

九州大学工学部 正員 平野宗夫

九州大学大学院 学生員 石田 真

渡辺訓甫

1. 緒言

掃流砂による貯水池の堆砂過程については、従来から多くの研究が行なわれ、段丘の進行による貯水池の埋没と背砂機構は可成明確になっている。しかし実際の貯水池では浮流砂の堆積し Bottom-Set Bed 上を掃流砂が段丘の形に進む為に、浮流・掃流を交えた場合の堆砂機構を解明する事が必要である。浮流砂と掃流砂の堆砂境界面形状は、貯水池に流入する浮流砂量と掃流砂量の割合によ、(決まる)と思われるが、我々の実験では、境界面はほぼ直線状になった。以下我々の行、た実験の結果について考察を行う。

2. 実験装置と手法

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 14.6 cm のセキを設置し、上流端に砂と石炭粉の供給装置がある。アルタ上を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

表-1 実験要目

	単位流量 Q (cm ³ /s)	供給砂量 Q_{80} (cm ³ /s)	供給石炭粉量 Q_{50} (cm ³ /s)	Q_{50}/Q_{80}	底勾配 $I \times$	$Q_{80} \times$	$Q_{50}/Q_{80} \times$
No. I	302	0.874	0	0	1/50	0.79	0.567
II	302	0.909	0.449	0.5	1/50	0.79	0.59
III	302	0.905	0.904	1.0	1/50	0.79	0.59
IV	302	0.926	1.800	2.0	1/50	0.79	0.60

流量と粒径を定め、流量 Q と供給砂量 Q_{80} を一定にし、供給石炭粉量 Q_{50} をいろいろ変えて実験を行、た。表-1 に主な実験要目を示してある。尚、使用した砂は $d_{50} = 0.83 \text{ mm}$ ・比重 $\delta = 2.65$ 、石炭粉は $d_{50} = 0.48 \text{ mm}$ ・比重 $\delta = 1.38$ ・沈降速度 $W_s = 23 \text{ cm/s}$ である。各実験に於いて流量と供給砂量、供給石炭粉量を一定にして置き、段丘角の位置と高さ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。又実験終了後、堆砂を掘り起して掃流・浮流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部で形成されると言われているが、本実験では、アルタ上面の bottom-set beds が洗掘されて河床が露出するという現象が起こった。

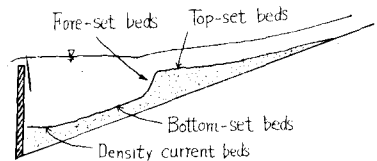


図-1 典型的な堆砂形状

(1) 浮流砂(石炭粉)と掃流砂の供給を開始すると、まず跳水段附近に砂がたま、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流線はデルタ角をばく離し、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先

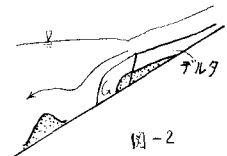


図-2

に集められ、デルタ角から落下してくる砂によって再び集められてゆく。本実験では、デルタ角を通過した流水は wake の渦によって下方に引き寄せられ wake 前面に堆積している石炭粉とまきあがって下流に押し流す。デルタの進行と共に wake 前面の浮流堆砂は順次下方へ押し流され、デルタがセキに到達すると全部堰から流失してしまう。従ってデルタの形成に寄与する浮流砂は wake 内に沈殿したものだけと考えられる。

(2) デルタ角の軌跡は図-3 に示すように、ほぼ水平になっており、掃流砂のみの場合(実験 No.1)と浮流砂の

含み場合 (No. I, III, IV) との間に系統的差異は認められない。

(3) デルタ肩の進行速度と後端の迎上速度は共に浮流砂が増すにつれて増大する。

(4) 実験終了後、デルタを掘り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、可成りなまりしており、図-3 に示す通り堰近くを除いては、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砂量のうちデルタ先端の wake 内に沈殿する浮流砂だけがデルタの形成に寄与する。従って wake 内に単位時間に沈殿して来る浮流砂量を q_{sf} 、浮流砂の空隙率を λ 、デルタ肩の掃流砂量を q_{bs} 、掃流砂の空隙率を λ とすると、流砂の連続条件から、

$$\frac{q_{sf}}{(1-\lambda)} = \frac{d\lambda_f}{dt} (S-\delta) \quad (1)$$

$$\frac{q_{bs}}{(1-\lambda)} = \frac{d\lambda_s}{dt} \delta \quad (2)$$

以上2式より $\frac{d\lambda}{dt}$ を消去すると

$$\frac{\delta}{S} = \frac{1}{1 + \frac{q_{sf}}{q_{bs}} \frac{(1-\lambda)}{(1-\lambda)}} \quad (3)$$

デルタ肩の軌跡は、ほぼ水平線から、 $S = x \cdot I_a$ 、従って

$\delta/S = \text{const.}$ であれば浮流砂・掃流砂境界面は直線となる。後に述べるように、 $q_{bs} = \text{const.}$ と考えられるので、 $q_{sf} = \text{const.}$ であれば直線となる。然るに wake 内に沈殿する浮流砂だけがデルタ底部に沈殿するものとするれば、 $S = X - x_f$ 、として

$$q_{sf} = \int_0^l C_0 \cdot W_0 \, dS \quad (4)$$

但し C_0 は wake 上の浮流砂の濃度で、 W_0 は浮流砂の沈降速度である。又、デルタ肩に於ける浮流砂の底面濃度を C_0 とすると C_0 は $C_0 = C_0 + f(S)$ で表わせるものとする。③式は $\lambda = \lambda$ とし

$$\text{次式} \quad \frac{\delta}{S} = \frac{1}{1 + \frac{q_{sf}}{q_{bs}}} = \frac{1}{1 + \frac{C_0 \cdot W_0}{P \cdot \delta} \int_0^l f(S) \cdot dS} \quad (5)$$

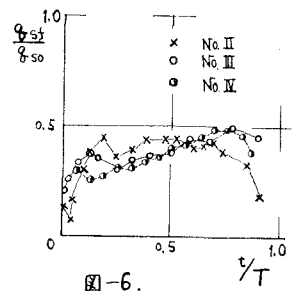
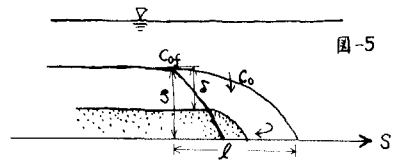
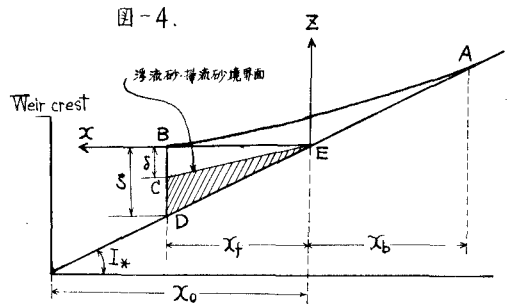
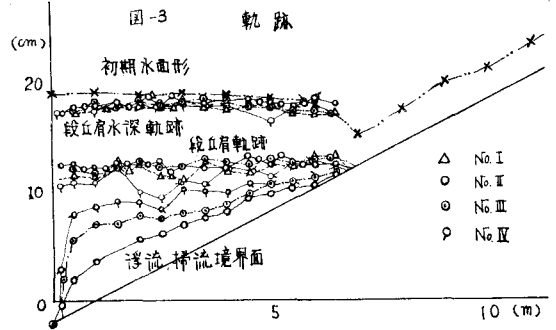
濃度分布に Kalinske の濃度分布式を用いれば

$$C_0 = \frac{q_{so}}{P \cdot \delta} \quad \text{但し} \quad P = \int_0^l [1 + 25 \frac{W_0}{V} (1 + \eta) \exp(-15 \frac{W_0}{V} \eta)] d\eta \quad (6)$$

$$\text{⑤、⑥式より} \quad \frac{\delta}{S} = \frac{1}{1 + \frac{q_{so} \cdot W_0}{P \cdot \delta \cdot q_{bs}} \int_0^l f(S) \cdot dS} \quad (7)$$

よって ⑤⑦式より、浮流砂量配分 $\frac{q_{sf}}{q_{so}}$ は次式で与えられる。

$$\frac{q_{sf}}{q_{so}} = \frac{W_0}{P \cdot \delta} \int_0^l f(S) \cdot dS \quad (8)$$



実験 No II 及 No IV に於いては、 E 及び $\int_0^L f(s) ds$ は同じであると思われるので $\%_{so}$ は浮流砂の量に因関係なく、デルタ肩より reattachment point までの距離（従ってデルタ肩の位置）のみに関係する事になる。そこで E 及び $\%_{so}$ の実験値と⑩式を用いて $\%_{so}$ を求めると図-6 のようになり、 $\%_{so}$ は供給浮流砂量 $\%_{so}$ に因関係なく、各実験とほぼ同じような値を示し上述の関係を裏付けているようである。又 $\%_{so}$ は時間と共に多少増えたりするようであるがその変化は余り大さくなく、浮流砂・掃流砂間の境界面はほぼ直線状を示していることと対応している。以上の事から浮流砂・掃流砂の境界面の形状を決めるには fore-set beds 附近の流れの様相と浮流砂の濃度分布を知る事が必要であり、今後の研究課題としたい。

(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、デルタ形状を2次式で近似すると、掃流砂量配分 $\%_{so}$ が定まる。浮流砂を含む場合に、top-set bed の堆砂形状を2次式で仮定し、デルタ肩の軌跡は水平であるとするという側の条件、 $x=x_0$ で $x=0$, $x=x_0$ で $z=I_a \cdot x_0$, $\frac{dz}{dx}=I_{co}$, より係数を求まり、次式

$$Z = (I_{co} - \frac{I_a \cdot x_0}{x_0 + x_b}) \cdot \frac{(x_0 - x)^2}{x_0 + x_b} + (2 \cdot \frac{I_a \cdot x_0}{x_0 + x_b} - I_{co}) \cdot (x_0 - x) \quad (9)$$

となる。デルタ先端の連続の式は、浮流砂・掃流砂境界面を直線と仮定し、その勾配を E とすると、

$$\frac{I_s}{I_a} \cdot \frac{d\%_{st}}{dt} = \frac{\%_{st}}{\%_{so}} \quad \text{但し} \quad \%_{st} = \frac{x_0}{x_0}, \quad T = \frac{\%_{so}}{(1-\lambda)} \cdot I_a \cdot x_0^2 \quad (10)$$

又デルタの長さは、図-4に於いて面積 $ABCEA = \frac{\%_{so}}{(1-\lambda)}$ より

$$(1 + \frac{I_{co}}{I_a}) \cdot \%_{so}^2 + 2 \cdot \%_{st} \cdot \%_{so} - 3 \cdot \%_{st}^2 (1 - \frac{I_a}{I_a}) - b \cdot T = 0 \quad \text{但し} \quad \%_{so} = (x_0 + x_b)/x_0 \quad (11)$$

流砂量式として
$$\frac{\%_{so}}{\sqrt{(\frac{x-p}{p}) \cdot g \cdot d^3}} = K \cdot \left\{ \frac{U_*^2}{(\frac{x-p}{p}) \cdot g \cdot d} \right\}^m \quad (12)$$

を用いると、
$$\frac{\%_{st}}{\%_{so}} = \left(\frac{I_{co}}{I_a} \right)^{\frac{2m}{3}} = \left(2 \cdot \frac{\%_{so}}{\%_{so}} - \frac{I_a}{I_{co}} - 1 \right)^{\frac{2m}{3}} = \left(2 \cdot \frac{I_a}{I_{co}} - 1 - 2 \cdot \frac{\%_{st}}{\%_{so}} \right)^{\frac{2m}{3}} \quad (13)$$

となる。尚指数 m の値は、佐藤・吉川・芦田公式では $m=1.5$, Brown 公式では $m=2.5$, 篠原・橋公式では $m=2.3$, である。⑩⑪⑫を連立して解けば $\%_{st}, \%_{so}, \frac{\%_{st}}{\%_{so}}$ の時間的変化がわかる。特に $m=1.5$, $I_{co}=I_a=I_s$ の場合には⑩⑪⑫より、 $\frac{1}{2} \cdot \frac{d\%_{st}^2}{dt} = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\%_{st}^2}{T}$ となり、簡単に積分できて、 $\%_{st} = \sqrt{\frac{6}{T} \cdot T}$, $\frac{\%_{st}}{\%_{so}} = \frac{4}{T}$, $\%_{so} = \sqrt{\frac{2T}{3}} \cdot T$, となる。但し一般には解析的に解けない。しかし実験結果や数値的に解いた結果によると、 $\frac{\%_{st}}{\%_{so}}$ は、ほぼ const. と考えられる。そこで $\frac{\%_{st}}{\%_{so}} = \text{const.}$ と仮定すると、⑩式より $T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\%_{so}}{\%_{st}} \cdot \frac{I_a}{I_a} \cdot \%_{st}^2$, これを⑪式に代入して、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\%_{so}}{\%_{st}} &= \frac{1}{1 - \frac{I_a}{I_{co}}} \cdot \left[\sqrt{1 + 3 \left(1 - \frac{I_{co}}{I_a} \right) \left\{ 1 + \frac{I_a}{I_a} \left(\frac{\%_{so}}{\%_{st}} - 1 \right) \right\}} - 1 \right], & (I_{co} \neq I_a) \\ \frac{\%_{so}}{\%_{st}} &= \frac{3}{2} \cdot \left\{ 1 + \frac{I_a}{I_a} \left(\frac{\%_{so}}{\%_{st}} - 1 \right) \right\} & (I_{co} = I_a) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

⑫⑬式より

$$\left. \begin{aligned} \frac{\%_{st}}{\%_{so}} &= \left[2 \cdot \frac{I_a}{I_{co}} - \frac{2 \left(\frac{I_a}{I_{co}} - 1 \right)}{\sqrt{1 + 3 \left(1 - \frac{I_{co}}{I_a} \right) \left\{ 1 + \frac{I_a}{I_a} \left(\frac{\%_{so}}{\%_{st}} - 1 \right) \right\}} - 1} - 1 \right] & (I_{co} \neq I_a) \\ \frac{\%_{st}}{\%_{so}} &= \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{1 + \frac{I_a}{I_a} \left(\frac{\%_{so}}{\%_{st}} - 1 \right)} \right]^{\frac{2m}{3}} & (I_{co} = I_a) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

又、 I_{eo}/I_e は⑫式より近似的に

$$\frac{I_{eo}}{I_e} = \left(-\frac{q_{90}}{q_{px}} \right)^{\frac{3}{2m}}$$

⑬

となる。ここに q_{px} は原河床勾配 I_e 、及び与えられた流量粒径のもとに於ける流砂量である。よって、

q_{90}/q_{90} は、 q_{90}/q_{px} 、及び I_e/I_e の関数になる。 $\varepsilon_u/\varepsilon_e$ も同様である。

そこで、⑭～⑯式により $m=2.3$ (篠原・橋公式) とし、 q_{90}/q_{px} を

パラメーターにして、 q_{90}/q_{90} 、 $\varepsilon_u/\varepsilon_e$ と I_e/I_e の関係を求めて図

示すると、図-7 のようになる。それによると I_e/I_e 、従って

汚流砂の割合が増加するにつれて、 q_{90}/q_{90} は減少し、 $\varepsilon_u/\varepsilon_e$ は

やや増大しており実験結果の傾向とよく一致している。×

I_e/I_e は実測値を用い、 $q_{90}/q_{90}=0.6$ 、として⑭、⑯式により、

デルタ形状を求め実験値と比較したところ、デルタの背端

附近を除き、実験値と可成よく合っている。その一例を、

図-8 に示す。

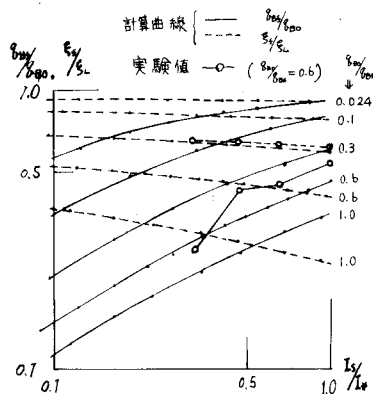


図-7

