

貯水池堆砂の数値計算法に関する研究

芦田 和男・岡部 健士

ON THE PREDICTION MODEL OF RESERVOIR SEDIMENTATION

By Kazuo ASHIDA and Takeshi OKABE

Synopsis

This paper is concerned with the prediction method of sedimentation process in reservoirs.

The contribution of suspended load, which having been treated empirically, is considered theoretically and found to be proportional to the discrepancy between the actual concentration and the equilibrium concentration just above the river bed. A practical method to estimate the longitudinal distribution of the former is proposed and its applicability is verified through numerical investigations.

The fundamental equations for the evaluation of the bed-profile deformation and the change in grain-size distribution are given after dividing the whole region of reservoir into three sub-regions arranged in a row.

1. 緒 言

自然河道の一部に貯水池が作られると、それまでは流下していた上流からの流送土砂が池内に堆積するようになり、時間の経過とともに明確な堆砂層が現われ、次第に変形しながら発達する。これが貯水池堆砂であるが、とくに我国の場合、山地における土砂生産が比較的活発であるから、堆砂は一般にかなり急速に進行する。そのため、数多くの貯水池において、堆砂による貯水容量の減少や背水域の洪水危険度の増大などが、重大かつ深刻な問題となっている。このような貯水池の堆砂問題に対して工学的な立場より合理的な対策を講じるためには、堆砂形状の将来予測を的確に行うことが重要であって、従来より、これに関する研究がさかんに行われてきた。

堆砂形状の予測に関する研究の端緒においては、Area-Increment Method や Area-Reduction Method に代表される純経験的な予測法がいくつか提案された。多くの貯水池についてこの種の方法の適用性を検討した結果、これらによっても大雑把な予測は可能であることが認められた。しかし、その一般性には自ずと限界があり、近年では、土砂水理学的な河床変動論に基づく堆砂予測法の開発に力が注がれている。

さて、貯水池堆砂は、掃流砂、浮遊砂および wash load という、流送特性が互いにまったく異なった3種の流砂が混在する中で進行するが、その理論的な予測方法がこれまでにある程度確立されているのは、掃流砂の堆砂に関するものだけのようである。これに対し、浮遊砂と wash load の取り扱い方はかなり経験的であって、たとえば、浮遊砂ならびに wash load として取り扱う土砂の大きさを限定し、両者を掃流砂のみによる堆砂デルタの肩より下流側に、一様に堆積させるという簡便法がよく利用されている。もっとも、このうち wash load の堆積過程には、貯水池に独特の密度流現象が複雑に関連しており、これに関しては今なお解明されていない点も多いので、上述のような方法によるのも止むを得ないと言える。しかし、一方の浮遊砂については近年かなり研究が進み、非平衡状態下の流送特性をも含めて、その運動特性がかなり明らかにされてきた。したがって、現在では、浮遊砂による河床変動量を土砂水理学的に取り扱った堆砂予測モデルに関する議論を進めることが可能と思われる。

そこで本研究では、まずはじめに浮遊砂による河床変動量に関する一般的な予測法について検討したのち、浮遊砂だけでなく wash load についても、堆砂予測モデルを提示するとともに、これを用いた若干の計算例を紹介する。

2. 浮遊砂による河床変動

2.1 河床変動の基礎式

ここでは、議論を簡単にするために、2次元流れにおける一様粒径の浮遊砂について考察する。

さて、河床変動は流砂量の場所的な不均衡によって生じるものであって、その速度 $\partial z_B / \partial t$ は次式で与えられる。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h (cu) dz = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 t : 時間、 x : 河床に沿う流下方向の座標、 z : 河床からの高さ、 z_B : 河床位、 c : 浮遊砂の容積濃度、 u : x 方向の流速、 h : 水深、 λ : 河床の空隙率である。

(1)式中の c は、浮遊砂濃度に関する基礎式

$$-\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w_f \frac{\partial c}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

を用いて求められるが、定常状態の場合矢野・芦田¹⁾の実験的検討の結果によれば、(2)式を次式のように簡略化することができる。

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w_f \frac{\partial c}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ϵ_x : 拡散係数、 w_f : 浮遊砂の沈降速度である。なお、(3)式の境界条件は

$$x = x_0 : \quad c = c(x_0, z) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$z = 0 : \quad \epsilon_z \partial c / \partial z + w_f c_e = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$z = h : \quad \epsilon_z \partial c / \partial z + w_f c = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。ここに、 x_0 : 解析対象領域の上流端の x 座標、 $c_e = w_f$ と流れの掃流力の関係によって定まる平衡状態の底面濃度である。

(3)式を $z=0 \sim h$ の間で積分し、(5)および(6)式を考慮しながら変形すると、

$$\int_0^h u (\partial c / \partial x) dz = w_f (c_0 - c_e) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここに、 $c_0 = z=0$ における濃度であり、以下においては底面濃度と呼ぶ。ここで $dh/dx \cdot (cu)_{z=h} = 0$ とみなせば、 $\int_0^h u (\partial c / \partial x) dz = \partial / \partial x \int_0^h (cu) dz$ となるから、(1)および(7)式より次式が得られる。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \cdot w_f (c_0 - c_e) \quad \dots\dots\dots (8)$$

すなわち、境界条件と水理条件として、 ϵ 、 u 、 h 、 c_e 、 $c(x_0, z)$ が与えられたならば、(3)式を用いて c_0 が算定でき、(7)式により河床変動量が算定される。

2.2 底面濃度の簡易解法

浮遊砂による河床変動の基礎式が(8)式のように与えられたが、 c_0 を計算するときに、(3)式を差分法などに基づいて直接数値解析するならば、計算労力がきわめて多大になり、長期間の堆砂予測への適用が困難になる。そこで、著者らは、 c_0 に関する簡易解法を検討した。以下これについて述べる。

拡散係数 ϵ_z は断面内で何らかの分布をもつと思われるが、ここでは ϵ_z をその断面内平均値 $\bar{\epsilon}$ で代表させることにして(3)式を

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + w_f \frac{\partial c}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (9)$$

のように記述し、以下、本式に基づいて議論を進める。

(9)式を $z=0 \sim z$ の間で積分し、(5)式を用いて変形すれば、

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial z} + w_f c = \int_0^z u \frac{\partial c}{\partial x} dz + w_f (c_0 - c_e) \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。また、 $z=h$ の場合には、(6)式より

$$0 = \int_0^h u \frac{\partial c}{\partial x} dz + w_f (c_0 - c_e) \quad \dots\dots\dots (11)$$

したがって、

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial z} + w_f c = w_f (c_0 - c_e) \left(1 - \frac{\int_0^z u (\partial c / \partial x) dz}{\int_0^h u (\partial c / \partial x) dz} \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

上式は、もしも右边が何らかの方法により c 以外の量で表示されたならば、単純な線型方程式になり、 c について解くことが可能になる。そこで、右边の積分式中の $u \partial c / \partial x$ を、(5)式の路床条件が満足される下記の濃度分布式を与えて近似的に評価してみよう。

$$c = c_0 e^{-c_e / c_0 \cdot w_f z / \varepsilon} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(13)式を(9)式の右边に代入して $u \partial c / \partial x$ を定式化し、これを(12)式に代入すれば、

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial z} + w_f c = \frac{w_f (c_0 - c_e)}{1 - e^{-c_e / c_0 \cdot w_f h / \varepsilon}} \{ e^{-c_e / c_0 \cdot w_f z / \varepsilon} - e^{-c_e / c_0 \cdot w_f h / \varepsilon} \} \quad \dots\dots\dots (14)$$

これを $z=0$ で $c=c_0$ の条件のもとで解き、

$$w_f h / \varepsilon = R_w \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$c_0 / c_e = C_0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

とおけば、つぎのような濃度分布の近似解を得る。

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{1 - e^{-R_w / C_0}} \{ e^{-R_w / C_0 \cdot z / h} - e^{-R_w / C_0} + e^{-R_w / C_0} (1 - e^{-R_w \cdot z / h}) / C_0 \} \quad \dots\dots\dots (17)$$

上式は、 $c_0 = c_e$ すなわち $C_0 \sim 1$ のとき $c/c_0 = e^{-w_f z / \varepsilon}$ となつて、平衡状態の濃度分布を与え、 $c_0 \neq c_e$ のときには、 R_w および C_0 によって変化する非平衡な濃度分布を与える。ただし、底面からの砂粒子の浮上がなく、 $c_e = 0$ すなわち $C_0 \rightarrow \infty$ のときには分布形が確定しない。これは濃度分布の第1近似解の与え方に起因しており、 $c_e = 0$ の場合の濃度分布式が必要ならば別途に導かねばならない。しかし、貯水池内で $c_e = 0$ となる領域では、浮遊砂濃度がすでに十分低減してしまっていると考えられるので、実用上 $c_0 = c_e = 0$ すなわち $\partial z_B / \partial t = 0$ と簡単に扱うことにしても、大きな誤りを招くことはないであろう。

ついで、(17)式を(11)式に代入すれば c_0 に関する方程式が求まる。しかし、(17)式をみれば、結果的に得られる式が $\partial h / \partial x$ 、 $\partial \varepsilon / \partial x$ 、 $\partial c_e / \partial x$ を含むきわめて複雑なものになることが明白である。また、流速 u に対して何らかの分布形を与えれば、場合により積分の実行自体が不能になる。あるいは、その実行が可能な場合でも、 c_0 に関する方程式の冗長さはまぬがれない。そこで、 c_0 を求める近似的な取り扱いとして、 $\partial h / \partial x$ 、 $\partial \varepsilon / \partial x$ 、 $\partial c_e / \partial x$ に関する項は全て無視し、さらに u も断面内平均流速で代表させることにする。

(11)式を上述のような条件のもとに書き直せば、

$$w_f (c_0 - c_e) = - \frac{q}{h} \frac{d}{dx} \int_0^h c dz \quad \dots\dots\dots (18)$$

となり、これに(17)式を代入して整理すると、

$$\frac{dc_0}{dx} = \frac{w_f c_e / q (1 - C_0)(e^{R_w/C_0} - 1)^2}{2C_0/R_w(e^{R_w/C_0} - 1)^2 + (1 - e^{R_w/C_0}) + \{-R_w + (R_w + e^{-R_w} - 1)/C_0\} e^{R_w/C_0}/C_0} \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 q ：単位幅流量である。

(19)式を用いれば、境界条件として

$$x = x_0 : c_0 = c(0, 0) \quad \dots\dots\dots(20)$$

が与えられた場合に、 $x > x_0$ の領域の底面濃度を比較的簡単な逐次計算により求めることができる。ただし、(19)式の誘導は多くの近似や仮定に基づいているので、つぎに(19)式の妥当性を十分に検討しておこう。

2.3 簡易解法の検討

(19)式を簡潔な形式で表示すれば

$$dc_0/dx = w_f c_e / q \cdot F(C_0, R_w) \quad \dots\dots\dots(21)$$

となる。**Fig. 1** は、 $F(C_0, R_w)$ と C_0 の関係を R_w を種々に変化させながら描いたものである。曲線群は全て $C_0=1$; $F(C_0, R_w)=0$ を通り、 $C_0 \geq 1$ に対して $F(C_0, R_w) \leq 0$ (複合同順) となっている。これは、平衡状態では濃度変化がなく、底面濃度が平衡状態下の底面濃度よりも大きい (あるいは小さい) とき、濃度が減少 (あるいは増加) することを示している。また、同一の C_0 に対する $|F(C_0, R_w)|$ に及ぼす R_w の影響についてみると、後者が大きいほど前者も大きくなっている。このことは、例えば u_* を一定したとき、 w_f が大きいほど濃度の変化が急激で、平衡濃度に早く近付く傾向があることを意味しているが、これが妥当であることは、いわゆる adaptation length²⁾に関する2.3の試算結果^{2),3)}からも明らかである。以上の考察より、(19)式が少なくとも定性的には十分妥当な解を与えると判断し得るが、さらにその妥当性を定量的に検討し

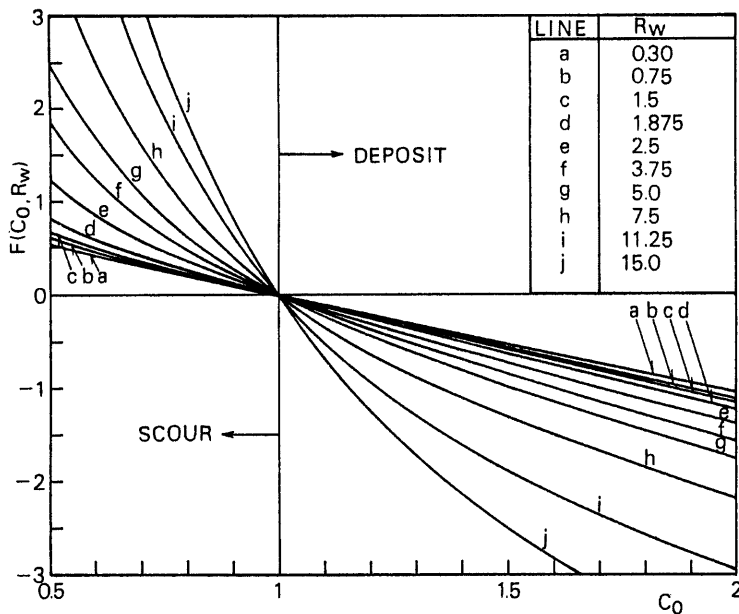


Fig. 1 Relations between $F(C_0, R_w)$ and C_0 with parameter R_w .

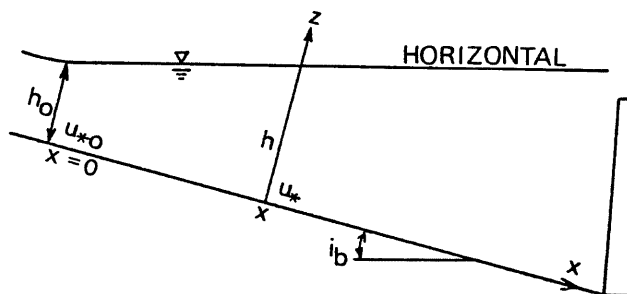


Fig. 2 Schematic sketch of reservoir model.

よう。

Fig. 2 に示されたような底勾配 i_b が一定の貯水池に流入する浮遊砂を例にとり、(9) 式を差分解析して得られる底面濃度の分布と(19)式に基づいて算定されるものとを直接比較してみた。なお、計算は、池内の水面が水平であり、図中の $x=0$ 点で浮遊砂濃度が平衡状態の分布形をもつという条件のもとで行われた。また、池内では流速係数 ϕ が一定 ($\phi=20$) であるとし、拡散係数 ε を

$$\varepsilon = u_* h / 15 \quad \dots\dots\dots (22)$$

により算定した。さらに、 c_e の計算には道上⁴⁾ の式を用いた。

Fig. 3 (a)~(c) は、 $i_b=1/100, 1/200, 1/400$ の各場合につき、 w_f/u_{*0} を 0.2, 0.4, 0.6 と変化させながら計算した結果を示したものであって、簡略式である(19)式に基づく計算値を実線で、差分解析によるものを破線で示している。図において、座標 (0, 1) より発する曲線は、 x 点の底面濃度を $x=0$ 点の底面濃度 c_{e0} で規格化したものの変化を示し、一方、座標 (0, 0) より発する曲線は、(8) 式に基づき、仮に $\lambda=0$ として算定される $\partial s_B / \partial t$ を $w_f c_{e0}$ で規格化したもの (図中では Rate of Dep. としている) の変化を示している。

はじめに底面濃度の計算結果についてみると、(19)式を用いた簡易解法が差分解法より若干大きい値を与えているが、その差は、最も大きい $i_b=1/100$ の場合でも高々数%程度であって、全体としてはかなりよく一致した結果が得られている。一方、規格化された $\partial s_B / \partial t$ についてみると、計算方法の相違による差が、

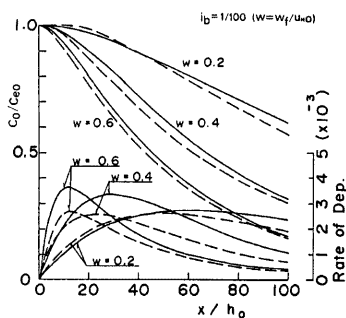


Fig. 3 (a) Comparison between calculated results using Eq. (19) and finite difference scheme ($i_b=1/100$).

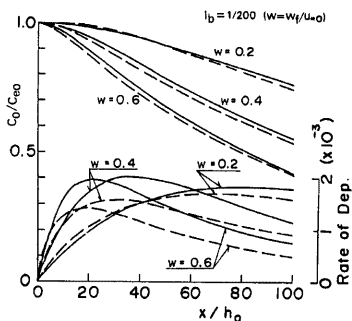


Fig. 3 (b) Comparison between calculated results using Eq. (19) and finite difference scheme ($i_b=1/200$).

底面濃度の場合よりもかなり顕著に現れている。しかし、定性的な傾向にはほとんど差がなく、したがって簡易解法を導入した河床変動計算によってもかなり妥当な堆砂予測が行えると思われる。

3. 堆砂予測モデル

一般に、堆砂予測においては、縦断方向のマクロな河床変動の計算が目的とされるが、これに関しては、水流ならびに土砂に関する運動式と連続式に基づいた、一次元解析的な計算理論がほぼ確立されている。したがって、ここでは予測モデル全般にわたる詳細な議論を行うことはせず、主として、浮遊砂による河床変動を一般的に取り扱う場合の河床変動式ならびに粒度分布の計算式について述べるとともに、wash load に対しては、理論性を若干加味した取り扱いを試みる。

3.1 河床変動計算の基礎式

掃流砂、浮遊砂および wash load の効果が混在するダム上流の河床変動を一般的に表示すると次式のようになる。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{B_B(1-\lambda)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \{B_s(q_B + q_s) + Q_W\} = 0 \quad \dots\dots\dots(23)$$

ここに、 z_B : 河床位、 B_B : 河床幅、 q_B および q_s : それぞれ単位幅当りの掃流および浮遊砂量、 B_s : bed material load の流送に有効な河床幅、 Q_W : 全断面当りの wash load の流送量、 λ : 河床の空隙率である。なお、 B_s は、ほとんどの場合 B_B と等置してよいと思われるが、河道の線形や河幅が著しく変化する場合には、そこに生じる流れの状態を十分に勘案して適当な補正を加えることも必要であろう。

さて、 q_B および q_s の算定にあたっては、bed material load を混合砂とみなした取り扱いが必要である。また、浮遊砂による河床変動は(8)式のように表示される。したがって、(23)式をつぎのように書き直しておくのがよからう。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{B_B(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(B_s \sum_{j=1}^J q_{Bj} \right) + B_s \sum_{j=1}^J w_{fi}(c_{ej} - c_{oj}) + \frac{\partial Q_W}{\partial x} \right\} \quad \dots\dots\dots(24)$$

ここに、 w_{fi} 、 c_{ej} および c_{oj} : それぞれ d_j なる粒径で代表される砂礫の沈降速度、底面濃度および底面の平衡濃度であり、 J : 粒径の分割数である。

さて、河床変動計算式の一般表示として(24)式を導いたが、実際に堆砂計算を行う場合には、本式をそのまま適用するのではなく、より実用的なものに書きなおしておく方が好都合である。

Fig.4 は、浮遊砂と wash load の流送特性の相違を指標にして堆砂計算対象区間の領域区分を行ったものである。ここに、全区間は、i) 河道区間、ii) 貯水池区間 U 、iii) 貯水池区間 D という3種の小領域に区分されている。

i) 河道区間は、流れが局所的にみると等流にかなり近いものになっている区間である。ここでは、河道に沿う水理量の変化がきわめて小さいので、浮遊砂はそれにほぼ完全に追従すると考えてもよからう。したがって、任意の断面の浮遊砂量を局所的な水理条件に対応して定まる平衡状態下の浮遊砂量で近似することが可能と思われる。一方、この区間の wash load は、河床変動にまったく関与しない。以上のことより、河道区間に対しては次式を適用し得る。

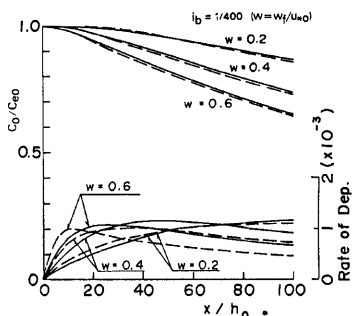


Fig. 3 (c) Comparison between calculated results using Eq. (19) and finite difference scheme ($i_b = 1/400$).

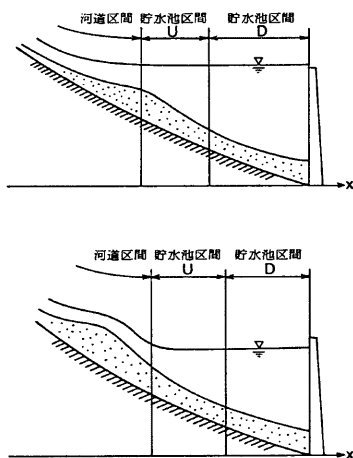
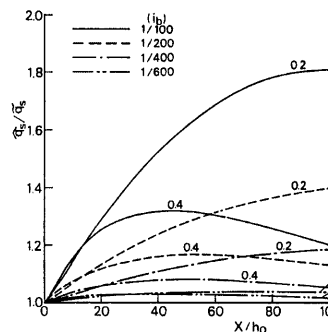


Fig. 4 Definition sketch of sub-regions.


 Fig. 5 Variations of relationship between q_s/q_s and x/h_0 with a parameter of i_b .

$$\frac{\partial s_B}{\partial t} + \frac{1}{B_B(1-\lambda_S)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B_s \sum_{j=1}^J (q_{Bj} + \dot{q}_{sj}) \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 q_{sj} ：局所的な水理条件に対応する平衡状態下の浮遊砂量、 λ_S ：河床の空隙率である。

これに対し、ii) 貯水池区間 U は、流れがダムによる堰上げの効果を直接的に受けて、急速にその土砂輸送能力を失ってゆく区間であり、ここでは浮遊砂の非平衡性を考慮する必要がある。一方、wash load については、この区間の下限を bed material load の堆積完了点としておけば、河道区間におけるのと同様に $\partial Q_W/\partial x=0$ でよいと思われる。したがって、貯水池区間 U の河床変動の基礎式は

$$\frac{\partial s_B}{\partial t} + \frac{1}{B_B(1-\lambda_U)} \left\{ -\frac{\partial}{\partial x} \left(B_s \sum_{j=1}^J q_{Bj} \right) + B_s \sum_{j=1}^J w_{fj}(c_{ej} - c_{oj}) \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここに、 λ_U ：河床の空隙率である。また、 c_{oj} を求めるには、粒径ごとに(19)式を適用すればよい。なお、河道区間と貯水池区間 U の境界を定める規準を明らかにしておかねばならないが、この問題を一般的に議論することはきわめて困難である。そこで、若干の数値計算例を参考に大雑把な目安を与えておこう。**Fig. 5** は、**Fig. 3** を描くために行なわれた差分法による数値計算の結果に基づき、浮遊砂量の計算値 q_s と、局所的に平衡状態を仮定して算定される浮遊砂量 q_s との比を表したものである。なお、図中の曲線群に付した数値は w_f/u_{*0} を示すが、 $w_f/u_{*0}=0.6$ の場合の計算結果は省略されており、新たに $i_b=1/600$ の場合が付け加えられている。不等流である限り、 $q_s/q_s=1$ となることはないが、 i_b が減少するにつれて q_s/q_s の値が急速に1に近付き、 $i_b=1/600$ 程度になるとその差が高々0.03~0.04程度になって、両者はほぼ一致するとみなせるようである。ところで、計算において水面は水平であると仮定されているから、いま述べた i_b と q_s/q_s の関係は、距離的な水深変化率 dh/dx と q_s/q_s の関係でもある。そこで、河道区間と貯水池区間 U の境界を定める一つの方法として、 dh/dx が1/600程度より大きくなり始める断面を深す方法を提案しておきたい。

最後に、貯水池区間 D は、貯水池区間 U の下流でダムサイトに至る全領域であって、ここでは wash load のみによる河床変動が起こる。したがって、河床変動の基礎式は

$$\frac{\partial s_B}{\partial t} + \frac{1}{B_B(1-\lambda_D)} \cdot \frac{\partial Q_W}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (27)$$

と記述される。ここに、 λ_D ：空隙率である。もっとも、 Q_W の分布を算定する適確な方法は未だに見出されていない。ただし、便宜的には、たとえば次式を基礎式にして Q_W を算定することが考えられる⁴⁾。

$$-\frac{\partial Q_W}{\partial x} = -K_W w_{fW} \left(\frac{A}{h} \right) \frac{Q_W}{Q} \quad \dots\dots\dots (28)$$

ここに、 A ：河道断面積、 Q ：流水流量、 w_{fW} ：wash load の代表沈降速度、 K_W ：再浮上係数とほぼ同義の係数である。 K_W や w_{fW} の値をいかに定めるかについては、具体的な個々の問題ごとに種々検討すべきであるが、(28)式を利用すれば、貯水池の形状特性や流量の相違により Q_W の分布状況が変化の様子だけは、ある程度把握できると思われる。そして、(28)式に基づいて Q_W が算定されれば、

$$-\frac{\partial z_B}{\partial t} - \frac{K_W(A/h)}{B_B(1-\lambda_D)} \cdot \frac{w_{fW} Q_W}{Q} = 0 \quad \dots\dots\dots (29)$$

により、河床変動量が算定される。

3.2 粒度分布の計算の基礎式

平野⁵⁾ は、粒子交換層の概念に立脚した理論展開により、掃流砂に起因する河床材料の粒度分布に関する基礎式を導いた。その一般形はかなり複雑であるが、本質的な部分のみを記述すると次式のようなのである。

$$-\frac{\partial P_j}{\partial t} = -\frac{1}{aB_B(1-\lambda)} \cdot \frac{\partial(B_S q_{Bj})}{\partial x} - \frac{P_{j*}}{a} \cdot \frac{\partial z_B}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (30)$$

ただし、 $\partial z_B / \partial t > 0$: $P_{j*} = P_j$

$\partial z_B / \partial t < 0$: $P_{j*} = P_{0j}$

ここに、 P_j および P_{0j} ：交換層および交換層直下の砂礫層において粒径 d_j の粒子が占める割合、 a ：交換層の厚さであり、平野は最大粒径程度としている。

さて、本論文では、浮遊砂と掃流砂を分離することなく取り扱うことにしているので、平野の理論の中で浮遊砂の存在を考慮すると、河道区間および貯水池区間 U に対する粒度分布の基礎式が、それぞれ(31)および(32)式ようになる。

$$-\frac{\partial P_j}{\partial t} = -\frac{1}{a_S B_B(1-\lambda_S)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \{B_S(q_{Bj} + q_{sj})\} - \frac{P_{j*}}{a_S} \cdot \frac{\partial z_B}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$-\frac{\partial P_j}{\partial t} = -\frac{1}{a_U B_B(1-\lambda_U)} \left\{ \frac{\partial(B_S q_{Bj})}{\partial x} + B_S w_{fi}(c_{sj} - c_{0j}) \right\} - \frac{P_{j*}}{a_U} \cdot \frac{\partial z_B}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (32)$$

ここに、 a_S および a_U ：河道区間および貯水池区間 U の交換層厚さである。

ところで、水理条件によっては、貯水池区間 U が wash load のみの堆積領域に逐次進入する状況が生じる。流入洪水のハイドログラフの立ち上り期間、あるいはかなり急激な貯水位の低下に伴い、貯水池深部の掃流力が次第に増加する場合などがこれに相当する。この場合でも、 $P_{j*} = 0$ とおいて(32)式をそのまま適用すれば、bed material load の堆積領域が下流側に拡張される様子を計算の上で表現することができる。しかし、wash load と bed material load が混在する河床に対する(32)式の適用性については、今後の検討を要する点が残されている。

つぎに、貯水池区間 D について考えてみると、ここでは、上述した現象とはまったく逆に、wash load が過去に堆積した bed material load を被覆する場合が起り得る。この場合、wash load の堆積量の増加とともに P_j が減少するとみるのが自然であるから、以下において、その取り扱い方を考えてみよう。

Fig. 6 に示したように、 δt 時間内に wash load の堆積によって河床が δz だけ上昇したとする。ここで、新しい河床面を頂面とする厚さ a' の検査層を

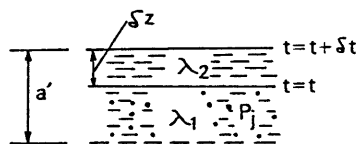


Fig. 6 Definition sketch.

考えると、この中にある粒径 d_j の bed material load の実容積 V_j は、河床単位面積あたり

$$V_j = (a' - \delta z)(1 - \lambda_1)P_j \quad \dots\dots\dots(33)$$

となる。ここに、 λ_1 ：時刻 t における河床の空隙率である。一方、検査層内の全実質土砂量 V_T は、同じく河床単位面積あたりについて

$$V_T = (a' - \delta z)(1 - \lambda_1) + \delta z(1 - \lambda_2) \quad \dots\dots\dots(34)$$

のように表示される。ここに、 λ_2 ：新たに加わった wash load の堆砂層の空隙率である。したがって、時刻 $(t + \delta t)$ に、検査層内で粒径 d_j の粒子が占める割合 $P_j|_{t+\delta t}$ は

$$P_j|_{t+\delta t} = (a' - \delta z)(1 - \lambda_1)P_j / \{(a' - \delta z)(1 - \lambda_1) + \delta z(1 - \lambda_2)\} \quad \dots\dots\dots(35)$$

さらに、 $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$ において上式を簡略化すると、

$$P_j|_{t+\delta t} = (a' - \delta z)P_j/a' \quad \dots\dots\dots(36)$$

を得る。 a' の値の定め方などに問題が残されるが、(36)式を用いれば wash load の混入あるいは被覆により生じる河床材料の粒度変化をある程度評価し得る。

4. 計 算 例

前章で提示した河床変動と粒度分布に関する基礎式を、流れの運動方程式と連続式、ならびに適当な流砂量式と組み合わせて連立方程式を構成し、これを与えられた水理条件と土砂の流入条件のもとに解けば堆砂の将来予測を行える。本論の計算手順は Fig. 7 に示すフローのとおりである。これをモデル的な河道条件と水理条件に対して適用した結果について述べよう。

計算に用いた河道モデルは Fig. 8 に示すようであり、河床勾配が一定値 $1/150$ 、横断面形状が底幅 50 m 、側面勾配 $1/1$ の台形となっている河道が、ダムの上流に無限に続いているものとした。また、ダムサイトの貯水位は 50 m で一定に保たれ、Manning の粗度係数 n は 0.04 で、この値は時間的、場所的に変化しないとす。流入洪水の条件としては、Fig. 9 に示したピーク流量 $1000\text{ m}^3/\text{s}$ 、継続時間 4 日の洪水を繰り返し合計 14 回与えることにしたが、計算においては、流量の時間的な変化を図中に併記した階段状のハイドログラフで近似した。

河床変動計算を行う区間の上流端はダムより 10 km 上流の地点に置くとともに、この点より上流では、河床位も河床材料の粒度構成もともに変化しないという条件を付した。したがって、上流端における bed material load の流入条件は、上述の河道条件と水理条件および以下で示す河床材料の粒度分布に対して一義的に定まる。一方、wash load の流入量は洪水流量の 2 乗に比例すると仮定し、上流端で

$$Q_W = 1.25 \times 10^{-6} Q^2 \quad (\text{m}^3/\text{sec 単位})$$

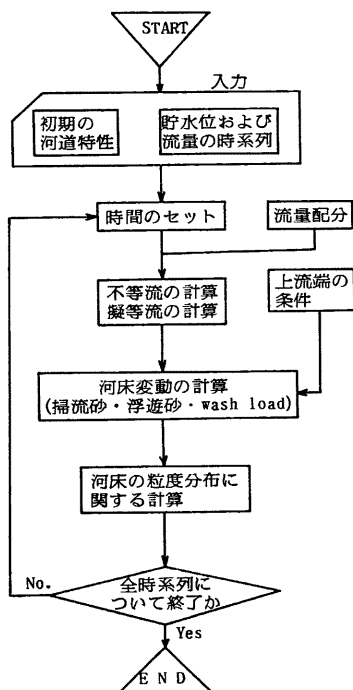


Fig. 7 Flow chart for calculation of sedimentation process in reservoir.

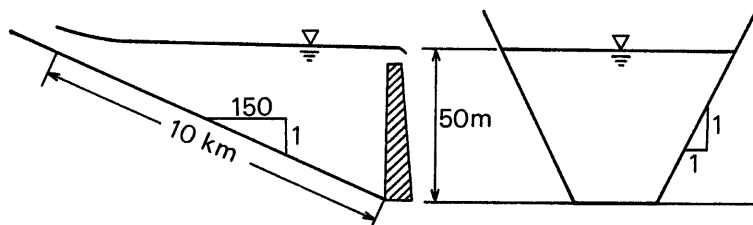


Fig. 8 Longitudinal and cross-sectional shapes of reservoir model.

Table 1 Representative diameters and their frequencies.

d_j (mm)	Percent	
	case (1)	case (2)
0.15	1	0
0.3	2	0.5
0.6	4	0.5
1.2	7	1
2.4	8	3
4.8	11	6
9.6	17	11
19.2	20	28
38.4	20	35
75.6	10	15

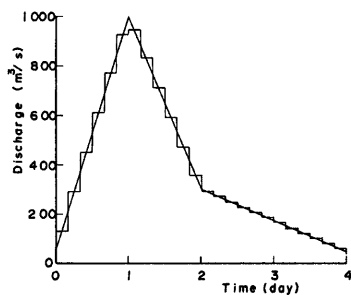


Fig. 9 Hydrograph of model flood.

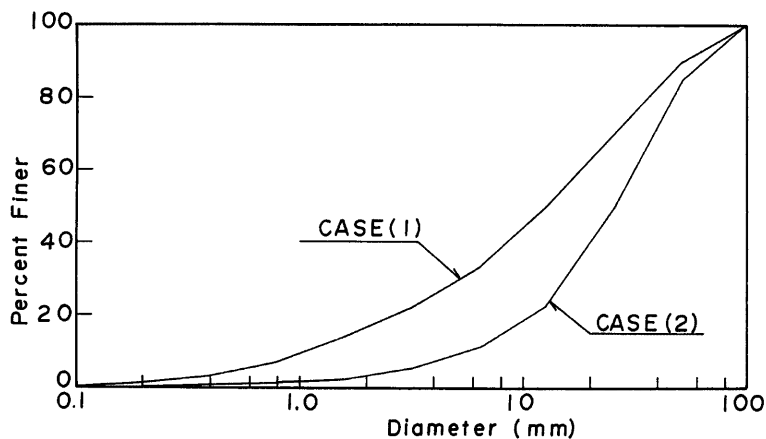


Fig. 10 Grain-size distributions used in calculation.

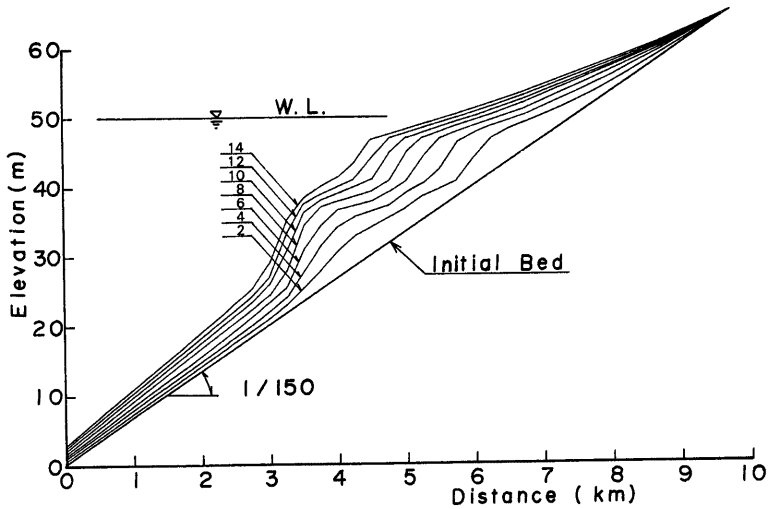


Fig. 11 Calculated result of sedimentation process, case (1).

を与え、貯水池区間 D における河床変動計算に必要な w_{fW} , K_W をそれぞれ 0.002 m/s および 1 とおいた。

初期状態における河道の河床材料の粒度分布としては、Fig. 10 に示された 2 種を考えた。case (1) と case (2) の粒度分布は、それぞれ同一の最大粒径 (100 mm) をもつが、前者は後者より細粒成分をかなり多く含むものとなっている。なお、計算においては、全粒径範囲を Table 1 に示すように 10 分割した。

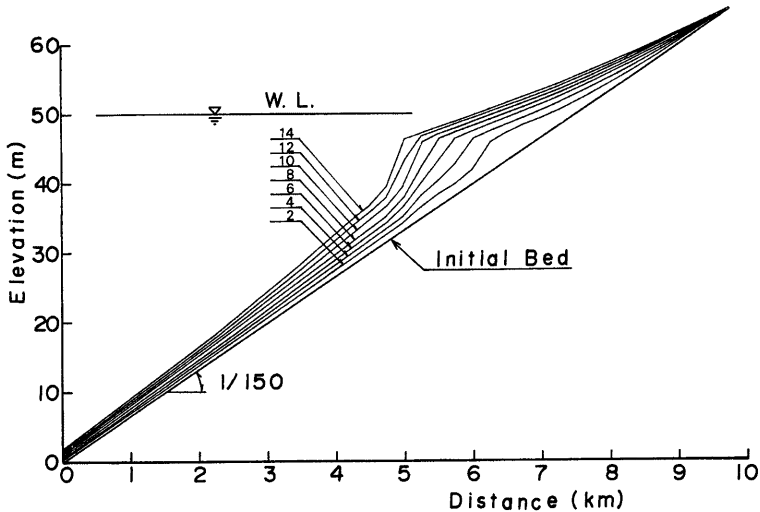


Fig. 12 Calculated result of sedimentation process, case (2).

計算用河道モデルを一定間隔 $\Delta x = 250 \text{ m}$ で配置した離散断面で代表させた。また、片押方式の計算の時間ステップ Δt は、 $Q \leq 400 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合に $\Delta t = 4 \text{ hr}$ 、 $Q > 400 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合には $\Delta t = 0.5 \text{ hr}$ とした。

Fig. 11 および12は、掃流砂量公式として芦田・道上式、浮遊砂量公式として道上式を用いた計算の結果求められた堆砂過程を示すものであって、洪水が2波通過することになる堆砂形状の変化を描いている。case (1) と (2) では粒度分布以外に関する条件がまったく同一であるから、上流の河床に細粒成分がより多く存在する前者の場合に、後者の場合よりも堆砂の進行が早くなることは当然であるが、堆砂層の形状にも著しい相違が現れている。すなわち、case (1) の場合、堆砂開始直後より2段のデルタが発達しはじめ、洪水が10回通過した時点で両者の区別が最も明瞭になり、その後は単一のデルタに統合される傾向となっている。これに対し、case (2) の場合には、単一のデルタが、その肩をほぼ同一の標高に保ち、またデルタの前面の勾配を次第に増加させながら発達している。これらの結果は、堆砂形状を的確に予測するためには、流入土砂の粒度組成をとくに慎重に与える必要があることを示唆している。ただし、wash load の堆積領域の形状には顕著な相違が見られない。

5. 結 語

以上、本論文では、河床変動論に基づく堆砂予測法の信頼性を高めることを目的とした研究について述べた。以下においては、その内容と成果を要約して結語とする。

まず、従来の堆砂予測においては、ほとんど経験的に取り扱われていた浮遊砂による河床変動の機構を土砂水理学的に考察し、非平衡な浮遊砂による河床変動が、(8)式に示されるように、底面における実濃度と平衡濃度の差で与えられることを示した。さらに、底面濃度の簡易算定法を検討し、その基礎式として(19)式を提案した。本式の妥当性は、これによる解と差分法によるものとを直接比較することにより検証された。

ついで、堆砂予測モデルを構成する河床変動量と粒度分布の計算式において、掃流砂、浮遊砂および wash load の効果を可能な限り実現象に近い形式で評価することを試みた。結果として、堆砂領域が上流側より i) 河道区間、ii) 貯水池区間 U および iii) 貯水池区間 D という3種の小領域に区分され、それぞれに対して別々の基礎式が与えられた。i), ii) および iii) の小領域に対する河床変動量と粒度分布の基礎式は、それぞれ(25)と(31)式、(26)と(32)式および(29)と(36)式のようなものである。なお、ii) に対する基礎式を i) に対しても適用し得ることは言うまでもない。

さらに、上述のモデルを片押方式の堆砂計算に組み込んで得られた数値計算例を紹介した。流入土砂の粒度組成が堆砂形状に著しい影響を及ぼすことが示された。今後は、本予測モデルを多くの実在貯水池に適用して、その有用性を検討してゆきたいと思っている。

最後に、本研究は、著者の一人岡部（現徳島大学）が昭和56年度文部省内地研究員として、砂防部門に在籍に行なわれたものであることを記して、関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 矢野勝正・芦田和男・大同淳之・前田武志：浮遊砂による貯水池の堆砂に関する研究，京都大学防災研究所年報，第7号，1964，pp. 348-364.
- 2) Kerssens, P. M. J.: Prins, A. Rijn, L. C.: Model for Suspended Sediment Transport, Jour. of ASCE, HY5, 1979, pp. 461-476.
- 3) Yalin, M. S. and G. D. Finlayson: On the Development of the Distribution of Suspended Load, Proc. of IAHR, Vol. 1, pp. 287-294.
- 4) 村本嘉雄・道上正規・藤田裕一郎：天ヶ瀬貯水池の濁水に関する調査研究，京都大学防災研究所年報，第17号B，1974，pp. 585-596.
- 5) 平野宗夫：Armoring をともなう河床低下について，土木学会論文報告集，第195号，1971，pp. 55-65.