

粒子の停止距離に着目した土石流堆積の計算法

九州大学 正 員 平野宗夫 橋本晴行
九州大学 学生員 宮島正悟○木藤賢一

1. まえがき

土石流災害の多くは、勾配が急減し幅の急拡大する渓流出口付近など、土石流が流出して堆積するところに発生する。その堆積危険地帯を予測するためには、土石流中の粒子がどのような位置に停止するかを明らかにする必要がある。そのため本研究は、まず、土石流中の粒子の停止過程について検討し、それに関する諸係数を実験により求めた。ついでこの成果を用いて堆積形状の計算法を導いた。

2. 粒子の停止位置についての理論的検討

図-1に示すように、土石流が幅 B_u の急勾配水路から幅の急拡大した緩勾配の堆積域に流入した瞬間に、土石流は両側壁の拘束を免れ、その幅を瞬間的に拡大するものとする。このとき、急勾配水路における微小幅 dB_u は堆積域では拡大して幅 dB_d となると考える。また、勾配変化点直前から堆積域突入直後にかけて粒子位置は $(0, y_u, z_u)$ から $(0, y_d, z_d)$ に、粒子速度は $(u, 0, 0)$ から $(u_d, v_d, 0)$ にそれぞれ変換されるとする。ここに、 $a_0 = \sqrt{1 + (v_{d0}/u_{d0})^2}$ として、 $z_{d0} = z_u / [a_0 \cos(\theta_u - \theta_d) \cdot dB_d / dB_u]$ 、 $u_{d0} = u(z_u) \cos(\theta_u - \theta_d)$ 、幅の拡大率 $dy_d/dy_u = a_0 (dB_d / dB_u)$ と仮定される。なお、添字 u, d はそれぞれ上流側、下流側斜面における物理量を表す。従って、急勾配水路および堆積域上で運動方程式をたて整理すると、

$$d^2x/dt^2 = -g(1 + \rho/2\sigma) \{ a_0 \left(\frac{dy_d}{dy_u} \right)^3 \sin\theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) - \sin\theta_d \} = -G_x \quad (1)$$

$$d^2y/dt^2 = -g(1 + \rho/2\sigma) \{ a_0 \left(\frac{dy_d}{dy_u} \right)^3 \sin\theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) \left(\frac{y_{d0}}{u_{d0}} \right) \} = -G_y \quad (2)$$

初期条件 $t=0$ で $x=0$, $dx/dt=u_{d0}$, $y=y_{d0}$, $dy/dt=v_{d0}$ のもとで(1), (2)式を解くと、粒子の x_d, y_d 方向の停止時間 t_x, t_y 、およびその移動距離 x_{sp}, y_{sp} はそれぞれ、

$$t_x = u(z_u) \cos(\theta_u - \theta_d) / G_x \quad (3)$$

$$t_y = v_{d0} / G_y \quad (4)$$

$$y_{sp} = v_{d0}^2 / (2G_y) + y_{d0} \quad (5)$$

$$y_{sp} = v_{d0}^2 / (2G_y) + y_{d0} \quad (6)$$

さて、上式に含まれる dy_d/dy_u と v_{d0}/u_{d0} は次のように求められる。まず dy_d/dy_u の評価については、横断方向の水面形を

$$H/H_0 = \{1 - (2y_{d0}/B_d)^2\}^{K_1} \quad (7)$$

と仮定し、連続条件を用いて求めると、

$$\frac{dy_d}{dy_u} = \beta \{1 - Y_{d0}^2\}^{K_1} \quad (8)$$

ここに、急勾配水路における水深を h として
 $\beta = h / \{H_0 \cos(\theta_u - \theta_d)\}$ $Y_{d0} = 2y_{d0}/B_d$

$$\frac{y_u}{B_u} = \frac{1}{2} \int_0^{Y_{d0}} (1 - Y_d^2)^{K_1} dY_d / \int_0^1 (1 - Y_d^2)^{K_1} dY_d$$

である。一方、 x_d 方向の平均停止距離の実験値を式(5)に代入すると、 $a_0^{1/3} (dy_d/dy_u)$ を逆算することができる。この逆算値を $a_0=1$ と近似して式(8)と比較すると、式(8)における最適な実験係数を求めることができる。

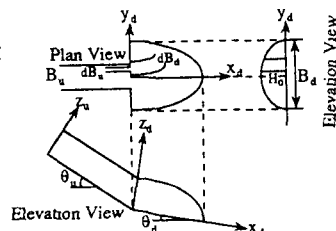


図-1 堆積水路に流入した土石流の模式図

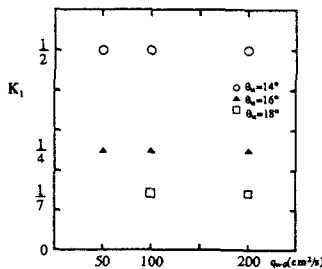


図-2 流量と K_1 との関係

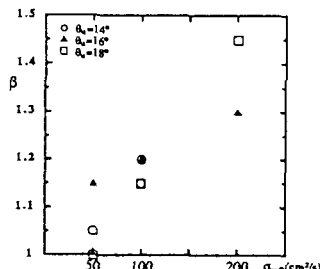


図-3 流量と β との関係

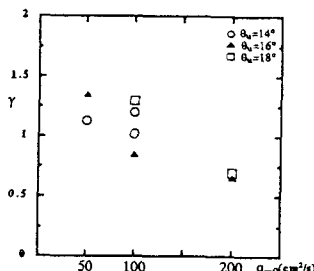


図-4 流量と γ との関係

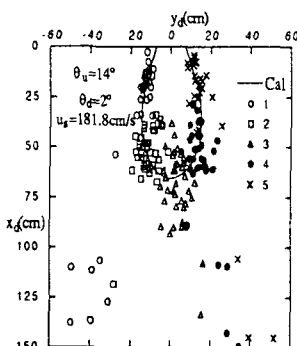


図-5 着色砂礫の停止位置

次に、 v_{d0}/u_{d0} については、 y_d 方向の平均停止距離の実験値を式(6)に代入して求めることができる。その結果、いずれの勾配においてもほぼ、 $v_{d0}/u_{d0} = \gamma y_u/B_u$ の関係を満たしていることがわかった。ここに、 γ は比例定数である。

図-2, 3, 4は、実験結果よりそれぞれの上流側勾配および供給水量についてそれぞれの係数を評価したものである。 K_1 は流量に関係なく、勾配が急になるほど減少している。また、 β は勾配に関係なく流量が増加するにつれて増加し、一方、 γ は減少している。これらの係数を用いて式(5), (6)より求めた計算結果を図-5に示す。

平均停止距離の評価式として式(5), (6)がほぼ妥当であることがわかる。

3. 土石流の初期堆積形状に関する考察

図-6に示すように、上流側水路の $z_u \sim z_u + dz_u$, $y_u \sim y_u + dy_u$ 区間を濃度 C 、速度 $u(z_u)$ で通過した粒子群は、堆積水路において平均停止距離のまわりに2次元確率密度関数 $p_{zu, yu}(x_d, y_d)$ に従って停止するものとする。このとき流入位置 (z_u, y_u) に起源をもつ粒子の堆積高を $\delta z_{zu, yu}$ 、堆積層における粒子濃度を C^* とおくと、砂の保存式は

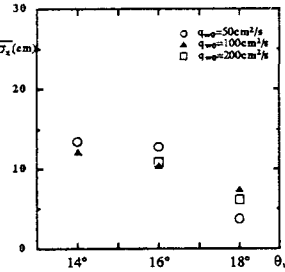


図-7 θ_u と $\bar{\sigma}_x$ との関係

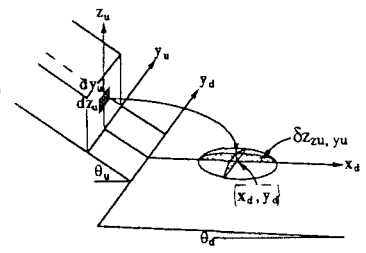


図-6 土砂粒子の堆積モデル

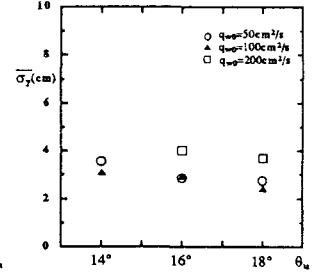


図-8 θ_u と $\bar{\sigma}_y$ との関係

となる。式(9)を時間 t で積分し、堆積開始時間を t_{sp} とおくと

$$\delta z_{zu, yu} = \frac{C(z_u)}{C^*} u(z_u) (t - t_{sp}) p_{zu, yu}(x_d, y_d) dz_u dy_u \quad (10)$$

上流側断面の範囲に渡って式(10)を積分すると (x_d, y_d) における堆積高 z は

$$z = \int_{d/2}^h \int_{-Bu/2}^{Bu/2} \frac{C(z_u)}{C^*} u(z_u) (t - t_{sp}) p_{zu, yu}(x_d, y_d) dz_u dy_u \quad (11)$$

である。ここで堆積開始時間 t_{sp} は粒子の停止に要する時間であり、 $t_x > t_y$ であるから、 $t_{sp} = t_x$ とおける。停止確率密度関数 $p_{zu, yu}(x_d, y_d)$ としては2次元正規分布を仮定し、次式で与えられる。

$$p_{zu, yu}(x_d, y_d) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-R_{xy}^2} \sigma_x \sigma_y} \exp \left[-\frac{1}{2(1-R_{xy}^2)} \left\{ \frac{(x_d - \bar{x}_d)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2R_{xy}(x_d - \bar{x}_d)(y_d - \bar{y}_d)}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y_d - \bar{y}_d)^2}{\sigma_y^2} \right\} \right]$$

式中の標準偏差 σ_x, σ_y ・相関係数 R_{xy} および変動係数 α_x は表面粒子の停止状況の実験結果より得られ、図-7, 8, 9は $\sigma_x, \sigma_y, \alpha_x$ の y_u 方向の平均値を示したものである。 $\bar{\sigma}_x$ は勾配が急なほど減少し、 $\bar{\sigma}_y$ は勾配・流量に関係なくほぼ3.5cmである。 $\bar{\alpha}_x$ は勾配・流量の増加とともに減少している。式(11)による堆積高の計算結果を図-10に示す。計算値は水路中央で比較的低くなっているが、これは、中央部分で流動性がよく堆積に遅れが生じているためである。

4. あとがき

粒子の停止位置の理論的考察より平均停止距離を評価し、それをもとに堆積形状の計算式を導いた。また、実験係数や統計量は勾配や流量に依存して変化することがわかった。今後、実用的な見地から実験係数や統計量を評価する必要がある。

参考文献 1) 田崎武詞・平野宗夫・橋本晴行・峯敏雄・八尋和朗：勾配の急減と幅の急拡大による土石流の堆積過程(3)、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、1988。

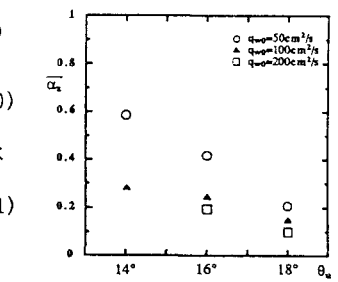


図-9 θ_u と $\bar{\alpha}_x$ との関係

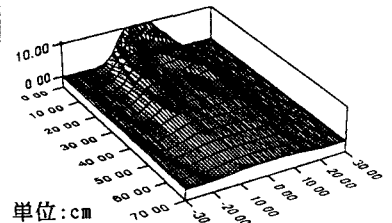


図-10 計算による堆積形状の鳥瞰図

($\theta_u = 16^\circ$, $\theta_d = 4^\circ$, $t = 3.6 \text{ sec}$)