

Ⅲ-14 貯水池の堆砂過程について(第3報)

九州大学工学部 正員 橋 東一郎

“ “ 平野 栄夫

“ “ 学生員 ○ 石田 真

1. 緒 言

掃流砂による貯水池の堆砂機構については従来から多くの研究が行なわれ、竣工の進行による貯水池の埋没と背砂機構はかなり明確になっている。しかし実際の貯水池では浮流砂の堆積した Bottom-set beds の上に掃流砂が段丘の形で進むために、浮流、掃流をまじえた場合、堆砂、背砂の機構を解明することが必要である。この問題については芦田教授が興味深い計算法を提案されているが、多くの仮定が導入されており検討の余地が多いように思われる。現在われわれは掃流砂と浮流砂が同時に流入する場合の貯水池の堆砂機構について実験を行なっているが、今回は終了しに実験の範囲で若干の考察を行なった。

2. 実験装置と方法

実験に用いた水路は有効長 15 m、幅 0.6 m、底勾配 $1/50$ のコンクリート製固定水路で、水路下流端に高さ 4.6 cm のヒキを設置し、上流端に砂と石炭粉の供給装置がある。デルタ上に砂は掃流状態で移動し、石炭粉は浮流状態で流れるように流量と粒径を定め、流量と供給砂量 g_{80} と一定にし、供給石炭粉量 g_{80} という変えて実験を行なった。実験の主な要目は表-1のとおりである。尚、使用した砂は $d_{50} = 0.83 \text{ mm}$ 、比重 $\sigma = 2.65$ 、石炭粉は $d_{50} = 0.48 \text{ mm}$ 、比重 $\sigma = 1.38$ 、沈降速度 $w_s = 2.3 \text{ cm/s}$ である。各実験において、流量と供給砂量、石炭粉量を一定にしておき、段丘肩の位置と高さ

表-1 実験の要目

実験 番号	単位幅流量 $q (\text{cm}^2/\text{s})$	供給砂量 $g_{80} (\text{cm}^2/\text{s})$	供給石炭粉量 $g_{80} (\text{cm}^2/\text{s})$	$\frac{g_{80}}{g_{80}}$	勾配
No. I	302	0.874	0	0	$1/50$
No. II	“	0.909	0.449	0.5	“
No. III	“	0.905	0.904	1.0	“

の変化をできるだけ連続的に記録し、約 20 分間隔で堆砂形状と水面形を測定した。また実験終了後、堆砂を掘り起こして浮流砂(石炭粉)、掃流砂境界面の形状を測定した。

3. 実験結果

貯水池堆砂の典型的な形は図-1のように① top-set beds ② fore-set beds ③ bottom-set beds ④ density current beds の4部で形成されるといわれているが、本実験ではデルタ前面の bottom-set beds が洗掘されて、河床が露出するという現象の起こった。

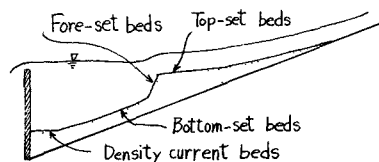


図-1 典型的な堆砂形状

(1) 浮流砂(石炭粉)と掃流砂の供給を開始すると、まず跳水点附近に砂がたまってデルタを形成し石炭粉は貯水池全体に堆積する。デルタが形成されると、デルタ肩で流線がはく離し、図-2のようにデルタ先端に wake ができる。wake 内に沈降してきた石炭粉は wake 内底面附近の逆流によって

デルタ先端の法尾に集められ、デルタ肩から落下してくる砂によってうずめられていく。デルタ肩を通過した流水は wake の渦によって下オに引き寄せられ、wake の前面に堆積していた石炭粉をまき上げて下流へ押し流す。デルタが進行するにつれ wake 前面に石炭粉の堆積は順次下オに押しやられ、デルタの先端がセキに到達するまでに全部セキから流出してしまふ。(図-3) 従って、デルタの形成に關係する浮流砂は wake 内に泥でんしたもののだけである。

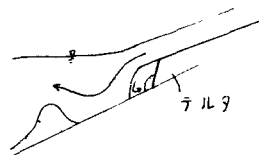


図-2

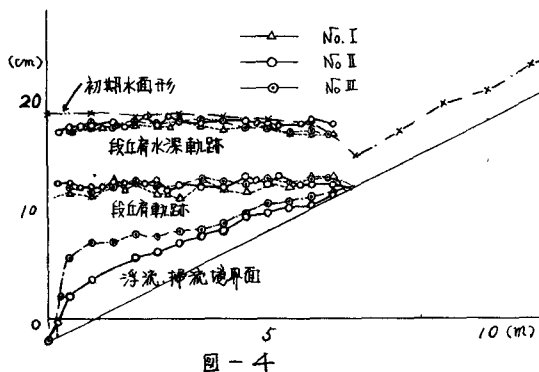


図-4

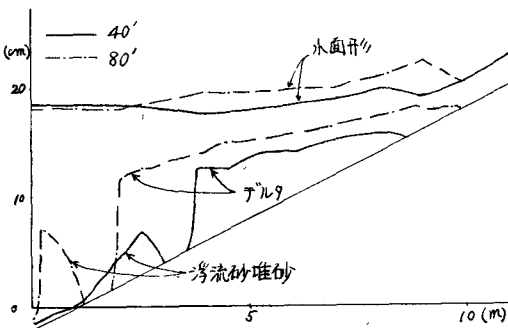


図-3 堆砂形状の時間変化

(2)デルタ肩の軌跡は図-4に示すようにはほぼ水平になっており、掃流砂のみの場合(実験No.I)と浮流砂を含む場合(No.II, No.III)との間に系統的な差異は認められない。

(3)デルタの肩の進行速度と後端の遡上速度は共に浮流砂が増すにつれて増大している。

(4)実験終了後デルタを掘起してみると、砂の堆積の下に石炭粉だけの堆積があり、その境界面はかなりはっきりしていた。その境界面を図示すると図-4のようになり、セキの近くを除きほぼ直線になっている。

4. 実験結果の考察

(1) 浮流砂・掃流砂境界面

本実験例のようにデルタ前面の bottom-set beds が洗い流される場合には、供給された浮流砂のうち、デルタ先端の wake 内に泥でんする浮流砂だけがデルタの形成に寄与する。従って、wake の中に単位時間に泥でんしてくる浮流砂の量を g_{sf} 、浮流砂の空隙率を λ とすると、微少量を無視して次式

$$\frac{g_{sf}}{1-\lambda} = -\frac{dx_f}{dt} (\eta_s - I_* x_f)$$

が成り立つ。同様にして、 g_{bf} を段丘肩における掃流砂量、 λ を掃流砂の空隙率とすると

$$\frac{g_{bf}}{1-\lambda} = -\frac{dx_f}{dt} (\eta_0 - \eta_s), \quad \text{この2式より } dx_f/dt \text{ を消去すると}$$

$$\eta_s = \frac{S}{B+S} \eta_0 + (1 - \frac{S}{B+S}) I_* x_f, \quad \text{ここに } S = \frac{g_{sf}}{1-\lambda}, \quad B = \frac{g_{bf}}{1-\lambda}$$

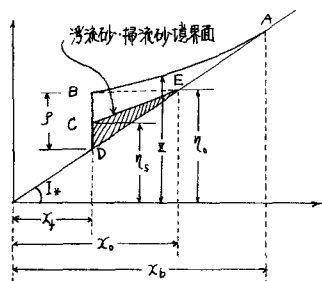


図-5

となり、もし $S/(B+S)$ の一定であれば、浮流砂・掃流砂境界面は直線になる。実験結果より S, B を求めて $S/(B+S)$ を図示すると図-6 のようになり、No. II の実験では始めと終りの部分を除き $S/(B+S)$ は一定値を示しているが、No. III では時間と共に漸増している。次に、 g_{sf} は g_{s0} , wake の長さ l , u_b, g , デルタ肩の水深

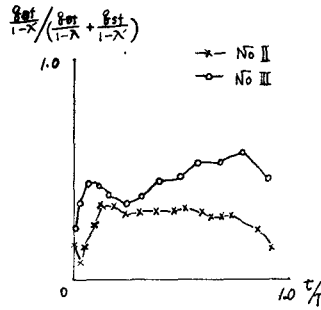


図-6

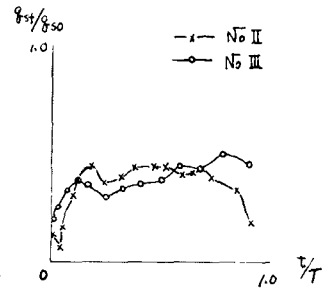


図-7

h_f , デルタ肩における浮流砂の濃度 C_f 等に規定されるが、 l はデルタ肩の高さ S に比例し、 C_f は w_0/u_* に規定されるから、 $g_{sf}/g_{s0} = \varphi(w_0/u_*, S/h_f)$ なる関数関係の存在が予想される。 h_f はほぼ constant, $S \propto \sqrt{t/T}$ だから、 $g_{sf}/g_{s0} \propto \sqrt{t/T}$ (ここに、 T : デルタがセキに到達するに要する時間) となる。そこで、実験値より g_{sf}/g_{s0} と t/T を求めてプロットすると図-7 のようになる。実験 No. III では g_{sf}/g_{s0} は時間とともに漸増しているようであるが、 g_{sf}/g_{s0} と S/h_f との間に相関があるかどうか、この2例だけから断定することはできない。

(2) デルタ形状と掃流砂量配分

貯水池に掃流砂のみ流入する場合、デルタの堆砂形状を2次式で近似すると、段丘肩掃流砂量と供給砂量の比 g_{sf}/g_{s0} が定まる。浮流砂を含む場合にも、浮流砂・掃流砂境界面を直線と仮定すると、同様にして g_{sf}/g_{s0} が求まる。まず、エネルギー勾配の式

$$I_e = \frac{dZ}{dx} - \frac{\alpha h}{dx} (1 - Fr^2)$$

において、堆砂面上では $\alpha h/dx$ は小さく、フルード数 Fr も1に近い場合が多いので、右辺第2項を無視し、近似的に $I_e = dZ/dx$ とおく。次に、堆砂形状を2次式で仮定し、3個の条件

$$x=0 \text{ で } z=\eta_0, \quad x=x_b \text{ で } z=I_* x_b, \quad dZ/dx = I_{e0} \quad \text{ここに } I_{e0}: g_{s0} \text{ に対応する } I_e$$

より係数を決めると、堆砂形状は

$$z - \eta_0 = (I_{e0} - \frac{x_b - x_0}{x_b - x_f} I_*) \frac{(x - x_f)^2}{x_b - x_f} + (2 \frac{x_b - x_0}{x_b - x_f} I_* - I_{e0})(x - x_f) \quad \text{----- ①}$$

となる。デルタ先端の位置は、浮流砂・掃流砂境界面を直線とし、その勾配を I_s とすると、デルタ先端の連続の式

$$\frac{g_{sf}}{1-\lambda} = -\frac{dx_f}{dt} (x_0 - x_f) I_s$$

を $g_{sf} = \text{const.}$ として積分すると

$$\frac{g_{sf} t}{1-\lambda} = \frac{1}{2} I_s (x_0 - x_f)^2 \quad \text{----- ②}$$

また、デルタ後端の位置は上式と図-5において、

図形 ABC EA = $g_{s0} t / (1-\lambda)$ より

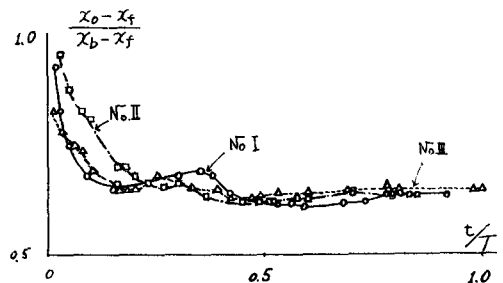


図-8

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_b - x_f}{x_o - x_f} &= \frac{1}{1 - I_{co}/I_*} \left\{ \sqrt{1 + 3 \left(1 - \frac{I_{co}}{I_*}\right) \left\{1 + \frac{I_s}{I_*} \left(\frac{g_{bo}}{g_{bf}} - 1\right)\right\}} - 1 \right\}, \quad (I_{co} \neq I_*) \\ \frac{x_b - x_f}{x_o - x_f} &= \frac{3}{2} \left\{ 1 + \frac{I_s}{I_*} \left(\frac{g_{bo}}{g_{bf}} - 1\right) \right\}, \quad (I_{co} = I_*) \end{aligned} \right\} \text{----- ③}$$

流砂量公式として保原，椿公式を用いると、近似的に

$$\frac{I_{co}}{I_*} = \left(\frac{g_{bo}}{g_{B*}} \right)^{\frac{4.6}{3}} \text{----- ④}$$

ここに、 g_{B*} ：原河床勾配 I_* 及び与えられた流量、流径のもとに流しうる流砂量が成り立ち、すぐ後に述べるように g_{bf}/g_{bo} も g_{bo}/g_{B*} と I_s/I_* の関数であるから、 $(x_b - x_f)/(x_o - x_f)$ すなわち、デルタの全長と堆砂開始点からデルタ先端までの距離の比は g_{bo}/g_{B*} と I_s/I_* に規定され、時間に無関係となる。実験データより $(x_b - x_f)/(x_o - x_f)$ と時間との関係をプロットしてみると、図-8 のようになり、 $(x_b - x_f)/(x_o - x_f)$ は堆砂開始直後を除き、ほぼ一定の値を示している。

次に、デルタ肩のエネルギー勾配 I_{ef} は

$$I_{ef} = \left(\frac{dZ}{dX} \right)_{X=x_f} = 2 \frac{x_b - x_o}{x_b - x_f} I_* - I_{co} \text{----- ⑤}$$

$$\therefore \frac{g_{bf}}{g_{bo}} = \left(\frac{I_{ef}}{I_{co}} \right)^{\frac{4.6}{3}} = \left[2 \frac{x_b - x_o}{x_b - x_f} \frac{I_*}{I_{co}} - 1 \right]^{\frac{4.6}{3}} \text{----- ⑥}$$

上に③式の関係を代入して

$$\left. \begin{aligned} \frac{g_{bf}}{g_{bo}} &= \left[2 \frac{I_*}{I_{co}} - 2 \left(\frac{I_*}{I_{co}} - 1 \right) \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \left(1 - \frac{I_{co}}{I_*}\right) \left\{1 + \frac{I_s}{I_*} \left(\frac{g_{bo}}{g_{bf}} - 1\right)\right\}} - 1} - 1 \right]^{\frac{4.6}{3}}, \quad (I_{co} \neq I_*) \\ \frac{g_{bf}}{g_{bo}} &= \left[1 - \frac{4}{3} \frac{1}{1 + \frac{I_s}{I_*} \left(\frac{g_{bo}}{g_{bf}} - 1\right)} \right]^{\frac{4.6}{3}}, \quad (I_{co} = I_*) \end{aligned} \right\} \text{----- ⑦}$$

となる。従って、 g_{bf}/g_{bo} は g_{bo}/g_{B*} と I_s/I_* を与えると計算することが出来る。 g_{bo}/g_{B*} をパラメーターとして g_{bf}/g_{bo} と I_s/I_* の関係を図示すると、図-9 のようになり、 I_s/I_* が小さくなると g_{bf}/g_{bo} も減少する。また、 $(x_b - x_f)/(x_o - x_f)$ と I_s/I_* の関係も図-9 に示しているが、 $(x_b - x_f)/(x_o - x_f)$ は I_s/I_* が小さくなると、幾分増大する。これらのことは実験結果と定量的にはよく一致している。

