

土石流の流動機構

京都大学防災研究所 正員 高橋 保
 京都大学大学院 学生員 〇藤井 由之

1. はじめに、土砂を高濃度に含む流れは、土砂の粒径が大きく相対水深の小さな場合や勾配のさほど急でない場合にはダイラタント流体として流動する(砂礫型土石流)。また、相対水深の大きな場合や勾配が非常に急な場合には、ビンガム流体、または粒子が浮遊して衝突効果と乱れ効果の双方が作用するような流体として流動する(泥流型土石流)。ここでは、砂礫型から泥流型への遷移を明らかにするとともに、中立的浮遊粒子を高濃度に含む流れについても言及する。また、土石流が発達する過程に関する検討を加える。

2. 砂礫型から泥流型への遷移、 $\alpha_a = 0.148 \text{ cm}$

($\sigma = 1.74 \text{ g/cm}^3$) および $\alpha_a = 0.076 \text{ cm}$ ($\sigma = 1.86 \text{ g/cm}^3$) の2種類の軽量骨材を用い、長さ4m、幅5cm、深さ10cmの木路に上流から水と粒子を供給し、側面から高速度ビデオカメラで撮影し、下流端で濃度を測定した。また、河床付近の側壁に作用する圧力とその地点での水位変動を測定した。

流速分布を図-1に示す。勾配の急な程、また粒径の小さな程、ダイラタント流体の流速分布(図中の実線)からはずれてくるのがここでも確認された。その場合、上層部に流速が一様に近い部分が存在するが、大きく乱れておりビンガム流体のプラグであるとは考え難い。そこで、粒子近傍の流速がBagnoldのAuto-Suspensionの限界 $u_s = w/\sin\theta$ (w : 粒子の沈降速度) を超えた場合に浮遊を開始し、その流速を与える高さ h_s より上層では、混合距離が $l = k(y - h_s)$ (k : カルマン定数) の乱流であると考え、次式を立てた。

$$y \leq h_s: a_i \sin\alpha \sigma \lambda^2 d^2 (dy/dy)^2 = \{C_d(\sigma - \rho) + \rho\} g(h - y) \sin\theta$$

$$y > h_s: a_i \sin\alpha \sigma \lambda^2 d^2 (dy/dy)^2 + \rho_m k^2 (y - h_s)^2 (dy/dy)^2 = \{C_d(\sigma - \rho) + \rho\} g(h - y) \sin\theta$$

ここに、 a_i : 定数、 α : 衝突角、 λ : 線形濃度、 ρ_m : 粒子浮遊を考慮した見掛けの密度、 C_d : 体積濃度である。また、式(1)、(2)により計算される流速分布は近似的に次式で示される(図中の一点鎖線)。

$$y \leq h_s: u/u_s = 2h/3\alpha d \sqrt{\frac{C_d(\sigma - \rho) + \rho}{\sigma a_i \sin\alpha}} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{y}{h}\right)^{3/2} \right\}$$

$$y > h_s: u/u_s = 1/k \ln \left| (Y_s + \sqrt{Y_s^2 + \phi^2}) / \phi \right|$$

$$\text{ここに、 } Y_s = (y - h_s)/h, \phi^2 = \lambda^2 (a_i \sin\alpha/k^2) (d/h)^2 (\sigma/C_d(\sigma - \rho) + \rho)$$

この場合、実際に粒子が浮遊しているのなら、河床付近で測定される水圧は静水圧より

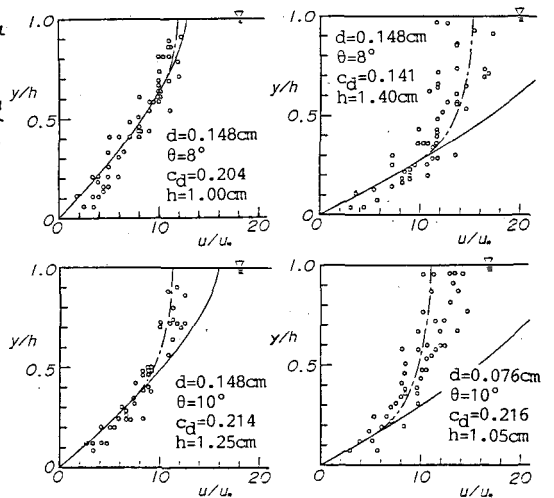


図-1 流速分布

大きくなるはずである。そこで、式(1)、(2)より得られる過剰間隙水圧の理論値と測定値との比較を図-2に示す。理論値より小さい測定値が得られる傾向があるが、これは、測定点付近での流れの制離や、粒子の浮遊している領域でも濃度を一定と仮定したことの影響と考えられる。

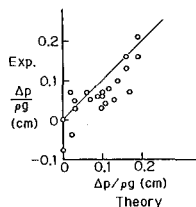


図-2 過剰間隙水圧

3. 中立浮遊粒子流 $\alpha=0.135$ の中立浮遊粒子 (ポリスチレン) を用いて、前項と同様の実験を行った。河床付近の粒子も浮遊してしまうため、式(3)、(4)をそのまま用いることはできない。その流速分布は、実際の水路が滑面であるにもかかわらず、粗面乱流の対数分布則にほぼ一致する (図-3)。河床付近の粒子の衝突効果によって粗度が形成されるものと解釈することができ、その相当粗度は濃度の関数として図-4のように示される。

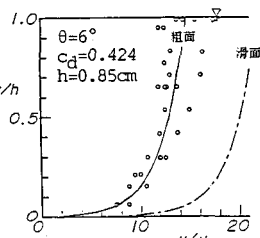


図-3 流速分布

4. 土石流の発達過程 $\alpha=0.148$ の軽量骨材を、幅5cmの水路に厚さ5cmで敷き、流出しないように押さえながら水で飽和し、押さえをはずして土石流を発生させる。段波通過後の定常に近い状態での侵食速度、流動架、濃度等を測定し、堆積長さを変化させることにより発達過程を調べる。

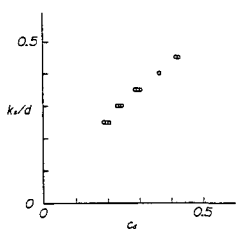


図-4 濃度と相当粗度

堆積層が不安定になる深さは、 $q_c = (C_{d0} - C_d) / (C_* - C_{d0}) \cdot h \cdot (S) (C_{d0}: 平衡濃度, C_*: 最密充填濃度)$ で表されるが、これが瞬間的に流れに連行されるのではなくある遅れ距離が必要である。この遅れ距離を流動架に比例するものと仮定し、比例定数を α とすれば、侵食速度 i は $i = \alpha \cdot (C_{d0} - C_d) / (C_* - C_{d0}) \cdot \bar{u} \dots (5)$ ($\bar{u}$: 平均流速) のように表される。

図-5は実験から α を求めたものである。このような侵食速度で砂礫が連行され土石流は発生するが、発達過程においては、掃流状集合流動の形態をとり、その土砂流動層内の濃度はほぼ平衡濃度に等しく、次第に厚さを増していく。水面と土砂流動層表面が一致したためやや式の形は異なるが、式(3)、(4)と同じ考え方で計算した流速分布を図-6に実線で示す。侵食に伴う運動量消費の結果として流速は小さくなるが、平衡状態に達すれば計算で得られた流速分布に一致する。

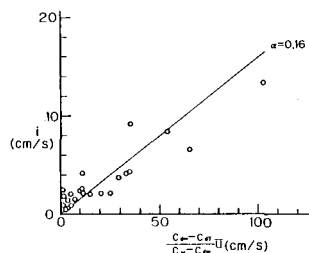


図-5 侵食速度

5. おわりに 粒子の浮遊を考慮することにより、砂礫型と泥流型の土石流の遷移および中立粒子流を説明できた。また、発達過程での侵食速度や流速分布に関する議論も行った。しかし、粒子比重による流れの遷移など不明確な点は多く、課題は多く残されている。

参考文献

Raynold: Proc.

R.S. London 1962

新井高橋: 40周年誌

高橋: なれり

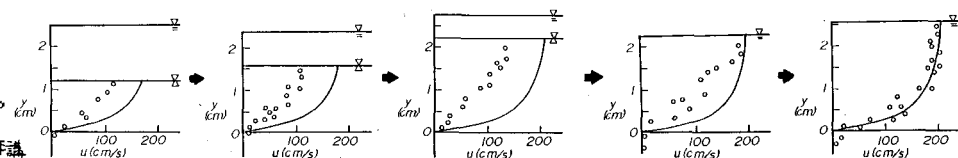


図-6 発達過程