

九州大学工学部 正員 ○橋本 晴行
九州大学工学部 正員 橋 東一郎
(株)建設技研 正員 中山比佐雄

I. まえがき 土石流は流下に伴って河床から多量の土砂を浸食して発達し定常波高に近づいていくことが高橋により明らかにされているが、本研究はその発達過程と河床侵食についてなおいっそう検討を加えるため行ったものである。

II. 実験方法 給水実験と人工降雨実験を行った。前者は $\sigma=1.55$, $d_n=0.82\text{cm}$, $\sqrt{q_{20}/d_{16}}=1.25$ の人工骨材を長さ約7m, 幅15cmの水路に厚さ $D=4.6\text{cm}$ と10cmに敷き, あらかじめ河床を水で飽和させてから実験を行った。この河床濃度 $C_s=0.59$, 全層流動限界勾配 $\theta_s=11^\circ$ である。後者は $\sigma=2.63$, $d_n=0.0876\text{cm}$, $\sqrt{q_{20}/d_{16}}=1.34$, $C_s=0.58$ の砂を同じ水路に10cmの厚さに敷き, 水平方向で6mに渡って雨を降らせて実験を行った。 $\theta_s=21^\circ$ である。

III. 実験結果と考察

1. 先端速度 U_f 図1のように給水後先端速度は増加しそして一定となること分かる。波高計算では一定速度の区間の軌跡を延長して t 軸と交わった点を初期とする。

2. 先端波高 土石流の基礎式(1)砂の連続の式, 水と砂とを合わせた連続の式, 及び濃度を規定する式が考えられる。即ち
$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial C_s \rho}{\partial t} + \frac{\partial C_s z}{\partial t} = 0 \quad \text{--- ①} \quad \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial t} = \begin{cases} 0 & \text{(給水)} \\ r_e \cos \theta_s & \text{(人工降雨)} \end{cases} \quad \text{--- ②}$$

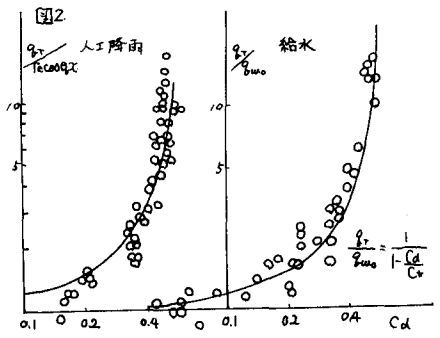
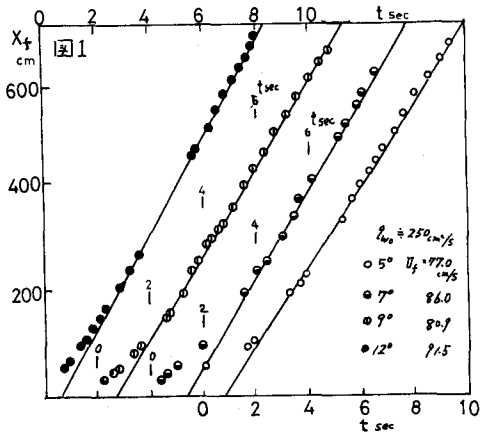
$C_s = \tan \phi / \{S(\tan \phi - \tan \theta)\}$ --- ③ である。ここに ρ , ρ_s は単位幅当りの全流量, 流砂量, C_s は流砂濃度, ρ は流動層厚, z は原河床面から上がった河床高を示し, 上向きを正とする。

r_e は有効雨量強度, θ_s は原河床勾配, ϕ は河床の内部摩擦角で前報より $\tan \phi=0.8$ とする。 S は粒子の水中比重。①, ②より z を消去すれば
$$\frac{\partial (C_s - C_{s0}) \rho}{\partial t} + \frac{\partial (C_s - C_{s0}) \rho}{\partial x} = \begin{cases} 0 & \text{(給水)} \\ r_e C_{s0} \cos \theta_s & \text{(降雨)} \end{cases} \quad \text{--- ④}$$

--- ④ となり非定常項を無視し, 給水では上流端 $x=0$ で $\rho = \rho_{s0}$ (給水量), $C_s=0$, 人工降雨の場合土石流発生点 $x=0$ で $\rho=0$ であるとして解けば (人工降雨) $\frac{\rho}{\rho_{s0} \cos \theta_s} = C_s / (C_s - C_{s0})$ --- ⑤ となる。

図2に実験値との比較を示す。③式において $\tan \theta = \tan \theta_s - \frac{\partial (z+z_0)}{\partial x}$ であることを考慮して, ②, ⑤より非線型項を無視すると水位 $H = \rho + z$ を規定する式かできる。
$$\frac{\partial H}{\partial t} = K \frac{\partial H}{\partial x} \quad \text{(給水)}, \quad \frac{\partial H}{\partial t} = K_r x \frac{\partial H}{\partial x} + R_0 \cos \theta_s \frac{\partial H}{\partial x} - R_0 \quad \text{(人工降雨)} \quad \text{--- ⑥}$$
 ここに $K = \frac{C_{s0} S C_s \rho_{s0} \tan \phi / (C_s - C_{s0}) \tan^2 \theta_s}{C_{s0} S C_s \rho_{s0} \tan \phi / (C_s - C_{s0}) \tan^2 \theta_s}$, $K_r = \frac{C_{s0} S C_s \rho_{s0} \tan \phi / (C_s - C_{s0}) \tan^2 \theta_s}{C_{s0} S C_s \rho_{s0} \tan \phi / (C_s - C_{s0}) \tan^2 \theta_s}$, $R_0 = r_e \cos \theta_s \cdot C_{s0} / (C_s - C_{s0})$ である。 C_{s0} は③式で $\tan \theta = \tan \theta_s$ とした濃度である。

給水の場合⑥式を $x=0$ で $\frac{\partial H}{\partial x} = M$, $t=0$ で $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ の境界条件下に与えれば $\frac{\partial H}{\partial x} = M \operatorname{erfc}(\eta)$ となる。ここに $\eta = x / \sqrt{4 K t}$ である。⑥式を②式に代入して $x=0$ で $\rho = \rho_{s0}$ の条件下に x で積分すれば $\rho = K M \times \operatorname{erfc}(\eta) + \rho_{s0}$ となり先端 $x = U_f t$ で $\rho = U_f \rho$ とおけば先端波高を規定する式として
$$\rho = \frac{K M}{U_f} \operatorname{erfc} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_f x}{K}} + \frac{\rho_{s0}}{U_f} \quad \text{--- ⑦}$$
 を得る。定常状態の濃度として C_{s0} を使えば定常波高は⑤より $\rho_{s0} = (\frac{\rho}{U_f}) \cdot C_s / (C_s - C_{s0})$ となり⑦から求める ρ_{s0} を等置すれば $M = (\frac{\rho_{s0}}{K}) \cdot C_{s0} / (C_s - C_{s0})$ となる。 K , M は以上の計算式より求め, U_f は実験値を使用して⑦式を検討し



たのが図3である。次に上流端の堆積層が給水後すぐ流失してしまう

場合の非定常過程として図4のような段渡先端部(Ⅰ)で原河床に乗り上げたモデルを考える。そしてⅡは時間のみの関数とし、先端背後(Ⅲ)の

河床は原河床面に対して β という角度で直線的に浸食され、 x_1 と x_2 は一定速度 U_1 、 U_2 で移動するとする。即ち(Ⅰ)で $\frac{\partial z}{\partial t}=0$ 、(Ⅲ)で $\frac{\partial z}{\partial t}=-U_2 \tan \beta$

とあって②式を上流側から解いて行けば $(\frac{d^2}{dx^2})\{(U_1-U_2)x + (R+D-R_0)\tan \beta\} + (U_1-U_2)R = U_2(D-R_0) + q_{w0}$ ・・・⑧ となり、 $t=0$ で $R = q_{w0}/U_1$ とす

れば $R = -(U_1-U_2)x \tan \beta - (D-R_0) + \{(U_1-U_2)^2 x^2 \tan^2 \beta + 2\{U_1(D-R_0) + q_{w0}\}x \tan \beta + (\frac{q_{w0}}{U_1} + D-R_0)\}^{1/2}$ ・・・⑨ となる。 $t \rightarrow \infty$ のとき $R \rightarrow$

$R_{\infty} = \{(D-R_0)U_2 + q_{w0}\}/(U_1-U_2)$ ・・・⑩。他方④式より図4の x_T に沿って移動していく場合

の定常状態を考へれば $(q_T - U_2 R_{\infty})/(q_{w0} - U_2 R_0) = C_d/(C_s - C_d)$ ・・・⑪ となり、先端部で $C_d = C_{d0}$ 、 $q_T = U_2 R_{\infty}$ とおけるから⑩式と連立して U_2 を求めることができる。 $U_2 =$

$[C_{d0}/\{C_s - (1-R_0/D)C_{d0}\}] \cdot q_{w0}/D$ ・・・⑫。 C_{d0} 、 U_2 は計算値を、 R_0 は実験値を、 $\tan \beta$ は上流端に堆積層が存在する場合も、このモデルで近似できるとして $\tan \beta = \frac{D}{(U_2 T)}$ を使用して

⑨式を検討したのが図5である。 T は上流端堆積層が D だけ浸食される時間であり、実験的に求める。なお⑫より求めた U_2 が U_1 より大きいときは $U_2 = U_1$ と

おいて計算を行った。

3. 土石流による河床浸食 ③式において $\tan \theta = \tan \theta_0 - \frac{\partial z}{\partial x}$ とおき、非線形型、微小項を無視すれば、⑥式においての H を Z に置きかえた式ができる。給水実験では境界条件として $x=0$ で $\frac{\partial z}{\partial x} = M$ 、先端 $x=U_1 t$

で $\frac{\partial z}{\partial x} = 0$ 、 $z=0$ として、差分近似と摂動法近似を行った。後者の近似は L を基準長として $Z = \frac{z}{L}$ 、 $X = \frac{x}{L}$ 、 $T = \frac{Kt}{L}$ なる無次元量で

拡散方程式をあらわし、変換 $\tau = T - EX$ 、 $X = X$ を行って、解を ε のべき級数に仮定して求める。ここに $\varepsilon = K/(g_s L)$ である。最終的に摂動

解第一近似は $Z = -2\sqrt{(t - x/U_1)K} M \operatorname{erfc}(\xi) \dots \dots \textcircled{13}$ となり、 $\xi = x/2\sqrt{(t - x/U_1)K}$ 。他方人工降雨の場合、右辺第2、第3項を無視すれば $\xi = \sqrt{x/(Kt)}$ として、 $\frac{Z_0}{\varepsilon} = -\{e^{(U_1/K - \xi^2)} - 1\}/\{e^{U_1/K - \xi^2} - 1\} \dots \dots \textcircled{14}$

となる。ここに境界条件として $x=U_1 t$ (先端)で $Z = -D$ 、 $x=U_1 t$ で $Z=0$ とした。 U_1 は実験値を M は定常的な濃度の実験値を③に代入して求めた勾配から得、 C_{d0} として実験値を、 U_1 は適当な値を仮定して計算を行い実験値と比較したのが図6、図7である。

Ⅳ. 結び 各計算において実験値と若干のズレがあるのは諸係数が C_d の値に大きく影響を受けること、 $\tan \beta$ や M の評価に問題があることなどが考えられるが、他の多くの要素が作用していることを考えるとこの程度のズレは甚しとすべきであらう。

(1) 高橋保, 京大防災研年報, No20.8-2, 1977.

(2) 橋・中山・橋本, S52年度西部支部.

