

九州工学部 ○橋本 晴行
 長崎大学工学部 椿 康一郎
 九州工学部 平野 宗夫

1. はじめに

土石流災害は、主として、勾配の急減と幅が急拡大する渓流出口付近など土石流堆積場で発生する。そのため、土石流の堆積に関する力学的、実験的研究として、まず勾配の急減による、生ずる単純な2次元堆積問題を取り扱われ、^{1),2)} について振幅をも伴う3次元堆積についての研究が進められてきた。³⁾ 本研究は、2次元の堆積問題について、ラグランジュ的観点から検討を行ったもので、本文においては土石流中の粒子の減速・停止過程を実験・理論両面から明らかにするとともに、この成果に基づいて土石流の堆積形状の計算方法を導いている。

2. 粒子の停止過程に関する実験

(1) 実験の方法

図-1に示すような勾配の急変点をもつ幅10cmの水路において、上流側移動床部に平均粒径 $d=7mm$ 、密度 $\sigma = 2.63 g/cm^3$ の均一な砂みき粒子を厚さ10cmに敷き、上流側から単位幅流量 $q_{w0}=220 cm^2/s$ の水を供給して土石流段波を発生・流下させ、緩勾配の固定床水路に流入させる実験を行った。上流側水路勾配 $\theta_u=18^\circ$ に固定し、下流側勾配 $\theta_d=2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ の4種類に設定した。 $x = -20 \sim 80 cm$ 区間を2台の16mm高速度カメラを用いて撮影し、土石流中の粒子が勾配変化点に達して減速・停止するまでの軌跡を詳細に追跡した。

(2) 実験の結果

16mmフィルムより土石流中の粒子を追跡し、勾配変化点にて y_d 軸を通過する直前の粒子速度 U と停止位置 x_{sp} との関係を求めたのが図-2である。バラツキは大きいものの、流入速度の大きい粒子ほど停止距離は長い。次に、測定した流入速度の範囲を5等分に区分して、それぞれ内の速度をもつ粒子の停止距離について平均値 \bar{x}_{sp} 、標準偏差 S 、および変動係数 $\alpha = S/\bar{x}_{sp}$ を求めたのが図-3である。変動

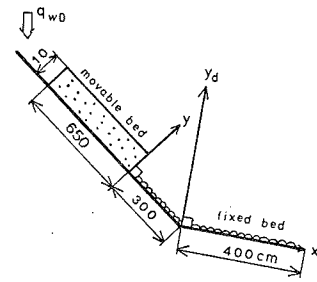
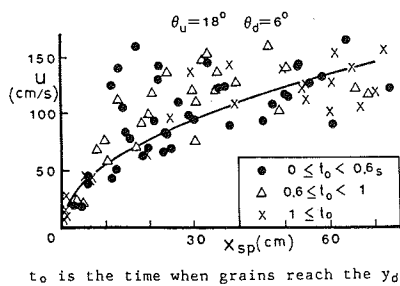


図-1 実験水路

係数は約0.42の一定値をとることが分る。



t_0 is the time when grains reach the y_d axis.

図-2 粒子速度と停止距離の関係

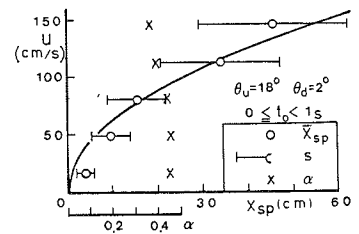


図-3 粒子速度別の停止距離の統計量

3. 粒子の停止機構の解析

傾斜角 θ_u の急勾配斜面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てくる場合を考える。土石流中の粒子には、推進力として重力と流体力 F_d^f が、抵抗力として粒子間力 F_d^g がそれぞれ作用している。したがって、上流側水路の土石流において質量 m の単一粒子の力のつり合い式を示すと

$$0 = -F_d^g + mg \sin \theta_u + F_d^f \quad (1)$$

このような粒子が勾配急変点に達し緩勾配斜面上に至ると、粒子の運動方程式は

$$m(1 + \rho/2\sigma) \frac{d^2x}{dt^2} = -F_d^g + mg \sin \theta_d + F_d^f \quad (2)$$

ここに、添字 u, d はそれぞれ上流急勾配、下流緩勾配斜面上における物理量を表すものである。緩勾配斜面上に達した瞬間においては、上流側水路における粒子速度 u は $u \rightarrow u_d = u \cos(\theta_u - \theta_d)$ に、粒子高さは $y \rightarrow y_d = y / \cos(\theta_u - \theta_d)$ に変換されるのに対して、粒子濃度は変化しないものと考えられる。したがって、粒子間力の表示式を参照すると

$$F_d^g = F_d^g \cos^5(\theta_u - \theta_d) = (mg \sin \theta_u + F_d^f) \cos^5(\theta_u - \theta_d)$$

と近似される。これを式(2)に代入すると

$$m(1 + \rho/2\sigma) \frac{d^2x}{dt^2} = -mg \{ \sin \theta_u \cos^5(\theta_u - \theta_d) - \sin \theta_d \} - F_d^f \cos^5(\theta_u - \theta_d) + F_d^f$$

粒子に作用する力の中で流体力は他の力にくらべて小さく、重要な役割を果たさないで、上式の右辺第2, 第3項は相殺し合うものと仮定する。したがって次式が得られる。

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

$t = 0$ で $\frac{dx}{dt} = u(y) \cos(\theta_u - \theta_d)$ の初期条件でとくと、停止するときは速度が0となるときであるから、停止に要する時間 t_{sp} は

$$t_{sp} = u(y) \cos(\theta_u - \theta_d) / G \quad (4)$$

停止距離 x_{sp} は

$$x_{sp} = u^2(y) \cos^2(\theta_u - \theta_d) / 2G = (G/2) t_{sp}^2 \quad (5)$$

図-2, 3は式(5)と実験結果とを比較したものである。実験値のパラッキは大きいものの、平均的には適合していることが分る。したがって、速度 $u(y)$ で流入してきた粒子は式(5)で示される平均値のまわりに散らばって停止するものと考えられる。

4. 土石流の堆積形状の計算法

3章の成果を用いて土石流の堆積形状の計算法について検討を行ってしよう。図-4に示すように、勾配 θ_u の上流側水路において高さ $y \sim y+dy$ の間に濃度 C 、速度 u 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 $P_g(x)$ 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 $P_g(x) dx$ 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さを δz_y 、堆積層における粒子濃度を C_x とおくと、砂の保存式は

$$C_x \frac{\partial}{\partial x} (\delta z_y) dx = u C dy f_g(x) dx \quad (6)$$

これを時間 t で積分し、堆積開始時間が t_{sp} となることを参考にして

$$\delta z_y = \frac{C}{C_x} u (t - t_{sp}) P_g(x) dy \quad (7)$$

x の位置には $y = y_{q0} \sim y_q$ までの様々な高さから流入してきた粒子が停止するので、式(7)をその範囲に渡って積分すると、位置 x における堆積高さは

$$z = \int_{y_{q0}}^{y_q} \frac{C}{C_x} u (t - t_{sp}) P_g(x) dy \quad (8)$$

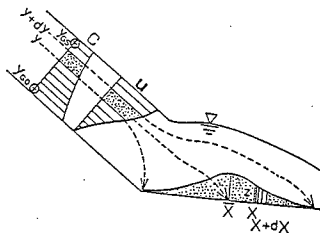


図-4 堆積過程の模式図

流入する粒子の高さ y と停止距離の平均値 \bar{x} および堆積開始時間 t_{sp} との間の関係は、式(5)から

$$\bar{x} = U^2 \cos^2(\theta_u - \theta_d) / 2G = (G/2) t_{sp}^2 \quad (9)$$

で与えられるので、次の関係が成立する。

$$dy = G d\bar{x} / \left\{ U \frac{du}{dy} \cos^2(\theta_u - \theta_d) \right\}, t_{sp} = \sqrt{\frac{2\bar{x}}{G}} \quad (10)$$

式(10)と式(8)に代入すると

$$Z = \int_{\bar{x}_{q0}}^{\bar{x}_q} \frac{C}{C_x} \frac{G}{\frac{du}{dy} \cos^2(\theta_u - \theta_d)} \left(t - \sqrt{\frac{2}{G} \bar{x}} \right) P_y(x) d\bar{x} \quad (11)$$

となる。ここに積分範囲の下限値は高さ y_{q0} における粒子速度 U_{q0} を用いて次式となる。

$$\bar{x}_{q0} = U_{q0}^2 \cos^2(\theta_u - \theta_d) / (2G) \quad (12)$$

一方、上限値は土石流先端部の表面粒子が停止する時間を境にして次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} (i) \quad U_{q0} \cos(\theta_u - \theta_d) / G \leq t \leq U_{qs} \cos(\theta_u - \theta_d) / G \quad \text{のとき} \quad y_q \leq y_{qs}, \quad \bar{x}_q = (G/2) t^2 \\ (ii) \quad t \geq U_{qs} \cos(\theta_u - \theta_d) / G \quad \text{のとき}, \quad y_q = y_{qs}, \quad \bar{x}_q = \bar{x}_{qs} = U_{qs}^2 \cos^2(\theta_u - \theta_d) / 2G \end{aligned} \right\} (13)$$

ここに、 y_{qs} , U_{qs} , \bar{x}_{qs} はそれぞれ表面粒子の流入高さ、速度および平均停止距離である。さらに式(11)

を時間 t で微分すると

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \int_{\bar{x}_{q0}}^{\bar{x}_q} \frac{C}{C_x} \frac{G}{\frac{du}{dy} \cos^2(\theta_u - \theta_d)} P_y(x) d\bar{x} \quad (14)$$

ここで、停止確率密度関数 $P_y(x)$ の評価が問題となるが、簡単に正規分布を仮定することにする。

いま水深 h として次のような変元を導入しよう。

$$Z = z \cos(\theta_u - \theta_d) / R, \quad \eta = y / R, \quad X = x / \bar{x}_{qs}, \quad \bar{X} = \bar{x} / \bar{x}_{qs}, \quad T = t / \{ U_{qs} \cos(\theta_u - \theta_d) / G \}$$

これらの変元を用いて、式(11), (14), (9)を整理すると次式が得られる。

$$Z = \int_{\bar{X}_{q0}}^{\bar{X}_q} \frac{C}{C_x} \frac{1}{\frac{d\eta}{d\bar{x}} \frac{U}{U_{qs}}} (T - \sqrt{\bar{X}}) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \alpha_p \bar{X}} \exp \left\{ -\frac{(X - \bar{X})^2}{2(\alpha_p \bar{X})^2} \right\} d\bar{X} \quad (15)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial T} = \int_{\bar{X}_{q0}}^{\bar{X}_q} \frac{C}{C_x} \frac{1}{\frac{d\eta}{d\bar{x}} \frac{U}{U_{qs}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \alpha_p \bar{X}} \exp \left\{ -\frac{(X - \bar{X})^2}{2(\alpha_p \bar{X})^2} \right\} d\bar{X} \quad (16)$$

$$\bar{X} = (U / U_{qs})^2 \quad (17)$$

ここに積分範囲の上限・下限値はそれぞれ

$$\bar{X}_q = \begin{cases} T^2 & (U_{q0} / U_{qs} \leq T \leq 1) \\ 1 & (T \geq 1) \end{cases}, \quad \bar{X}_{q0} = \frac{\bar{x}_{q0}}{\bar{x}_{qs}} = \left(\frac{U_{q0}}{U_{qs}} \right)^2 \quad (18)$$

したがって、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速度勾配および平均停止距離を通じて速度などの分布に規定されること分かる。このことから、流入してくる土石流の特性によつて異なつた堆積形態が生じることが予測される。

式(15)~(17)における速度勾配 $\frac{d\eta}{d\bar{x}} \frac{U}{U_{qs}}$ や速度分布 U/U_{qs} は、従来の土石流の流動式⁵⁾を用いて与えられる。

しかしながら、表面あるいは底面で速度勾配が0となるため、式(15), (16)の計算が困難となる。これを避けるため、便宜上ここでは流入する粒子の高さの範囲として表面および底面からそれぞれ半粒径ずつとした $y_{q0} = d/2 \sim y_{qs} = h - d/2$ の範囲を考えることにする。

5. 堆積形状に関する実験

2章の実験と同じように、図-1に示す実験水路を用いて堆積実験を行つた。このとき、長さ3mの土石流流下水路と4mの堆積水路は(i)固定床滑面、(ii)使用材料を粗度として貼つた固定床粗面、あ

よび(丙)流下水路に厚さ5cmで、堆積水路に厚さ10cmで砂山を敷き詰め移動床の3通りにした。

表-1に実験条件を示す。

図-5は流下・堆積水路が固定床粗面、移動床のそれぞれの場合における堆積形状の時間的変化を無次元表示したものである。固定床粗面の場合下流側水路とほぼ同じ勾配をもった背砂が上流側水路を遡上するのに対して、移動床の場合はこのような背砂は形成されず、上流側水路にはほぼめらかに連続するように堆積が遡上する。また、図は省略するが、滑面水路において勾配変化点から下流側へ離れた位置にステップ状の堆積が生じるのが特徴的である。

図-6は堆積の先端の位置 X_f と堆積の後端の位置 X_b の軌跡を無次元表示したものである。堆積先端の軌跡については、実験条件によって明瞭な差異は認められないが、堆積後端の軌跡については、固定床の場合にくらべて移動床の場合の方が上流側水路への遡上が速い。また、Case A, Cにおいては、下流側水路勾配による軌跡の差異は認められない。

6. 堆積形状の計算結果

実験結果から明らかのように、堆積が上流側水路へ遡上するので、土石流が流入する境界点を勾配変化点から時間とともに上流側へ移動させる必要がある。図-5の実線は、このような境界の移動を考慮して求めた堆積形状の計算曲線である。固定床、移動床それぞれの特徴が計算曲線に現れ、実験結果と概ね適合している。さらに、図-6に堆積の先端と後端の軌跡の計算曲線を示した。移動床の場合には、堆積の上流側水路への遡上が固定床の場合にくらべて速い。このように計算結果は実験結果を良く説明していることが分る。

表-1 堆積に関する実験条件と土石流の流入条件

Case	Run No.	d (mm)	qwo (cm ² /s)	θ_u	θ_d	h (cm)	Us (cm/s)	C ₀ /C*	U ₀ /Us	
A	1	216	216	18°	2°	5.43	198.8	0.86	0.02	Roughly fixed bed
	2	7.0	219		4°					
	3	218	8°							
B	4	4.4	107	18°	4°	4.23	173.5	1.00	0.02	
	5	201	198	18°	2°	4.56	245.5	0.86	0.02	
6	4.4	211			4°					
D	8	4.4	199	14°	4°	3.25	201.9	0.90	0.02	
E	9	4.4	209	18°	4°	2.68	325.5	0.86	0.66	Smoothly
F	10	4.4	199	14°	4°	3.95	185.0	1.00	0.0	Movable
G	11	4.4	199	18°	4°	6.70	202.0	1.00	0.0	bed

参考文献

- 1) 椿・平野・内村, 第10回災害科学シンポ, 1973.
- 2) 高橋・吉田, 京大防災研年報, 1979.
- 3) 高橋, 京大防災研年報, 1980.
- 4) 橋本・椿, 土木学会論文報告集, 1983.
- 5) 椿・橋本・末次, 土木学会論文報告集, 1982.

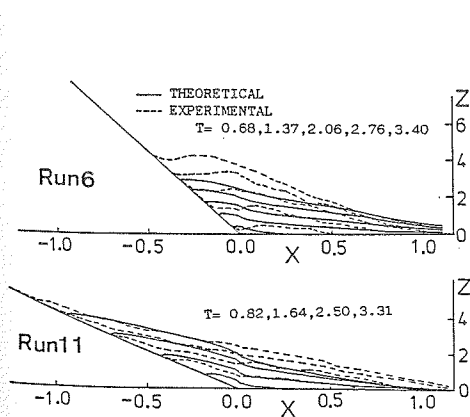


図-5 堆積形状の時間的変化

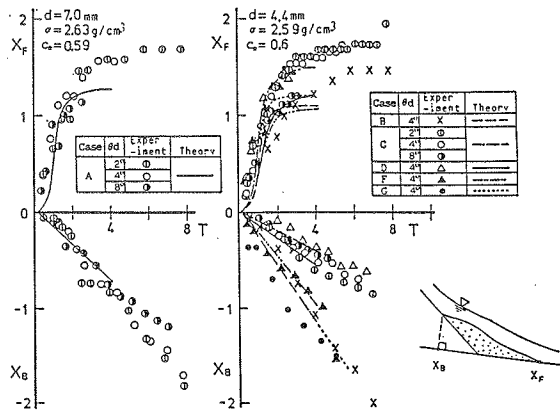


図-6 堆積の先端と後端の軌跡