

徳島大学 正員 杉尾 捨三郎

徳島大学 正員 岡部 健士

1. 緒 論 貯水池内の堆砂量の約 60～80%は浮遊土砂によって占められているという。そこで、堆砂面の将来予測を適確に行なうためには、浮遊土砂の堆砂過程を定量化する手法の開発が要求される。この分野において、芦田らは貴重な成果をあげている。本報告は、浮遊土砂のみが存在する場合の堆砂過程を半理論的に考察し、実用計算への応用が容易な堆砂形の基本式を導き、芦田らの実験成果を利用してその有用性を検討したものである。

2. 堆砂過程の解析²⁾ 解析に先立ち次のような仮定が設けられた(図-1参照)。

- 貯水池は広幅矩形断面をもち、河幅は流れ方向に変化する。
- 貯水池内の水面は水平で、デルタの肩もまた水平に移動する。
- デルタ肩移動水平線を境界として貯水池を2分し、上部は流水域、下部は静水域とみなす。
- 流水域内では Manning の粗度係数 n は一定であり、Prandtl-von Kármán の対数流速分布式が成立する。
- 静水域内では、土粒子はその最終沈降速度で垂直に落下し堆積する。
- 貯水池内における偏流および密度流を無視する。

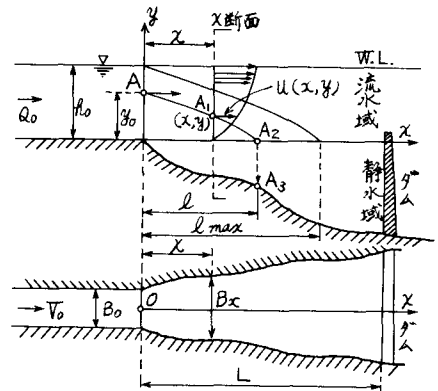


図-1 堆砂過程のモデル図

(1) 土粒子の軌跡: デルタ肩に原点をもつ ($x \sim y$) 座標をとリ、 Q , h , B , V , u_x をそれぞれ流水流量, 流水域の水深, 河幅, 平均流速, 摩擦速度とする(図-1参照)。ここで、添字“0”は流入断面のもの、添字“ x ”は x 断面のものを示す。仮定(C), (d) により、流水域における流速係数は、

$$\frac{V_x}{u_{*x}} = \frac{V_0}{u_{*0}} = \frac{h_0^{1/2}}{n\sqrt{g}} = \text{一定} \quad (1)$$

流水の連続条件 $V_x \cdot B = V_0 \cdot B_0$ を(1)式に代入して、

$$u_{*x} = \frac{B_0}{B_x} \cdot u_{*0} \quad (2)$$

を得る。さらに、流水域内では対数型平均流速式: $\frac{V_x}{u_{*x}} = 6.0 + 2.5 \ln \frac{h_0}{R_s}$ が成立するから、相当砂粒粗度 R_s は流水域内で一定値をもち、その任意点における流速 $u(x, y)$ は次式で与えられる。

$$\frac{u(x, y)}{u_{*x}} = 8.5 + 2.5 \ln \frac{y}{R_s} \quad (3)$$

浮遊土粒子は、その最終沈降速度 w_0 に等しい垂直速度成分および $u(x, y)$ なる水平速度成分をもって流下するものとすれば、流入断面を $y=y_0$ で通過した粒子の t 秒後の位置は $y=y_0-w_0 t$ である。また、 t 時間内の粒子の水平移動距離 dx は $dx = u(x, y) \cdot dt$ となるから、粒子の軌跡曲線は次式のようになる。

$$\int_0^x \frac{dx}{u_{*x}} = \int_0^t (8.5 + 2.5 \ln \frac{y}{R_s}) dt = \int_{y_0}^y (8.5 + 2.5 \ln \frac{y}{R_s}) \frac{dy}{-w_0} \quad (4)$$

(2) 式を(4)式に代入し、 y に関する積分を行なうと、

$$\frac{1}{B_0 u_{*0}} \int_0^x B_x dx = \frac{1}{w_0} \left[y (6.0 + 2.5 \ln \frac{y}{R_s}) \right] \frac{y_0}{y} \quad (5)$$

となる。ここで、 $A_x = \int_0^x B_x dx$ とおけば、 A_x は流入断面から x 断面までの水面積となる。また、

$$B_0 u_{*0} = \frac{Q_0 \cdot n \cdot \sqrt{g}}{R_0^{2/3}} \quad (6)$$

結局、流入断面において $y = y_0$ にあった粒子の軌跡は次のように書かれる。

$$A_x = \frac{Q_0 \cdot n \cdot \sqrt{g}}{w_0 R_0^{2/3}} \left[y (6.0 + 2.5 \ln \frac{y}{R_s}) \right] \frac{y_0}{y} \quad (7)$$

上式において、 $y = 0$ とおくことにより粒子が x 軸と交わるまでの水平到達距離 l は

$$A_l = \frac{Q_0 \cdot n \cdot \sqrt{g}}{w_0 R_0^{2/3}} \cdot y_0 \cdot (6.0 + 2.5 \ln \frac{y_0}{R_s}) \quad (8)$$

以上は水路幅が x 方向に変化する場合についての考察であるが、特に $B_x = B = \text{一定}$ ならば、 $A_l = B \cdot l$ かつ $B_0 = B$ であるから、 l を表す (8) 式は単純な形になる。すなわち、

$$l = \frac{Q_0 \cdot n \cdot \sqrt{g}}{w_0 R_0^{2/3}} \cdot \frac{y_0}{B} \cdot (6.0 + 2.5 \ln \frac{y_0}{R_s}) \quad (9)$$

(2) 堆砂厚さ：堆砂面の進行速度は流水の速度に比して十分小さく、適当な長さの時間 ΔT 内においては貯水池内の水理状況は変化しないとみなせる。流入断面における土砂の濃度分布 $C(y_0)$ が与えられているとき、その中の高さ Δy_0 、幅 B_0 の帯状断面を ΔT 秒間に通過した土砂が A_3 点において水平長 Δl 、厚さ $\Delta \xi$ 、横断幅 B_x の部分に堆積したとする。このとき粒子の連続条件より次式が導かれる (図-2 参照)。

$$C(y_0) \cdot B_0 \cdot \Delta y_0 \cdot u(y_0) \cdot \Delta T = (1 - \lambda) \cdot B_x \cdot \Delta \xi \cdot \Delta l \quad (10)$$

(λ : 粒子の水中空け率)

(8) 式の両辺を y_0 で微分し

$$\frac{\Delta l}{\Delta y_0} \approx \frac{dl}{dy_0} = \frac{B_0 u(y_0)}{B_x w_0} \quad (11)$$

を得、(10) 式に代入すれば、河幅が変化する場合の A_3 点の堆砂厚 $\Delta \xi$ を表す次式を得る。

$$\Delta \xi = \frac{C(y_0) w_0}{(1 - \lambda)} \Delta T \quad (12)$$

3. 計算例および実験結果との比較

元河床勾配 i_0 、河幅 B_x 、流量 Q_0 、汚遊土砂の粒度構成および各粒径に対する濃度分布、Manning の粗度係数 n が与えられれば、(8) 式と (12) 式とを用いて堆砂面形状を逐次計算することができる。本報告では、芦田らの実験の Experiment-2 と比較してみる。計算に先立って与えられる諸量は以下のように定めた。

まず、芦田らの報告に記されている数値をそのまま用いて、 $i_0 = 1/30.8$ 、 $B_x = 20 \text{ cm}$ (一定)、 $Q_0 = 5 \text{ l/sec}$ 、 $R_0 = 10 \text{ cm}$ とした。土砂の粒径は単に平均粒径 (0.052 mm) で代表させ、A. S. C. E 推薦の方法で $w_0 = 0.23 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ とし (Rubey 式でもほぼ同様の値を得る)、流入断面における土粒子濃度分布は、芦田の実験図から純粋の容積濃度 $C(y_0)$ を次式のように求めた。

$$C(y_0) = 0.001444 \left(\frac{R_0}{y_0} - 1 \right)^{0.2048} \quad (13)$$

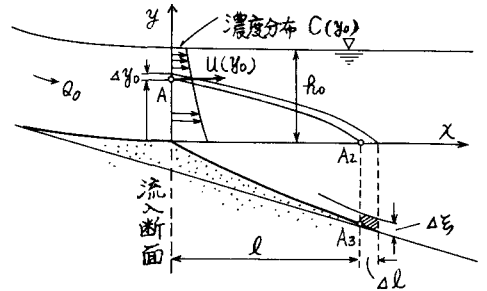


図-2 堆砂厚説明図

なお、 n については報告されていないので、ここでは仮に $n = 0.015$ と推定した。また、 $\lambda = 0.4$ 。

$\Delta T = 3600 \text{ sec.}$ として堆砂過程を描き、実験値と比較したのが図-3 であるが、(4)式および(13)式の性質上計算の過程において x 軸より上方に突出した部分 ACD が現れる(図-4参照)。これは流りの掃流力によって下流に流されると考えるのが妥当であろう。それゆえ、図形 ACD を面積等しく DEF に移し、新たに出来上がった $ABFED$ を結果的に生じる堆砂形状とした。なお、図-3 に記入している実験において観測された堆砂過程は芦田らの図より測り取ったものであるが、堆砂面進行の原点を本稿の仮定に沿うよう多少移動させている。

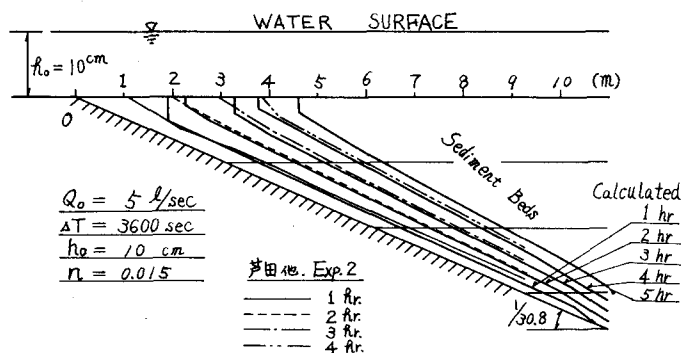


図-3 数値計算による堆砂過程

さて、基本式の誘導において数多くの仮定を設定しているにもかかわらず、計算された堆砂過程は実験結果とかなり良好に合致する。また、計算されたデルタ肩の進行速度は初期の1時間を除いては一定値 0.022 cm/sec で実測値の 0.027 cm/sec と大差ない。

4. 結論

浮遊土砂のみが存在する場合の堆砂面進行過程を定量的に推計する方法を提案した。(8)式および(12)式から計算される堆砂面は要約すると次のような性質をもつ。一樣粒径で $C(y_0) = \text{一定}$ ならば、堆砂厚は流れ方向に一樣に分布し、 $C(y_0)$ が河床に近いほど大ならば、下流ほど薄くなる。もし粒径が一樣でなければ、粒径が大きな粒子ほど上流側に多く堆積する。また、貯水池幅が流入部から拓がる割合が大なるほど堆砂長さは短くなる。このことは Harrison³⁾ が経験的に得た事実と一致している。

本稿で提案された方法を芦田らの実験結果と比較した結果、かなりの有用性が認められた。特に、本法は、理論が極めて単純明快であり、計算方法も比較的容易であるに加えて、河幅が変化する場合にも応用できるという長所をもっている。しかしながら、この解析は多くつ仮定の下に進められており、中にはやや大胆なものもあるから、今後さらに流入部付近の流速分布特性や乱れ特性の把握に努め、流入部における濃度分布の決定やデルタ肩の形を適正に修正するための資料とせねばならない。

本研究では芦田教授らによる貴重な研究成果を利用させていただいた事を深く感謝致します。

(参考文献)

- 1) 矢野・芦田・大同：浮遊砂による貯水池の堆砂に関する研究；京大防災研年報，No. 7，1964。
- 2) 杉尾：浮遊砂による貯水池の堆砂過程；土木学会水工学シリーズ，河川コース，1974。
- 3) Harrison, A.S. : Deposition of the Head of Reservoirs ; Proc. Minnesota International Hydraulics Convention ; I.A.H.R., 1953, pp. 199~225.