_d との関係式から導いていた。しかし、 p_s は粒子骨格応力で、流動層全体の内部粒子の重力成分が伝わるものであり、粗度の条件によって変化する p_d との間に関係式は成り立たないので既存の構成則を用いることにした。間隙水乱れによる応力も従来の構成則を用いる。以上より、底面におけるせん断抵抗力 τ_0 は次式のようになる。

$$\tau_0 = \tau_{s0} + \tau_{d0} + \tau_{f0} \dots\dots(1) \quad \tau_{s0} = p_s \tan \phi_s \dots\dots(2) \quad p_s = (c/c_s)^{1/5} (\sigma - \rho) c g h \cos \theta \dots\dots(3)$$

$$\tau_{d0} = \frac{\pi}{12} \cdot \sigma \cdot c \cdot \frac{1}{\beta} \cdot u(ks)^2 \dots\dots(4) \quad \tau_{f0} = \rho k_f d^2 \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}} \frac{1}{ks^2} \cdot u(ks)^2 \dots\dots(5)$$

ここで τ_{s0} は粒子摩擦, τ_{d0} は粒子衝突, τ_{p0} は間隙水乱れによる応力, c_* は充填状態の粒子濃度, c は粒子濃度, h は水深, g は重力加速度, σ は粒子比重, ϕ_s は摩擦角, ρ は水の密度, d は粒子径, k_f は係数である。

4. 実験結果及び考察

まず, 棧粗度の定性的な影響について抵抗係数 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だが, 構成則による理論値は $K(c)$ という濃度の関数となり, 粗度の影響の大きさを $K(c)$ からの f' の差の大きさとしてみる事ができる²⁾。図2に相対水深 h/ks と f' の関係を示す。図より各濃度区分において h/ks が小さいほど f' が増大していて, h/ks の増大に伴って f' が一定値に収束しており, 砂粒子による粗度²⁾と同様の傾向を示している。ただし, 砂粒子の粗度では h/ks の増大に伴い f' はほぼ $K(c)$ に収束していたが, 棧粗度の場合 $K(c)$ より小さい値に収束しており, 棧粗度は全体的に若干抵抗が小さくなっている。これは材料が木材のために摩擦角などが違うことが考えられるが, これはパラメータの設定により解決できる。以上, 棧粗度は砂粒子に比べ若干抵抗は小さいが, 定性的な傾向は同様であり, 棧粗度と砂粒子の粗度は同じ枠組みで考えることができるといえる。

底面抗力について, まず, A パターンの実験結果を用いて外力と底面の全抗力の釣り合いについて検討を行う。A パターンは棧と棧間が 1:1 であるから, 受感部にかかる全外力と全抗力は釣り合うはずである。図3に水深基準面を粗度下として計算した外力に対する抗力の比を示す。すべて1程度の値であり, 外力と全抗力の釣り合いが確認され, 水深基準面の設定が妥当であるといえる。

次に, 全抗力に対する棧の抗力(摩擦・衝突)の割合を検討する。B パターンのデータより棧の抗力比を計算した結果と C パターンより直接計測した結果を図4に示す。両者ともよく一致しており, 実験が良好に行われたことが確認できる。実験結果より, 全抗力に対する摩擦・衝突の比は常に約6割以上の値をとっており, 摩擦応力が降伏応力として存在していることがわかる。また, 抗力比は濃度の上昇に伴い増加し, 粗度が大きいほどその傾向が顕著である。図では2層モデルによる計算結果も示している。これまでの2層モデルでは降伏応力の存在を再現できなかったが, 改良したモデルによる計算結果は実験結果と同様の傾向を再現できているといえる。実験結果は計算結果より全体的に高い値となっているが, 輸送濃度に対して底面近傍の濃度が大きいことを考慮すれば, 値もほぼ妥当であると考えられる。

5. まとめ

本研究ではこれまでの2層モデルに対し, p_s と τ_d に関して修正を行った。また, その検証のため棧粗度における底面抗力を測定する実験を行った。この実験結果より, 水深基準面を粗度下としたときの外力と全抗力が一致していることが確認された。また, 摩擦・衝突に相当する棧部分の抗力比は, 濃度の上昇に伴い増加し粗度が大きいほどその傾向は顕著であったが, 修正した2層モデルの計算結果は同様の傾向を再現可能であり, 妥当性が示されたといえる。

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,

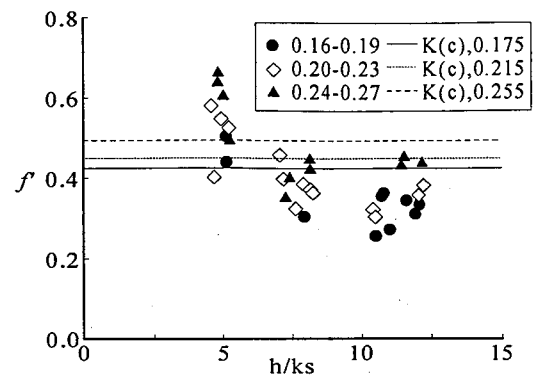


図2 棧粗度における h/ks と f' の関係

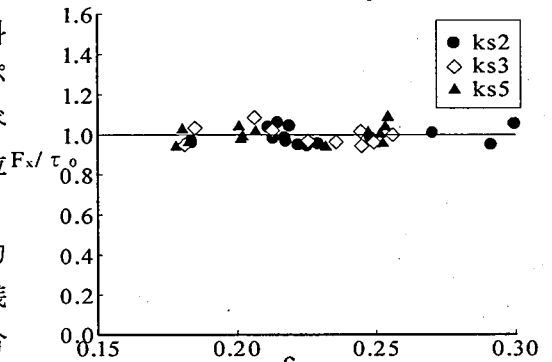


図3 外力に対する抗力の比(粗度 A)

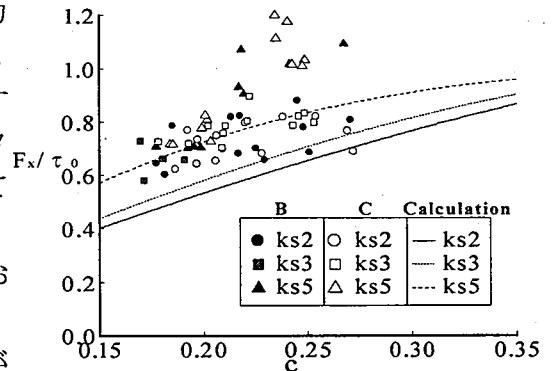


図4 外力に対する棧の抗力の比(粗度 B,C)