

勾配の急減と幅の急拡大による土石流の堆積過程(3)

九州大学大学院 学生員 〇田崎武詞
九州大学工学部 正員 平野宗夫 橋本晴行
九州大学工学部 学生員 峯 敏雄 八尋和郎

1. まえがき

土石流災害の多くは勾配が急減し、幅が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で発生する。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、前報¹⁾に引き続いて、土石流堆積における粒子の停止距離および堆積形状について理論的検討を加えたものである。

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 の上流側水路から幅が広くて勾配が緩やかな堆積域に突入した瞬間を考える。このとき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。一方、流れの中の微小部分に着目すると、上流側水路における微小幅 dB_u は堆積域では拡大して幅 dB_d をもつものとする。

二次元等流状態の土石流では粒子には抵抗力として F^g が、推進力として流体力 F^f と重力がそれぞれ作用している。従って上流側水路での微小幅 dB_u 中の質量 m の単一粒子の流れ方向の力のつり合い式は、 $0 = -F_{ux}^g + F_{ux}^f + mgsin\theta_u$ (1) となる。一方、堆積域上の微小幅 dB_d における粒子の運動方程式は、

$$x: m(1 + \frac{\rho}{2\sigma}) \frac{d^2 x}{dt^2} = -F_{dx}^g + F_{dx}^f + mgsin\theta_d \quad (2), \quad y: m(1 + \frac{\rho}{2\sigma}) \frac{d^2 y_d}{dt^2} = -F_{dy}^g + F_{dy}^f \quad (3)$$

ここに、添字 u, d はそれぞれ上流側、下流側斜面上における物理量を表す。勾配変化点直前(上流側水路)での粒子位置 $(0, y_u, z)$ および、粒子速度 $(u, 0, 0)$ は堆積域突入直後では、

$$(0, y_u, z) \rightarrow (0, y_{d0}, z_{d0}) = \{ 0, y_{d0}, z / [\sqrt{(1 + (v_{d0}/u_{d0})^2)} \cos(\theta_u - \theta_d) \frac{dB_d}{dB_u}] \}$$

$$(u, 0, 0) \rightarrow (u_{d0}, v_{d0}, 0) = \{ u \cos(\theta_u - \theta_d), v_{d0}, 0 \}$$

に変換されると仮定し、粒子間力の表示式²⁾を参照すると

$$F_{dx}^g = a_0 F_{ux}^g (\frac{dy_d}{y_u})^3 \cos^5(\theta_u - \theta_d) = a_0 (F_{ux}^f + mgsin\theta_u) (\frac{dy_d}{y_u})^3 \cos^5(\theta_u - \theta_d)$$

$$F_{dy}^g = (\frac{v_{d0}}{u_{d0}}) F_{dx}^g = (\frac{v_{d0}}{u_{d0}}) a_0 (F_{ux}^f + mgsin\theta_u) (\frac{dy_d}{y_u})^3 \cos^5(\theta_u - \theta_d)$$

と近似される。ここで、 $a_0 = \sqrt{(1 + (v_{d0}/u_{d0})^2)}$, $dy_d/dy_u = a_0 (dB_d/dB_u)$ である。また、粒子間力 F_{dx}^g は、堆積域突入直後(F_{d0}^g)から停止に至るまで時間的に一定と仮定している。これを(2),(3)式に代入し、土石流では流体力の役割は粒子間力に比べ小さく流体力 F^f を含む項は相殺し合うものと仮定すると

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{g}{1 + \rho/2\sigma} \{ a_0 (\frac{dy_d}{y_u})^3 \sin\theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) - \sin\theta_d \} \equiv -G_x \quad (4)$$

$$\frac{d^2 y_d}{dt^2} = -\frac{g}{1 + \rho/2\sigma} \{ a_0 (\frac{dy_d}{y_u})^3 \sin\theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) (\frac{v_{d0}}{u_{d0}}) \} \equiv -G_{y_d} \quad (5)$$

初期条件 $t=0$ で $x=0$, $dx/dt=u_0$, $y_d=y_{d0}$, $dy_d/dt=v_{d0}$ のもとで(4), (5)式を解くと、粒子の x, y_d 方向それぞれの速度が0となる時間

t_x, t_{y_d} および、その移動距離 x_{sp}, y_{dsp} は、

$$t_x = u(y) \cos(\theta_u - \theta_d) / G_x \quad (6)$$

$$t_{y_d} = v_{d0} / G_{y_d} \quad (6)'$$

$$x_{sp} = u^2(y) \cos^2(\theta_u - \theta_d) / 2G_x \quad (7)$$

$$y_{dsp} = v_{d0}^2 / 2G_{y_d} + y_{d0} \quad (7)'$$

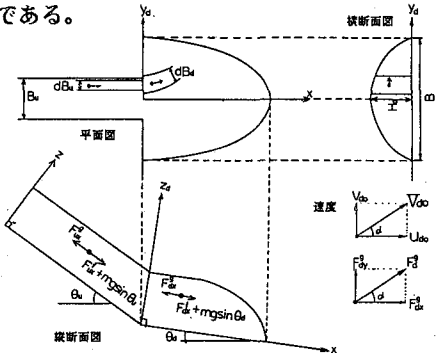


図-1

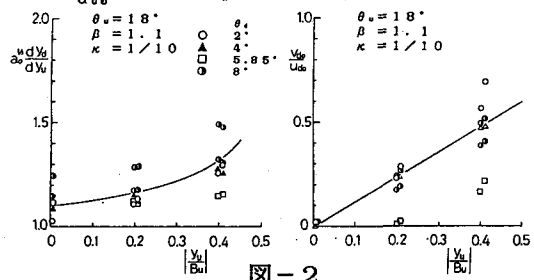


図-2

ここで、 $a_0(dy_d/dy_u)^3$ は、前報¹⁾の実験値 $\bar{x}$ (粒子の平均停止距離)を用いて(7)式より逆算し次式で与えられる。

$$a_0\left(\frac{dy_d}{dy_u}\right)^3 = \left[\beta\left(1-2\frac{y_u}{B_u}\right)^{-\frac{\kappa}{\kappa+1}}\right]^3 \quad (8)$$

また、 v_{d0}/u_{d0} は同様に実験値 $\bar{y}_d$ (粒子の平均停止距離)を用いて(7)'式より逆算した。その結果を図-2に示す。 y_{d0} は(8)式と横方向の連続の条件より次式で与えられる。

$$y_{d0} = \frac{B_u}{2}(\kappa+1)\beta\left\{1-\left(1-2\frac{y_u}{B_u}\right)^{\frac{1}{\kappa+1}}\right\}$$

図-3は出口付近で土石流表面に落とした粒子の停止状況¹⁾と(7)および(7)'式による計算値である。

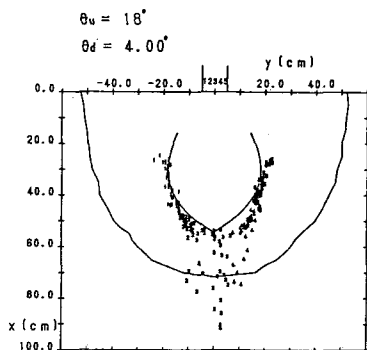


図-3

3. 土石流の堆積形状に関する考察

図-4に示すように、上流側水路の $y \sim y+dy, y_u \sim y_u+dy_u$ 区間を濃度 c 、速度 u で通過した粒子群は、下流側水路において平均的な停止距離 $\bar{x}, \bar{y}_d$ のまわりに、2次元確率密度関数 $P_{y,y_u}(x,y_d)$ に従って停止するものとする。流入位置 (y, y_u) に起源をもつ粒子の堆積高を $\delta Z_{y,y_u}$ 、堆積層における粒子濃度を c として、砂の保存式は次式となる。

$$c \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\delta Z_{y,y_u}) dx dy = u(y) c(y) P_{y,y_u}(x,y_d) dy dy_u dx dy \quad (9)$$

(9)式を時間 t で積分し、堆積開始時間として(6)式を用いると

$$\delta Z_{y,y_u} = u(y) c(y) / c \cdot (t - t_x) P_{y,y_u}(x,y_d) dy dy_u \quad (10)$$

となる。また、流入する粒子の高さ y と $\bar{x}, t_x$ との関係は(6), (6)', (7)式で与えられる。いま、 $P_{y,y_u}(x,y_d)$ として2次元正規分布を仮定すると、時間 t 、位置 (x, y_d) における堆積高 Z_d を求める式として、(10)式より次式が導かれる。

$$Z_d = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} \frac{u(y) c(y) (t - t_x)}{c \cdot 2\pi \sigma_x \sigma_{y_d} \sqrt{1-\rho^2}} \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \frac{(x-\bar{x})^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho(x-\bar{x})(y_d-\bar{y}_d)}{\sigma_x \sigma_{y_d}} + \frac{(y_d-\bar{y}_d)^2}{\sigma_{y_d}^2} \right\} \right] dy dy_u \quad (11)$$

従って、土石流の堆積は上流側水路から流入する土石流の特性、すなわち粒子の濃度や平均停止距離 $\bar{x}$ を通じて速度分布に規定されることが分かる。以上のことから流入する土石流の流動特性に関する実験を行い土石流における力のつり合い方程式³⁾から求めた次式を満たすように流入条件 $c_0/c, u_0/u_s$ を求め与えた。その結果を表-1に示す。

$$\frac{\bar{u}}{u_s} = \left(\frac{\phi C^*}{x} \right)^{-1} \left(1 - \frac{u_0}{u_s} \right) \frac{\int_{C_s}^{C_0} \frac{2C - C_s}{C - C_0} F(C) dC}{\int_{C_s}^{C_0} F(C) dC} + \frac{u_0}{u_s} \quad (12)$$

ここで、標準偏差・相関係数を土石流表面粒子の停止状況¹⁾の実験結果より与えた。その計算結果を図-5に示す。

4. あとがき

以上、粒子の停止位置について理論的検討を加えた結果、平均的停止位置の予測式を導き初期堆積形状を明らかにすることができた。今後、堆積の上流側水路への遡上を考慮した堆積形状の予測式の検討が必要である。最後に、本研究を遂行するに当たり多大の助力を受けた九州大学の松岡雅博氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橋本・藤田・平野・田崎, 土木学会西部支部研究発表会 1987.
- 2) 椿・橋本, 第28回水理講演会 1984.
- 3) 椿・橋本・末次, 土木学会論文報告集, 第317号 1982.

表-1

d (mm)	q_{u0} (cm ² /s)	θ_u	θ_d	h (cm)	u_s (cm/s)	$\frac{\bar{u}}{u_s}$	$\frac{c_0}{c}$	$\frac{u_0}{u_s}$
1.9	100.5	18°	4°	4.1	180	0.622	0.76	0.06

$\theta_u = 18^\circ, \theta_d = 4.00^\circ$
 $d = 1.90 \text{ mm}$
 $T_0 = 2.90 \text{ sec}$

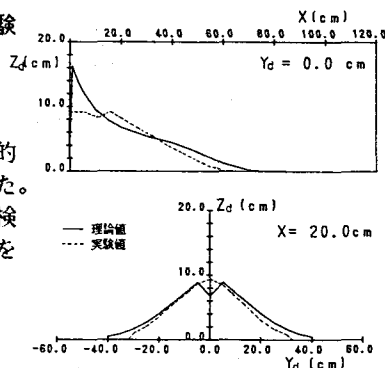


図-5