

II-105

泥流型土石流の堆積について

名城大学理工学部 正員 新井宗之
 京都大学防災研究所 正員 高橋 保

1. はじめに: 土石流の停止堆積機構については、従来、石礫型土石流に関する研究が主であった。そして、それらは実験的にも実際の土石流の堆積においても比較的よく適応することが明かにされている¹⁾。しかしながら、火山灰などを主成分とした土石流の堆積では従来の石礫型土石流に基づく堆積モデルでは十分に説明出来ないことも報告されており、水深に比して細かな粒子を主成分にする泥流型土石流の堆積過程を明かにする必要性が生じている。ここでは細粒径の粒子を高濃度に含む流れが急勾配から緩勾配の流路へ流出した場合に土砂が堆積を始める位置について考察する。

2. 実験条件・方法: 実験水路は幅15cm、長さが、上流側6m、下流側4mの可変勾配水路であり、水路床はペンキ仕上げの滑面である。実験砂は $d_{50}=0.102 - 0.016\text{cm}$ 、密度 $\sigma=2.69 - 2.75\text{g/cm}^3$ 。土砂の体積濃度は $C=0.2 - 0.4$ 、単位幅流下流量 $q_T=53.3, 80\text{cm}^3/\text{s}$ 、上・下流の水路勾配は $\theta_u=18^\circ$ 、 $\theta_d=0, 57, 3.1^\circ$ である。実験方法は水路の上流端より土砂を水を供給し土石流を流下させ、緩勾配水路での堆積過程を35mmカメラを使用し、記録、解析を行なった。

3. 理論: 水路勾配変化点から下流側へ x 軸をとり、勾配変化点から土石流の先端までをコントロールボリュームにとれば、連続式と運動量保存則は次のようになる。ただし微小項は省略している。

$$d[(h_1+h_2)/2 \cdot x]/dt = q_T (=v_u h_u) \quad \cdots (1)$$

$$d[(h_1+h_2)/2 \cdot x \rho_m v]/dt = (h_1+h_2)/2 \cdot x \rho_m g \sin \theta_d + \rho_m q_T v_u \cos(\theta_u - \theta_d) - \tau_o \cdot x \quad \cdots (2)$$

ここで、 v_u 、 h_u : 上流側水路における流速、水深、 $\rho_m = (\sigma - \rho_o)C + \rho_o$: 見掛けの平均密度、 θ_u 、 θ_d : 上流側、下流側水路勾配、 q_T : 単位幅流量。式(2)の左辺は勾配変化点から下流へ流入した運動量の時間変化、右辺第一項は重力による推進力、第二項は上流側より流入する運動量の下流側への寄与分、第三項は流体抵抗力である。流体抵抗として、

$\tau_o = \rho_m u_*^2 \quad \cdots (3)$ を用い、水深として平均値 $(h_1+h_2)/2=h$ を用いるとすれば、式(1)、(2)より次式を得る。

$$dV/dt + 1/t \cdot V = V/t + G \quad \cdots (4)$$

ここに、 $V = V_u \cos(\theta_u - \theta_d)$ 、 $G = g(\sin \theta_d - \sin \theta_u)$ $\cdots (5)$ 式(5)の θ_d は上流水路内の土石流中の粒子を浮遊させ続けることのできる限界摩擦速度に対応するエネルギー勾配を表わしており一定であるとする。 $t=0$ で $V=V$ の初期条件で式(4)を解けば、

$$t_L = 2V/G \quad \cdots (6) \quad x_L = V^2/G \quad \cdots (7) \quad \text{となる。}$$

ところで、水深に、比して粒径が小さな粒子を高濃度に含む流れにおいては、粒子と流体が一体となった流体塊の混合の効果が大きいことを明かにしてきた²⁾。固体粒子を浮遊した乱れのエネルギー平衡方程式は³⁾、

$$\rho_m u_*^2 du/dy \int_{y/h}^1 [\rho_o \{1 + (\gamma - 1)c\} / \rho_m] d(y/h) = a(1 - \alpha_1^3 c) u^3 / L + \rho_o (\gamma - 1) V_{pg} c + P \quad (8)$$

ただし、 C : 土砂の体積濃度、 $\gamma = \sigma / \rho_o$ 、 V_p : 粒子の沈降速度、 L : 渦の代表長、 $\tilde{u} = \sqrt{u_*'^2}$ 。式(8)の右辺第三項は粒子の衝突による項である。しかし、 Δ を流れの代表長、 q を流速、 ν を動粘性係数とすると、 $\Delta q / \nu \gg 1$ の場合 $\nu q^2 / \Delta^2 \ll q^3 / \Delta$ であり、 $d / \Delta \ll 1$ とすると、

$a_1 \sigma \lambda^2 d^2 (du/dy)^2 \sin \alpha \approx (d/\Delta)^2 q^2 / \Delta^2 \ll q^3 / \Delta \quad (9)$ であるから P を省略することができよう。

ここで、 du/dy は粒子を高濃度に含む場合についてすでに得ているが²⁾、 $d/h \ll 1$ の場合近似的に

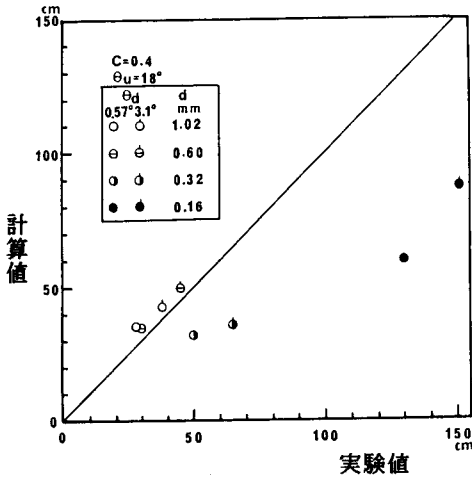


図-1 土石流の先端到達距離

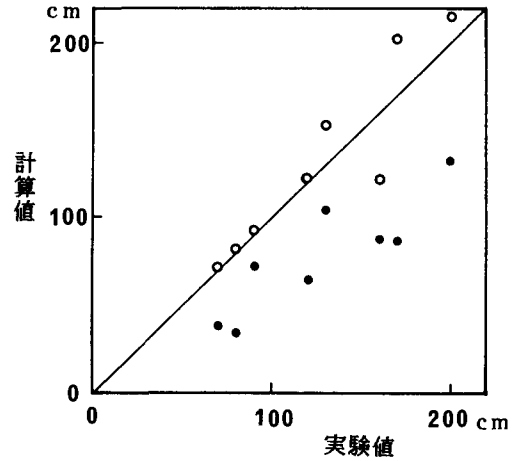


図-2 泥流型土石流の初期堆積位置

$du/dy = U_x/\kappa y$ (10) となる。また、 $(\tilde{u}/\tilde{u}_0)^3 = f(\rho_m/\rho_0, C) = (\rho_m/\rho_0) \cdot f_c$ (11) と仮定し従来明かにされていることを用い、さらに濃度を一樣として式(8)を $y = \delta - h$ で積分して解くと次式を得る。

$$U_x^3 = [(\rho_0/\rho_m)\kappa_0(\gamma-1)gV_pC(h-\delta)] \cdot [\phi \{ \ln(h/\delta) - 1 \} \{ 1 - (1-\alpha^3 C)(\rho_m/\rho_0)f_c \}]^{-1} \quad (12)$$

$$\text{ただし、} \phi = L_0/L = \kappa_0/\kappa = (1 + \beta_1 C + \beta_2 C^2)/2 \cdot [1 + \{1 + 4B\kappa_0(1 + \beta_1 C + \beta_2 C^2)s_1\}^{1/2}] \quad (13)$$

$$B=13, \quad \beta_1=2, \quad \beta_2=-4, \quad \kappa_0=0.4 \quad \cdots (14)$$

$$s_1 = [g(\gamma-1)V_pC(h-\delta)] / [U_x^3 \ln(h/\delta) \{1 + (\gamma-1)C\}] \quad \cdots (15)$$

$$f_c = 1 + a_1 C + a_2 C^2, \quad a_1 = -1.47, \quad a_2 = 7.87 \quad (16)$$

式(12)は右辺を平衡に保つ摩擦速度の関係を表わしている。式(16)の a_1, a_2 は堆積実験の結果から逆算的にもとめている。

4. 考察：石礫型土石流の先端部到達距離 x_L は次のように明かにされている¹⁾。

$$x_L = V^2/G \quad \cdots (17), \text{ここに、} G = \{(\sigma - \rho_0)gC_{d0}\cos\theta_d \tan\alpha\} / \{(\sigma - \rho_0)C_{d0} + \rho_0\} - g\sin\theta_d,$$

$$V = V_{*0}\cos(\theta_d - \theta_*)[1 + \{[(\sigma - \rho_0)C_{d0}K_d + \rho_0]\cos\theta_*\} / \{2[(\sigma - \rho_0)C_{d0} + \rho_0]\} \cdot gh_*/V_*^2}] \quad \cdots (18)$$

図-1は式(17)、(18)による土石流先端到達距離の計算値と実験値との関係を示したものである。土砂濃度は $C=0.4$ 、下流水路勾配 $\theta_d=0.57^\circ, 3.1^\circ$ で粒径を $d_{50}=0.102 - 0.016\text{cm}$ である。これによると粒子径が比較的大きなものは式(17)、(18)とよい一致を示しており、運動量保存則に粒子の衝突応力を考慮した妥当性が示されている。しかし、粒径が $d_{50}=0.016\text{cm}$ と小さくなると実験値との差異が大きくなっており、他の考え方が必要であることを示している。

そこで、式(15)に含まれる θ_* を式(12)から元まるものと等しいとして(7)式によって堆積が始まるまでの距離 x_L を求めて実験値と比較したものが図-2である。図中の黒丸は式(17)、(18)の石礫型土石流モデルによるものであり、白丸が式(12)、(7)、(5)による結果である。これより式(16)で与えたような f_c を用いるならば、ここで採用したような考え方によって泥流の堆積開始地点が求められることがわかる。

5. おわりに：ここで求めた f_c は x_L に対して非常に鋭敏に影響する。 f_c の値を他の方法によって検討することが次の課題となろう。

参考文献：1) 高橋保、吉田等；京大防災研究所年報、第22号、B-2、昭54.4 2) 新井、高橋；土木学会論文集、第375号、II-6、1986.11 3) 日野；土木学会論文集、第92号、昭38.4