

鳥取大学 工学部 ○正員 鈴木 幸一
道上 正規

1. はじめに ダム建設などにより上流からの供給土砂が減少した場合に河床低下の軽減および河床勾配の緩和を目的とした河川を横断して設置する床固めに関し、それによってどのような水理条件のときに有効な機能を果たすのかということと床固め自体の安定性という二面から検討しておく必要があり、本研究の目的は床固め上下流部の河床変動特性および床固め直下流部の局所洗掘特性の解明にある。

2. 床固め上下流部の河床変動¹⁾ 道上の導いた河床変動に関する拡散型方程式²⁾,

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = K \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad K = \frac{z_l}{20} \cdot \frac{1}{1-\alpha} \cdot \frac{qF(\eta/c_c)}{SA} \quad (1)$$

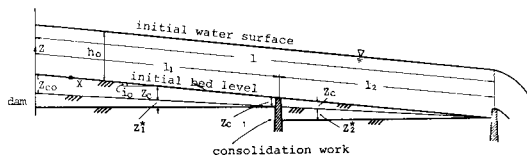


図-1

を図-1に示すように河川上流端にダムを建設し流入砂を0とし、下流端水位が一定になるように制御されている河川

正間 l の上流ダムサイトを原点($x=0$)とした場合の $x=l$ 地点に天端を現河床と一致させた床固めを設置したときの床固め上下流部の河床低下問題に適用する。ただし、 z :河床高、 t :時間、 x :流下方向距離、 α :砂の空隙率、 ρ :砂の密度、 ρ_w :水の密度、 $S=0/\rho-1$ 、 q :単位幅流量、 U :平均流速、 U_r :摩擦速度、 $A=U/U_r$ 、 φ :粗度の関数、 η : T_0/T_c の関数、 T :掃流力、 T_c :限界掃流力である。式(1)を解くときの境界条件および初期条件を求めるために実験事実に基づいて次のような仮定を設ける。仮定1) 水路下流端では河床低下は生じない。2) 床固め部($x=l_1$)の上下流では、床固め上で限界水深が生じ始める時(右表)で z は上下流の水位は連続的であって河床低下量も上下流で連続的である。3) 床固め上で限界水深が生じると床固め上 z_c の水位は低下しなくなり床固め直上流部での河床低下は止まる。4) 上流から給砂のないダム直下流部での河床勾配は砂の限界勾配に等しく、また床固め部で限界水深が生じた後の床固め直下流部の河床勾配は床固め上流部から流入する土砂を掃流するのに必要な勾配となる。つまり、床固め上($x=l_1$)で限界水深が生じ始める時間を t_c とし、その時の元河床からの河床変動量を z_c とする。 z_c は河床が上昇したときを正とする。

(1) $t \leq t_c$ の場合: この場合、図-1において l を l_1 および l_2 の二つに分けて考える必要はない。 z_0 および z_c をそれぞれ元河床勾配および砂の限界勾配とすると、境界条件および初期条件は、

$$\frac{\partial z(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = z_0 - z_c, \quad z(x,t) \Big|_{x=l} = 0, \quad z(x,t) \Big|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

であって、これらの条件で K を一定として式(1)の解を求めると式(3)が得られる。

$$z = -(z_0 - z_c) \left[(l-x) - \frac{z}{l} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-K \{ (2n+1)\pi / 2l \}^2 t} \cdot \left\{ \frac{2l}{(2n+1)\pi} \right\}^2 \cos \frac{(2n+1)\pi}{2l} x \right] \quad (3)$$

(2) $t > t_c$ の場合: この場合は、 l を l_1 正間と l_2 正間の二つに分けて考える必要がある。 $t^* = t - t_c$ 、 $x^* = x - l_1$ と変数変換し、 $t^*=0$ に対する l_1 正間および l_2 正間の初期勾配を近似的にそれぞれ $z_0 = z_0 - (z_c - z_{cl})$ および $z_{20} = z_0 - z_{cl}/l_2$ と表わし、 $z_1^* = z(x^*) - z_c$ と置く。ただし、 z_c および z_{cl} はそれぞれ $x=0$ および $x=l_1$ における z_c の値である。

1) $0 \leq x \leq l_1$ 正間: 式(1)を解く際の境界条件、初期条件および式(1)の解は次式のとおりである。

$$\frac{\partial z_1^*(x, t^*)}{\partial x} \Big|_{x=0} = z_0 - z_c, \quad z_1^*(x, t^*) \Big|_{x=l_1} = 0, \quad z_1^*(x, t^*) \Big|_{t^*=0} = 0 \quad (4)$$

$$z_1^* = -(z_0 - z_c) \left[(l_1 - x) - \frac{z}{l_1} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-K \{ (2n+1)\pi / 2l_1 \}^2 t^*} \cdot \left\{ \frac{2l_1}{(2n+1)\pi} \right\}^2 \cos \frac{(2n+1)\pi}{2l_1} x \right] \quad (5)$$

1) $l_1 \leq x \leq l$ 正側: 仮定4)より $z^* = 0$ の河床勾配は $z^* = 0$ からこの正側への流入砂量 g_{in} を決めるには必要勾配 $z'_0(x^*)$ となるから、式(1)の境界条件、初期条件および解は左式のようになる。ただし、 $z_1^* = z(x^*) - z_0$ である。

$$\partial z_1^*(x^*, t^*) / \partial x^* \big|_{x^*=0} = \lambda'_{10} - \lambda'_0(x^*) = f(x^*), \quad z_1^*(x^*, t^*) \big|_{x^*=l_1} = 0, \quad z_1^*(x^*, t^*) \big|_{t^*=0} = 0 \quad (6)$$

$$z_1^* = -\frac{2}{l_2} K \sum_{n=0}^{\infty} \cos \frac{(2n+1)\pi}{2l_2} x \int_0^{t^*} f(\alpha) e^{-K \left(\frac{(2n+1)\pi}{2l_2} \right)^2 (t^* - \alpha)} d\alpha \quad (7)$$

l'_0, Z_{01} および t_0 : l'_0 は洗砂量式として佐藤吉川・茅田式を用いると $l'_0 = (1/8g^{1/2})(5g_{in}/4F)^{1/2}$ であり、式(7)中の g_{in} は

$$g_{in} = -(1-\lambda) \int_0^{l_1} \frac{\partial z_1^*}{\partial t^*} dx = 4K(1-\lambda)(\lambda'_{10} - \lambda'_0) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{(2n+1)\pi} e^{-K \left(\frac{(2n+1)\pi}{2l_2} \right)^2 t^*} \quad (8)$$

である。また、 Z_{01} については、床面下部と下流側で等流水深になった断面での運動量保存の関係式を用いると、

$$Z_{01}/h_0 = \{2F^2/(F^2-1)/(F^2+2)+1\}^{1/2} (3/2F^2)^{-1} \quad (9)$$

であり、 $x=l_1$ 、 $z=Z_{01}$ とすることによって式(3)から t_0 を求めることができる。ただし、 $F=U/\sqrt{g h_0}$ 、 g : 重力加速度、 h_0 : 等流水深、 h_0 : 限界水深 である。

図-2 は任意点(x)における河床低下量の時間的変化についての実験結果と計算結果との関係を示した一例である。河床波の影響から実験データに大きなばらつきはありものの概して計算値は実験値の傾向をかなりよく捉えているものと考えらる。

3. 床面直下流部の局所洗掘 一方、図-3のように床面直下流部の局所洗掘状態を模式的に表わし、最大洗掘深を Z_{sm} 、その生じている位置を床面から L ところであると、洗掘孔の上流側傾斜角 α ($\approx 10^\circ$) を一定とすると、図-3の記号によって洗掘孔のAB部の体積 V の時間変化とそこへの流入砂量 g_{in} 、流出砂量 g_{so} との関係は、

$$(1-\lambda) dV/dt = g_{so} - g_{si} \quad (10)$$

と表わされる。ここで、 $Z_{sm} = \tan \alpha \cdot L$ 、 $V = Z_{sm}^2/2 \cdot \tan \alpha$ であり、 g_{si} は

$$g_{si} = -(1-\lambda) \int_0^{l_1} (\partial z_1^* / \partial t) dx \quad (11)$$

によって計算される。ただし、式(11)の z_1^* については $t \leq t_0$ の場合は式(3)で、 $t > t_0$ の場合は式(4)で計算される。一方、 g_{so} については、AB断面の流速係数 ϕ_u 、 h_u と最大洗掘深位置での全体的な河床から水面までの深さ、 $-z_{H1}$ と床面直下流部での元河床から河床の全体的な低下量(図-2参照)とすると、 $U = g/\phi_u(h_u + Z_{sm} + z_{H1})$ であり、流

量式として佐藤吉川・茅田式を用いると、

$$g_{so} = 9F/\sqrt{g} \cdot \left\{ g/\phi_u(h_u + Z_{sm} + z_{H1}) \right\}^3 \quad (12)$$

となる。式(10)に式(11)および(12)を代入すると、次式で表わされる Z_{sm} の時間 t に関する微分方程式が得られる。

$$\begin{aligned} t \leq t_0: \quad \frac{dZ_{sm}}{dt} &= \frac{\tan \alpha}{Z_{sm}} \left[\frac{1}{1-\lambda} \frac{9F}{\sqrt{g}} \left\{ \frac{g}{\phi_u(h_u + Z_{sm} + z_{H1})} \right\}^3 - K(\lambda'_{10} - \lambda'_0) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin \frac{(2n+1)\pi}{2} \frac{f_1}{f} \right] \cdot e^{-K \left(\frac{(2n+1)\pi}{2l_2} \right)^2 t} \\ t > t_0: \quad \frac{dZ_{sm}}{dt} &= \frac{\tan \alpha}{Z_{sm}} \left[\frac{1}{1-\lambda} \frac{9F}{\sqrt{g}} \left\{ \frac{g}{\phi_u(h_u + Z_{sm} + z_{H1})} \right\}^3 - K(\lambda'_{10} - \lambda'_0) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{4}{(2n+1)\pi} e^{-K \left(\frac{(2n+1)\pi}{2l_2} \right)^2 t^*} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

図-4 は図-2 に示した実験条件と同じ条件での実験の最大局所洗掘深 Z_{sm} の時間的変化の実測値と式(13)を Runge-Kutta 法によって計算した曲線を示してあり、種々の仮定にもかかわらず両者は比較的良好一致を示している。(参考文献) 1) 梶田、鈴木、道上: 土木学会中国四国支部年報(1979) 2) 道上: 専攻学位論文(1971)