

泥流型土石流の堆積過程に関する研究

名城大学理工学部 正員 新井宗之
 名城大学理工学部 ○学生員 杉山能啓
 名城大学理工学部 学生員 伊藤清克

1. はじめに：土石流災害においては土石流堆積域において被害が多く発生している。このため石礫型土石流の堆積に関する研究がすすめられてきており、実験的にも実際の適用例でも比較的よく適応することが明らかにされている。しかしながら、1985年南米コロンビア国のネバド・デル・ルイス火山による土砂災害の例などのように、火山灰を主成分とするような粒径の小さな粒子を高濃度に含む流れの場合、その堆積過程についてはまだ十分明らかにされていない。ここでは一次元水路における堆積過程の実験と数値計算とを比較し、平面域へ流入する土石流の堆積についても実験的に検討した。

2. 実験条件・方法：実験水路は幅15cm、長さが、上流側6mで、一次元堆積実験の場合は下流側4m、平面堆積実験の場合は一辺1.9m四方の水路である。水路床はペンキ塗布で仕上げられている。平面水路床は発砲スチロールである。表-1のように、実験砂は $d_{50}=0.015\sim 0.535\text{cm}$ 、 $\sigma=2.63\sim 2.64\text{g/cm}^3$ 、実験条件としては土砂の流下体積濃度 $C=0.3\sim 0.42$ 、単位幅流量 $q_T=53.3\sim 90.6\text{cm}^3/\text{s/cm}$ 、水路勾配は上流側 $\theta_u=18^\circ$ 、下流側 $\theta_d=0.57^\circ\sim 3.1^\circ$ で実験を行なった。堆積過程の記録、解析のため、35mmモータードライブカメラ、ビデオカメラを用いた。

3. 考察：土石流の堆積過程において、石礫型土石流の場合、緩勾配水路に流入した土石流は河床との間で粒子相互の衝突応力に基づくCoulomb摩擦に相当する応力によって停止し、後続する土石流によりそれが乗り越えられながら、砂礫の水中安息角を保ちつつ堆積するというモデルによって説明されている。しかしながら泥流型土石流においては粒子相互の衝突の効果よりも粒子と流体とが一体となった流体塊の混合の効果が大きいことから¹⁾、基本的には粒子が流体中に浮遊しているものと考えられる。従って泥流型土石流の堆積機構においては河床との粒子相互の衝突の効果よりも流体抵抗を考え、その粒子の堆積においては、流れが浮遊し得る粒子濃度よりも過剰な濃度の粒子が沈降堆積する過程であると考えられる。

一次元水路の場合、水路勾配変化点から下流側へX軸をとり、勾配変化点(II)から土石流先端部(I)までをコントロールボリュームとし、微少項を省略すると、連続式、運動量保存式は、

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

$$d[(h_1+h_2)x\rho_m v/2]/dt=(h_1+h_2)x\rho_m g \sin\theta_d/2+\rho_m q_T v_u \cos(\theta_u-\theta_d)-\tau_0 x \quad (2)$$

となる。ここで、 v_u 、 h_u ：上流側水路における流速、水深、 C ：土砂の容積濃度、 $\rho_m=\rho_0+(\sigma-\rho_0)C$ ：土石流の見掛けの平均密度、 θ_u 、 θ_d ：上流側、下流側水路勾配、 ρ_0 、 σ ：水、粒子の密度、 h_1 、 h_2 ：コントロールボリュームにおける先端、後端の水深。式(2)の右辺第三項の流体抵抗の項として、 $\tau_0=\rho_m U_*^2$ ・・・(4)を考える。式(4)の摩擦速度における勾配をエネルギー勾配 θ_e と考え、コント

表-1 実験条件

実験番号	砂			容積濃度 C	単位幅流量 q_T (cm ³ /s/cm)	水路勾配		下流側水路
	d_{50} (mm)	σ (g/cm ³)	C			θ_u	θ_d	
1	0.015	2.63	0.58	0.30	53.3	18	0.57	一次元
2	0.154	2.63	0.54	0.42	90.6	18	3	平面
3	0.535	2.64	0.55	0.35	80.0	18	3	平面

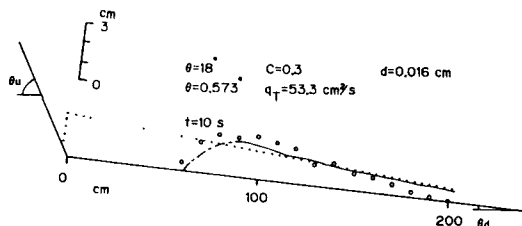


図-1 泥流型土石流の堆積

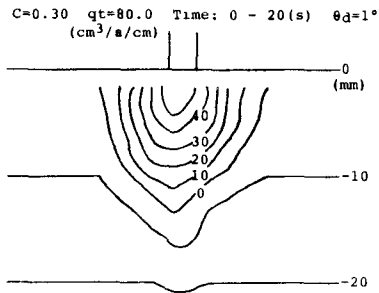


図-2 土石流堆積 ($d_{50}=0.054\text{cm}$)

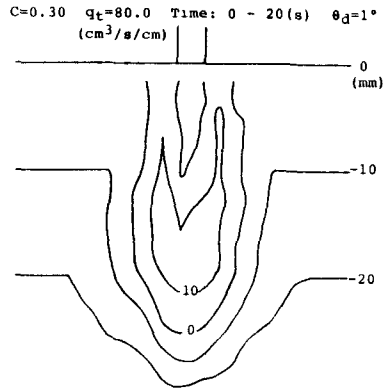


図-3 土石流堆積 ($d_{50}=0.015\text{cm}$)

ロールボリューム内の水深を平均値 h とし、 $t=0$ で $v=V$ の初期条件で θ_0 一定と仮定して上式を解けば勾配変化点から先端までの距離(x_L)及びその到達時間(t_L)は次のようになる。

$$x_L = V^2/G \quad \dots (5), \quad t_L = 2V/G \quad \dots (6), \quad \text{ただし、} V = v_0 \cos(\theta_0 - \theta_d), \quad G = g(\sin \theta_0 - \sin \theta_d) \quad \dots (7)$$

ところで、固体粒子を浮遊した乱れのエネルギー平衡方程式²⁾は、

$$\rho_m U_x^2 du/dy \int_{y/h}^1 [\rho_0 \{1 + (r-1)C\} / \rho_m] d(y/h) = a(1 - \alpha^3 C) \bar{u}^3 / L + \rho_0 (r-1) w_s g C + P \quad (8)$$

ただし、 $\gamma = \sigma / \rho_0$: 粒子の比重、 w_s : 粒子の沈降速度、 L : 渦の代表長。ここで $(\bar{u} / \bar{u}_0)^3 = f(\rho_m / \rho_0, c) = (\rho_m / \rho_0) * f_c \quad \dots (9)$ と仮定し従来の結果を用いて解くと

$$U_x^3 = \{ \rho_0 / \rho_m \kappa_0 (r-1) g w_s C (h - \sigma) \} / [\psi \{ \text{Log}(h/\sigma) - 1 \} \{ 1 - (1 - \alpha^3 C) (\rho_m / \rho_0) f_c \}] \quad (10)$$

$$\text{ただし、} \psi = \kappa_0 / \kappa = (1 + \beta_1 C + \beta_2 C^2) / 2 \cdot [1 + \{ 1 + 4B \kappa_0 (1 + \beta_1 C + \beta_2 C^2) s_1 \}^{1/2}] \quad (11)$$

$$B = 13, \beta_1 = 2, \beta_2 = -4, \kappa_0 = 0.4, s_1 = g(\gamma - 1) w_s C (h - \sigma) / [U_x^3 \text{Log}(h/\sigma) \{ 1 + (\gamma - 1) C \}]$$

$f_c = 1 + a_1 C + a_2 C^2$, $a_1 = -1.47$, $a_2 = 7.87$, 定数 a_1, a_2 は土石流堆積実験より定めている。濃度 C と水深 h が定まれば、式(10)よりその濃度の粒子を浮遊させるエネルギー勾配 θ_0 が求まり、それを式(5)において用いれば泥流型土石流の初期堆積位置 x_L が求まる。

泥流型土石流の堆積過程として初期堆積位置より下流は洪水氾濫などで用いている不定流の運動量式、保存式³⁾, $\partial M / \partial t + \partial(u_0 M) / \partial x = -gh \partial H / \partial x - \tau_x / \rho \quad \dots (12)$, $\partial h / \partial t + \partial H / \partial x = i \quad \dots (13)$ を用いる。ここで、 $M = u_0 h_0$, i : 堆積速度。

図-1は濃度 $C=0.3$, $q_T=53.3\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$, $d_{50}=0.016\text{cm}$ の計算例及び実験結果を示している。図中の実線は上述の方法で求められた計算結果であり、点線は石礫型土石流の堆積モデルの計算値、白丸は実験値である。上述の方法が比較的よく実験結果を示していると思われる。

図-2、図-3は平面域における濃度 $C=0.3$, $q_T=80.0\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$, $\theta_d=1^\circ$, $d_{50}=0.015\text{cm}$, $d_{50}=0.053\text{cm}$ の条件による実験結果である。二つの図の違いは粒径の違いだけで、他の条件は同じである。これからも明らかのように、粒径が比較的大きな石礫型土石流の場合は平面域で半円状又は円形に近い堆積状態を示しているが、粒子径が小さい場合にそれとは異なっており、粒子の沈降堆積過程によるモデルが必要であることが示されている。

参考文献

1) 新井、高橋；泥流型土石流の流動機構、土木学会論文集、第375号、II-6、1986.11, 2) 日野；固体粒子を浮遊した流れの乱流構造の変化、土木学会論文集、第72号、昭38.4, 3) 高橋、中川、西崎；堤防沈壊による洪水危険度の評価に関する研究、京大防災研究所年報、第27号B-2、昭61.4