

## II-134

## 堆積の遡上を考慮した2次元土石流堆積の計算

九州大学大学院 学生員 宮島 正悟

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

## 1. はじめに

勾配の急減による土石流の堆積過程については、椿・橋本<sup>1), 2)</sup>が粒子の停止距離・時間に着目した研究を行い、堆積形状の予測式を求めた。しかしながら、彼らの計算法には、堆積土砂勾配の粒子運動への影響や質量保存則における堆積遡上速度の影響などが考慮されていないなどの問題があった。本研究はこれらの問題点を解決するため、堆積の遡上と同じ速度で移動する座標系において粒子運動を解析し、これをもとに、勾配急減による土石流堆積の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運動の解析

傾斜角  $\theta_u$  の急勾配斜面上で発生した土石流が傾斜角  $\theta_{d0}$  の緩勾配斜面上に流入し、堆積が上・下流の両方向に進行していく場合を考える。堆積の上流端とともに移動する  $x_1$  座標系を導入し(図-1)、堆積高を  $z$ 、堆積表面に沿う曲線長を  $l$ 、任意点での堆積土砂の傾斜角を  $\theta_d$  とする。解析の便宜上、検査面  $y_{d1}$  軸を固定し、堆積遡上速度  $v_B$  を速度分布  $u(y)$  の流れに付加する。堆積土砂上の粒子の運動方程式は、椿<sup>1)</sup>と同様な考察を行い、次のように近似される。

$$\frac{d^2 l}{dt^2} = - \frac{g}{1+\rho/(2\sigma)} \{ \sin\theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_{di}) - \sin\theta_{d0} \} \equiv -G(l, t) \quad (1)$$

$$\text{ここに、} \quad l = \int_0^{x_1} \left\{ 1 + \left( \frac{\partial z}{\partial x_1} \right)^2 \right\}^{1/2} dx_1$$

減速度  $G(l, t)$  は粒子が停止するまで時間的に一定と仮定する。初期条件  $x_1=0, v_1=(u+v_B)\cos(\theta_u - \theta_{d1}) \equiv v_0$  のもとで(1)式を解くと、

$$v_l = \sqrt{v_0^2 - 2 \int_0^l G(l, t_i) dl} \quad (2)$$

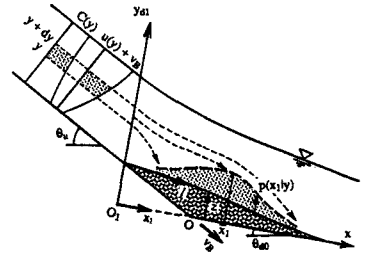


図-1 堆積モデル

粒子が停止するときの速度は  $v_l = v_B \cos(\theta_u - \theta_d)$  であるから、停止距離  $l_{sp}$ 、時間  $t_{sp}$  はそれぞれ

$$(u+v_B)^2 \cos^2(\theta_u - \theta_{di}) - v_B^2 \cos^2(\theta_u - \theta_d) = 2 \int_0^{l_{sp}} G(l, t_i) dl \quad (3)$$

$$t_{sp} = \int_0^{l_{sp}} \frac{dl}{v_l} \quad (4)$$

一方、任意の地点での堆積土砂勾配  $\theta_d$  は、 $\theta_d = \theta_{d0} - \tan^{-1} \frac{\partial z}{\partial x_1}$  と表される。 $\frac{\partial z}{\partial x_1}$  が微小の場合は停止距離  $l_{sp}$  は次のように近似される。

$$l_{sp} = \bar{l} = \frac{1}{2G_0} u(u+2v_B) \cos^2(\theta_u - \theta_{di}) - \frac{v_B^2}{2G_0} [\Delta_2]_{\bar{x}_1} + \frac{g}{G_0 \{1+\rho/(2\sigma)\}} \int_0^{\bar{l}} \Delta_1 dl \quad (5)$$

$$\text{ここに、} \quad G_0 = \frac{g}{1+\rho/(2\sigma)} \{ \sin\theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_{di}) - \sin\theta_{d0} \}$$

$\Delta_1, \Delta_2$  は、紙面の都合上その式は省略するが、 $\frac{\partial z}{\partial x_1}, \theta_u, \theta_{d0}$  の関数である。(5)式の右辺第1項は堆積土砂勾配を無視したときの停止距離、第2、第3項は堆積土砂の影響を考慮した項で、停止距離を長くする方向に作用する。

## 3. 堆積形状の計算式の誘導

粒子の堆積を椿<sup>1)</sup>に従って次のようにモデル化しよう。急勾配斜面において高さ  $y \sim y+dy$  の区間を速度  $u+v_B$ 、濃度  $C$  で通過した粒子群は、緩勾配斜面において平均的な停止位置  $\bar{x}_1$  の周りに確率密度関数  $p(x_1|y)$

に従って停止するものとする。距離 $x_1$ において、流入高さ $y$ に起源をもつ粒子の堆積高を $\delta z_v$ 、堆積層における粒子濃度を $C$ とおくと、砂の保存式は、単位ステップ関数 $s$ を用いて、

$$\frac{\partial(\delta z_v)}{\partial t} = \left[ (u+v_B) \frac{C}{C^*} dy \right] \cdot p(x_1|y(t_{sp})) s \left( x_1 - \int_{t_1-t_{sp}}^{t_1} v_B \cos(\theta_u - \theta_d) dt \right) \quad (6)$$

(6)式を $y=y_{G0} \sim y_G$ について積分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \int_{y_{G0}}^{y_G} \frac{C}{C^*} \frac{G_0}{\frac{dy}{\cos^2(\theta_u - \theta_d)}} \cdot p(x_1|y) s \left( x_1 - \int_{t_1-t_{sp}}^{t_1} v_B \cos(\theta_u - \theta_d) dt \right) \Delta d\bar{x}_1 \quad (7)$$

ここに、 $\Delta$ は $\frac{\partial z}{\partial x_1}$ の関数で、 $dy$ と $d\bar{x}_1$ の関係式における堆積土砂勾配を考慮した付加項である。さて、問題は堆積上流端の遡上速度 $v_B$ の評価である。堆積の遡上が堆積上流端( $x_1=0$ )での堆積によるものであるから、その速度 $v_B$ は $x_1=0$ における堆積速度 $\frac{\partial z}{\partial t}$ に比例することが考えられ、次のような関係を仮定する。

$$v_B = \frac{1}{\sin(\theta_u - \theta_d)} \left[ \frac{\partial z}{\partial t} \right]_{x_1=0} \approx \frac{1}{\sin(\theta_u - \theta_d)} \left[ \frac{\partial z}{\partial t} \right]_{Max}$$

ここに、 $\frac{\partial z}{\partial t}$ は一般に原点近傍で最大値をとるので $\left[ \frac{\partial z}{\partial t} \right]_{x_1=0}$ は上式のように置き換えられている。

以上の式において堆積土砂勾配の影響を無視すると、次のような解析解を得る。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \int_{y_{G0}}^{y_G} \frac{C}{C^*} \frac{G_0}{\frac{dy}{\cos^2(\theta_u - \theta_d)}} \cdot p(x_1|y(t_{sp})) s(x_1 - v_B \cos(\theta_u - \theta_d) t_{sp}) d\bar{x}_1 \quad (9)$$

$$z = \int_{x_{1G0}}^{\bar{x}_{1G}} \frac{C}{C^*} \frac{G_0}{\frac{dy}{\cos^3(\theta_u - \theta_d) v_B}} \left[ \int_{x+v_B \cos(\theta_u - \theta_d) t_{sp}}^{x+v_B \cos(\theta_u - \theta_d) t_{sp}} p(x_1|y(t_{sp})) s(x_1 - v_B \cos(\theta_u - \theta_d) t_{sp}) dx_1 \right] d\bar{x}_1 - x \tan(\theta_u - \theta_d) s(-x) \quad (10)$$

#### 4. 堆積形状の計算結果と考察

計算手順を図-2に示す。図-3は堆積土砂勾配の変化を考慮した場合と無視した場合それぞれの計算値の比較を行ったものである。両者のケースの計算結果に顕著な差異は認められないので、勾配変化を無視した計算法で十分であると予想される。図-4、5は式(10)を用いた計算値と実験値との比較を行ったものである。計算曲線は上流部では実験値より低い堆積高、下流部では逆に高い堆積高となっている。これは、浸透水による堆積の促進効果を考慮していないためと思われる。

#### 5. あとがき

移動座標系を導入することにより従来より合理的な計算が行えるようになった。しかしながら、堆積土砂勾配の影響を考慮した計算法では、式が複雑な上に、計算時間を要するなど問題が残った。今後はさらに検討を加えていきたい。

#### 参考文献

- 1) 椿・橋本、第28回水理講演会論文集, 1984
- 2) 橋本・溜池他2名、第29回水理講演会論文集, 1985

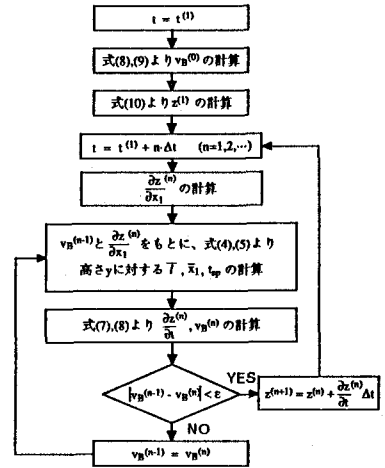


図-2 計算手順フローチャート

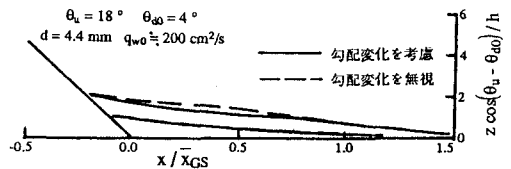


図-3 勾配変化を考慮した場合と無視した場合の比較（固定床）

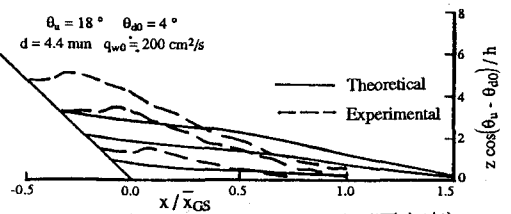


図-4 計算値と実験値の比較（固定床）

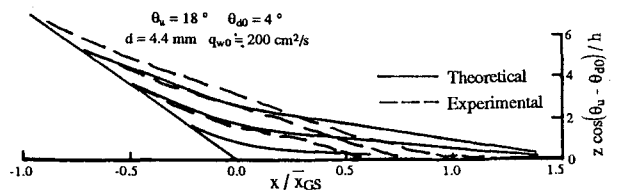


図-5 計算値と実験値の比較（移動床）