

土石流における微細砂の役割

京都大学防災研究所 正員 高橋 保
三井建設 正員 ○八木秀樹

1.はじめに 土石流中に細かい土砂を含む場合には土石流の流動性が大きくなり、土石流の挙動を変化させることが考えられる。そこで本研究では、流動性が大きくなる効果を流体の密度 ρ が $\eta\rho$ ($\eta>1$)になるものとして表わし、その場合の土石流の挙動について考察する。

2.微細砂の効果についての考察 高橋は、土石流中で流動している砂礫群の荷重の一部が間隙を満たしている流体によって受けもたれることにより、増加する浮力の効果を、流体の密度 ρ が $\eta\rho$ になるものとして表わした。通常、このような浮力の効果は粒子が浮遊している間だけ作用するものであるから、粒子間の流体の乱れによって浮遊を続けるような粒径の粒子よりも大きい粒子では沈降に要する時間だけ作用することになり、よって長時間作用するものではないが、粒度分布の広い土石流においては容積濃度が高いことと、小粒子の沈降のさいに大粒子の間隙をぬっていく必要があることにより、単一粒子の沈降の場合に比べて沈降に相当長時間を要するものと考えられる。高橋はこの考え方のもとに流動堆積機構について考察しており、その考察において ρ を $\eta\rho$ に変えているが土石流の流動中の容積濃度 C_d はそのままにしている。しかし $\eta>1$ の場合には、質量保存則より C_d を C_{dn} に変える必要がある。ここに C_{dn} は流体の密度が ρ から $\eta\rho$ になった場合の浮遊していない粒子だけの容積濃度である。以下この考え方のもとに $\eta>1$ の場合にどのように土石流の挙動が変わるかについて考察する。

3.流体の密度 ρ が $\eta\rho$ になった場合の土石流の挙動 ρ が $\eta\rho$ になったときに土石流の容積濃度 C_d が C_{dn} になるとすると質量保存則より(1)式で C_{dn} が求められる。

$C_d(\rho_f) + \rho = C_{dn}(\rho - \eta\rho) + \eta\rho$ (1) の砂礫の密度 以下、流体の密度には $\eta\rho$ 、土石流の容積濃度には C_{dn} を用いて考察する。

土石流の平衡濃度 C_{dn0} はBagnoldの分散力の概念を開水路に適用した、

$$\alpha_i \rho \lambda^2 d^2 \left(\frac{dy}{dy} \right)^2 \cos \alpha = C_{dn}(\rho - \eta\rho) g(h-y) \cos \theta \quad \cdots (2) \quad \text{および} \quad \alpha_i \rho \lambda^2 d^2 \left(\frac{dy}{dy} \right)^2 \sin \alpha = [C_{dn}(\rho - \eta\rho) + \eta\rho] g(h-y) \sin \theta \quad \cdots (3)$$

の両式から求められる流速分布が一致するという条件より求められる。ここで α_i :実験定数、 λ :線濃度、 d :代表粒径、 h :水深、 $(\frac{dy}{dy})$:水深方向の速度勾配、 α :砂粒子の衝突条件に基く角度である。実際には、土石流の濃度がある程度高くなると粒子間の間隔が小さくなり、容易に濃度が高くなり得ず、平衡濃度はほぼ $C_{dn0} = \eta\rho \tan \theta / (\rho - \eta\rho)(\tan \phi - \tan \theta)$ (4) で与えられる。(4)式は(2)式および(3)式が同一であるための条件式の $\tan \alpha$ (動摩擦係数)を $\tan \phi$ (静摩擦係数)でおきかえたものであり、そのために過剰になったせん断力が流体の乱れによって受けもたれるようになると考えられる。このせん断力では(3)式の左辺につけ加えられるもので、

$$(5) \text{式で与えられる。} \quad \tau' = \eta\rho(\tan \phi - \tan \alpha) g(h-y) \sin \theta / (\tan \phi - \tan \theta) \quad \cdots (5)$$

次に、停止堆積機構について考察する。発生区間で十分に発達した土石流がそのままの

Tamotsu TAKAHASHI, Hideki YAGI

濃度で流下することのできる限界の勾配 θ_c は、(5)式で τ を0とすることにより、

$$\tan \theta_c = C_{d0} \alpha (1 - m) \lambda \tan \theta / (C_{d0} (1 - m) + m) \quad \text{--- (6)} \quad \text{となる。}$$

土石流の停止機構には、高橋の運動量保存則に着目したモデルがある²⁾。このモデルでは上流の急勾配(θ_u)の水路から下流の緩勾配(θ)の水路へ土石流が流出してきたとき先端部の流動深が h_f 、勾配変化部の流動深が h の直線状の形態をとって x_L の位置まで到達して停止するものとする。運動量保存式と連続式が次式のように表わされる。

$$\frac{d}{dx} \left\{ \frac{1}{2} (h + h_f) (1 - m) C_{d0} + m \rho \right\} v x = \frac{1}{2} (h + h_f) x \left\{ (1 - m) C_{d0} + m \rho \right\} g \sin \theta + \left\{ (1 - m) C_{d0} + m \rho \right\} h_u v_u^2 \cos (\theta_u - \theta) - \frac{1}{2} (1 - m) \rho C_{d0} (h + h_f) x \cos \theta \tan \theta \quad \text{--- (7)}$$

$$\frac{1}{2} (h + h_f) x = h_u v_u t \quad \text{--- (8)} \quad h_u, v_u, C_{d0} \text{ : 上流水路における土石流の初期流速、濃度, } v, h \text{ : 下流水路における流速、勾配変化点からの距離}$$

なお、(7)式では静水圧、土圧の項を省略している。

(7), (8)式を解いて x_L 、停止するまでの時間 t_L が次式で求められる。 $x_L = \frac{1}{2} V^2 / G, t_L = 2V / G \quad \text{--- (9)}$

ただし $V = v_u \cos (\theta_u - \theta), G = g \cos \theta \left\{ (1 - m) C_{d0} \tan \theta / (1 - m) C_{d0} + m \rho \right\} - \tan \theta \quad \text{--- (10)}$ かつ v_u は(3)式を積分して得られる断面平均流速であり、次式で表わされる。 $v_u = \frac{2}{3} \alpha \left(\frac{g \sin \theta}{C_{d0} \cos \theta} \right) (C_{d0} + (1 - C_{d0}) m / \rho) \left\{ \frac{1}{2} h_u^2 \right\} \quad \text{--- (11)}$

$C_d = 0.4$ の広い粒度分布をもつ土石流中に m を1より大きくするのに寄与できる砂が全体の容積濃度で5%含まれているとすると、 $C_{d0} = 0.35$ であり、(11)式により $m = 1.126$ である。この場合について土石流の平衡濃度 C_{d0} 、十分に発達した土石流をそのまま流し得る勾配 θ_c 、実験規模($h = 2.5 \text{ cm}, d = 0.3 \text{ cm}$)と実際規模($h = 100 \text{ cm}, d = 10 \text{ cm}$)の土石流の停止時表1。 m の変化による土石流の諸特性の変化

の先端到達距離 x_L 、停止までに要する時間 t_L を計算して表1に示す。比較のため、 $m = 1$ の場合についても計算値を示した。 m が1から1.126になると流動性がかなり増大することがわかる。

	$m=1$	$m=1.126$	Note
C_{d0}	0.42	0.51	
θ_c	13.4°	10.9°	
$x_L \text{ (cm)}$	91	140	$h=2.5 \text{ cm}$
$t_L \text{ (sec)}$	1.5	2.2	$d=0.3 \text{ cm}$
$x_L \text{ (cm)}$	3250	11033	$h=100 \text{ cm}$
$t_L \text{ (sec)}$	11.3	19.2	$d=10 \text{ cm}$

4. 高濃度に浮遊した砂の沈降

m が1より大きい場合の土石流の挙動について考察したが、実際には m がどの程度の大きさになるか知る必要がある。そこで m の評価に必要な、高濃度に浮遊した砂の沈降について実験を行なった。実験手順は以下のとおりである。ほぼ均一な砂を入れた中空円筒内に底から給水して底に浮遊している状態をつくったのち、給水を止め砂を沈降させた。砂の浮遊状況は、圧力計により計測した。実験結果は表2に示すとおりで、さして高濃度の浮遊状況を得ることができなかった。圧力の時間変化より界面付近の粒子の沈降速度 w を表2に示した。比較のため、濃度 C のときの界面付近の粒子の沈降速度 w を与える(12)式を用いて計算した w の値も示す。

$$w = (1 - C)^{\frac{1}{m}} w_s \quad \text{--- (12)} \quad w_s \text{ : 単一粒子の終末沈降速度, } m \text{ : } w_s \text{ に関係する値, } C \text{ : 動粘性係数}$$

実験値と計算値を比較するといずれの場合も実験値が計算値の約0.2~0.5倍と小さくなっている。また、実験の範囲では濃度が高く、粒径が細かいほど実験値が計算値に比べ小さくなっていることがわかる。

5. おわりに 本研究では、土石流が細かい土砂を含む場合には流体の密度が $m \rho (m > 1)$ になるとして土石流の挙動について考察したが、今後は m を1より大きくする機構、あるいは m の値の評価について考察を進める必要がある。

- 参考文献 1) 高橋保: 土石流の機構について, 第19回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集, 1982
2) 高橋保: 土石流の力学的機構, 工学雑誌, 1989, A-1 3) 水理公式集, P.418