

京都大学防災研究所

正会員

高橋 保

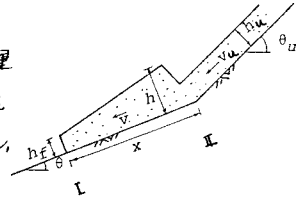
建設省

〃

吉田 将

1. まえがき 扇頂部のように、河道勾配が急に緩くなる場所へ土石流が流出すると、減速し、停止・堆積するに至る。現在、土石流の堆積機構や堆積範囲の予測法が曖昧なもので、危険浸流や危険範囲の指定作業が進められており、研究進展が急務となっている。本研究は、その一環として、一様幅で勾配が急緩に緩くなる場での土石流の堆積機構について論ずるものである。

2. 土石流先端部の停止機構 土石流段波が勾配急緩部に到達したとき、減速運動が始まるので、図-1に示したように、F流側水路内の部分が一休となり、 $h$ を増大させながら、 $U$ の速度で進行し、 $x = x_L$ で停止するものと考えよう。ただし、流動中の土石流の濃度 $C_d$ は、上流水路での値 $C_{du}$ が保持されるものと仮定する。



先端部の形状は、図のように直線的であるとして、断面工、 $x$ 間で運動量式を立、図-1 土石流段波の停止

てると、 $\frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} (h + h_f) x \frac{U}{g} \right] = \frac{1}{2} (h_f + h) x h_f \sin \theta + \frac{1}{2} g h_f \cos (\theta_u - \theta) + \frac{1}{2} g h_f \cos (\theta_u - \theta) [(1 - F) C_{du} K + F] - F$  (1)

である。ここに、 $h_f$ : 土石流の単位重量、 $K$ : 主軸土圧係数、 $h_f$ : 土石流量、 $F$ : 底面摩擦係数であり、慣用のもの以外の他の記号は図中に示されている。土石流では粒子同士の衝突の効果は重要であり、Bagnoldに従えば、

$$F = \frac{1}{2} (1 - F) g C_{du} (h_f + h) x \cos \theta \tan \phi \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} (h_f + h) x = g_t t \quad (3), \quad \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} U = \frac{V}{t} - G \quad (4)$$

である。ゆえに $t=0$ で $U=V$ として解くことにより、到達距離 $x_L$ として、 $x_L = V^2 / G \quad (5)$ と得る。これは、下流水路勾配 $\theta$ が0に近いとき、段波先端部は勾配急変部で急激に停止することを示している。

(5)式から、土石流が停止するためには、 $G > 0$ 、すなわち、 $\tan \theta < [(1 - F) C_{du} \tan \phi] / [(1 - F) C_{du} + F] \quad (6)$

でなければならない。もし、上流水路での土石流が、その勾配に対する平衡濃度に達している場合には、 $C_{du} = (F \tan \theta_u) / [(1 - F) (\tan \phi - \tan \theta_u)] \quad (7)$ であるから、(6)式は、 $\tan \theta < (\tan \phi / \tan \theta_u) \tan \theta_u \quad (8)$ とも書くことができる。一般に、堆積層の静止摩擦係数 $\tan \phi$ は、粒子の衝突に基づく摩擦係数 $\tan \phi$ より大きいから、上流水路で平衡状態に達した土石流は、下流のより緩勾配の水路ととのまま流下する場合のあることがわかる。さらに、上流水路での濃度が小さい場合や、高濃度の泥流によって $\phi$ が小さくなっている場合にはかなり緩勾配の地点まで、そのまま到達することができるのである。

(6)式が満足されるとき、土石流段波は下流水路内で停止するが、 $h_f$ を不変とした上記解析によれば、停止時の表面勾配 $\theta_s$ は、 $\theta_s = \theta + 2g h_f / V^2 \quad (9)$ となる。しかるに、土石流が停止したときには、もはや濃度は $C_{du}$ ではあり得ず、堆積濃度 $G$ となる。その結果、余分の水は絞り出されて表面流が発生する。もし、 $G$ が発生した表面流によって集合流動を生ずるほどに急勾配であれば、実際の停止勾配は $G$ ではあり得ず、下層部分は停止しても、上層部分は流動を続けて、もっと緩い勾配と形成するはずである。集合流動の発生限界勾配 $\theta$ は、表面流の水深と $h_0$ 、粒径と $d$ として、 $\tan \theta = [(1 - F) G \tan \phi] / [(1 - F) G + F (1 + h_0 / d)] \quad (10)$ で与えられる。

$\theta > \theta$ のときには、 $\theta_s$ は常に $\theta$ よりも大きいから、前述のように、下層部停止、上層部流動の形態となりながら、堆積は進行するのである。一方、 $\theta_s < \theta$ であれば、土石流無能時間が長くなり、停止層の上へ後続土石流が乗り上げて停止し、次第に堆積勾配状態となり、以後 $\theta$ のまま堆積は進行することになる。また、 $\theta_s > \theta$ で $\theta < \theta$ のときには、停止当初から堆積勾配は $\theta$ に等しくなるであろう。以上より、堆積過程は $\theta < \theta$ の場合と、 $\theta > \theta$ の場合で異なることが判る。つぎに、上記の二つの場合の堆積過程の解析を試みる。

3.  $\theta \leq \delta$  の場合の堆積過程. 停止過程を無視して, 最初から堆積過程が始まるものと仮

定し, 図-2 のような, 勾配  $\gamma$  の三角形状の堆積とするものとモデ

ル化する. 砂礫保存則より,  $\frac{1}{2} X^2 A = \frac{Q_T}{C_A} t$

$$A = \frac{\tan(\delta - \theta)}{\tan(\delta - \theta) \tan(\theta_u - \theta) + 1} + \frac{1}{\tan \delta \cos^2(\theta_u - \theta)} \left[ \frac{\tan(\delta - \theta)}{\tan(\delta - \theta) \tan(\theta_u - \theta) + 1} \right] \quad (11)$$

を得る. これより,  $X = \sqrt{(2 Q_T C_A) t / (C_A A)} \quad \dots (12)$

$$y = \frac{1}{\cos(\theta_u - \theta)} \frac{\tan(\delta - \theta)}{\tan(\delta - \theta) \tan(\theta_u - \theta) + 1} X \quad (13) \quad x_1 = y / \tan \delta \quad (14)$$

となる. (13)式は  $y$  が  $t$  とともに増大することを示しているが, 後給

土石流のエネルギーは有限であるから, ある限界高さ以上になれば遡上と開始

するはずである. この場合の堆積過程を図-3 のようにモデル化する.

微小項を無視した砂礫保存式は,  $dX/dt = C' / (A' X + H B') \quad \dots (15)$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} A' &= \frac{\cos(\theta_u - \theta)}{\sin(\delta - \theta)} \tan(\theta_u - \theta) + \frac{1}{\cos(\theta_u - \theta)} \\ B' &= \frac{\cos(\theta_u - \theta)}{\sin(\delta - \theta)} + \frac{1}{\sin(\theta_u - \theta)} \\ C' &= \frac{Q_T}{C_A} \left[ \frac{1}{\sin(\theta_u - \theta)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

である. (15)式を  $t=0$  で  $X=0$  として積分して,

$$X^2 + H \frac{2B'}{A'} X - \frac{2C'}{A'} (t - t_0) = 0 \quad (17) \quad x_1 = X + \frac{H}{\tan \delta} \quad (18)$$

$$X = \left[ H + X \tan(\theta_u - \theta) \right] \frac{\cos(\theta_u - \theta)}{\sin(\delta - \theta)} \quad (19) \quad \text{となる.}$$

なお, 遡上開始時刻  $t_0$  は(13)式による  $y$  が,

$$y \geq \alpha' \frac{U_0^2}{2g} \cos \theta_u + h_u - \frac{h_0}{\cos(\theta_u - \theta)} - \frac{U_0^2}{2g} \cos \delta - h_u \quad (20)$$

を満足する時である. ここに,  $\alpha'$ : 土石流のエネルギー

補正係数で 1.7 に等しい,  $U_0$ : 表面流の流速,  $h_u$ :

ジャンプによる損失水頭である. また,  $H = \alpha' \frac{U_0^2}{2g} \cos \theta_u - \frac{U_0^2}{2g} \cos(\theta_u - \theta) - h_u \cos \theta_u \quad (21)$  である.

図-4 は上記の理論と実験による確かめた例であり, 初期には停止過程の影響による差が出ているが, ほぼ現象が説明されていることが判る. なお,  $\delta, H$  は実験値が用いられている. とくに, 堆積勾配  $\gamma$  が理論値でよく説明されることと他の実験ケースでも判明している.

4.  $\theta > \delta$  の場合の堆積過程. 下層部が停止して木, 枝り出された水

によって上層部の濃度が小さくなり, 流動が継続する. この時連続式は,

$$\text{木に対して: } (1 - C_u) \frac{\partial y}{\partial t} + (1 - C_u) \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (22)$$

$$\text{砂礫に対して: } C_d \frac{\partial y}{\partial t} + C_u \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (23)$$

である. ただし  $y$  は堆積厚である. (22), (23)式より, 微小項を省略して,

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{y}{(C_u - C_d)(1 - C_u)} \frac{1}{\tan \delta} \frac{\partial y}{\partial x} \equiv K \frac{\partial y}{\partial x} \quad (24)$$

を得る.  $K$  は一定値ではないが, 上下流の勾配差が小さいと,  $C_u, y$

の変化は小さいので, 上下流の平均値をとって一定値であると仮定する.

そうすれば,  $X=0$  で  $\frac{\partial y}{\partial x} = \tan \theta - \tan \theta_u$ ,  $t=0$  で  $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$  のもとにおける(24)式の解として,  $z = y / (M \sqrt{Kt})$ ,

$\xi = X / (2 \sqrt{Kt})$ ,  $M = \tan \theta_u - \tan \theta$  と置いて,  $z = 2.1 \operatorname{erfc}(\xi) \quad \dots (25)$  が得られる. 図-5 は実験値

と(25)式と比較したものであり, 初期を除いて適合度はよい. なお, 堆積勾配は上下流勾配の平均値に等しいと置いた図中の鉄板,  $z = -z_0 + 1 \quad (26)$  もよく実験値の傾向を示していることが注目される.

5. おとがき. 一様幅で勾配が急変する場合の停止機構について考察し, そのまま流下する場合, 勾配  $\gamma$  で堆積する場合, 上下流の平均的な勾配で堆積する場合のあることと明らかにした. また, それぞれの堆積過程の解析モデルを提案し, 実験結果がよく説明されることを述べた. 今後は急流部の堆積機構を把握する予定である.

参考文献. 1) 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, NO.20-B2, 1977, pp.405-435.

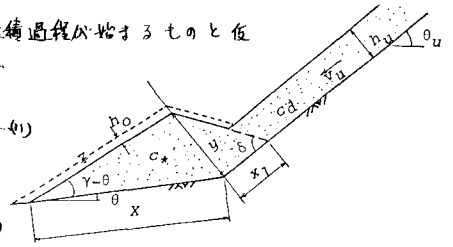


図-2 土石流の初期堆積過程

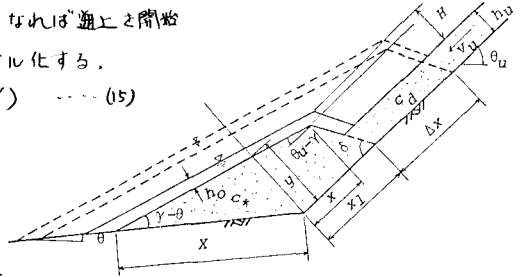


図-3 土石流の遡上堆積過程

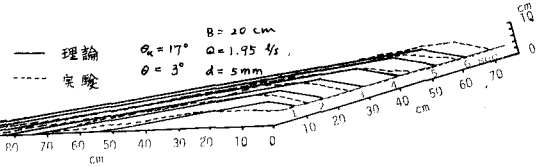


図-4 実験値と理論値の比較

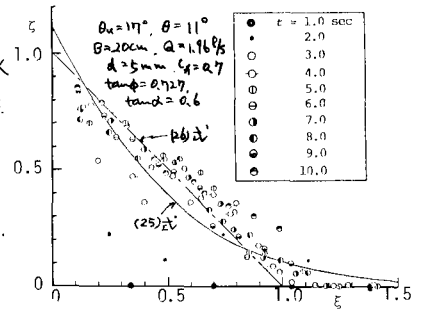


図-5  $\theta > \delta$  の場合の堆積形状