

土石流の貯水池流入点近傍での堆積過程について

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
 名城大学理工学部 学 員 黒田 崇

1. はじめに: 非粘着性の土砂を高濃度に含む土石流が湛水域に流入した場合、その構成粒子によってその堆積・流動特性が異なる。含有粒子が微細な場合には、密度流として湛水内の流動を継続するが、比較的大きな石礫型土石流の場合には流入点付近で堆積する。そしてその堆積過程については継続して流入する場合、湛水内のデルタフロントはほぼ粒子の水中安息角を保ちながら、上流側堆積勾配はほぼ土石流の発生勾配を保ちながら堆積する。しかしながら流入直後の流入点付近での堆積過程はまだ十分明らかにされていない。そこで、ここではそれがどのような堆積過程のもとにあるのか検討した。

2. 実験及び実験結果: 実験水路は、長さ 6 m, 幅 15.0 cm, 水路下流端に高さ 43 cm の堰を設け、両側は透明アクリル製で、水路床はペンキ塗布仕上げの可変勾配水路である。水路勾配は $\theta=18^\circ$ で堰に水を湛水させ、上流端より水および砂を供給し実験を行った。実験砂は粒径 $d_{50}=0.98$ mm, 密度 $\sigma=2.62$ g/cm³ を用い、流量 $Q_T=800, 1200$ cm³/s, 土砂の流下容積濃度はいずれも $C=0.35$ である。

3. 基礎方程式及び数値計算法: 含有する粒子が停止・堆積するまでは、流れを連続体とすることが可能であり、急勾配一次元河道における重力場での漸変流近似した運動方程式及び連続方程式は (1), (2) 式のようなものである。固体成分の連続式、地盤高の変化は (3), (4) 式のようなものである。(1) 式の底面摩擦応力 τ_{bx} を (5) 式のように表し抵抗則に (6), (7) 式のように土石流の抵抗則を用いる。ただし、その誘導過程から (8) 式を満足しない場合には (9) 式のように対数則を用いるものとする。また、土砂の堆積速度 i については、泥流型土石流の勾配急変などによる外力の低下による掃流力の減少にともない、平衡濃度以上の土砂は沈降堆積するとするモデル¹⁾の式 (10) を用いる。方程式の数値計算には中央差分を用い、運動方程式 (1) 式を表せば (12) ~ (14) 式のようなものである。とくに非線形項 $\partial(uM)/\partial x$ は流速の正負により (14) 式のように前進差分と後退差分を使い分けている。また、固体成分の連続式 (3) 式も非線形項 $\partial(CM)/\partial x$ を流量フラックスの正負により差分を使い分けている。差分格子において水深 h と流量フラックス M とは $\Delta x/2$ ずらした格子上で計算する。差分式で、 $n+1$ は Δt 時間後の値である。

計算における境界条件は、湛水面より上流へ 41.7 cm の位置で矩形的流入ハイドログラフを与えるものとし、下流側境界条件は堰天端上で全幅堰の越流量式で越流するものとする。格子間隔 $\Delta x=2.78$ cm, 時間ステップ $\Delta t=0.001$ sec で計算を行った。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{g}{\rho_m} h^2 \frac{\partial \rho_m}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (1), \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(C_h)}{\partial t} + \frac{\partial(CM)}{\partial x} = C_* i \quad (3), \quad i = -\frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (4), \quad \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} = \frac{f}{8} u |u| \quad (5)$$

$$f = 8 \left[\frac{1}{\kappa} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi} \right) - \sqrt{1 + \phi^2 + \phi} \right\} \right]^{-2} \quad (6)$$

$$\phi^2 = \lambda^2 \left(\frac{\alpha_0}{\kappa^2} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_m} \right) \left(\frac{d}{h} \right)^2, \quad \lambda = \frac{1}{(C_*/C)^{1/3} - 1} \quad (7)$$

$$\frac{h}{d} \geq \frac{s \left\{ \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu_0^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu_0^2}{sgd^3}} \right\}}{\sin \alpha \left\{ sC \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} \right) + 1 \right\}} \quad (8), \quad f = 8 \left\{ A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{h}{\kappa_*} \right) \right\}^{-2} \quad (9)$$

$$i = \begin{cases} -\{1 - (\frac{|u|}{U_c})^m\} \frac{C}{C_*} w_s, & U_* < U_{*c} \\ 0, & U_* \geq U_{*c} \end{cases} \quad (10),$$

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{1}{\phi} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{Y_0}{\phi} \right) - \sqrt{1 + \phi^2} + \phi \right\} \quad (11)$$

$$\frac{M_{i-\frac{1}{2}}^{n+1} - M_{i-\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} + XDX = gh \sin \theta_{b0} \frac{h_i^n + h_{i-1}^n}{2} - g \cos \theta_{b0} \frac{(h_i^n + h_{i-1}^n)(H_i^n - H_{i-1}^n)}{2\Delta x} - \frac{1}{2} g \left(\frac{h_i^n + h_{i-1}^n}{2} \right)^2 \frac{\rho_{mi}^n - \rho_{mi-1}^n}{\Delta x} - \frac{f}{8} u_{i-\frac{1}{2}}^n |u_{i-\frac{1}{2}}^n| \quad (12)$$

$$u_{i-\frac{1}{2}}^n = \frac{M_{i-\frac{1}{2}}^n}{\frac{1}{2}(h_i^n + h_{i-1}^n)} \quad (13), \quad XDX = \frac{\partial(uM)}{\partial x} = \begin{cases} u_{i-\frac{1}{2}}^n M_{i-\frac{1}{2}}^n - u_{i-\frac{3}{2}}^n M_{i-\frac{3}{2}}^n & u \geq 0 \\ u_{i+\frac{1}{2}}^n M_{i+\frac{1}{2}}^n - u_{i-\frac{1}{2}}^n M_{i-\frac{1}{2}}^n & u < 0 \end{cases} \quad (14)$$

ここに、 $M(=h \cdot u)$: x 方向の単位幅流量、 u : x 方向の平均流速、 $H = z_b + h$, h : 流動深、 z_b : 基準面からの河床高さ、 θ_{b0} : x 軸の傾斜角、 τ_{bx} : x 方向の底面摩擦応力、 ρ_m : 流体の見かけの平均密度、

g : 重力加速度、 i : 堆積・侵食速度、 β' : 運動量補正係数である。 C : 個体粒子成分の容積濃度、 C_* : 堆積層中の粒子の容積濃度、 $V_s(=Ch)$: 流動深 h に含まれる個体粒子成分の容積、 $Y_0 = y_0/h$ で、滑面の場合、 $y_0 = a\nu_0/u_*$, $a = 1/9.025$, 粗面の場合 $y_0 = bk_s$, $b = 1/30$, κ : カルマン定数, σ : 個体粒子の密度、 d : 粒子径、 ν_0 : 水の動粘性係数、 α_0 : Bagnold の定数 ($\alpha \sin \alpha = 0.022$) である。

4. 考察: 図-1, 2 は流量 $Q_T=800 \text{ cm}^3/\text{s}$ および $1200 \text{ cm}^3/\text{s}$ で、濃度 $C=0.35$ の流れが湛水域に流入し続けた場合の実験結果 (破線) および計算結果 (実線) が示してある。また、堆積形状の表示時間 T は、土石流の先端が湛水域に流入してから経過時間である。堆積過程のモデルは、土石流が勾配急変などによる掃流力の減少にとともにその流動条件における平衡濃度を超える濃度の粒子が沈降堆積するとするものである。その堆積条件、堆積速度による計算結果は、図-1, 2 に示すようにいずれの流量の場合でも、流入直後の堆積形状は実験結果と比較的よく一致している。しかしながら、堆積形状の下流端や時間の経過とともに、計算値は実験値よりも小さな値を示す傾向がある。これは式 (10) において濃度 C が水深方向の平均値として取り扱っており、時間の経過に伴う水深方向の濃度変化を考慮しない結果と思われる。

参考文献 1) 新井, 高橋: 土木学会第 45 回年講 II, pp.316-317, 1990.

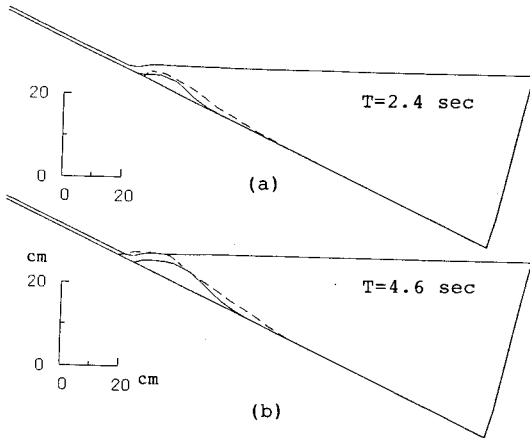


図-1 堆積過程 ($Q_T=800 \text{ cm}^3/\text{s}$)

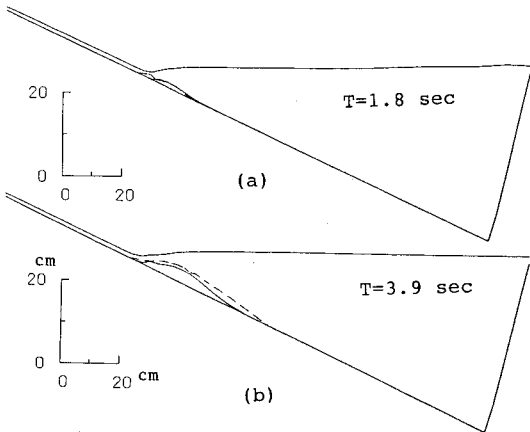


図-2 堆積過程 ($Q_T=1200 \text{ cm}^3/\text{s}$)