

土石流の勾配急変による堆積機構

Deposition of Debris Flow due to Abrupt Change of Bed slope

九州大学工学部 正 員 椿 東一郎
九州大学工学部。正 員 橋 本 晴 行

1. はじめに

人命の損失を伴うほど激甚な土石流災害は、主として勾配の急変と幅が急拡大する渓流出口付近に発生する。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),2)}ごく最近では、拡幅をも伴う扇状堆積についての研究が進められてきた。³⁾本研究は、勾配の急減のみによる土石流の堆積問題に限定しているが、問題の特性は固・液系から粒子が分離する過程にあると考え、Lagrange 的な観点からの接近を試みたものである。本文においては、個々の粒子が減速して停止に至る軌跡を実験的に追跡するとともに、その過程を解析し、さらに、その成果を応用して堆積形状について検討している。

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 $d = 7\text{ mm}$ 、密度 $\sigma = 2.63\text{ g/cm}^3$ 、最密充填濃度 $C_* = 0.59$ の砂れき粒子を厚さ10cmに敷き詰め、上流側から単位幅流量 $q_{w0} = 2.20\text{ cm}^3/\text{s}$ 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。勾配は上流側 $\theta_u = 18^\circ$ に固定し、下流側は $\theta_d = 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ の4種類に設定した。各実験において、 $x = -20 \sim 80\text{ cm}$ 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。ここに、座標は勾配変化点を原点にして元の水路床に沿って x 軸、下流側水路床から垂直上向きに y_d 軸、さらに上流側水路床から垂直上向きに y 軸をとることにする(図-1)。

(2) 実験の結果

16mmフィルムより、流入して来る土石流中の粒子を $x = -20\text{ cm}$ 付近から停止に至るまでを追跡し、勾配変化点にたてた 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

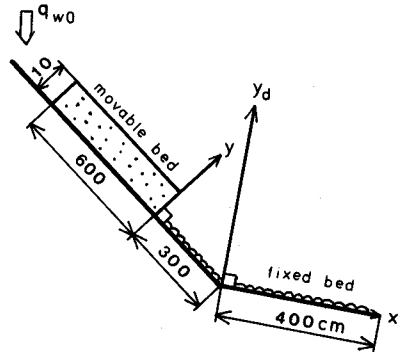


図-1 実験水路

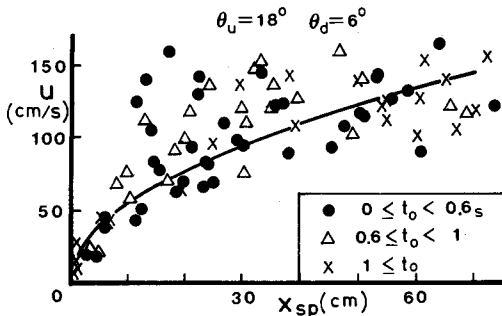


図-2 粒子速度と停止距離の関係

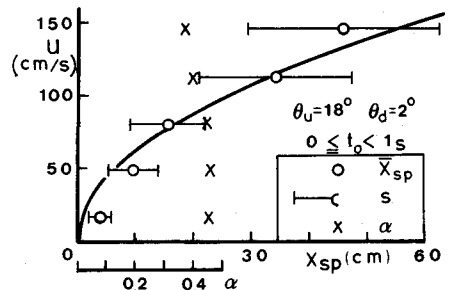


図-3 粒子速度別の停止距離の統計量

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も長いことが分る。測定した流入速度の範囲を5等分に区分して、それぞれの区分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 $a = s / \bar{x}_{sp}$ を求めたのが図-3である。変動係数は約0.42の一定な値をとる。

次に、流入して来る粒子の $x = -15\text{ cm}$ における無次元高さ $\eta = (y - z) / h$ と x_{sp} との関係を図-5に、 η と停止点の高さ y_{sp} との関係を図-6に示す。ここに z は河床高である。また、停止点が勾配変化点より上流側にある場合($x_{sp} < 0$)および下流側にある場合($x_{sp} > 0$)についての(x_{sp}, y_{sp})の定義は図-4に

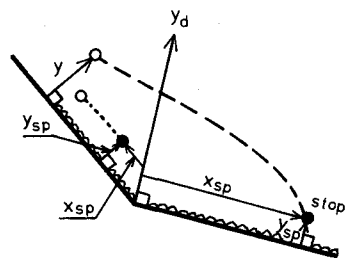


図-4 停止距離と停止高さの定義

示す通りである。図-5, 6より、流入して来る土石流の上層の粒子は停止するまでの距離が長く、且つ原河床に近い低い所に停止するのに対し、下層の粒子は上流側水路の原河床に近い所に停止する。さらに中層の粒子は勾配変化点付近の高い位置に停止している。当然のことながら、先端部の粒子ほど原河床に近い所に停止し、後続流の粒子ほど高い位置に停止する。このようなことから流入する土石流の上層粒子は堆積の下流進行に、中層粒子は堆積高さの増加に、下層粒子は上流水路への堆積の遡上に寄与することが分る。

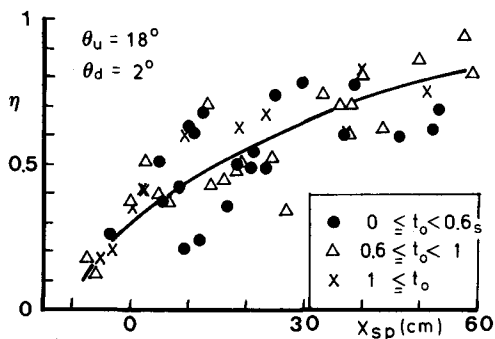


図-5 粒子の流入高さ と停止距離の関係

なお、以上の結果は、流動層における逆グレイディング現象と組合せて、土石流堆積物の粒度構成、分級作用に対し、きわめて有用な知見を与えるものである。

3. 粒子の停止機構

(1) 等流状態の土石流の中を移動する粒子に働く力

粒子の停止機構を知るためには、粒子に作用する力を評価する必要がある。そのための準備として、上流側水路上で等流状態にある土石流中の粒子に働く力について検討を加えてみる。

粗粒な粒子を高濃度に含有する土石流においては、粒子相互に作用する粒子間力が存在し、衝突力と接触力に分けられる。各々の力は前報、5章の式(12)および(18)において $v_L \rightarrow 0$ 、 $d_L \rightarrow d$ とおくことにより求めることができる。これを用いると、土石流中を移動する単一粒子のつり合い方程式は流れに垂直方向には前報の式(21)で、流れ方向については次式で与えられる。

$$0 = -\frac{\pi}{6} \left(\sigma + \frac{\rho}{2} \right) \beta k_M d^3 \frac{(du/dy)^2}{1 - C/C_*} \left\{ -\frac{16}{105} \frac{C}{C_*} d \frac{d^2 u/dy^2}{du/dy} - \frac{16}{105} d \left(1 - \frac{C}{2C_*} \right) \frac{d(C/C_*)/dy}{1 - C/C_*} \right\} + \frac{\pi}{6} d^3 \sigma g \sin \theta_u + \frac{\pi}{6} d^3 i_x \quad (1)$$

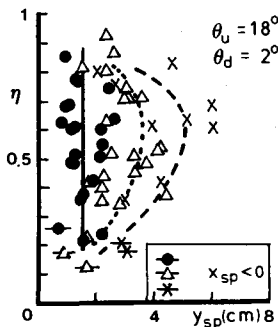


図-6 粒子の流入高さ と停止高さの関係

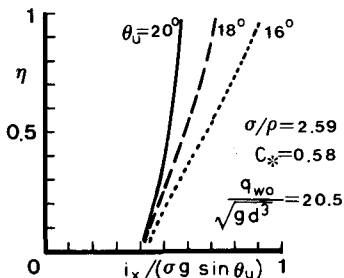


図-7 流体力と粒子重量との比

ここに、 $\beta = 1.15$ 、 $k_M = 5$ 、 ρ = 水の密度、 C = 粒子濃度、 i_x = 単位体積当りの流体力の x 成分。上式の右辺第 1 項は衝突力に起因する粒子間力、第 2 項は粒子の重さの成分、及び第 3 項は流体力である。式 (1) において、既に求められている⁴⁾濃度・速度分布を代入すると、粒子間力と流体力の大きさを評価することができる。図-7 はその計算結果である。表面方向ほど、また勾配は低いほど、 $i_x/(\sigma g \sin \theta_u)$ は大きくなるが、流体力の大きさは粒子重量成分の 6 割程度で作用方向は流れ方向である。一方、右辺第 1 項の粒子間力は、流れとは逆向きに作用し、重さ成分の 1.6 倍程度の大きさであることが分かる。従って、便宜上流体力と粒子間力との和を抵抗力 F と呼ぶと、土石流中の粒子には、推進力として重力と上述の抵抗力 F が作用しつり合っているものと考えられる。

(2) 粒子の停止に至る軌跡と停止時間・距離

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てくる場合を考える。前節を参考にして上流側水路上の土石流における質量 m の単一粒子のつり合い式を記すと、

$$0 = F_u + mg \sin \theta_u \quad (1)$$

このような土石流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

$$m \left(1 + \frac{\rho}{2\sigma} \right) \frac{d^2 x}{dt^2} = F_d + mg \sin \theta_d \quad (2)$$

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わすものである。緩勾配斜面上に達した瞬間の土石流においては、上流側水路における粒子速度は $u \rightarrow u_d \equiv u \cos(\theta_u - \theta_d)$ に、粒子高さは $y \rightarrow y_d = y / \cos(\theta_u - \theta_d)$ に変換されるので、式(1)における粒子間力の表示式を参照して

$$F_d \equiv F_u \cos^3(\theta_u - \theta_d) = -mg \sin \theta_u \cos^3(\theta_u - \theta_d)$$

と近似される。したがって式(2)は

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

となり、初期条件 $t = 0$ で $dx/dt = v_0$ のもとにとけば

$$\frac{dx}{dt} = -Gt + v_0 \quad (4)$$

となる。初速度 v_0 は勾配変化点直前における粒子の速度分布 $u(y)$ を用いて、 $v_0 \equiv u(y) \cos(\theta_u - \theta_d)$ と書き表わされる。式(4)を $t = 0$ で $x = 0$ の条件下でといて求めた粒子の軌跡は

$$x = -\frac{G}{2} t^2 + v_0 t \quad (5)$$

無次元化すると

$$\begin{aligned} \frac{x}{v_0 t} &= -\frac{G}{2v_0} t + 1 \\ &= -\frac{1}{2(1 + \rho/(2\sigma))} \{ \sin \theta_u \cos^3(\theta_u - \theta_d) - \sin \theta_d \} \frac{gt}{v_0} + 1 \end{aligned} \quad (5)$$

となる。停止するのに要する時間 t_{sp} は速度が 0 となる時間であるから

$$t_{sp} = \frac{v_0}{G} = \frac{u(y) \cos(\theta_u - \theta_d)}{G} \quad (6)$$

となる。また停止距離 x_{sp} は、式(5)に t_{sp} を代入して

$$x_{sp} = \frac{v_0^2}{2G} = \frac{u^2(y) \cos^2(\theta_u - \theta_d)}{2G} = \frac{G}{2} t_{sp}^2 \quad (7)$$

となる。

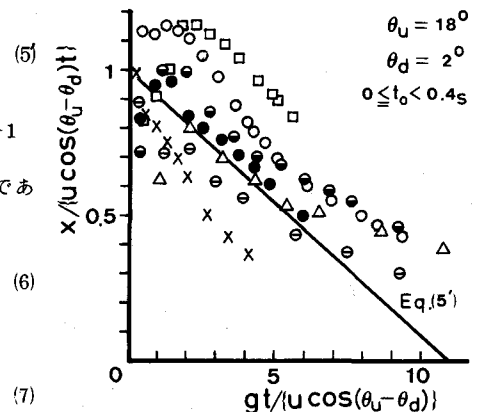


図-8 粒子の軌跡

粒子の軌跡を無次元表示した式(5')を実験値と比較したのが図-8である。さらに図-2, 3において実線で示されているのが式(7)である。いずれも実験値のバラツキは大きいものの、平均的には良く適合していることが分かる。

2, 3章において粒子の停止機構について検討を加えてきたが、これらの成果を応用することにより、土石流の堆積における諸現象を解明する手掛りを得ることができる。

4. 土石流の堆積過程

(1) 実験の方法とその結果

2章と同様な手順で発生・流下した土石流を堆積水路上に流入させ、 $x = -2\text{ m} \sim 2\text{ m}$ の区間を2台の16mmカメラと3台のVTRカラーカメラを用いて撮影し解析を行なった。河床材料としては、2章の実験で使用した材料に加えて新たに $d = 4.4\text{ mm}$ 、 $\sigma = 2.59\text{ g/cm}^3$ 、 $C_* = 0.6$ の砂れき粒子を用い、実験条件は表-1に示す通りである。撮影・録画した16mmフィルムとVTRより流入してきた土石流の流動層と停止層との境界を読み取って求めた堆積形状が図-9である。図-10は堆積の先端 x_F と上流側水路を遡上するBack sandの後端 x_B の軌跡を示している。土石流の流入直後においては堆積は急速に前進するが、その後流量や勾配に応じて次第に減速していく。一方、堆積の後端では、stepが先端の進行より数秒の遅れをもって上流側へ遡上する。

Case	Run No	d (mm)	q_{wo} (cm^2/s)	θ_u	θ_d
A	1	7	216	18°	2°
	2		219		4°
	3		218		8°
B	4	4.4	107	18°	4°
C	5	4.4	201	18°	2°
	6		211		4°
	7		198		8°

表-1 堆積過程に関する実験条件

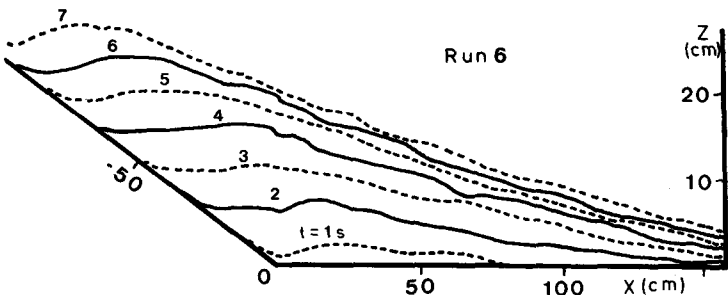


図-9 堆積形状の時間的变化

(2) 堆積過程の解析

土石流先端流入後、時間 t を経過したとき、上流側水路の $y \sim y + dy$ の間を通過した粒子が下流側水路の $x \sim x + dx$ の区間に停止する確率を $p_y(x)dx$ とすると(図-11)、砂の保存式は

$$C_* \frac{\partial(\delta z_y)}{\partial t} dx = u C_d y \cdot p_y(x) dx \quad (8)$$

時間 t で積分して

$$\delta z_y = \frac{C}{C_*} u (t - t_{sp}) p_y(x) dy \quad (9)$$

x の位置には $y = 0 \sim h$ までのさまざまな高さから流入して来

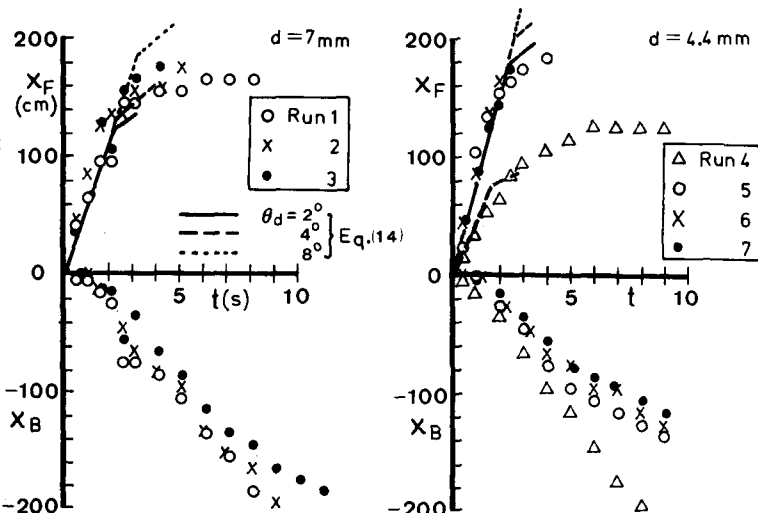


図-10 堆積の先端と後端の軌跡

る粒子が停止する可能性があるので、上式を積分して

$$z = \int_0^h \frac{C}{C_*} u(t - t_{sp}) p_y(x) dy \quad (10)$$

流入する粒子の高さ y と停止位置の平均値 $\bar{x}$ は、3章2節より式(7)を書き直した

$$\bar{x} = \frac{u^2(y) \cos^2(\theta_u - \theta_d)}{2G} = \frac{G}{2} t_{sp}^2 \quad (11)$$

によって関係づけられている。これから

$$dy = \frac{G}{u \frac{du}{dy} \cos^2(\theta_u - \theta_d)} d\bar{x} \quad (12)$$

さらに、停止確率密度関数 $p_y(x)$ として正規分布を仮定すると

$$p_y(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2s^2}} \quad (13)$$

ここに s は標準偏差で、2章の実験から $s = \alpha \bar{x}$ ($\alpha=0.42$) で与えられる。式(11)～(13)を式(10)に代入し、濃度分布を一様とすると

$$z = \frac{C}{C_*} \int_0^{\bar{x}_F} \frac{G}{\frac{du}{dy} \cos^2(\theta_u - \theta_d)} \left(t - \sqrt{\frac{2}{G\bar{x}}} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha\bar{x}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2(\alpha\bar{x})^2}} d\bar{x} \quad (14)$$

ここに、 u_s を流入する土石流の表面速度として、 $\bar{x}_F$ は

$$\bar{x}_F = \frac{u_s^2 \cos^2(\theta_u - \theta_d)}{2G} \quad (15)$$

(3) 計算例

式(14)を計算するためには、流入直前の土石流の速度勾配 du/dy を知らなければならない。従来、土石流の速度分布については、高橋⁶⁾や著者ら⁴⁾により詳細な検討が行なわれている。たとえば前者によると速度勾配は

$$\frac{du}{dy} = \frac{3u_s}{2h} \left(1 - \frac{y}{h}\right)^{1/2} = \frac{3u_s}{2h} \left(1 - \frac{u}{u_s}\right)^{1/3} \quad (16)$$

で与えられている。式(11)を用いて u を消去すると

$$\frac{du}{dy} = \frac{3u_s}{2h} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{2G\bar{x}}}{u_s \cos(\theta_u - \theta_d)} \right\}^{1/3} \quad (17)$$

他方、後者の理論によると、表面と底面付近を除けば、流動層の大部分において、速度はほぼ直線的な分布を示しているので、簡単に次式で近似する。

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_s}{h} \quad (18)$$

式(14)は Back sand の発達を考慮していないので、計算は土石流流入後堆積の初期に限ることとする。計算に用いた土石流の流入直前の流動特性 C 、 u_s 、 h は表-2に示す値をもつことが実験から分っている。これらを用いてそれぞれのケース毎に計算を行なった結果を図-12に示す。式(17)を用いる場合よりも式(18)を使用した方が全体的に実験結果に近い堆積形状が得られている。従って式(18)を用いた計算によって堆積の先端の軌跡を求めると、図-10に示すように実験値とかなり良く適合していることが分る。ここに先端は便宜上 $z = d$ となる位置で定義している。

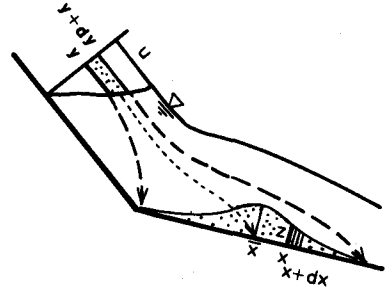


図-11 停止過程の模式図

5. 結び

勾配の急減のため土石流が堆積する場合について、個々の粒子の停止時間・距離についての簡便な理論式

を示し、粒子軌跡の実験値と比較して、理論の適合性がかなり良好であることが分った。さらに、これらの式を利用することにより堆積の進行を予測する式が求められ、従来の研究とは異なったLagrange的な観点からの新しいアプローチは十分な発展性をもっていることが示された。今後はさらに土石流の流入後十分に時間が経過し、背砂を伴う堆積計算を可能にするよう、研究を進める予定である。最後に、実験およびデータ整理に際し、熱心に協力された藤田和夫技官、中西隆夫（現前田建設）、松木正幸（現青木建設）、及び本学学生の溜池博文、元野一生の諸氏に深甚なる謝意を表します。

Case	C	U_s (cm/s)	h (cm)
A	0.443	191	5
B	0.51	136	4.5
C	0.474	223	4.5

表-2 流入する土石流の特性

参 考 文 献

- 1) 椿東一郎・平野宗夫・内村好：土石流の堆積過程について、第10回災害科学総合シンポジウム、1973。
- 2) 高橋 保・吉田 等：土石流の停止・堆積機構に関する研究(1)－勾配の急変による堆積－、京都大学防災研究所年報、第22号B-2、1979。
- 3) 高橋 保：土石流の停止・堆積機構に関する研究(2)－土石流扇状地の形成過程－、京都大学防災研究所年報、第23号B-2、1980。
- 4) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性、土木学会論文報告集、第317号、1982。
- 5) 橋本晴行・椿東一郎：土石流における逆グレイディング機構、土木学会論文報告集、第336号、1983。
- 6) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究、京都大学防災研究所年報、第20号B-2、1977。

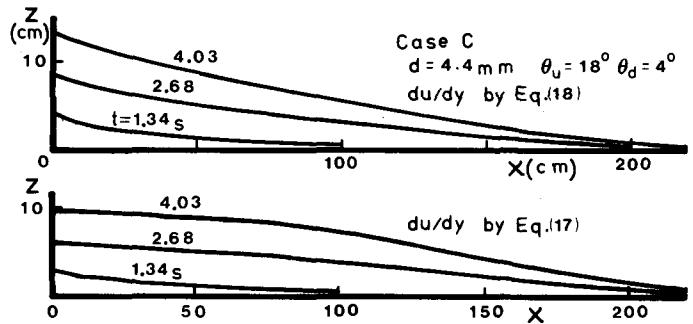


図-12 堆積形状の計算例