

貯水池の堆砂過程について

九大工学部 正員 橋 東 一 郎

九大工学部 学生員 ○宮武 順造

第一般に於いて貯水池の堆砂過程はついで堆砂過程中流量が一定及び流送工砂量も一定の場合を取扱ひ二三の特殊な結果を得た。しかしながら実際の貯水池では堆砂過程に於いて流量及び流送工砂量は断片的に変化してゐる。その取扱ひに於いて不明確な点があるように思われる。そこで著者はこうして注意を注目して基礎的なものとして貯水池の埋没過程中に流送工砂量が変化する場合における砂堆の運動状態に於いて理論的な考察を行ない実験により明らかにし、この結果に基づいて堆砂過程に於いて実用的な算定法の提案を試みたものである。

実験要目 表-1

実験番号	砂の粒径 d (mm)	比重	流量 q (m³/s)	総砂量 q_0 (m³)	堆高 h (cm)	断面形状
NO 1	0.025	2.692	372.68	0.091 → 0.276	5.5	1/150
2	0.033	2.694	372.68	0.255 → 0.784	5.5	・
3	0.025	2.632	372.68	0.201 → 0.503	6.5	・
4	0.063	2.660	372.68	0.258 → 0.524	6.5	・

1 実験装置及方法

堆砂過程中の総砂量が変化する場合の砂堆の運動に注目して、ここでは総砂量を元の総砂量の2~3倍に変化させて実験を行なつた。

実験に用いた水路は長さ16m幅60cmの鋼製水路で片面がガラス張りである。総砂装置は水路と流路間に四方のSand Boxを有しその下部に所要の量の砂を貯け、そこから自然落下させ分散器により水路幅全体に分散し水路内に一定量の砂を混入させた。実験は表-1の条件で行なつた。水位及び河床の測定は水路断面3ヶ所で行ない縦方向の測定は25cm間隔で約10ヶ所同時に形状を測定した。水面形は静圧管、堆砂面はポイントゲージによりそれぞれ測定を行なつた。

2 貯水池における堆砂の運動に於ける考察

(1) 基礎方程式

流砂量式として河床近傍の浮流砂を含む掃流型流砂量の有初掃流力係が導入されてゐる次式を用ゐると単位幅当りの流砂量 q_0 は、

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{q_0}{\sqrt{s g d^3}} = K \cdot \frac{1}{2} (1 - 0.25 \frac{q_0}{K}) \\ \frac{1}{2} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{q_0}{K} = \frac{h \cdot I_0}{s \cdot d} \cdot \frac{q_0}{K}, \text{ 但し } q_0 = \frac{1}{2} K, \frac{1}{2} = 0.05 \frac{h}{d} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで I_0 は (図-1) を参照して、

$$I_0 = I_0 - \frac{d^2}{2} - \frac{d^2}{2} - \frac{d^2}{2} \quad (2)$$

よつて、 $\frac{d^2}{2}$ 、 $\frac{d^2}{2}$ の項を無視すると近似的に

$$I_0 = I_0 - \frac{d^2}{2} \quad (3)$$

従つて単位幅当りの流量 q は

$$q = h \cdot q \cdot \sqrt{s \cdot h \cdot I_0} \quad (4)$$

こゝで (1) と (4) 式により単位幅当りの流砂量 q_0 は $K=25$, $m=2.3$ 、 $\frac{1}{2}$ の値に代して計算すると

$$q_0 = 25 \sqrt{s g d^3} \left[\frac{q^{\frac{1}{2}} (2 \cdot \frac{1}{2} \cdot I_0)}{s \cdot d \cdot \frac{1}{2}} \right]^{2.3} \quad (5)$$

(2) 砂堆の運動に於ける基礎式

傾正角を流れる流砂量 q_{bf} は (5) 式より

$$q_{bf} = 25 \sqrt{s g d^3} \left[\frac{q^{\frac{1}{2}} (2 \cdot \frac{1}{2} \cdot I_0)}{s \cdot d \cdot \frac{1}{2}} \right]^{2.3} \quad (6)$$

こゝで I_0 は傾正角上に於ける I と同じく、

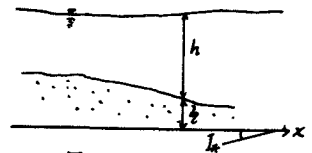


図-1

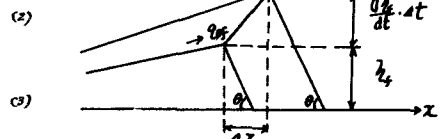


図-2 傾正角略図

次に(図-2)の如く戸田氏によると砂堆の運動より前進速度 U 、及び運動方向の角度 θ は、砂の空け率 α と入として、

$$U = \frac{q_{ef}}{(1-\alpha)z_f} \quad (9)$$

$$\theta = \frac{1}{U} \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)_f + \left(\frac{\partial b}{\partial x} \right)_f \quad (10)$$

但し添字 f は砂堆頂上の値である。

そこで、 $\left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)_f$ について砂堆背面に於ける平均値を用いると

$$\left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)_f = \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)_m = \frac{(q_{eo} - q_{ef})}{(1-\alpha)L} \quad (11)$$

ゆへ(9)に代入して(10)を考慮すると、 $\theta = \frac{q_{eo}}{q_{ef}} \cdot \left(1 - \frac{q_{ef}}{q_{eo}} \right) \frac{z_f}{L} + \left(\frac{\partial b}{\partial x} \right)_f$

[2-1] 堆砂面が上流側に反転後、(図-3)

いま任意の時刻 t に於ける堆砂の形状を(図-3)の如く次式で与えらる。

$$b = ax^2 + bx + c \quad (11)$$

従つて $x=0$ で $z=z_f$ 、 $x=-L$ 、 $z=0$ 及び 傾丘後端 $x=-L$ で b

細砂量 q_{eo} 全部が流れてくるから $\left(\frac{dz}{dx} \right)_{x=-L} = 2a(-L) + b = \dot{z}_0 = (I_0 - I_{ef})$ の

$$\left. \begin{aligned} \text{条件より、} \quad a &= \left(\frac{z_f}{L} - \dot{z}_0 \right) \frac{1}{L} \\ b &= \frac{2z_f}{L} - \dot{z}_0 \quad \text{及び} \quad c = z_f \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

従つて傾丘頂上の速度 I_{ef} に於いて $\dot{z}_f = \left(\frac{\partial b}{\partial x} \right)_{x=0} = b$

$$I_{ef} = I_0 - \left(\frac{2z_f}{L} - \dot{z}_0 \right) \quad (13)$$

I_{ef} は(5)'から次式で求められる。

$$I_{ef} = \left(\frac{q_{eo}}{1.5gd^{1/3} + 2z} \right)^{2/3} \cdot \left[\frac{(5gd^{1/3})^{2/3}}{q^{2/3}} \right] \quad (14)$$

傾丘後端が後方に伸びる速度 $\frac{dL}{dt}$ について、(図-4)の如く此間、

に伸びた距離を dL とすると、 dL 間に堆積した総量が dL 間の細砂量に等しいとすると次式が成り立つ

$$\frac{q_{eo}}{(1-\alpha)} \cdot dt = \int_{-(L+dL)}^0 (ax^2 + bx + c) dx + \frac{(z_f + \frac{dz_f}{dt} \cdot dt)^2 \cot \theta}{2} - \int_{-L}^0 (ax^2 + bx + c) dx - \frac{z_f^2 \cot \theta}{2} \quad (15)$$

但し θ は砂堆中の空け率。

そこで a, b, c は dt 時間後の形状係数、 Q, b_0, c_0 は初期形状に於ける係数で dt を dt と次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} a &= \left(\frac{z_f}{L} - \dot{z}_0 \right) \frac{1}{L} \\ b &= \left(\frac{2z_f}{L} - \dot{z}_0 \right) \\ c &= z_f \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

又傾丘角 θ 運動より $\frac{q_{ef}}{(1-\alpha)} \cdot dt = \left(z_f + \frac{dz_f}{dt} \cdot dt \right) dx + \frac{dz_f}{dt} \cdot dt \cdot \cot \theta \quad (17)$

(15)式を積分し、(16)式を代入して(17)式を考慮すると傾丘後端の伸びる速度 $\frac{dL}{dt}$ に於いて次式が得られる。

$$\lim_{dL \rightarrow 0} \frac{dL}{dt} = \frac{dL}{dt} = \frac{1}{2(z_f + L\dot{z}_0)} \left[\frac{6q_{eo}}{(1-\alpha)} - \frac{2(z_f + L\dot{z}_0)}{z_f} \frac{q_{ef}}{(1-\alpha)} - \left\{ L + (4z_f - L\dot{z}_0) \cot \theta \right\} \frac{dz_f}{dt} \right] \quad (18)$$

$\frac{dz_f}{dt}$ が $\frac{q_{eo}}{(1-\alpha)}$ に比して小さいとすると、

$$\frac{dL}{dt} = \left[\frac{3z_f}{(z_f + L\dot{z}_0)} \cdot \frac{q_{eo}}{q_{ef}} - 1 \right] \cdot U \quad (19)$$

従つて(19)式により dt 後の傾丘後端の伸びた長さ dL を求めることが出来るが(19)式の微分方程式の型に於いて無視される項が多りのので実用的には dt 時間後の傾丘の長さ L について、 dt 時間に堆積した総量が dt 間の細砂量に等しいから(図-4)を参照して初期形状に於ける(単位幅当りの)傾丘を V_0 とすると次式が成り立つ。

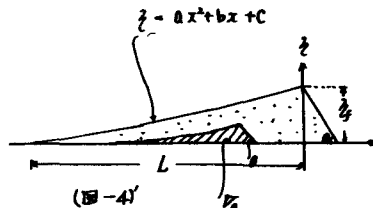
$$\frac{q_{eo}}{(1-\alpha)} \cdot dt = \int_{-L}^0 (ax^2 + bx + c) dx - V_0 + \frac{q_{ef}^2 \cot \theta}{2} \quad (20)$$

(13)式の条件により t 後の段丘の長さ L は

$$L = \frac{-z_0 + \sqrt{z_0^2 + 6L_0 M}}{i_0} \quad (21)$$

$$\text{但し } M = \left(\frac{q_{so}}{(1-\alpha)} \cdot \alpha t + V_0 - \frac{u^2 \cot \theta}{2} \right)$$

$$i_0 = (I_n - I_{co})$$



従って(21)式により t 後の段丘角の厚さ z_0 が知れると t 時間後の段丘の長さ L が解ける。又この L により t 後の形状が(23)及(11)式から得られることになる。

[2-2] 段丘背面が途中で切れこれる場合(アル内に陥没した場合等)下流の河床が不連続の場合)

(図-5)を参照して、この場合の段丘の長さ L は t 後に x より初期形状の段丘長さ L_0 に Δx が加わったものであるから

$$L = L_0 + \Delta x \quad (22)$$

段丘が上流に及ぶ場合と同様に形状を2次式で仮定する即ち(11)

で与えると、いま段丘後端 $x=0$ で初期堆積厚さを z_0 、 t 後に高まる量 Δz_0 とすると、 $x=0$ で $z = z_0 + \Delta z_0$ $x=L$ で $z = z_0$ 、又段丘後端 $x=0$ で総砂量が全部流水であるから $\left(\frac{dz}{dx} \right)_{x=0} = b = i_0$ である。

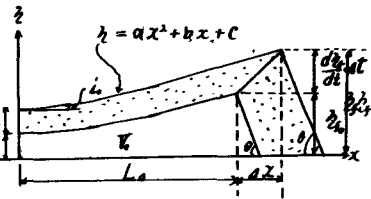


図-5 段丘が切れる場合

従って上の条件により t 後の段丘の形状にフリて次式が成立つ

$$aL^2 + i_0 L + (z_0 + \Delta z_0) - z_0 = c \quad (23)$$

t 時間の間に陥没した量が t 後の全体の $Volume$ から初期形状の $Volume$ を除いたものに等しいから初期形状の $Volume$ を V_0 とすると(図-5)を参照して

$$\frac{q_{so}}{(1-\alpha)} \cdot \alpha t = \int_0^L (ax^2 + bx + c) dx - V_0 + \frac{z_0^2 \cot \theta}{2} \quad (24)$$

(24)(25)式より t 時間後の段丘の形状にフリて $x=0$ における z_0 の高まる量 Δz_0 が仮係数 a, b, c は、

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_0 &= \frac{3}{2} M - \frac{1}{4} [i_0 L + (4z_0 + 2z_0)] \\ a &= \frac{3}{2} \frac{z_0}{L^2} - \left(\frac{1}{4} \frac{i_0}{L} + \frac{3}{2} \left(\frac{M}{L^2} \right) \right) \\ b &= i_0, \quad c = z_0 + \Delta z_0 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\text{但し } i_0 = I_n - I_{co}, \quad L = L_0 + \Delta x, \quad M = \left(\frac{q_{so}}{(1-\alpha)} \cdot \alpha t + V_0 - \frac{u^2 \cot \theta}{2} \right)$$

(26)式より段丘角上におけるエネルギ-勾配、 I_{ef} は $i_f = \left(\frac{dz}{dx} \right)_{x=L} = 2 \cdot a \cdot L + i_0$ より

$$I_{ef} = I_n - i_f = 2I_n - \left[\frac{3z_0}{L} - 2i_0 - \frac{3M}{L^2} \right] - I_{co} \quad (27)$$

以上の諸式により段丘背面が途中で切れこれる場合にフリても[2-1]の場合と同様に t 後の z_0 が解ると(26)式により a, b, c が解け t 後の段丘の形状が求められる(27)式により I_{ef} が解け t 後の段丘部流砂量 q_{ef} が(1)式から解ける。

3 堆積の算定方法及び計算値と実験値との比較

以上の考察をもとに、堆積過程中に於いて総砂量が2~3倍に増加した場合について、砂堆の運動及び堆積形状の算定を行なうと、いまいふ t の場合も総砂量 q_{so} が2~3倍に増加する直前の段丘位置及び形状を初期形状として扱うことに1次の時を $t=0$ とする。

(i) 初期形状により $t=0$ における q_{so}, z_0, L_0 (後) は known である。 (ii) 最初の t 間は(7)式より z_0 と t として時刻の最初の値を用いるとするとこれらは known であるから同式により t の位置が解ける。

(ii) 最初の此周の運動方向角 θ は 60° で、 q_{01} , q_1 , L 及び(投) f はそれぞれ時刻 t 最初の値を用い q_{00} として2~3倍に増加した q_{00} を用いることにすると原式により(5)が解ける。この後の傾きの厚さ q_1 が R_{max} となる。(iv) 此後の q_1 が解けると(10)式又は(12)式、傾きが途中で切れている場合は(12)式により、それ以外に此時周後の傾きの長さ L 及び傾きの形状が求められる。(v) 従って(10)式又は(12)式により此時周後の傾き角 θ のエネルギー密度 I_{ef} が降り(6)式により此時周後の傾き流砂量 q_{01} が求められる。(vi) 此後の傾き角の厚さ q_1 は流砂量 q_{01} が解ったから(10)式又は(12)式により此後の傾き角の軌跡が得られ(10)式により傾き角と流に傾ける距離も得られる。以上以下の計算を繰返して行なえばよく傾きが途中で切れている場合には[2-2]に於いて q_1 を求めるのが加わることになる。(図-6)(図-7)は計算値と実験値とを比較したもので(図-6)は傾きが流に及び、(図-7)は傾きが途中で切れている場合を各々示している。計算の結果実験値とかなりよく一致しておりこの計算方法が妥当であることを示しているように見える。

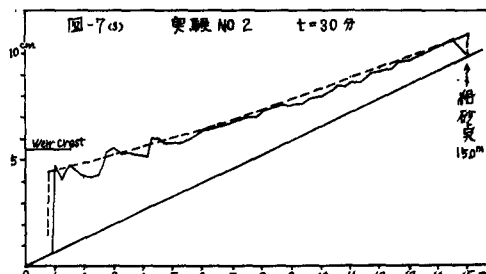
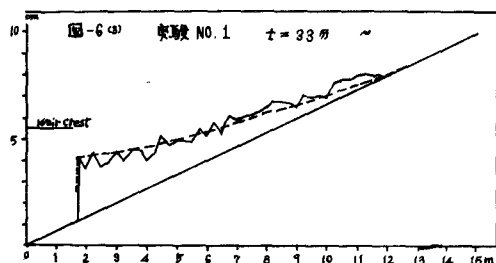
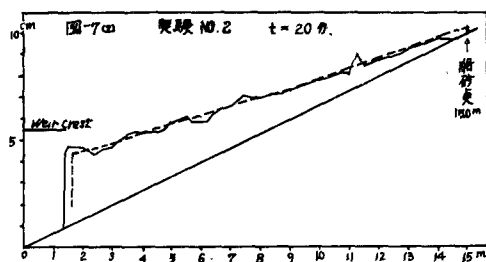
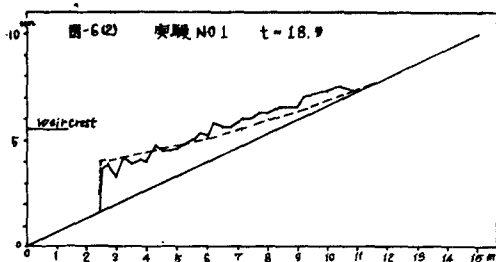
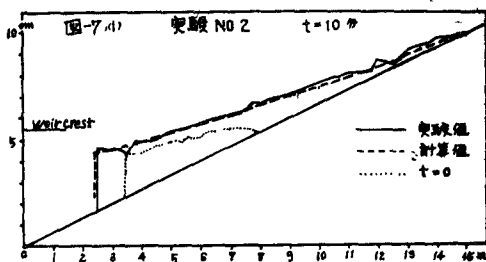
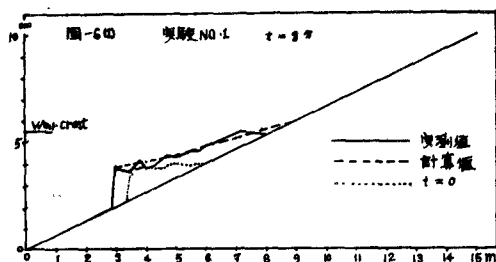


図-6 計算値と実験値との比較(実験 NO.1)

図-7 計算値と実験値との比較(実験 NO.2)

(1) 矢野、戸田、佐達 砂の質に用いる石の実験 京大防災研究所年報 第6号(1977)