

II-56

勾配急変による土石流の堆積過程 (2)

九大工学部 正 橋本晴行 橋本一郎 藤田和夫
 九大工学部 学 元野一生 溜池博文
 青木建設㈱ 正 松木正幸

1. まえがき

急勾配の溪谷などに発生する土石流は、流下して渓流出口付近に堆積し、人命や社会資本に多大な損失を与えている。そのため、土石流の堆積過程を明確にして堆積危険範囲を予測することが急務である。前報では勾配の急減によって土石流中の粒子が減速・停止する過程について理論的検討を行ったが、本研究はそれについて実験的検証を行うと同時にその成果を応用して土石流の堆積の進行について検討している。

2. 土石流中の粒子の停止過程について

1) 実験の方法とその結果

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 $\rho=2.63\text{g/cm}^3$ 、最密充填濃度 $C_k=0.59$ の砂れき粒子を厚さ10cmに敷き詰め、上流より水を供給して土石流を発生させた。勾配は上流側 $\theta_u=18^\circ$ に固定し、下流側 $\theta_d=2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$ の4種類に設定した。16mm高速度カメラを用いて、土石流中の粒子が勾配変化点に達し減速・停止に至るまでの軌跡を追跡した。

録画した16mmフィルムより、 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。流入速度の範囲を5等分して、それぞれの区分内の速度をもつ粒子について停止距離の平均 $\bar{x}_{sp}$ 、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。 α は約0.42と一定となる。

2) 粒子の停止機構

前報¹⁾を参照すると、上流側水路における土石流中の粒子に働く力のつり合い式、および下流側水路までの粒子の運動方程式は、粒子間力を F_d として、それぞれ $0 = F_u + mg \sin \theta_u$ — (1) $m(1 + \frac{\rho}{2\sigma}) \frac{d^2x}{dt^2} = F_d + mg \sin \theta_d$ — (2) となる。ここで添字 u, d はそれぞれ上流、下流における物理量を表わす。下流側水路上に達した瞬間の土石流においては、粒子速度は $u \rightarrow u_d \approx u \cos(\theta_u - \theta_d)$ に、粒子高さは $y \rightarrow y_d \approx y / \cos(\theta_u - \theta_d)$ に変換される。粒子間力の表示式を参照して $F_d \approx F_u \cos^2(\theta_u - \theta_d)$ — (3) したがって式(2)は $\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{g}{1 + \rho/(2\sigma)}$ $\{\sin \theta_u \cos^2(\theta_u - \theta_d) - \sin \theta_d\} \equiv -G$ — (4) となる。初期条件 $t=0$ で $\frac{dx}{dt} = v_0 = u(y) \cos(\theta_u - \theta_d)$ 、 $x=0$ の条件下でとくと $x = -\frac{G}{2}t^2 + v_0 t$ — (5) 無次元化して $\frac{x}{v_0^2} = -\frac{G}{2v_0^2}t^2 + t = \frac{1}{2(1+\rho/(2\sigma))} \{\sin \theta_u \cos^2(\theta_u - \theta_d) - \sin \theta_d\} \frac{gt}{v_0^2} + t$ — (6) となる。停止するのにかかる時間 t_{sp} 、距離 x_{sp} はそれぞれ $t_{sp} = \frac{v_0}{G}$ $= \frac{u(y) \cos(\theta_u - \theta_d)}{G}$ — (7) $x_{sp} = \frac{v_0^2}{2G} = \frac{u^2(y) \cos^2(\theta_u - \theta_d)}{2G} = \frac{G}{2} t_{sp}^2$ — (8) となる。

粒子の軌跡を無次元化した式(6)と実験値を比較したのが図-4である。又、図-2, 3で実験値で示しているのが式(8)である。実験値はばらつきが大きいものの、平均的には理論曲線と良く適合していることが分かる。

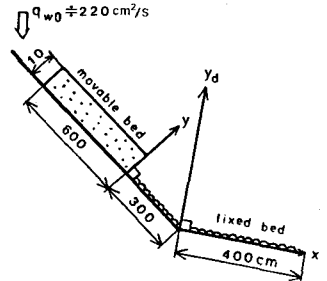


図-1 実験水路

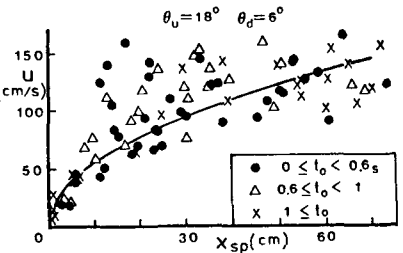


図-2 粒子速度と停止距離の関係

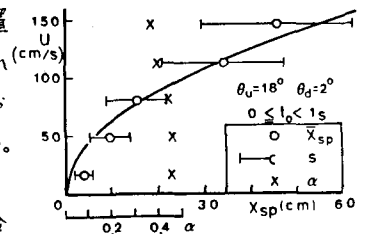


図-3 粒子速度別の停止距離の統計量

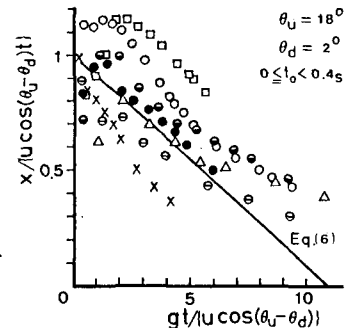


図-4 粒子の軌跡

3. 土石流の堆積過程

1) 実験方法とその結果

2章と同様な手順で発生した土石流を下流側の堆積水路に流入させ、16mmカメラ、VTRを用いて撮影・解析した。河床材料は、2章で用いた材料の他に $d=4.4\text{mm}$, $\sigma=259\text{g/cm}^3$, $C_k=0.6$ の砂れき粒子を用いた。実験条件は表-1に示す。録画した16mmフィルムとVTRより土石流の流動層と停止層との境界を読み取って堆積形状を求めたのが図-5である。図-6は堆積の先端 x_f の軌跡を示している。土石流流入直後堆積は急激に進行するが、その後流量や勾配の変化に応じて減速する。

2) 堆積過程の解析

土石流先端流入後、時間 t 経過したとき、上流側水路の $y \sim y+dy$ 間を通過した粒子が下流側水路の $x \sim x+dx$ 間に停止する確率を $P_g(x)dx$ とする(図-7)と、砂の保存式は $C_k \frac{\partial(SZ)}{\partial t} dx = U C dy P_g(x) dx$ — (9) 時間 t を積分して $SZ = \frac{C}{C_k} U(x-t_{sp}) P_g(x) dy$ — (10) x の位置には $y=0$ へ入るまでのさまざまな高さから流入してきた粒子が停止する可能性がある。そこで $Z = \int_0^h \frac{C}{C_k} U(x-t_{sp}) P_g(x) dy$ — (11) 流入する粒子の高さ y と停止位置の関係は式(8)より $\bar{x} = \frac{U^2 y}{2G} \cos^2(\theta_u - \theta_d) = \frac{G}{2} t_{sp}^2$ — (12) 停止確率密度関数 $P_g(x)$ を正規分布と仮定して $P_g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2S^2}}$ — (13) ここに $S = \alpha \bar{x}$ 式(12), (13)より $t \leq \frac{U S \cos(\theta_u - \theta_d)}{G}$ のとき $Z = \int_0^{\frac{G}{C_k} t^2} \frac{C}{C_k} \frac{U}{dy} \cos^2(\theta_u - \theta_d) \frac{G}{2} t_{sp}^2$ — (14) $t \geq \frac{U S \cos(\theta_u - \theta_d)}{G}$ のとき $Z = \int_0^{\frac{G}{C_k} t^2} \frac{C}{C_k} \frac{U}{dy} \cos^2(\theta_u - \theta_d) \frac{G}{2} t_{sp}^2$ — (15) 但し、 $\bar{x}_f = \frac{U^2 \cos^2(\theta_u - \theta_d)}{2G}$ — (16) 速度勾配 $\frac{du}{dy}$ は、著者の理論によると、表面と底面を除くと速度分布は直線に近似することができると $\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$ — (17) と仮定する。表-2を用いてそれぞれのケースについて Z の計算を行ない、図-5に実線と示した。又、式(14), (15)を用いて堆積の先端の軌跡を求め、図-6に線と示した。ここに先端は便宜上 $Z=d$ なる位置で定義した。

4 結果

勾配の急減による土石流の堆積において、従来の研究とは異なったLagrange的観点から、堆積の進行を予測する式が求められ、実験値と比較検討された。

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
	5	4.4	201	18	2
C	6	7	211	18	4
	7		198		8

表-1

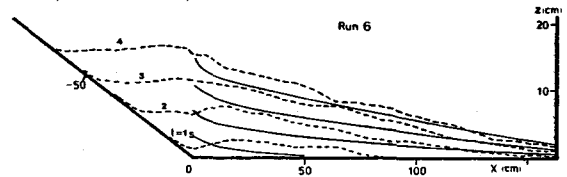


図-5

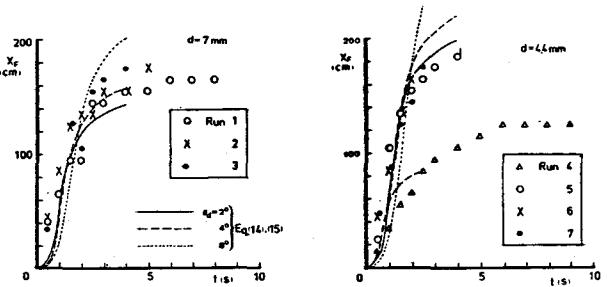


図-6

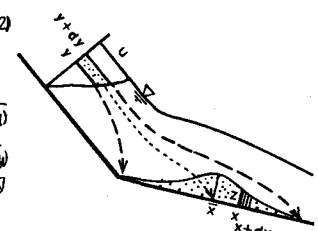


図-7 停止過程の模式図

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

- 橋本晴行・橋東一郎・藤田和夫・他3名: 勾配急変による土石流の堆積過程, 土木学会西部支部研究発表会議要集, 1982。
- 橋本晴行・橋東一郎: 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。
- 橋東一郎・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。