

泥流型土石流の堆積シミュレーションについて

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
 名城大学大学院 学生員 伊藤清克

1. はじめに：石礫型土石流の堆積過程については、土石流を連続体として取扱ひ、その停止限界を与えて連続体が停止堆積するというモデルで現象が説明される事が示されている。しかしながら、微細な粒子を高濃度に含む流れの場合には、そのようなモデルが適応できず、別な考え方が必要である。ここでは、勾配急変による土石流において、過剰濃度の粒子が沈降堆積するという考えによる数値計算と実験結果との比較検討を行った。

2. 実験の概要：実験は、長さ6m、幅15cmの直線水路の下流端に190cm四方の平面が接続されている水路で、上流端より土砂及び水を同時に供給し、土石流を流下させ、平面域での堆積形状を測定することにより行った。直線水路の水路勾配は $\theta_u=18^\circ$ 、平面域では $\theta_a=1^\circ, 3^\circ$ である。平面域の河床材料は発泡スチロールである。実験砂は $d_{s0}=0.016\text{cm}$ 、 $\sigma=2.65\text{g/cm}^3$ 、流下流量 $Q_f=800\text{cm}^3/\text{s}$ 、容積濃度 $C=0.35$ の条件で実験を行った。

実験砂			容積濃度	単位幅流量	水路勾配	
$d_{s0}(\text{mm})$	$\sigma(\text{g/cm}^3)$	C.	C	$q_f(\text{cm}^3/\text{s})$	θ_u	θ_a
0.154	2.63	0.57	0.35	53.3	18°	1°

表-1 実験条件

3. 基礎方程式及び計算方法：土石流は停止瞬間までは一種の連続流体であるとしての取扱ひが可能と考えられるので、圧力項を静水圧近似とする漸変流とすれば、2次元平面上の連続流体のx方向及びy方向の運動方程式はそれぞれ次式のようなものである⁽¹⁾⁽²⁾。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta' \frac{\partial (u \cdot M)}{\partial x} + \beta' \frac{\partial (v \cdot M)}{\partial y} = -g \cdot h \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta' \frac{\partial (u \cdot N)}{\partial x} + \beta' \frac{\partial (v \cdot N)}{\partial y} = -g \cdot h \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $u, v: x, y$ 方向の平均流速、 $M(=u \cdot h), N(=v \cdot h): x, y$ 方向の流量フラックス、 h :流動深、 $H: z+h$ 、 z :河床の基面からの高さ、 $\tau_{bx}, \tau_{by}: x, y$ 方向の底面摩擦応力、 β' :運動量補正係数、 g :重力加速度。

また、流動体の連続式及び粒子成分の個体部分に関する連続式はそれぞれ次式のようなである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i \quad \dots\dots\dots (3), \quad \frac{\partial V_s}{\partial t} + \frac{\partial (C \cdot M)}{\partial x} + \frac{\partial (C \cdot N)}{\partial y} = i \cdot C. \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 i :堆積速度、 ρ_m :見かけの平均密度 $\rho_a + (\rho_s - \rho_a) \cdot C$ 、 ρ_a, ρ_s :それぞれ水と粒子の密度、 C :流動層中の個体成分の容積濃度、 C :個体粒子の堆積での容積濃度、 V_s :流動深 h の柱の中に含まれる個体部分の容積。ここで(1),(2)式の底面摩擦応力を次のようなで与える。

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho_m} = \frac{f}{8} \cdot u \cdot \sqrt{u^2 + v^2} \quad \dots\dots\dots (5), \quad \frac{\tau_{by}}{\rho_m} = \frac{f}{8} \cdot v \cdot \sqrt{u^2 + v^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、摩擦係数の f として泥流型土石流に対する抵抗則である次式を用いる⁽³⁾。

$$f = 8 \cdot \left\{ \frac{1}{\kappa} \left[\operatorname{arcsinh} \left\{ \frac{1}{\phi} \right\} - \operatorname{arcsinh} \left\{ \frac{Y_0}{\phi} \right\} - \sqrt{1 + \phi^2} + \phi \right] \right\}^{-2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\phi^2 = \lambda^2 \left[\frac{\alpha_0}{\kappa^2} \right] \left[\frac{\rho_s}{\rho_m} \right] \left[\frac{d}{h} \right]^2, \quad \lambda = \frac{1}{(C/C)^{1/3} - 1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $Y_0 = y_0/h$ で、滑面のとき $y_0 = (a \cdot v_0)/u$ 、 $a=1/9.025$ 、粗面のとき $y_0 = b \cdot k_s$ 、 $b=1/30$ 、 k_s :粗度高さ、 v_0 :水の動粘性係数、 α_0 :バグノルドによる定数($a_1 \cdot \sin \alpha = 0.022$)、 α :粒子の衝突角、 κ :カルマン定数、 $u_* = (g \cdot h \cdot \sin \theta)^{1/2}$ 、 θ :河床勾配である。ただし、(7)式は、粒子が粒子間隙水の乱れによって浮遊していると仮定しているため、 s を粒子の水中比重とすれば、

$$\frac{h}{d} \geq \frac{s \cdot \left\{ \left\{ \frac{2}{3} + \frac{36 \nu_a^2}{s \cdot g \cdot d^3} \right\}^{1/2} - \left\{ \frac{36 \nu_a^2}{s \cdot g \cdot d^3} \right\}^{1/2} \right\}^2}{\sin \theta \left\{ s \cdot C \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} \right) + 1 \right\}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

を満足する必要がある、これを満足しない場合には、式(10)のように対数則が成り立つものとする。また地盤高の変化は式(11)のようである。任意の点の流れにおける濃度が粒子を浮遊できる濃度よりも高い場合、過剰濃度の粒子が沈降堆積するものとして堆積速度を式(12)のように表わすものとする。

$$f = \frac{8}{\left(6.0 + \frac{1}{K} \ln \frac{h}{k_s} \right)^2} \quad \dots\dots(10), \quad \frac{dz}{dt} + i = 0 \quad \dots\dots(11), \quad i = - \left\{ 1 - \left(\frac{|u|}{U_c} \right)^m \right\} \cdot \frac{C_d}{C} \cdot w_s \quad \dots\dots(12)$$

ここに、 w_s : 粒子の沈降速度、 U_c : 濃度 C_d を維持する下限流速、 m : 定数。ただし、 $|u| < U_c$ のとき、 $i=0$ 。

基礎式の差分式として中央差分を用い、非線形項 $\partial(u \cdot M) / \partial x$, $\partial(v \cdot M) / \partial y$ は流速の正負により前進差分と後退差分を使い分ける風上差分を用いる⁴⁾。計算上の格子点は図-1に示すように、 M, N 及び h の関係を $\Delta x/2, \Delta y/2$ ずつずらし、その交点に h を配置する格子点として計算する。また時間ステップは、 M, N, h を同一時間上として計算する。

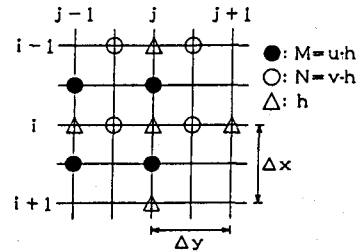


図-1 格子点

4. 考察: 図-2は、平面河床勾配 $\theta_d=1^\circ$ 、実験砂 $d_{50}=0.016\text{cm}$ 、流量 $Q_T=800\text{cm}^3/\text{s}$ 、濃度 $C=0.35$ の土石流を水路上流端より5sec流し、平面域に堆積した実験形状(破線)と同様な境界条件で数値計算した結果(実線)である。数値計算において、格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 5\text{cm}$ 、時間ステップ $\Delta t = 0.01\text{sec}$ を使用し、平面域に流入する土石流のハイドログラフはなるべく実験に近いように与えている。河床の粗度は土石流の平面域での流動形状に近い相当粗度 k_s をえ、マンニングの粗度係数で $n=0.013$ である。ところで式(12)における濃度 C_d を維持することのできる下限の流速 U_c に、粒子が粒子間隙水の乱れによって浮遊できる条件として式(9)を満足する必要があるが、 h/d 及び C が与えられると式(9)を満足する下限の θ がありこれを摩擦損失勾配とし、式(7)より得られる流速を U_c としている。また、任意の点の流速 u が $|u| \geq U_c$ では $i=0$ とする。式(12)における定数 m を $m=0.3$ とした堆積計算と実験結果が図に示されており、比較的良好に対応していると思われる。

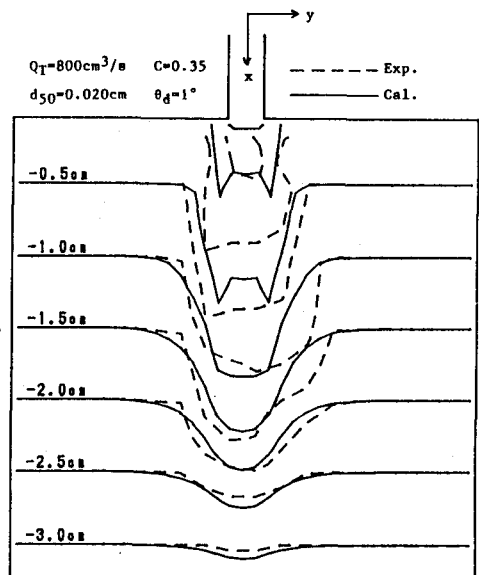


図-2 平面堆積形状(等高線)

5. おわりに: 泥流型土石流の平面域での堆積過程について、漸変流の基礎方程式を基にした差分式による数値計算と実験結果を比較検討した。式(12)の堆積速度式において、 $m=0.3$ とした堆積計算が実験結果を比較的良好に説明し得ることを示した。しかし、まだ計算例が少なく、この m の値が一般的であるかどうか明かではなく、今後検討したい。

参考文献: 1) 高橋, 中川, 西崎: 堤防決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29号B-2, 1986, pp421-450. 2) 高橋, 中川, 山路: 土石流氾濫危険範囲の推定法に関する研究, 京大防災研究所年報, 第30号B-2, 1987, pp611-626. 3) 新井, 高橋: 泥流型土石流の流動機構, 土木学会論文集, No375, 11-6, 1986, pp69-77. 4) 清水康行, 板倉忠興: 河川における2次元流れと河床変動の計算, 土木試験所報告, No.88, 1986, pp.1-65.