

## 河床粗度条件による土石流の底面抗力の変化に関する実験的研究

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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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ている。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層モデルを考え、粗度層におけるエネルギー散逸を構成則と同様の方法で評価すると、定性的な粗度の影響を表現できることも明らかとなっている<sup>3)</sup>。

これは粗度層における応力分布が粗度の条件によって大きく変化することによるものだが、応力分布の変化は実験的には確認されていない。また、今後この2層モデルで侵食・堆積などの河床部分における現象を連続的に扱うためには、応力構造の変化を正確に評価する必要があり、そのためには応力分布の変化を実験的に明らかにすることが不可欠である。そこで本研究では、棧粗度に分力計を設置して底面抗力を測定する実験を行い、上記2層モデルにおける応力分布の変化と比較、検討を行った。

## 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に加工しており、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1つの棧を固定して抗力 $F_x$ を測定した(図1)。さらに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することで土石流を発生させ、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。

実験条件は勾配が13, 15, 17°の3種類、供給する水の流量は2, 2.5, 3l/secの3種類である。

## 3. 棧粗度の条件と清水における抗力

今回実験に用いた棧粗度は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 $F_x/\tau_0$ れぞれ $ks_2, ks_3, ks_5$ とする)。清水においては、足立<sup>4)</sup>によれば $s/ks < 10$ の領域では完全干渉流で、個々の棧の交流が互いに干渉しあい、底層領域が比較的一様な流れとなり、砂粒子の粗度のような流れが期待できる。さらに $s/ks < 8$ の領域は溝粗度に分類され、粗度形態の指標は $s/ks$ よりも溝幅 $b$ に対する溝間隔 $s$ の比 $s/b$ がとられる。本研究に用いた棧粗度はすべて $s/ks < 8$ の領域で、すべて $s/b = 1$ であるから、清水においては3種類の粗度は同様の抗力となると期待される。

そこで土石流の実験結果の前に、まず清水における各棧粗度の抗力について検討した。検討に用いた指標は棧粗度の支配面積(粗度と間隔1つ分)に働く河床面せん断力 $\tau_0$ に対する棧粗度の抗力 $F_x$ の比、 $F_x/\tau_0$ である。図2に相対水深(水深/粗度高さ)と $F_x/\tau_0$ の関係を示す。粗度や相対水深によらずほぼ一定の値となっ

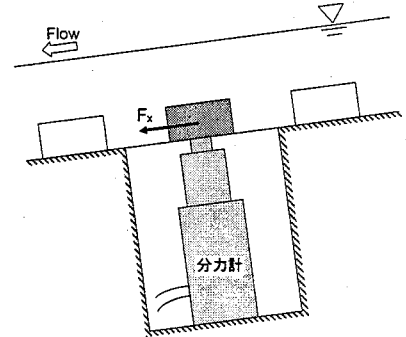


図1 分力計設置図

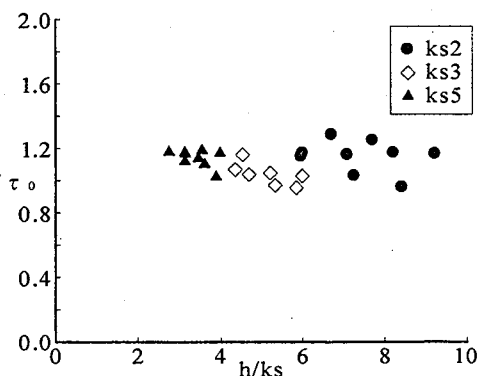


図2 相対水深と抗力の関係

ていることがわかる。この結果は上記で期待していたとおりであり、清水の流れにおいては本実験のように栈粗度間隔が狭く溝粗度の領域では、粗度幅、間隔が一定であれば粗度高さによらず底面抗力は一定となる。以上より、土石流においても抗力の直接値を用いて粗度による比較を行うことが出来るといえる。

#### 4. 実験結果及び考察

まず、栈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<sup>2)</sup>。図3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<sup>2)</sup>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、栈粗度の場合  $K(c)$  より小さい値に収束しており、栈粗度は全体的に若干抵抗が小さくなっている。本実験では濃度の差が小さいため濃度による違いはわかりにくいですが、概ね濃度が高い方が傾向が顕著であるといえる。以上、栈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、栈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。

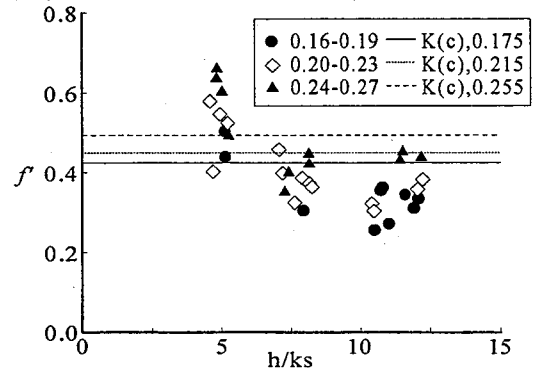
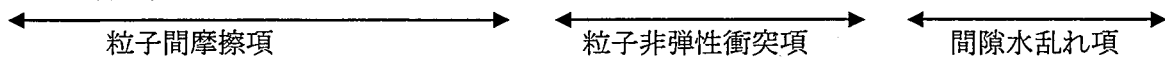


図3 栈粗度における  $h/ks$  と  $f'$  の関係

次に底面抗力について検討を行う。筆者ら<sup>3)</sup>は粗度層におけるエネルギー散逸を構成則と同様の方法で評価したところ、次式のようにになった。

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

$$K_{ks} = \frac{1}{2} \frac{(c/c_*)^{1/5}}{1 - (c/c_*)^{1/5}} e^2 \sin^2 \alpha \cdot \sigma \cdot c \cdot \tan \phi_s \cdot \frac{1}{\beta^2} + \frac{1}{2} (1 - e^2) \sin^2 \alpha \cdot \sigma \cdot c \cdot \frac{1}{\beta} + \rho k_f d^2 \frac{(1 - c)^{5/3}}{c^{2/3}} \frac{1}{ks^2} \quad \text{式(2)}$$



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、 $\alpha$  は粒子の衝突角、 $\sigma$  は粒子比重、 $\beta$  は粗度間隔の比、 $\phi_s$  は粒子の摩擦角、 $\rho$  は水の密度、 $d$  は粒子径、 $k_f$  は係数である。この式により、全応力に対する摩擦・衝突項の割合を計算すると、粗度が大きいほど濃度の上昇に伴う摩擦・衝突項の割合の増加が大きくなる。栈粗度に直接働く抗力は摩擦・衝突と考えられるから、実際に摩擦・衝突による抗力の増加が起きれば、栈粗度の抗力は増加すると考えられる。そこで、各栈粗度ごとに濃度  $c$  と  $F_x/\tau_0$  の関係を図4に示す。図より、どの粗度においても濃度の上昇に伴い抗力が大きくなっているが、粗度が大きいほどその傾向が顕著であることがわかる。これは計算結果と同様の傾向を示しているといえる。

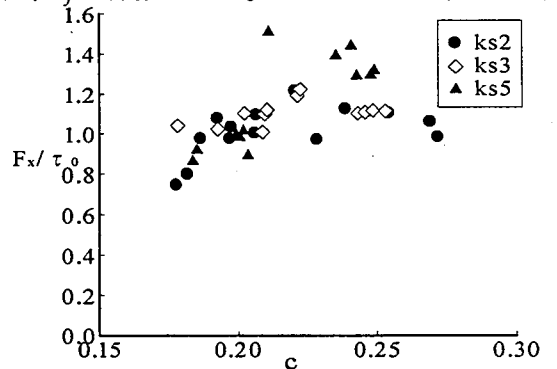


図4 濃度と抗力の関係

#### 5. まとめ

本研究では栈粗度に分力計を設置し底面抗力を直接測定する実験を行った。この実験結果より、栈粗度は砂粒子の粗度より若干抵抗は小さいが、巨視的な傾向は同様であり、両者は同じ枠組みで扱えることが明らかとなった。また、抗力の検討では粗度が大きいほど濃度の上昇に伴う抗力の増加が大きいことがわかったが、これは筆者らが考えた2層モデルの計算結果と同様の傾向を示しており、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，248-249，2004，4) 足立：土木学会論文集，第104号，33-41，1964