

49 土石流の河道侵食機構

京都大学○江頭進治 河川環境管理財団 芦田和男
京都大学大学院 寺西直之 青木建設 熊谷修治

1.はじめに 土石流による河道侵食機構を明らかにするために水路実験を行い、その結果と従来の土石流に関する知見より、側岸および河床の侵食速度式を提案している。

2.1次元支配方程式 江頭ら¹⁾によれば、土石流の1次元支配方程式は以下に示す通りである。

混合物および砂礫の質量保存側

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial cvh}{\partial x} = E \quad (1) \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial vh}{\partial x} = \frac{E}{c_*} \quad (2)$$

運動量保存側

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = & g \sin \theta - g \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{(\sigma/\rho - 1)}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \frac{\partial c}{\partial x} \right\} - \frac{vE}{c_* h} \\ & - \frac{(\sigma/\rho - 1)cg \cos \theta \tan \phi_s}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \frac{1}{1 + \alpha} - \frac{v^2}{\{(\sigma/\rho - 1) + 1\}h} f_b \end{aligned} \quad (3)$$

河床変動式

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_*} \quad (4)$$

ここにh:流動深、v:平均流速、E:侵食速度、c:土石流の濃度、c*:砂礫の堆積濃度、θ:河床勾配、ρ:水の比重、σ:砂の比重、α:定数(0.25)、φ_s:砂粒子の静摩擦角、f_b:間隙流体の抵抗係数、z_b:河床位である。

さて、以上の方程式系を閉じさせるには、もう一つ侵食速度Eに関する方程式が必要である。以下ではその侵食速度式を誘導する。

3.侵食速度式 まず、土石流が堆積も侵食も起こさないような勾配を平衡勾配とよぶ。式(3)において加速度項、圧力項、および侵食速度Eをそれぞれ0とし、θについて解けば次式を得る。

$$\theta_e = \arctan \left\{ \frac{(\sigma/\rho - 1)cg \tan \phi_s}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \frac{1}{1 + \alpha} + \frac{v^2}{\{(\sigma/\rho - 1) + 1\}h} f_b \right\} \quad (5)$$

ここに、θ_eは平衡勾配である。いま、ある濃度を有した土石流がある勾配の河道上を流れるとき、堆積あるいは侵食によって、濃度や勾配が式(5)を満たすように変化すると考える。図1において微小時間dt後の河床変動量は次のように表わせる。

$$dz_b = \frac{\partial z_b}{\partial t} dt + \frac{\partial z_b}{\partial x} dx \quad (6)$$

両辺をdxで除すと次式を得る。

$$\frac{dz_b}{dx} = \frac{\partial z_b}{\partial t} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (7)$$

左辺は侵食された砂礫とともに動く座標からみた時の河床勾配であって、それが常に平衡勾配を保つと考える。また、dx/dtは侵食された砂礫の移動速度であり、土石流の平均流速のk倍として、kv(k<1)と置く。これらと式(4)を用いて式(7)を変形整理すると、侵食速度式は次のように表示される。

$$\frac{E}{kv} = c_* (\tan \theta - \tan \theta_e) \quad (8)$$

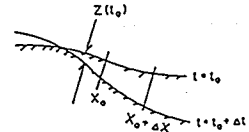


図-1 河床変動図

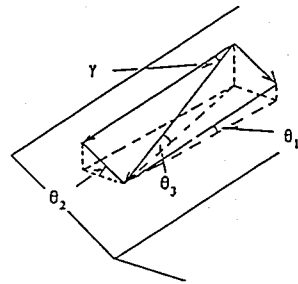


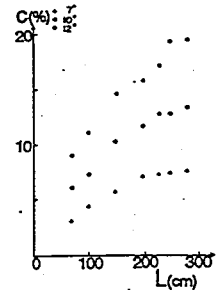
図-2 θ₁, θ₂, γ及びθ₃の関係

次に、側岸における侵食速度式を求める。側岸では横断方向に傾斜を持つので、流下方向と侵食された砂礫の移動方向は異なると考えられる。砂礫の移動方向に河床侵食の時と同様の議論をすれば次式を得る。

$$\frac{E}{kv} = c_s (\tan \theta_3 - \tan \theta_c) \quad (9)$$

ここに θ_3 は砂礫の移動方向の勾配である。ところで θ_3 は水路勾配 θ_1 、側岸の傾斜角 θ_2 および砂礫の移動方向と流下方向のなす角 γ の関数である(図-2参照)。

以上河床および側岸の侵食速度式を導いた。これらの式に含まれる a, θ_2, γ については、水路実験により検討する。



4. 実験方法および条件 河床侵食および側岸侵食に関する2種類の実験を行った。図-3 河床侵食実験結果 河床侵食実験では幅10.8cmの矩形断面水路に粒径0.0865cmの砂を厚さ4cmにしき(移動床長と下流端濃度) つめ上流端より給水し、下流端濃度を測定した。勾配は $7^\circ, 10^\circ, 12^\circ$ の3種類、移動床の長さは70~250cmの7種類である。側岸侵食実験では、土石流を形成させるための移動床の区間の下流側に、片岸のみ侵食可能な50cmの区間を取り付け、勾配 $10^\circ, 12^\circ, 16^\circ$ の3種類の条件下において、下流端濃度および15秒通水後の河床形状を測定した。

5. 河床および側岸侵食速度式の検討 図-3は河床実験より得られた移動床の長さの下流端濃度との関係である。これによると移動床が長くなるにつれて下流端濃度は大きくなるが、ある長さにおいて定常値に落ちつくようである。この定常値と河床勾配は式(5)を満たすと考えられる。図-4は、河床実験のうち勾配 10° の下流端濃度と侵食速度の関係および式(8)を示したものである。これによると $a=0.02$ としたときに侵食速度式は適合性が高い。その他の勾配の実験においても $a=0.02$ ぐらいの値を用いればよさそうである。また式(8)は濃度が大きいほど侵食速度が小さくなることを示すが、それは実験結果で裏付けられている。

次に式(9)の θ_3 を決めるために、 θ_3 を規定する θ_2 と γ を側岸侵食実験のデータで検討する。図-5は $\theta_2=38.5^\circ$ (砂礫の水中安息角)とした時の式(9)と河床勾配 12° のときの実験データを示している。これによると $\gamma=0^\circ$ 付近で両者は一致している。また、図-6は $\gamma=0^\circ$ とした時の式(12)と実験結果を示している。

これを見ると、 $\theta_2=38.5^\circ$ として問題は無く、侵食速度は $\gamma=0^\circ, \theta_2=38.5^\circ$ として評価できそうである。このことは、 θ_3 の代わりに河床勾配 θ_1 を用いて評価できることを意味している。

5. 結論 以上、河床および側岸の侵食速度式を提案した。この式は侵食のみならず堆積速度も評価できる。また側岸侵食速度は河床侵食の場合と同じ式でほぼ評価できることを示した。しかし、式に含まれる a の値や $\theta_3(\theta_2, \gamma)$ は限られたデータのみで検討これらについて今後さらに検討する必要がある。

参考文献 1) 江頭進治・芦田和男・佐々木浩:土石流の流動機構, 第32回水理講演会論文集, 1988, pp.485-495

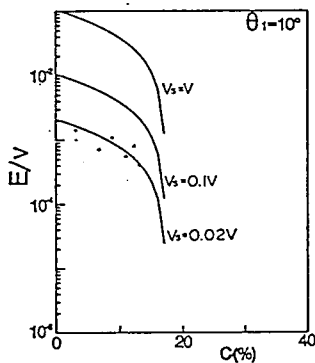


図-4 侵食速度式と河床侵食実験結果

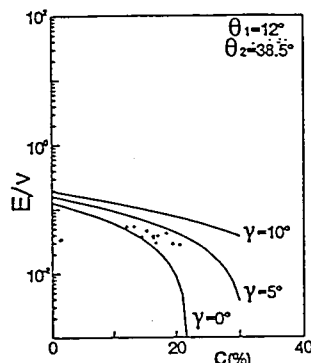


図-5 侵食速度式と側岸侵食実験結果($\theta_2=38.5^\circ$)

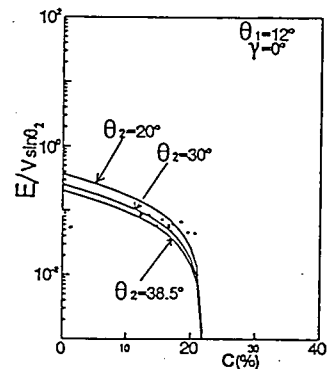


図-6 侵食速度式と側岸侵食結果($\gamma=0^\circ$)