

土石流堆積のシミュレーション (1)

九州大学工学部 正 員 平野宗夫

九州大学工学部 正 員 橋本晴行

九州大学大学院 学生員 峯 敏雄

九州大学工学部 学生員 前田雄一

1. はじめに

土石流の堆積に関する研究は、まず勾配の急減によって生ずる単純な2次元堆積問題が取り扱われ¹⁾、ついで振幅を伴う3次元堆積についての研究が進められてきた²⁾。しかしながら実際の堆積場では家屋、道路、田畑などがあり複雑な地形を構成している。また堆積が上流へ遡上し境界が移動するなどの問題も伴っている。本研究は、複雑な地形条件下の堆積問題を取り扱うための手始めとして2次元堆積における境界の移動を組み込んだ計算法について考察したものである。

2. 移動座標系における粒子の停止過程

傾斜角 θ_u の急勾配斜面上で発生した土石流が勾配の急変によって傾斜角 θ_d の緩勾配斜面上に流入し、堆積が上流側水路及び下流側水路を進行していく場合を考える(図-1)。

まず勾配変化点から下流水路に沿って x_0 軸を、堆積の上流端から下流水路に平行に x 軸をそれぞれ取ることにする。

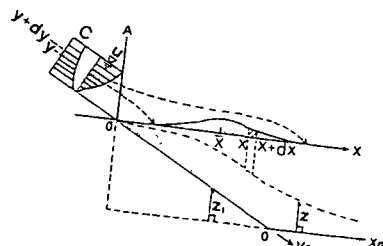


図-1

実験によると堆積の上流端はほぼ一定な速度 v_0 で上流急勾配水路を遡上するので $x = x_0 + v_0 \cos(\theta_u - \theta_d)t$ (1)の関係が存在する。解析の便宜上、検査面A-0を固定するために上流側急勾配水路に沿って v_0 の速度を流れの場に付加することにする。このとき、堆積土砂上の土石流中の粒子の運動方程式は、これまでの研究成果¹⁾を参考にして

$$\frac{dx^2}{dt^2} = -\frac{g}{1 + \rho/(2\sigma)} \{ \sin \theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) - \sin \theta_d \} \equiv -G \quad (2)$$

で近似することができる。これを初期条件 $t=0$ で $dx/dt = (u+v_0)\cos(\theta_u - \theta_d)$ 、 $x=0$ の条件下で式(2)を解くと

$$\frac{dx}{dt} = -Gt + (u+v_0)\cos(\theta_u - \theta_d) \quad (3) \quad x = -\frac{G}{2}t^2 + (u+v_0)\cos(\theta_u - \theta_d)t \quad (4)$$

ここに、 u は検査面において流入して来る土石流の速度分布である。粒子が停止するときの速度 $dx/dt = v_0 \cos(\theta_u - \theta_d)$ であるから、停止に要する時間 t_{sp} 、及び距離 x_{sp} はそれぞれ

$$t_{sp} = (u/G)\cos(\theta_u - \theta_d) \cdots (5), \quad x_{sp} = (u+2v_0)(u/(2G))\cos(\theta_u - \theta_d)t \cdots (6)$$

3. 堆積形状の予測式

勾配 θ_d の上流側水路において高さ $y \sim y+dy$ の区間を速度 u 、濃度 C で通過した粒子群は、勾配 θ_d の下流側水路において、平均的な停止位置 x のまわりに確率密度関数 $p(x|y(t_{sp}))$ に従って停止するものとする。このとき、この粒子群が下流側水路の $x \sim x+dx$ の区間に停止する確率は $p(x|y(t_{sp}))dx$ である。距離 x において流入高さ y に起源をもつ粒子の堆積高を δz 、堆積層における粒子濃度を C とおくと砂の保存式は

$$\left[C \frac{\partial}{\partial t} (\delta z) \right] (x, t) dx = [(u+v_0)C dy] (x, t - t_{sp}) p(x|y(t_{sp})) S(x - v_0 \cos(\theta_u - \theta_d)t_{sp}) dx \quad (7)$$

ここに $S(x - v_0 \cos(\theta_u - \theta_d)t_{sp})$ は単位ステップ関数である。

勾配の変化点から下流側は、 $t=0$ から堆積の可能性が存在するが、変化点から上流側は検査面が到達してからの堆積の可能性は存在しない。その到達時間を t_1 として式(7)を積分すると

$$[\delta z] (x, t) = \int_{t_1}^{t-t_{sp}} \frac{C}{C_0} dy p(x|y(t_{sp})) S(x - v_0 \cos(\theta_u - \theta_d)t_{sp}) dt \quad (8)$$

ここに $t_i = -x / \{v_s \cos(\theta_u - \theta_d)\} S(-x_0)$ 。さらに式(8)を $y=y_{00} \sim y_0$ まで積分することにより条件を解放すると

$$z(x, t) = a \int_{y_{00}}^{y_0} \frac{C}{C_x} (u+v_s)(t-t_{sp}-t_i) p(x|y(t_{sp})) S(x-v_s \cos(\theta_u - \theta_d) t_{sp}) dy + z_i \quad (9)$$

ここに、河床高 $z(x, t)$ は、 x 軸から垂直上向きに測るものとし、河床の初期条件は

$$z_i = -x_0 \tan(\theta_u - \theta_d) S(-x_0)$$

である。また a は積分範囲についての補正係数である。さらに $z' = z - z_i$ として式(9)から

$$\left[\frac{\partial z'}{\partial t} \right]_{(x, t)} = a \int_{y_{00}}^{y_0} \left[\frac{C}{C_x} (u+v_s) \right]_{(x, t-t_{sp})} p(x|y(t_{sp})) S(x-v_s \cos(\theta_u - \theta_d) t_{sp}) dy \quad (10)$$

粒子の流入高さ y , 流入速度 $u(y)$, 平均停止距離 $\bar{x} = x_{sp}$ 及び粒子停止時間 t_{sp} 。との間の関係は式(5), (6)によって与えられるので、 $dy = \frac{G}{(u+v_s) \cos^2(\theta_u - \theta_d) du/dy} d\bar{x}$ (11)

式(11)を(9), (10)に代入するとそれぞれ

$$z = a \int_{\bar{x}_{00}}^{\bar{x}_0} \frac{C}{C_x} \frac{G}{\cos^2(\theta_u - \theta_d) du/dy} (t-t_{sp}-t_i) p(x|y(t_{sp})) S(x-v_s \cos(\theta_u - \theta_d) t_{sp}) d\bar{x} + z_i \quad (12)$$

$$\frac{\partial z'}{\partial t} = a \int_{\bar{x}_{00}}^{\bar{x}_0} \frac{C}{C_x} \frac{G}{\cos^2(\theta_u - \theta_d) du/dy} p(x|y(t_{sp})) S(x-v_s \cos(\theta_u - \theta_d) t_{sp}) d\bar{x} \quad (13)$$

積分範囲の下限値は高さ y_{00} における粒子速度 u_{00} を用いて $\bar{x}_{00} = (u_{00} + 2v_s) \{u_{00} / (2G)\} \cos^2(\theta_u - \theta_d)$

一方、上限値は表面粒子がはじめて停止する時間を境にして次のように与えられる。

$$(i) \quad u_{00} \cos(\theta_u - \theta_d) / G \leq t \leq u_{03} \cos(\theta_u - \theta_d) / G$$

$$y_0 \leq y_{03}, \quad \bar{x}_0 = (u + 2v_s) \{u / (2G)\} \cos^2(\theta_u - \theta_d)$$

$$(ii) \quad t \geq u_{03} \cos(\theta_u - \theta_d) / G$$

$$y_0 = y_{03}, \quad \bar{x}_0 = \bar{x}_{03} = (u_{03} + 2v_s) \{u_{03} / (2G)\} \cos^2(\theta_u - \theta_d)$$

ここで、 y_{03} , u_{03} , $\bar{x}_{03}$ はそれぞれ表面粒子の流入高さ、速度及び平均停止距離である。

ここで問題となるのは上流水路への堆積の遡上速度 v_s の評価である。堆積の上流側への遡上は勾配変化点付近での堆積が寄与することから

$$v_s = \frac{1}{\sin(\theta_u - \theta_d)} \left. \frac{\partial z'}{\partial t} \right|_{x=0} \quad (14)$$

とおくことかきよう。一方、式(13)を計算したところ $x=0$ 近傍で堆積速度の最大値が存在する。そのため $\partial z' / \partial t$ の最大値を用いて式(14)を計算することにする。式(13)には v_s が含まれているため、まず $v_s = v_{s(1)} = 0$ とおいて式(13)より $\partial z' / \partial t$ の最大値を求める。次に式(14)より $v_s = v_{s(1)}$ を求める。これを用いて式(13)より再び $\partial z' / \partial t$ の最大値を求め、式(14)より $v_s = v_{s(2)}$ が計算される。これを数回繰り返すことにより v_s の収束値が容易に計算される。ついて収束値の v_s を用いて式(12)よりある時刻 t における堆積高を計算する。計算結果と実験との比較は講演時に述べる。

4. 結語

堆積の上流側急勾配水路への遡上速度の評価が可能になったため、堆積高の計算が従来よりかなり容易になった。今後は粒子の停止過程において地形の場所的变化を組み込んだ計算法を開発していく予定である。

参考文献、1) 橋本・椿・平野、砂防学会研究発表会、1986。

2) 田崎・平野・橋本・峯・八尋、土木学会西部支部研究発表会、1988。