

変勾配溪床での土石流 発生機構に関する研究

京都大学防災研究所：正員 高橋 保

京都大学大学院： 学生員 ○匡 尚富

1. まえがき 溪床堆積物上に表面流が現れて発生する土石流に関して従来一様勾配堆積物を対象に上流端から給水される場合について実験的、理論的な研究がなされている。しかし、実際には土石流発生区域の溪床勾配は上流端から下流端まで場所的に違うし、給水も溪床の最上流端からだけではなく溪床全体の両側からも流入する。したがって、本研究では変勾配溪床で土石流が発生する過程を実験的に究明し、運動量式と連続式から土石流の基礎式を導き、その数値シミュレーションを行って計算モデルの妥当性の検討を行った。

2. 理論的な考察 1). 土石流の基礎式 運動量保存則に擬似等流の仮定を用いて加速項、慣性項を評価すれば(1)式が得られ、連続式は(2)式である。

$$\frac{q^2}{h^2 C^2 R^2 P} = \sin\theta - \left\{ \cos\theta - \left(p \frac{h}{R} \right)^2 \frac{q^2}{gh^3} \frac{\partial h}{\partial x} \right\} \frac{q}{gh^2} i \left\{ (K+1) \frac{\rho_{*F}}{\rho_F} - 2 - p \frac{h}{R} \right\} - \frac{q}{gh^2} \gamma \left\{ 2 - p \frac{h}{R} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = i + r \quad (2)$$

ここに q : 単位幅流量、 h : 流動深、 c : 係数、 p : Chezyの抵抗則では $1/2$, Dilatant流体では $3/2$, θ : 溪床勾配、 k : 侵食のとき $k=1$, 堆積のとき $k=0$, i : 侵食速度、 $\rho_{*F} = C_* \rho_s + (1-C_*) \rho$, $\rho_F = C_d (\rho_s - \rho) + \rho$, ρ_s : 砂礫の密度、 ρ : 水の密度、 C_* : 砂礫の静止密度、 r : 単位幅の横流入、 s : 堆積層の飽和度である。以上の基礎式を解析する際には侵食速度が問題になる。2) 侵食速度 堆積層が水で飽和される時流動層が表面に存在することによる不安定化の深さを考察し、その不安定化層が侵食を受けるのにある遅れ距離が存在するとしてつぎの(3)式が得られる。

$$i = \alpha \frac{q}{dm} \frac{C_{t\infty} - C_d}{C_* - C_{t\infty}} \frac{(\sigma - \rho_m) \left\{ \tan\phi - \frac{C_t(\sigma - \rho)}{C_d(\sigma - \rho_m)} \tan\theta' \right\}}{(\sigma - \rho) (\tan\phi - \tan\theta')} \quad (3) \quad \theta' = \theta - \tan^{-1} \frac{\partial D}{\partial x}$$

$$C_{t\infty} = \frac{\rho \tan\theta'}{(\sigma - \rho) (\tan\phi - \tan\theta')} \quad C_{d\infty} = \frac{\rho m \tan\theta'}{(\sigma - \rho_m) (\tan\phi - \tan\theta')} \quad \rho_m = \frac{C_t (\sigma - \rho) + \rho - C_d \sigma}{(1 - C_d)}$$

ここに D : 堆積層の厚さ、 dm : 代表粒径、 ϕ : 砂礫の摩擦角、 C_d : 浮遊砂を除いた土砂濃度、 C_t : 流動層の全土砂濃度である。 α は定数であるとする。堆積層が不飽和であれば侵食速度は r_* の関数であると考えられる。 $C_d > C_{d\infty}$ であると i は負となり、堆積を生じるが堆積速度は(4)式で表すと仮定する。

$$i = \beta \frac{C_{d\infty} - C_d}{C_*} \frac{q}{d_m} \quad (4)$$

β は常数であると仮定する。3) 濃度 C_d については 流動層の砂礫が深さ方向に均一に分布すると仮定し、流砂の連続式によって(5),(6)式が求められると考える。

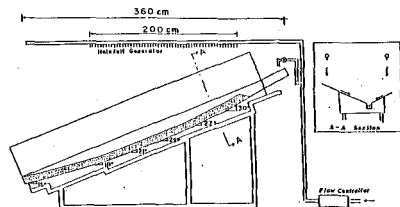


図1 実験水路

$$\frac{\partial V_s}{\partial t} + \frac{\partial C_t q}{\partial x} = iC_* \quad (5)$$

$$C_d = (V_s/h)(1-\xi) \quad (6)$$

ここに V_s : 流動層の単位幅土砂含量、 $(1-\xi)$: 流

Table 1 The property of materials used in the experiments

Material	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₈₅ /D ₁₀	C _t	lang	γ
A	0.75	4.00	3.71	0.64	0.75	2.00

Table 2 Kind of experiments

Case	材料	堆積厚	堆積厚(%)	掃流方式	掃流時間	掃流速度	掃流流量	掃流速度
1	A	270	10 cm	上流	40 sec	2000 cc/s	一定	一定
2	A	125	10 cm	上流	40 sec	2000 cc/s	一定	一定
3	A	270	10 cm	上流	40 sec	350 cc/s	一定	一定
4	A	270	10 cm	両側	40 sec	200 cc/s	一定	一定

動層の粒径がある粒径以上の粒子の含有率である。

3. 数値シミュレーション 先端部のごく近傍を除けば土石流も殆ど等流の抵抗則を用いた Kinematic Wave の取扱が可能であると思われる。その際、(1)式は(7)式のように置き換えられる。

$$q = \frac{2}{5} \frac{g \sin \phi}{dm a_1 \sin \phi} \left\{ C_d + (1 - C_d) \frac{\rho}{\sigma} \right\}^{1/2} \left\{ \left(\frac{C_*}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^2 R^{1/2} \quad (7)$$

係数 C は掃流状集合流動あるいは Dilatant 流動の流動式から求めることができる。上記の式の差分化を行い、Leap frog 法によって計算を実行した。

4. 実験結果と計算結果の比較 図1に示した実験水路で Table1 の混合砂と Table2 の条件で実験を行った。また、各実験に対して Table3 の計算条件で計算した。実験と計算結果が図2-図5に示されている。図2、図3は実験ケース1の堆積層厚及び流動深の時間的变化と A2 の条件による計算結果との比較を示している。図2において曲線1,2,3の領域は堆積層が不飽和であり、侵食速度に実験値を用いているので実験と計算の一致は当然であるが曲線4,5の傾向が実験と計算でほぼ一致しており、(3)式のような侵食速度式が適切であることを示している。図3では H の計算結果と実験結果にかなり差があるがそれは実験の精度がよくないことや基礎式の簡単化の影響であると考えられる。図4、図5は横流入の場合に対する同様の比較であるがこの場合には侵食速度も流動深も比較的良好に一致している。図6は堆積層が不飽和の領域において実験結果から侵食速度と掃流力の関係を求めた結果である。掃流力の小さい範囲での実験がないので確かではないが $2 < \tau_* < 3.2$ であれば侵食速度が(8)式で表される。

$$\frac{i}{u_*} = 1.68 \tau_* - 2.92 \quad (8)$$

Table 3 The case of computation

Case	材料	堆積厚	堆積厚(%)	掃流方式	掃流時間	掃流速度	掃流流量	掃流速度
A1	200	270	実験値	実験値	1.0	0.002	0	0
A2	200	270	実験値	実験値	1.0	0.002	0	0
B1	200	125	実験値	実験値	1.0	0.002	0	0
B2	200	125	実験値	実験値	1.0	0.002	0	0
C1	200	270	実験値	実験値	1.0	0.002	0	0
C2	200	270	実験値	実験値	1.0	0.002	0	0
D1	200	270	実験値	実験値	1.0	0.002	0	0
D2	200	270	実験値	実験値	1.0	0.002	0	0

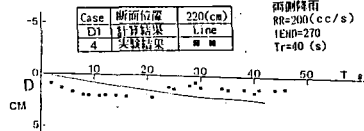


図4 堆積層厚の変化

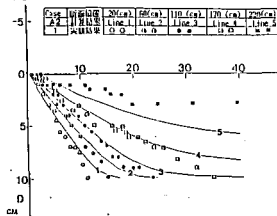


図5 土石流の流動深の変化

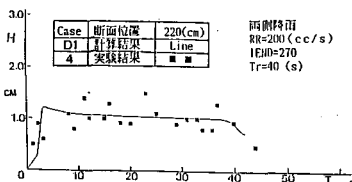


図6 侵食速度と掃流力の関係

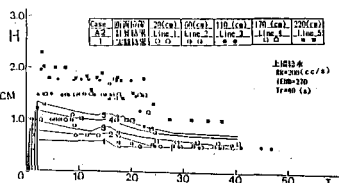


図7 土石流の流動深の変化

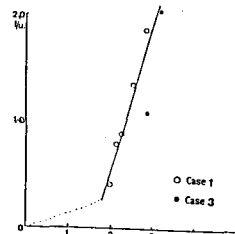


図8 侵食速度と掃流力の関係

5. あとがき 変勾配流路上での侵食と堆積を考慮した土石流形成のモデルを提示し、その数値計算と実験結果との比較により、その妥当性を調べ、モデルに含まれている定数を求めた。さらに実験精度の向上や他の条件についての追加実験等を計画中である。なお、この研究の一部に文部省科学研究費(一般研究(C)60550362)の補助を受けた。また、数値計算や実験には中川 一 助手の力を得た、感謝する次第である。