

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. 研究の背景と目的

従来の土石流の構成則は土石流の流体内部における粒子の相互作用などを評価することによって提案されている。江頭ら¹⁾の構成則においては流体のエネルギー散逸Φが粒子間摩擦Φ_s、粒子の非弾性衝突Φ_d、粒子間隙の水の乱れΦ_fの3つのプロセスに支配されるとしている。式(1)

$$\Phi_{total} = \Phi_s + \Phi_d + \Phi_f = \frac{1}{\alpha} k_g e^2 \sigma d^2 c^{1/3} \tan \phi_s \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^3 + k_g \sigma (1 - e^2) d^2 c^{1/3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^3 + k_f \rho d^2 \frac{(1 - c)^{5/3}}{c^{2/3}} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^3 \quad (1)$$

$$\alpha = (c_s / c)^{1/3} - 1$$

ここで、σは粒子密度、dは平均粒径、gは重力加速度、ρ_mは土石流の密度、k_gは係数で実験から0.0828、k_fは形状係数、ρは清水の密度、eは粒子の反発係数、cは充填状態での粒子層の体積濃度である。

このような粒子の相互作用を河床粗度について考えてみると、実際に土石流が流下する山地河川においては河床が巨礫で覆われている場合が考えられ、土石流が流下していく時に粗度の条件は変化していくはずである。河床部分における粒子の衝突や摩擦などの相互作用によるエネルギー散逸は粗度の大きさなどの条件によって異なり、土石流の流動に影響を及ぼすものと考えられるが、今までにこのような粗度の影響を検討した例はなく、それに関する実験も行われていない。そこで、本研究では粗度の条件を考慮した実験を行い、従来の構成則の適用性と流れに及ぼす粗度の影響を検討する。

2. 実験概要

幅10cm、長さ9mの可変勾配水路を用い、下流側4.5mには粗度となる砂礫粒子を貼り付け、上流側4.5mには土石流の材料となる砂礫粒子を粗度の高さと等しくなるように約10cmの深さまで満たす。上流端より水を定常的に供給して土石流を発生させ、定常状態において水路下端で流量Q、輸送濃度c、水深hを測定する。実験に用いた砂礫粒子はσ/ρ=2.6でd=0.218(cm)、σ/ρ=2.64でd=0.294(cm)の2種類である。粗度はそれぞれd=0.294、0.553、0.669(cm)の砂礫粒子を一定の間隔をとるように貼り付けたものの3種類(それぞれをks3、ks5、ks7とする)で、それぞれについて平均粗度高さks(下床から粗度上面までの高さ)と平均粗度間隔lを測定してある。なお、l/ksは3種類とも1.7程度でほぼ同値をとることから粗度はほぼ相似形とみなせ、代表スケールとしてksを用いて解析を行う。水路勾配は13°、15°、17°、供給する水の流量は100cm²/s、150cm²/s、200cm²/s、300cm²/s、350cm²/sである。

3. 結果と考察

<従来の構成則の適用性の検討>

エネルギー散逸Φとせん断応力τの間には式(2)で示される関係がありせん断力τは式(3)のようになる。

$$\Phi = \tau \partial u / \partial z \quad (2)$$

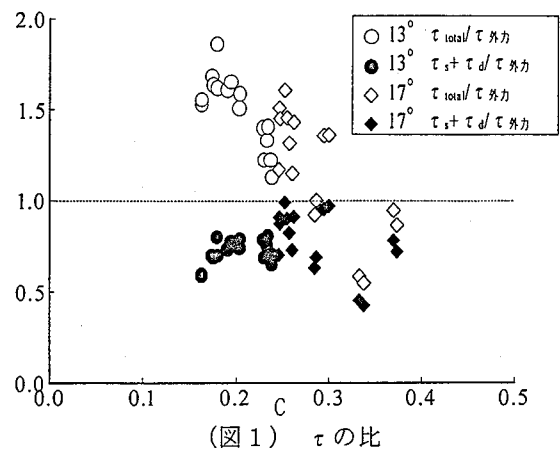
$$\tau_{total} = \tau_s + \tau_d + \tau_f \quad (3)$$

ここでτ_sは粒子間摩擦、τ_dは粒子の非弾性衝突、τ_fは粒子間隙の水の乱れによるせん断応力である。

定常状態においては式(3)で示されるτ_{total}とτ_{外力}はつりあっている(式(4))。

$$\tau_{total} = \tau_{外力} = \rho_m g \sin \theta (h - z) \quad (4)$$

材料粒子と粗度の砂礫粒子が同程度の大きさであるks3の条件において構成則から算出されるτ_{total}とτ_s+τ_dのτ_{外力}に対する比を図1に示す。図より、濃度が低くなるにしたがってτ_{total}がτ_{外力}に対して大きい値をとっていることがわかる。τ_s+τ_dに関してはτ_{total}に対してほぼ同程度の割合をとっているが、τ_fに関しては濃度に対する変化が大きく濃度が低いところでτ_f/τ_{外力}が1程度の値をとっていて、τ_{外力}と同程度の値をとることになっている。江頭らの考え方によればτ_sは降伏応力であり流動を主に支配していて、τ_sに対する外力の過剰分がτ_dとτ_fによって消費されるとしている。しかし、実験結果においてτ_fはτ_sやτ_{外力}と同等のオーダーをとっており、このことはτ_f



(図1) τの比

が過剰評価されていることが示唆している。これは混合距離の過大評価によるものと考えられるが、 τ_f に1/2を乗じれば τ_{total} が $\tau_{外水}$ とほぼ同値をとることから以後はこのような修正を加えた上で検討を行う。

<粗度による水深の差>

図2は $d=0.294$ (cm)、 13° の条件において流量 Q と水深 h の関係を示したものである。図では構成則から算出される理論線も同時に示してある。ks3が理論線とよく一致しているのに対しks5、ks7と粗度が大きくなるにしたがって水深が大きい値をとっていることがわかる。これは、粒径や水路勾配が異なる条件においても同様の傾向が得られている。

<水深のかさ上げの検討>

河床に粗度がある場合、粗度が占有する体積の分だけ水深はかさ上げされるため粗度による水深の差は生じるはずだが、そのかさ上げ分を計算したところその程度は実験結果で生じたもの比べて小さいものであり、水深のかさ上げだけで実験結果にみられる粗度による水深の差を説明することはできない。

<抵抗係数の導入>

粗度による水深の差をエネルギー散逸の点から検討するために、ここで抵抗係数を導入する。開水路における土石流の抵抗係数は次式で示される。

$$f = \frac{2ghs \sin \theta}{U^2} = \frac{2\rho_m ghU \sin \theta}{\rho_m U^3} = \frac{2}{\rho_m} \cdot \frac{1}{U^3} \Phi = \frac{25}{2\rho_m} K(c) \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \quad (5)$$

$$K(c) = \frac{1}{\alpha} k_g \sigma \cdot e^2 c^{\frac{1}{3}} + k_g \sigma (1-e^2) c^{\frac{1}{3}} + \rho \cdot k_f d^2 \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}}$$

ここで $\rho_m ghU \sin \theta$ は外部から得られるエネルギー、 Φ はエネルギー散逸であり定常状態においてはこの両者は等しい。このエネルギー散逸 Φ に典型的な土石流の流速分布である3/2乗則を適用して式(1)を代入した。式中の $K(c)$ は同一の材料粒子の条件下においては濃度 c に関する定数となる。そこで粗度の影響を統一的に検討するため相対水深 h/d の影響を無くし、 $K(c)$ を定数として評価できるように変形し次式で示される f' を定義した。

$$f' = f \cdot \frac{2\rho_m}{25} \left(\frac{h}{d}\right)^2 = K(c) \quad (6)$$

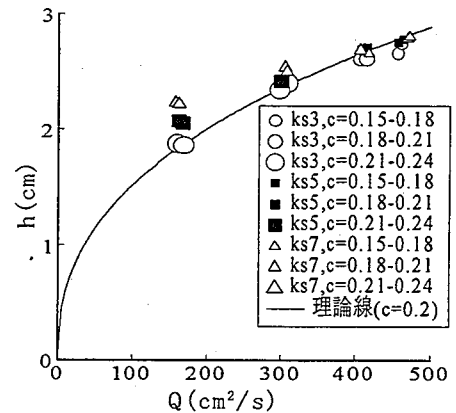
この f' は粗度部分におけるエネルギー散逸の影響が小さい場合は構成則にしたがい一定値 $K(c)$ をとる。粗度部分におけるエネルギー散逸の影響が大きい場合は式(5)における Φ にそのエネルギー散逸の増加分が加わるため f' は $K(c)$ よりも大きい値をとることになる。よって、このエネルギー散逸の増加分を f' と $K(c)$ のいずれの大きさとしてみることが出来る。粗度部分の影響は粗度層に対する流動層の比、つまり粗度に対する相対水深 h/ks が小さいほど大きくなると考えられる。そこで、実験結果を同一の粒径の条件で濃度を0.03ごとに区分して f' と h/ks の関係を図3に示す。図ではそれぞれの濃度区分の中間濃度における $K(c)$ を直線で示してある。各濃度区分ごとに h/ks が小さくなるにしたがってエネルギー散逸の増加分が多くなり f' と $K(c)$ が大きくなり、 h/ks が大きくなるにしたがって粗度の影響が小さくなり f' が $K(c)$ という一定の値に収束していくことが見てとれる。また、濃度が大きいほどその傾向が顕著なることから粗度部分におけるエネルギー散逸は濃度が支配的であることがわかる。

4. まとめ

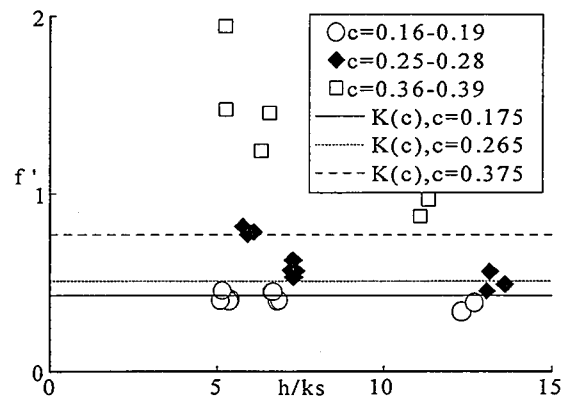
土石流の流れに及ぼす影響を実験値から江頭らの構成則に基づいて検討した。粗度が材料粒子と同程度の大きさの場合は、間隙水の乱れの過剰評価の傾向が見られるものの構成則は概ね流動を評価できていることが確認できた。しかし、粗度が大きくなり h/ks が小さくなると粗度の影響は無視できないものとなり、それは濃度が支配的な要因であることがわかった。

参考文献

- 1) 江頭・芦田：京都大学防災研究所年報，32B-2，487-501，1989， 2) 伊藤・江頭：水工学論文集，第42巻，913-918，1998，



(図2) Q と h の関係、 13° ， $d=0.294$ (cm)



(図3) h/ks と f' の関係、 $d=0.294$ (cm)