

鹿児島工高庫 正員 田原 誠

1. まえがき

斜面長の長い急斜面において長時間継続して豪雨がいった場合、その集水効果は無視できない量となり、最近、土砂崩壊による災害の問題として、しばしば取り上げられ、その究明が待たれている所である。著者は、この問題について、前報にひきつづき室内実験をおしすめ、崩壊河床形状について、エネルギー勾配の修正、浸透流量、阻界掃流力等を考慮した結果、実験結果の傾向をよく説明できるので、ここに報告する次第である。

2. 流路浸食のモデルと基礎方程式

流路浸食の形状および座標は、図-1, 2に示すようにで、初期勾配 θ_0 の傾斜面において、 $x=0$ で集水流量 $Q=0$ 、 $x=l$ で段落ち構造(砂防堰堤)になっており、浸食量 $z=0$ である。任意時刻 t のエネルギー勾配 I_e は、図-1の図表より、
$$I_e = \rho \sin \theta = \frac{dx \sin \theta_0 - dz}{\sqrt{(dx \cos \theta_0)^2 + (dx \sin \theta_0 - dz)^2}} = \frac{1}{\cos \theta_0} \sqrt{1 + \rho^2 \theta_0^2 (\sin \theta_0 - \frac{dz}{dx})^2} \quad (1)$$

横断浸食形状は、河床幅 b_0 、流域幅 B_0 とおき、つぎの指数式を考える。

$$\frac{y'}{b_0/2} = \delta \left(1 - \frac{z'}{Z'}\right)^\gamma + 1, \quad \text{ここに、}\delta, \gamma \text{は形状係数} \quad (2)$$

上式で、 $z'=0$ なり $y'=y'_0$ 、および $y'=B_0/2$ なり $z'=Z'$ を求めると、

$$y'_0 = (\delta+1)b_0/2 \quad (2)_1, \quad Z' = [1 - \{(\frac{B_0}{b_0}-1)/\delta\}^\gamma] Z \quad (2)_2$$

浸食断面積 A は、 $0 \leq y' < \frac{B_0}{2}$: $A = 2 \int_0^{y'} y' dz' = (1 + \frac{\gamma}{1+\delta}) b_0 Z \quad (3)_1$

$$y' \geq \frac{B_0}{2} : A = 2 \left[\int_0^{\frac{B_0}{2}} y' dz' + \int_{\frac{B_0}{2}}^{y'} y' dz' \right] = \left[1 + \left(\frac{B_0}{b_0} - 1 \right) \left(1 - \frac{\delta}{1+\delta} \left(\frac{B_0}{b_0} - 1 \right)^\gamma \right) \right] b_0 Z \quad (3)_2$$

式(3)₁、(3)₂において、 $A = C_A b_0 Z$ とおけば、 $\delta \rightarrow \infty$ のとき $C_A = 1$ で、河床幅 b_0 が浸食となり、 $\delta \rightarrow 0$ のとき $C_A = 1 + \delta \rightarrow C_A = \frac{B_0}{b_0}$ つまり流域幅 B_0 にわたる浸食の問題に該当することになる。実験によれば、 $b_0/b_0 \div 0.25$ 程度で、式(2)₁により $\delta \div 3$ となった。 δ については、更に検討の余地があり、2次流出(右方向成分の流れ)の問題にもなってくる。

流水の連続・運動方程式：

降雨強度 r 、浸透能 i としたとき、有効雨量強度 $r_e = r - i$ は、本実験では $r = 90 \text{ mm/hr}$ 、

砂層の場合 $i \div 0.01 \text{ cm/sec} = 360 \text{ mm/hr}$ 程度になり、図-1の問題の場合、 $x=0$ 付近で $r \approx i$ 、 $x=l$ では $i=0$ となるから、結局 $r_e = 0 \rightarrow r$ に変化する。然しながら、実際の斜面の i は無視できるほど小さく、実験の初期設定として河床を飽和水状態に保てば、降水は全部表面流となり $r_e \div r = \text{一定}$ とみなすことができる。さて、流水の連続性より、

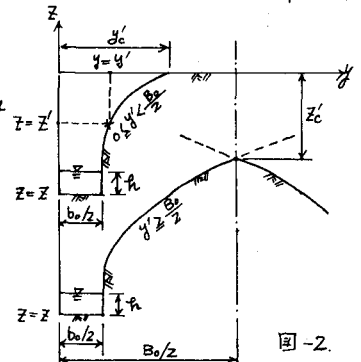
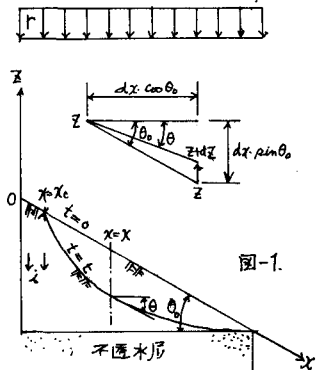
$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial (U \sin \theta)}{\partial x} = \frac{r_e \cos \theta_0 B_0}{b_0} \quad (4) \quad \text{流速公式として、} U = \varphi U_* \sqrt{g \rho \sin \theta} \quad (5)$$

急斜面流の場合、Fr数 $= U/dx/dt \gg 1$ で、式(4)の左辺 $= (\frac{dx}{dt} + U) \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial x}$ における dx/dt は U に對して無視できるので、 $\partial U / \partial t \div 0$ とおく。また、Manningの粗度係数 n を用いると $\varphi = U_*^{1/2} / n \sqrt{g}$ である。

砂防堰の連続・運動方程式：

空隙率 λ ($\div 0.4$)、砂防堰の単位幅あたりの容積移動量を q_T とおくと、

$$\text{河床の連続性より、} (1-\lambda) \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial q_T}{\partial x} b_0 = 0 \quad (6) \quad \text{流砂量公式として、} q_T = \frac{K U_*}{5 g} (U_*^2 - U_{*c}^2) \quad (7)$$



こゝに、 S は砂礫の水中比重、 K は、佐藤・吉川・芦田の式で、 $n \leq 0.025$: $K = 0.623 / (40n)^{3.5}$, $n > 0.025$: $K = 0.623$ とおられる。

3. 河床の縦断形状についての検討

式(1)、(4)、(5)より、 $\rho \sin \theta$, R , U を消去すると、 $U^3 = \frac{g \Gamma_e B_0 x (\sin \theta_0 - \frac{\partial \zeta}{\partial x})}{\rho b_0 \sqrt{1 + \rho \sin^2 \theta_0 (\sin \theta_0 - \frac{\partial \zeta}{\partial x})^2}} \dots (8)$

式(6)に、式(3)₁、(3)₂ 即ち $A = G b_0 Z$ および式(7)、(8) を代入し、 $x/l = \xi$, $Z/l = \zeta$, $\frac{K \Gamma_e B_0 l}{(1-n) G S \rho b_0 l} = \tau$,

$\frac{g b_0 U \tau^2}{g \Gamma_e \cos \theta_0 B_0 l} = \alpha$, $1 + \rho \sin^2 \theta_0 (\sin \theta_0 - \frac{\partial \zeta}{\partial \xi})^2 = f(\xi, \zeta)$ とおけば、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \xi} = \frac{\xi \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \xi^2}}{(f(\xi, \zeta))^3} \left\{ 1 - \frac{(\sin \theta_0 - \frac{\partial \zeta}{\partial \xi}) f(\xi, \zeta)}{\xi \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \xi^2}} \right\} \left[1 - \frac{1}{3} \left\{ \frac{\alpha \cos \theta_0 \sqrt{f(\xi, \zeta)}}{\xi (\sin \theta_0 - \frac{\partial \zeta}{\partial \xi})} \right\}^2 \right] \dots (9)$$

i). 静的平衡河床

式(7)で静的平衡の条件 $U_e = U_{ec}$ を適用し、式(8) および境界条件 $\xi = 1$ で $\zeta = 0$ を用いると、 $\zeta \leq 0$ の領域に対して、

$$\zeta = \rho \sin \theta_0 \left(\xi - 1 + \alpha \cos \theta_0 \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha^2}}{\xi + \sqrt{\xi^2 - \alpha^2}} \right) \dots (10)$$

河床崩壊部分の上流端の位置 $\xi = \xi_c$ は上式で、 $\zeta = 0$ とおくと、

$$\cos \theta_0 = \frac{1 - \xi_c}{\alpha \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha^2}}{\xi_c + \sqrt{\xi_c^2 - \alpha^2}}} = g(\xi_c, \alpha) \dots (11)$$

図-3 を利用し、 ξ_c の最小値を求めると、 $\xi_c = \alpha$ から $\cos \theta_0 = 1$ で、 $\xi_c = 0.3822$ の値を得る。本実験の $\tan \theta_0 = 1/5$ では、 $\xi_c = 0.390$ でこの計算値は実験結果ともよく一致していた。

ii). 動的平衡河床

式(9)で動的平衡の条件 $\tau \rightarrow \infty$, $\partial \zeta / \partial \xi \rightarrow 0$ を適用すると、右辺第2項は(+)より、第2項に対して、境界条件 $\xi = 1$ で $\partial \zeta / \partial \xi = \rho \sin \theta_0$ を用いる。最終定常河床形状は、

$$\zeta = \rho \sin \theta_0 \left(\xi - 1 + \frac{\beta}{\tan \theta_0} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \beta^2}}{\xi + \sqrt{\xi^2 - \beta^2}} \right) \quad \text{ここで} \quad \frac{(\rho \sin \theta_0 - 1) \tan^2 \theta_0}{1 + (\rho \sin \theta_0)^2 \tan^2 \theta_0} = \beta \dots (12)$$

で、 $U_{ec} = \sqrt{g R \sin \theta_0}$, $U_{ec} / S g d \div 0.05$ のとき、 $\rho \sin \theta_0 = \frac{0.05 S d}{R}$ 従って、 $\rho \sin \theta_0 / \sin \theta_0 \ll 1$ として無視すれば、 $\frac{\tan^2 \theta_0}{1 + \tan^2 \theta_0} = \beta$ とおける。i) と同様に、 $\xi = \xi_c$ は、式(12)で $\zeta = 0$ とおけば、 $\frac{1}{\tan \theta_0} = \frac{1 - \xi_c}{\beta \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \beta^2}}{\xi_c + \sqrt{\xi_c^2 - \beta^2}}} = g(\xi_c, \beta) \dots (13)$ となる。

式(12)について、 $\theta_0 = 45^\circ$ とおき β を変数として計算したものが、図-4 である。また、実験結果と式(9)による計算結果を比較したものが、図-5 で、下流域ではかなりよく一致し、上流域で浸食速度 $i \div 0$ とみなした影響がでていることがわかる。

最後に、本研究について御指導を頂きました九州大学橋本一郎教授、平野宗夫助教授、および本実験に際し協力を頂いたフジタ工業 KK 谷口正美、日本鋼管工事の堤和博氏に感謝の意を表する次第であります。参考文献 1). 田原：暴雨による急斜面の流路浸食機構について、第29回年講Ⅱ、昭49.10

2). 芦田・奥村・田中：斜面侵食に関する実験的研究、防災研年報 16-B

