

九州大学 工学部 正員 椿 東一郎
 “ “ “ 平野 泉夫
 運輸省 “ “ 〇上 渡 暁男

1. 緒言

掃流砂の流入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ており、段丘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きている。しかし、実際には流入土砂の大部分は浮流砂であるような貯水池も多く、このような場合の堆砂機構の解明も必要である。本報は、浮流砂として石灰粉を貯水池に流入させて実験を行ない、その結果について考察したものである。

2. 実験装置と方法

実験に用いた水路は有効長 12m、幅 0.4m の片面アクリライト製可変勾配水路で、水路下流端に高さ 20cm の堰を設置し、上流端に石灰粉供給装置がある。実験に用いた石灰粉は比重 1.38、中央粒径は 0.60mm および 0.78mm の 2 種である。これらの粒度曲線を図-1 に示す。

各実験において、流量と供給石灰粉量を一定にしておき、堆砂形状と水面形状を測定した。また、実験 No I については浮流砂の濃度分布を測定し、B 砂の実験では粒径の分級作用をみるために実験中および実験後に堆砂を採取し、粒度分析を行なった。実験の要目は表-1 に示すとおりである。

表-1 実験要目

実験	石灰粉	中央粒径 d_{50} (mm)	単位中流量 q (cm ² /s)	供給砂量 q_{to} (cm ² /s)	河床勾配 I_x
No I	A 砂	0.60	260	0.56	1/50
II	“	“	337.5	0.40	“
III	B 砂	0.78	300	0.55	“
IV	“	“	570	0.49	“
V	“	“	425	0.61	“
VI	“	“	570	1.10	“

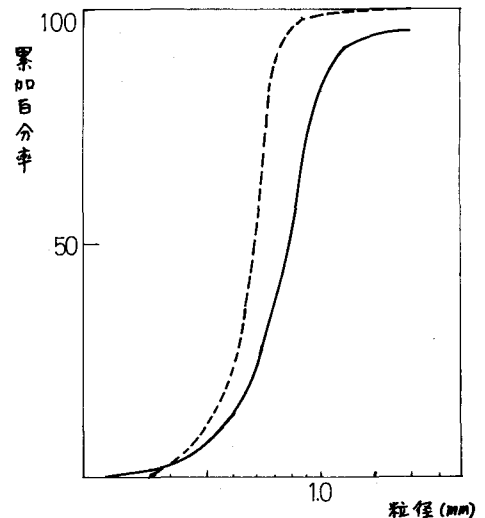


図-1 粒度曲線

3. 実験結果とその考察

実験結果を列記すると以下のようである。

- (1) 各実験とも、石灰粉供給開始後しばらくすると段丘が
 でき、明瞭な top-net beds, fore-net beds および bottom-
 net beds を形成した。図-2 にその 1 例を示す。top-net beds 上では掃流砂と浮流砂が同時に存在した。
 bottom-net beds 上では流砂は浮流砂のみとなり、堆積した石灰粉は殆んど移動しないが、fore-net beds

の前面では渦領域の逆流により bottom-set beds が洗掃される傾向がみられた。

(2) 各実験とも段丘は堆砂開始点を除きほぼ水平で殆んど逆上しない。筆者らは前報¹⁷⁾において掃流砂と浮流砂が同時に貯水池に流入する場合の段丘形状の計算式を導き、 g_{Bo}/g_{Bk} (g_{Bo} : 供給掃流砂量、 g_{Bk} : 同一流量、粒径、勾配のもとに流しうる掃流砂量) が 0 に近づくとき段丘は逆上せず水平になることを示したが本実験がその場合に相当し、前報の理論をうづけた。

(3) 流量が多いほど、また供給砂量が多いほど段丘上の水深は大きくなり、bottom-set beds の厚さも大きくなる。

(4) 段丘肩における掃流砂量 g_{st} を段丘肩における連続の式 $g_{st}/(1-\lambda) = U_f \cdot \delta$ (λ : 空け率、 U_f : 段丘肩の進行速度、 δ : fore-set beds の厚さ) より求めると同一実験ではほぼ一定値を示す。これは、既往の掃流砂のみの実験の結果と同様である。

(5) 段丘肩における浮流砂の濃度分布測定結果によると、濃度分布に時間的変動は認められない。従って、段丘上の浮流砂濃度は段丘上流端を除けば定常になっていると考えられる。

(6) 堆砂の粒度分析によると、段丘表面の粒度は供給砂と同じで、場所的、時間的変動はなかった。

bottom-set beds の粒径は供給砂 ($d_{50} = 0.78 \text{ mm}$) より明らかに小さく $d_{50} = 0.7 \text{ mm}$ 程度であった。

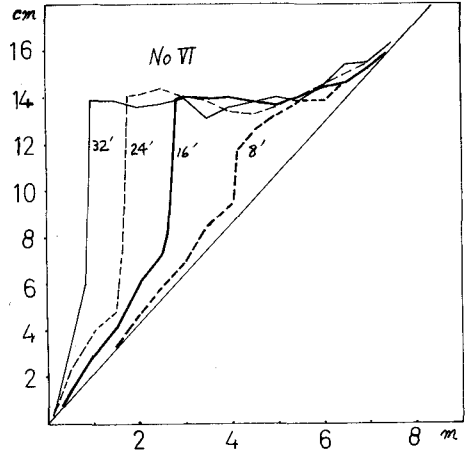


図-2 堆砂形状の変化

4. 段丘肩上の水深と流砂量について

図-3 に示す座標系で考える。まず段丘上における河床の連続の式を段丘全長にわたって積分すると、

$$\int_{x_b}^{x_f} \frac{\partial z}{\partial t} dx = -\frac{1}{1-\lambda} (g_{st} + g_{sf} - g_{to}) \quad (1)$$

こゝに、 g_{sf} : 段丘肩における浮流砂量、 g_{to} : 供給砂量、その他の記号は図-3 のとおりである。本実験のように段丘が逆上しない場合は

$$g_{st} + g_{sf} - g_{to} = 0 \quad (2)$$

となる。また、浮流砂量 g_{sf} は、浮流砂の河床濃度を C_{sf} とし、 q を単位巾流量、 h_f を段丘肩上の水深として、

$$g_{sf} = \int_0^{h_f} C_{sf} u dz = C_{sf} P \cdot q \quad (3)$$

P は Lane-Kalinske によると、 K をカルマン定数、 w_0 を粒子の沈降速度、 u_* を摩擦速度、 V を平均流速として、

$$P = \int_0^1 \left[1 + \frac{u_*}{KV} (1 + \log \eta) \right] \exp \left(-\frac{6 w_0}{KV} \eta \right) d\eta \quad (4)$$

次に、河床濃度 C_{sf} については、H. A. Einstein は掃流砂層の濃度に接続するとしているが、 w_0/u_* が大きい場合にこの考えが適用できるかどうか疑問である。ここでは、次のようなモデルを考える

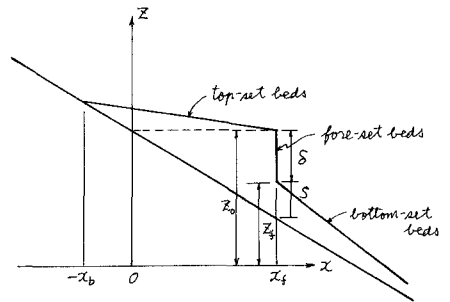


図-3 記号説明図

ことにする。すなわち、①図-4のように河床近傍を掃流砂層と浮流砂層に分けて考える。②浮流砂は乱れ v' によって鉛直方向に運ばれる。③掃流砂層からとらえる砂は掃流砂層の濃度 C_* をもち、浮流砂層から掃流砂層に落ちこく砂は浮流砂底面濃度 C_0 をもちている。とする。掃流砂層の濃度 C_* は、掃流砂層の厚さを αd (d は粒径)、掃流砂層の平均流速を u_b 、 $\varphi' = u_b/u_*$ とすると、

$$C_* = \frac{g_B}{u_b \cdot \alpha d} = \frac{g_B}{\alpha \varphi' u_* d} \quad (5)$$

河床附近の乱れを v' とすると、掃流砂層からとらえる砂の量および浮流砂層から掃流砂層に沈降する砂の量は、 $f(v')$ を v' の確率密度関数として、それぞれ

$$C_* \int_{w_0}^{\infty} (v' - w_0) f(v') dv' \quad \text{および} \quad C_0 \int_{-\infty}^w (v' + w_0) f(v') dv'$$

定常状態においてはこの両者が等しい。 $f(v')$ として正規誤差関数を用いると、定常状態に関する式がえられる。

$$\frac{C_0}{C_*} = \frac{\varphi(\sigma) - F(\sigma)}{\varphi(\sigma) + 1 - F(\sigma)} \quad , \quad \varphi(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \quad , \quad F(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\sigma}{\sigma_0}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (6)$$

ここに、 $\sigma = w_0/\sqrt{w_0^2}$ であるが、栗原教授によると河床附近では $\sqrt{w_0^2} = 0.93 u_*$ であるから、 $\sigma = w_0/0.93 u_*$ となる。式(6)を図示すると図-5のようになる。それによると w_0/u_* が小さいと $C_0/C_* \div 1$ となり浮流砂底面濃度は掃流砂層の濃度に接近するが、 w_0/u_* が大きくなると C_0 は C_* より急激に小さくなる。

式(2)、(3)および(5)より式がえられる。

$$\frac{g_{Bf}}{g_{T0}} = 1 / \left(1 + \frac{C_0}{C_*} \frac{P g}{\varphi' \alpha d} \right) \quad (7)$$

また、掃流砂量の一般式 $g_B/u_* d = K(u_*^2/sgd)^m f(u_{*c}/u_*^2)$ を用いると、

$$\frac{u_*^2}{sgd} = \left\{ \frac{g_B}{u_* d \cdot K \cdot f(u_{*c}/u_*^2)} \right\}^{1/m} \quad (8)$$

ここに、 S : 砂の水中比重、 u_{*c} : 限界摩擦速度である。

φ , φ' , d , w_0 , g_{T0} , g etc が与えられれば上記の諸式より段丘肩上の水深 r_f , u_* , g_{Bf} , g_{Tf} etc が計算できる。すなわち、まず u_*

を仮定すると式(4), (6), (7) より g_{Bf} が求まり、この g_{Bf} を式(8)に代入して求めた u_* と最初仮定した u_* が一致すればそれが求める u_* である。 u_* が求まれば水深は $r_f = g/u_* \varphi$ より求まり、水面は既知点から段丘の高さから分かる。また、 g_{Bf} , g_{Tf} は u_* から式(1)上の関係式より求められる。

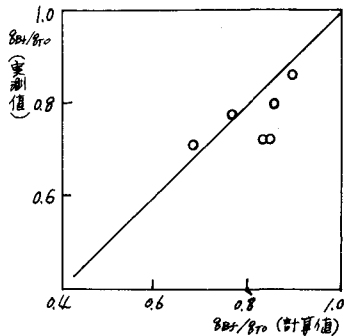


図-6 計算値と実測値の比較

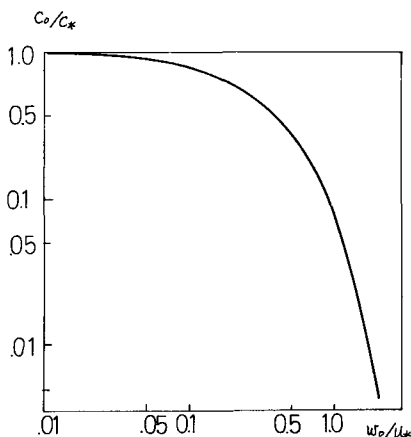
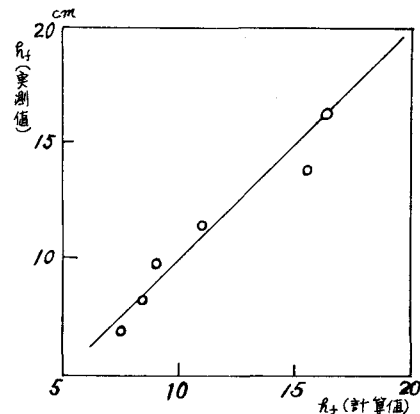


図-5 C_0/C_* と w_0/u_*



以上にエリ、 δ_{sf}/δ_{st} および δ_{st} を求めて実測値と比較したものが図-6であり、計算値と実測値はかなりよく一致している。なお、この計算において掃流砂量式として篠原・橋の式 ($K=25, m=1.8$) を用い、 α は Einstein に従って $\alpha=2, \rho'=8.5$ としている。

5. fore-set beds と bottom-set beds の形状について

図-3の座標系と記号を用いて考える。まず fore-set beds と bottom-set beds の境界面の高さ Z_f は次式

$$\frac{dZ_f}{dx_f} = \frac{\partial Z_f}{\partial t} \frac{dx_f}{dt} + \frac{\partial Z_f}{\partial x_f} \quad (9)$$

で表わされる。fore-set beds における連続の条件より $dx_f/dt = \delta_{sf}/\{(1-\lambda)(Z_0-Z_f)\}$

fore-set 前面の bottom-set beds からの堆砂のまき上げがなぬものとする $\partial Z_f/\partial t = (w_0-v)C_{sf}/(1-\lambda)$

但し、 v は上向き流速である。 $\partial Z_f/\partial x_f$ は境界面における bottom-set beds の勾配であるから、

$\partial Z_f/\partial x_f = -I_b$ とし、式(9)に上述の関係を代入すると

$$\frac{dZ_f}{dx_f} = \frac{\delta_{sf}}{\delta_{st}} \frac{w_0-v}{P \cdot \delta} (Z_0-Z_f) - I_b \quad (10)$$

δ_{sf}, δ_{st} 等は一定と考えられるから、もし $I_b = \text{const}$ であれば上式は簡単に積分できて次式となる。

$$\frac{Z_f}{Z_0} = 1 - M I_b (1 - e^{-\frac{x_f}{M Z_0}}), \quad M = \frac{P \cdot \delta I_b}{(w_0-v) Z_0} \frac{\delta_{st}}{\delta_{sf}} \quad (11)$$

上式によると $x_f \rightarrow \infty$ とすれば $Z_f/Z_0 \rightarrow \text{const}$ となり、fore-set beds と bottom-set beds の境界は水平に進むことになる。また、bottom-set beds の形状を直線と仮定しその勾配を I_b とすると、砂流砂の連続の式より

$$\frac{\delta_{sf}}{1-\lambda} \frac{dx_f}{dt} = S - \frac{1}{2} \frac{S}{(I_b-I_*)^2} \frac{dI_b}{dx_f} + \frac{S}{I_b-I_*} \frac{dS}{dx_f} \quad (12)$$

ここに、 $S = Z_0 - Z_f$, I_* : 原河床勾配である。ここで $I_b - I_* = \beta I_*$ とし、 $(w_0-v)x_f/P \cdot \delta = \xi$, $(w_0-v)S/P \cdot \delta I_* = \eta$ とおいて無次元化すると、式(10)および(12)は次のようになる。

$$\frac{d\eta}{d\xi} = \frac{\delta_{st}}{\delta_{sf}} (\xi - \eta) - \beta, \quad \frac{d\beta}{d\xi} = 2 \frac{\beta}{\eta} \left\{ \beta + \frac{d\eta}{d\xi} \right\} - 2 \frac{\delta_{st}}{\delta_{sf}} \frac{\beta}{\eta} (\xi - \eta) \quad (13)$$

上式を δ_{st}/δ_{sf} を定数とし、初期条件 $\xi=0$ で $\eta=0$ のもとに数値的に解き、 P の値を式(4)より求めて実験値と比較すると S はかなりよく合うが β は実測よりかなり大きな値 (bottom-set beds の勾配が尤) になる。この点については、 $\partial Z_f/\partial x_f$ の仮定が妥当でなかったためと考えられるが、 P の計算値にも疑問があり、また、fore-set beds 前面の bottom-set beds が逆流により洗掘されたこと、水路長が充分でないため bottom-set beds を充分発達させることができなかったことなど実験条件にも問題があるため、今後これらの点を改良して bottom-set beds の解明につとめたいと考えている。

参考文献

- 1) 平野・石田・渡辺：掃流・砂流砂の流入による貯水池の堆砂過程，土木学会第23回年報，43.10