

九州大学工学部 正員 橋本 一郎

大学院 学生員 宮武 順彦

第I報⁽²⁾で貯水池の堆砂過程について段丘部流砂量 q_{0f} と給砂量 q_{00} との配分比 $\frac{q_{0f}}{q_{00}}$ 及び堆砂面勾配 I と原河床勾配 I_* との比 $\frac{I}{I_*}$ 等が、粒径 d 、原河床勾配 I_* 及び与えられた流量 Q のもとに流し得る流砂量 q_{0f} を導入して、ほぼ $\frac{q_{0f}}{q_{00}}$ によって定められることを示したが更に実験を追加してこの関係を確かめるとともに又段丘形状として2次曲線を仮定して上記の関係を導き、加えて実際の貯水池では堆砂過程中に流量流送土砂は時間的に変化しておりその基礎的な場合として給砂量 q_{00} を急増した場合の段丘の運動に關して考察を行ない堆砂過程について実用的な計算法を試みたものである。なお各種実験の要目を表Iに示した実験NOⅣは給砂量 q_{00} を埋没過程中に変化させたものである。

表-1 実験要目

流砂量 q として有効掃流力 q_0 が導入されている式(1)を用いる

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \frac{q_0}{\gamma_s g d^3} = K \frac{1}{4} m \left(1 - \frac{0.8 \frac{1}{4} m}{\frac{1}{4} m} \right) \\ \frac{1}{4} m &= \frac{h \cdot I_e}{s \cdot d} \cdot \frac{q}{q_0} \quad \text{但し } q = \frac{1}{4} m \cdot q_0 \\ & \quad q_0 = 6.0 + 5.75 \log \frac{h}{d} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

I初期勾配 I_e は $F_n=1$ とすると近似的に

$$I_e = I_* - \frac{d^3}{\Delta x} \quad (2)$$

1 堆砂面形状

図-1を参照して堆砂が上流に廻りする場合に

て考える。任意の時刻 t における段丘形状を2次式で仮定すると
 $x=0$, $z=z_0$ $x=L$ $z=0$ 又段丘後端 $x=L$ で給砂量 q_{00} 全部が流

れてゐるから $\left(\frac{dz}{dx} \right)_{x=L} = 2a(L) + b = (I_* - I_{e0})$ 以上の条件から形状は

$$z = \left[\frac{z_0 - L(I_* - I_{e0})}{L^2} \right] x^2 - \left(\frac{2z_0}{L} - (I_* - I_{e0}) \right) x + z_0 \quad (3)$$

段丘の長さ L に於いて t 時間後の段丘の肩の厚さ z_0 として t 時間に段丘上面及び前面に堆積した量が t 時間の給砂量に等

しいとすると t 後の長さ L は

$$\frac{q_{00}}{(1-x)} \cdot \Delta x = \int_L^0 (ax^2 + bx + c) dx - V_0 + \frac{1}{2} \cot \theta$$

上式を積分して(3)式を考慮すると

$$L = \frac{-z_0 + \sqrt{z_0^2 + 6(I_* - I_{e0})M}}{I_* - I_{e0}} \quad \text{但し } M = \left(\frac{q_{00}}{(1-x)} \Delta x + V_0 - \frac{1}{2} \cot \theta \right) \quad (4)$$

次に図-2の如く堆砂面が空中で切れる場合に於いても上記と同様に

$$z = \left[\frac{3}{2} \frac{z_0}{L^2} - \frac{1}{4} \left(\frac{I_* - I_{e0}}{L} \right) - \frac{3}{2} \frac{M}{L^3} \right] x^2 + (I_* - I_{e0})x + z_0 + \Delta z_0 \quad (5')$$

$$L = L_0 + \Delta x \quad (6')$$

で表わされる。ここに z_0 は t 後の段丘肩の厚さ、 I_{e0} は q_{00} に相当する初期勾配、 I_* は原河床勾配、 V_0 は段丘の初期形状における単位幅当りの体積である又 L_0 は初期形状における段丘の長さを示す。

2 段丘部流砂量 q_{0f} 及堆砂面勾配 I

流砂能力は貯水池内では背水の影さようを受け水深が増すとともに減少する従つて給砂量 q_{00} が与えら

実験番号	砂の粒径 d mm	比量	流量範囲 Q m ³ /sec	給砂範囲 q_{00} m ³ /sec	原河床勾配 I_*	堆高 z_0 cm	段丘後端の位置 x cm	堆砂面勾配 I
NO I	A 0.85	2.632	372.68	0.254~1.250	1/100	10.0	49.0	43.0
	B 0.33	2.684		0.360~2.200		7.5	-	-
NO II	A 0.85	2.632	372.68~387.0	0.187~0.577	1/100	8.6	49.0	43.0
	B 0.33	2.684		0.268~1.430		8.6	-	-
NO III	A 0.85	2.632	372.68	0.145~0.577	1/150	5.0	49.0	43.0
	B 0.33	2.684		0.231~0.745		5.5	-	-
NO IV	A 0.85	2.632	372.68	0.201~0.503	1/150	5.5	-	-
	B 0.33	2.684		0.258~0.524		-	-	-
杉見堤	A 0.85	2.632	72.6~108.0	0.035~0.095	1/100	2.5	47.0	47.0
	B 0.44	2.632		84.5~110.5		0.033~0.057	-	-
山崎敷	A 3.3	2.66	133.3~230.0	0.090~0.228	1/50	4.0	-	-
	B 1.4	-		66.6~326.7		0.090~0.148	-	-
	C 0.46	-	66.6~133.3	0.154~0.170	-	-	-	-

図-1 段丘形状略図

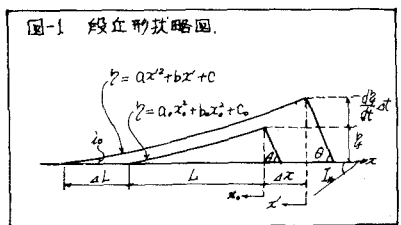
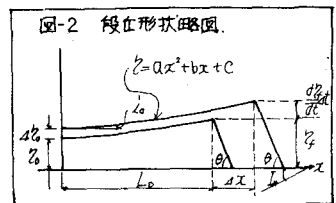


図-2 段丘形状略図



れると $q_{00} < q_{00}$ は砂は流され $q_{00} > q_{00}$ は堆積を不すことになり、フル末端付近において $q_{00} = q_{00}$ のとき段丘の発生が起ると考えてよい。いまこのとき段丘開始点として $x=0$ すると時間 t と位置 x との関係は Exner の丘形成式 $\frac{dx}{dt} = \frac{q_{00}}{q_{00}}$ が成立。段丘流砂量 q_{00} は (1) 式より流量 Q 及び水深 h で書直し $k=25, m=2.3$ 及び $\frac{q_{00}}{q_{00}}$ が $\frac{1}{2}$ に比して無視すると近似的に

$$\frac{q_{00}}{\sqrt{s g d^3}} = 25 \left[\frac{Q^2}{s g d^3 q_{00} h_f^2} \right]^{2.3} \quad (5)$$

と書け q_{00} の微小な変化を無視すると段丘肩水深 h_f が一定の時には q_{00} も一定となる、又 h_f 及び q_{00} の実測値から一定であることが知られる。 q_{00} が x, t に無関係に一定とすると段丘肩の軌跡はほぼ水平とみなされるから、原河床勾配 I_x を用いて $q_{00} = x I_x$ と置き、Exner の関係式を用いて段丘肩の厚さ h_f と時間 t との関係は $h_f = \sqrt{\frac{2 I_x q_{00}}{(1-\lambda)}} t$ となる。そこで (6) 式において段丘の発生から考えると t は 0 であり $\frac{h_f}{L} = \frac{q_{00}}{I_x}$ の項が q_{00} に比して小さいとして無視すると (6) 式中 $M = \frac{q_{00}}{I_x} t$ と書きこれを用いて (4) 式より

$$\frac{h_f}{L} = \frac{(I_x - I_{00})}{(N - 1)} \quad \text{但し } N = 1 + 3.36 \frac{(1-\lambda)}{(1-\lambda)} \left(1 - \frac{I_{00}}{I_x}\right) \frac{q_{00}}{q_{00}} \quad (6)$$

λ は水中の空ガキ率、入は Sand box 中の空ガキ率である。段丘肩のエネルギー勾配 I_{ef} は (3) 式より求められ (6) 式を用いて変形すると次式を得る。

$$I_{ef}/I_{00} = I_{ef}/I_{00} - \left(\frac{I_x}{I_{00}} - 1 \right) \left(\frac{2}{N-1} - 1 \right) \quad (7)$$

そこで q_{00} の微小な変化を無視すると q_{00} を導入して (1) 式より $I_{ef}/I_{00} = \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}}$, $I_{ef}/I_{00} = \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}}$ となり (7) 式は

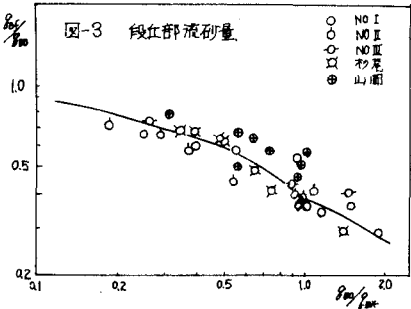
$$\left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}} = \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}} - \left[\left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}} - 1 \right] \left[\frac{2}{N-1} - 1 \right]$$

但し $N = 1 + 3.36 \left[1 - \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}} \right] \frac{q_{00}}{q_{00}} \quad (8)$

又 $q_{00} \geq q_{00}$ によりは近似的に $I_x = I_{00}$ と考えられるから (3) 式より I_{ef} は $I_{ef} = I_x - \frac{2q_{00}}{L}$ となり前述と同様にして次式を得る。

$$\frac{q_{00}}{q_{00}} = \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right) \left[1 - 1.19 \frac{q_{00}}{q_{00}} \right]^{\frac{2.3}{3}} \quad (9)$$

上式を計算した結果を図-3 に実線と示した。図-3 は $\frac{q_{00}}{q_{00}}$ の実測値を杉尾山岡教授の資料とプロットしたもので明らかに $\frac{q_{00}}{q_{00}}$ が増すと $\frac{q_{00}}{q_{00}}$ は減少し、粗砂のうち buck sand の波及に消滅される砂量の割合が増してゆくことを示している。



堆砂面勾配について、今段丘肩勾配 I_{ef} で代表させること

にすると (3) 式より I_{ef} を求め (6) 式を考慮すると I_{ef} により

$$I_{ef} = I_x - \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)_{x=0} = I_x - \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right) \left(\frac{3-N}{N-1} \right) \quad \text{が得られ } q_{00} \text{ を導入して}$$

$$\frac{I_{ef}}{I_x} = 1 - \left[1 - \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}} \right] \left(\frac{3-N}{N-1} \right)$$

但し $N = 1 + 3.36 \left[1 - \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}} \right] \frac{q_{00}}{q_{00}}$

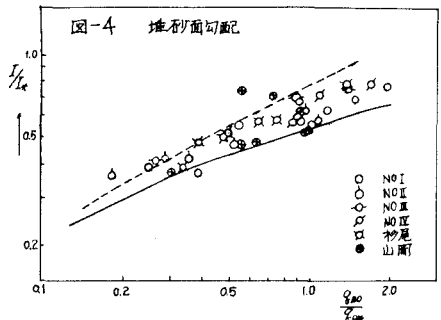
$$\left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}} \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}} = \left[\left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{1}{2.3}} - 1 \right] \left(\frac{3-N}{N-1} - 1 \right) \quad (10)$$

又 $q_{00} \geq q_{00}$ によりは前述と同様にして結果は

$$\frac{I_{ef}}{I_x} = 1 - 1.19 \frac{q_{00}}{q_{00}} = f \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right)$$

但し $\frac{q_{00}}{q_{00}} = \left(\frac{q_{00}}{q_{00}} \right) \left(1 - 1.19 \frac{q_{00}}{q_{00}} \right)^{\frac{2.3}{3}} \quad (11)$

上式を解いた結果を図-4 の実線と示した。そこで堆砂面の平均勾配の面からみると、段丘肩における流砂量は q_{00} 、段丘後端における流砂量は q_{00} であるから平均的には堆砂面と $\frac{1}{2}(q_{00} + q_{00})$ の流砂量があると考えられる。従って流砂量式 (1) は I_x のもとで流し得る流砂量 q_{00} を導入して



$$\frac{1}{2}(q_{bf} + q_{bo}) = 25\sqrt{5g d^3} \left[\frac{q^{\frac{1}{2}}(2 \cdot I_m q)^{\frac{1}{2}}}{5 \cdot g \cdot d \cdot q_o} \right]^{1.5} = q_{bf} \left(\frac{I_f}{I_o} \right)^{1.5}$$

ここに I_o は堆砂面との勾配と式より

$$I_f/I_o = \left[\frac{1}{2} \frac{q_o}{q_{bf}} (1 - \frac{q_{bo}}{q_{bf}}) \right]^{\frac{1}{1.5}} \quad \text{但し } \frac{q_o}{q_{bo}} = f(\frac{q_{bo}}{q_{bf}}) \text{ と考えられる,} \quad (12)$$

上式を解いた結果を図-4の破線であらした。図-4は I_f の実験値を杉尾、山岡教授の資料ととてプロットしたもので (10)(11) 式の曲線がやや下にあるのは実験値がほぼ平均値に等しい値と等しいと考えられ明らかに q_{bo}/q_{bf} が増すとともに I_f も増加する事を示している。なお図中の実験値は堤に到達した時の値を用いてプロットしたものである。以上液砂量配分 q_{bo} は I_f 等から q_{bo}/q_{bf} が求まることと示された。

3 液砂量を急増させた場合における段丘の進行と背砂の計算

段丘肩に注目して段丘肩の厚さを q_f 、突陥率を λ とし、段丘前進速度 $U = \frac{dx}{dt}$ は Exner の関係式より近似的に

$$U = \frac{q_{bf}}{(1-\lambda)q_f} \quad (3-1)$$

戸田教授等によると段丘肩の基準面に対する運動方向角 θ は $\theta = \frac{1}{L} \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_f + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_f$ と考えられる。本文では $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_f$ について段丘肩では液砂量 q_{bf} 、段丘後端では供給砂量 q_{bo} が流れているとして液砂の連続式を積分した型の段丘背面における平均値を用いることにすると近似的に $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_f = \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_m = \frac{q_o(q_{bo} - q_{bf})}{(1-\lambda) \cdot L}$ となり更に (3-1) 式を考慮すると、段丘の長さを L と λ を correction term とし、

$$\theta = \frac{q_{bo}}{q_{bf}} \left(1 - \frac{q_{bo}}{q_{bf}} \right) \frac{q_f}{L} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_f \quad (3-2)$$

ここに添字 f は段丘肩における値を示す。

次に背砂の翹上速度 $\frac{dy}{dt}$ について (図-1) を参照して段丘肩が dx だけ進んだ時、 dt 時間に段丘後端が L だけと流側に伸びるとすると、1) dt 時間内に給砂した砂が dt 時間の間に段丘上面及び前面に堆積し得るものと仮定すると次式が成立つ

$$\frac{q_{bo}}{(1-\lambda)} \cdot dt = \int_{(L+dx)}^0 (ax^2 + bx + c) dx + \frac{(y_0 + \frac{dy}{dt} dt)^2 \cot \theta}{2} - \left[\int_{-L}^0 (ax_0^2 + bx_0 + c_0) dx_0 + \frac{y_0^2 \cot \theta}{2} \right] \quad (3-3)$$

ここに θ は水中の砂の突陥角、 a, b, c は初期形状における係数、 a, b, c は dt 後の形状係数である。即ち

$$\begin{aligned} a_0 &= \left(\frac{y_0}{L} - \lambda_0 \right) \frac{1}{L} & a &= \left[\left(y_0 + \frac{dy}{dt} dt \right) - \lambda_0 (L + dx) \right] / (L + dx)^2 \\ b_0 &= \left(\frac{2y_0}{L} - \lambda_0 \right) & b &= 2 \left[y_0 + \frac{dy}{dt} dt \right] / (L + dx) - \lambda_0 \\ c_0 &= \left(\frac{y_0}{L} \right) & c &= \left(y_0 + \frac{dy}{dt} dt \right) \quad \text{但し } \lambda_0 = I_f - I_{eo} \end{aligned}$$

従って (3-3) 式を積分して上式の関係式を代入し、(3-1) 式を考慮して、更に dx 及び dx に関する高次項を無視し又 $\frac{dy}{dt}$ の項が $\frac{q_{bo}}{(1-\lambda)}$ に比して小さいとすると近似的に段丘の長さ L について

$$\frac{dy}{dt} = \left[\frac{3y_0}{(y_0 + L\lambda_0)} \cdot \frac{q_{bo}}{q_{bf}} - 1 \right] \cdot U \quad (3-4)$$

と書け進行速度 U に比例して段丘後端の翹上も増大する。(3-4) 式の微分方程式の型だと無視される項が多いので、实用的に dt 後の段丘の厚さを q_f とし、 dt 後の段丘の長さを (4) 式で求める。

$$L = \frac{-y_0 + \sqrt{y_0^2 + 6(I_f - I_{eo})M}}{(I_f - I_{eo})} \quad \text{但し } M = \left(\frac{q_{bo}}{(1-\lambda)} \cdot dt + y_0 - \frac{y_0^2 \cot \theta}{2} \right) \quad (3-5)$$

又任意時刻 t における段丘部液砂量 q_{bf} は (1) 式より $k=25, m=23$ による q_o が q_o に代して無視して近似的に

$$q_{bf} = 25\sqrt{5g d^3} \left[\frac{q^{\frac{1}{2}}(2 \cdot q_o)^{\frac{1}{2}}}{5 \cdot g \cdot d \cdot q_o} \cdot (I_f - \left(\frac{dy}{dx} \right)_f) \right]^{1.5} \quad (3-6)$$

と書け q_{bf} を求める。以上の U, θ, L, q_f の各式を用いて段丘肩の軌跡及び cd 形状を求める任意の時刻 t の形状は (3) (3) 式で与えられるが、段丘肩の $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_f$ の値も解かることになる。

上記の諸式を用いて計算を試みると、まず初期形状を埋没过程中給砂量 q_o が変化する直前に求めた 0

とする。時刻 t において $t=0$ から時刻は $(\frac{1}{2})_t, q_t, q_f$ として時刻の最初の値を用いることにするとこれらは q_{sum} である。新しく変化した q_{in} (給砂量) が与えられると (1) 式により q_{in} に相当する I_{in} を求める。この I_{in} を用いて時刻の進行角度 θ の q_{in} を求め q_{in} としては急増した給砂量 q_{in} を用いると (3-2) より θ が解ける。従って (3-1) (3-2) 式によって t 時間後の段丘の肩の位置は q_{in} を q_{in} が解け (3) 式により形状が求められる。 t 後の形状が解けると (3-6) 式により t 時間後の q_{in} を求める。 $t \rightarrow 2t$ については順次 q_{in} に応じて上記の手順で計算を繰返すことにはなる。ここではその隙段丘の長さ L は (3-5) 式によった。

以上の計算方法をもとに給砂量を 2~3 倍に変化させた実験 No. IV-1, 2 の実験について計算を行った。(図-5) は実験 No. IV-1 について計算値と実験値を示した。又 (図-6) は No. IV-2 の計算値と実験値を比較したものである。なお図-5 の No. IV-1 は段丘の背面が土流に及ぶ場合で、No. IV-2 は段丘背面が途中で切れる場合のものでこの場合には (図-2) のように給砂量の増減厚さ h を求めるのが加わることになる。これは h が解けると (3) 式により求められる。図からも明らかなに計算結果と実験値はほぼよく一致している。

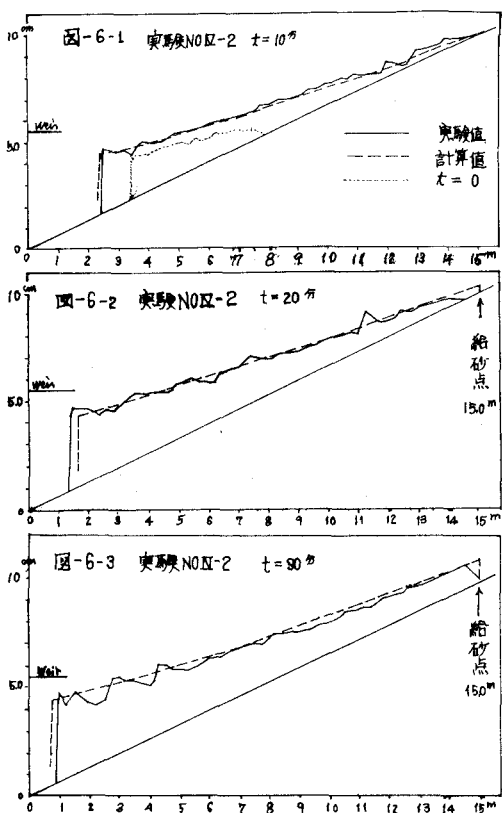


図-6 計算値と実験値との比較(実験No. IV-2)

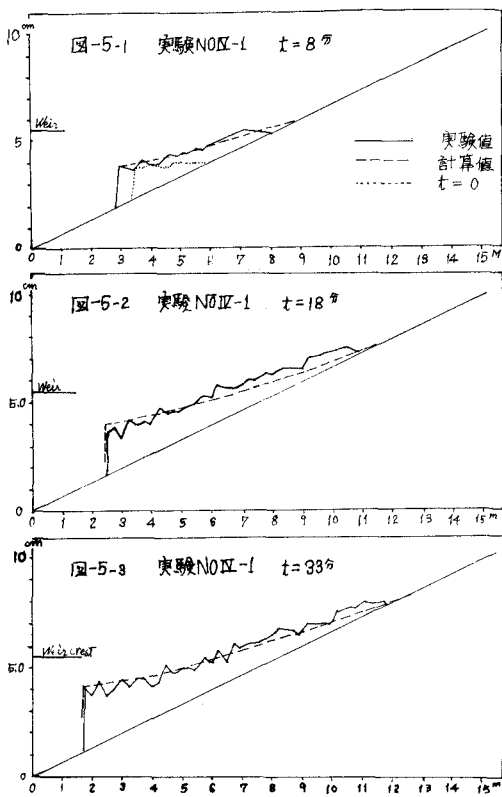


図-5 計算値と実験値との比較(実験No. IV-1)

- (1) 矢野, 佐藤, 田, 「9.40 背砂は利用する石可資」 京大防災研年報第6号 (1972)
- (2) 橋, 堀, 佐武 「砂り池の堆砂直経は7.112」 第21回年次講演概要 (1974)