

○ 関西電力株式会社 正員 千田 実
 京都大学 防災研究所 正員 芦田和男
 京都大学 防災研究所 正員 高橋 保

1. まえがき

ゲート操作により貯水池の水位を低下させて放流すると堆砂の形状は崩れ変形してゆくが、その場合流量によつて堆砂上に水みちが生じ、侵食形態は複雑な様相を呈する。また人為的に水位を急激に低下させ、堆砂を Dead Water 領域へ押し込めたり、貯水池が満砂状態となつているときにはゲートより排砂する必要がある。そのような場合、堆砂の形状および排砂量の解析的に予測することが、貯水池の有効利用の面から望まれる。貯水池内の堆砂形状の変動はデルタが形成・進行する堆積過程と、水位低下による侵食過程とに分けて考えることができる。堆砂過程においては従来多くの研究成果があり、その機構や予測法について比較的明らかにされているが、侵食過程では一般に流路の集中がおこり、断面の一部が低下して行き流路の側岸侵食の形で次第に全断面に侵食が及んでいく。このような場合の河床低下の予測法については未解明な点が少なくない。ここではこの問題について理論的・実験的研究を行った。実験は一様台形水路における堆積過程の実験および侵食過程の二様（河床が全般的に低下する場合と水みちが生じて側岸侵食のみまたは低下する場合）の実験と初期条件が i) 満砂、ii) 中間堆砂の場合について行い、理論的に導いた予測法の妥当性について比較検討した。

2. 堆積過程の理論

(1) 堆砂モデル 図-1, 図-2

(2) 流砂の連続式

$$\frac{d(\text{図形} ABCD \text{ の体積})}{dt} = A \quad \text{---(1)}$$

$$\frac{d(\text{図形} EBCD \text{ の体積})}{dt} = B \quad \text{---(2)}$$

$$\text{ただし } A = \frac{Q_{B_0}}{1-i} \quad \text{ここに } Q_{B_0} : \text{上流よりの流砂量}$$

$$B = \frac{Q_{B_f}}{1-i} \quad Q_{B_f} : \text{デルタ先端で流下する土砂量}$$

$$Z - Z_f = a(X - X_f)^n \quad \text{---(3)} \quad i : \text{空ゲキ率}$$

$$b \left\{ \frac{1}{n+1} (Z_0 - Z_f)(X_0 - X_f) - \frac{1}{2} i_0 (X_0^2 - X_f^2) + Z_f (X_0 - X_f) \right\} + m \left[\frac{1}{2n+1} (Z_0 - Z_f)^2 (X_0 - X_f) + \frac{1}{3} i_0^2 (X_0^3 - X_f^3) + Z_f (X_0 - X_f) - i_0 Z_f (X_0^2 - X_f^2) + \frac{2Z_f}{n+1} (Z_0 - Z_f)(X_0 - X_f) - 2i_0 \left\{ \frac{1}{n+1} (Z_0 - Z_f) X_0 (X_0 - X_f) - \frac{(Z_0 - Z_f)(X_0 - X_f)^2}{(n+1)(n+2)} \right\} \right] = \int_0^t A dt + C_B \quad \text{---(4)}$$

$$Z_f (b + m Z_f)(X_0 - X_f) - \frac{1}{2} (b + 2m Z_f) i_0 (X_0^2 - X_f^2) + \frac{1}{3} m i_0^2 (X_0^3 - X_f^3) = \int_0^t B dt + C_f \quad \text{---(5)}$$

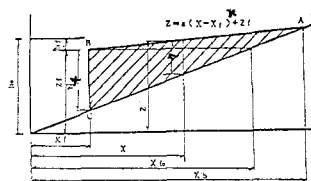


図-1 堆砂の所有モデル (上流に境界のない場合)

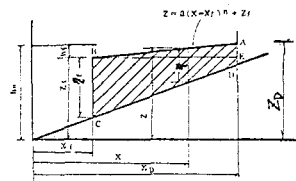


図-2 堆砂の解析モデル (上流に境界のある場合)

3. 侵食過程の理論

(1) 全幅侵食の場合

不等流の運動方程式

$$i = \frac{U_*^2}{gh} + L(X) \quad \text{---(6)} \quad \text{ここに } i = i_0 - \frac{1}{\alpha} \frac{Z}{X}$$

台形断面水路の河床幅

$$B = b + 2mZ \quad \text{---(8)}$$

流砂の連続式

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-i} \frac{1}{B} \frac{\partial (U_*^2 \times B)}{\partial X} = 0 \quad \text{---(9)}$$

掃流砂量式

$$Q_B = \rho F \cdot \frac{U_*^2}{(\rho/\beta - 1)\beta} \quad \text{---(10)}$$

抵抗則

$$U_* = g^{1/2} \cdot n \cdot \frac{Q_B^{1/2}}{\beta^{1/2}} \quad \text{---(11)}$$

河床変動の振散式

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{27}{5} m \cdot \frac{Q_B}{B^2} \frac{\partial Z}{\partial X} = \frac{21}{20} \frac{1}{1-i} \rho F \frac{Q}{(\rho/\beta - 1)\alpha B} \frac{\partial^2 Z}{\partial X^2} \quad \text{---(12)}$$

移流項を無視して

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{K_0}{1 + 2mZ/b} \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial X^2} \quad \text{---(13)} \quad \text{ここに } K_0 = \frac{21}{20} \frac{1}{1-i} \rho F \frac{Q}{(\rho/\beta - 1)\alpha B} \quad \text{---(14)}$$

m が小さいときの運動量小さいとき

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = K' \frac{\partial^2 Z}{\partial X^2} \quad \text{---(15)} \quad K' = \frac{21}{20} \frac{1}{1-i} \rho F \frac{Q}{(\rho/\beta - 1)\alpha B'} \quad \text{---(16)}$$

方程式の解

a) $B' = \text{const}$ 満砂 上流端半無限の場合

初期条件 $Z(X, 0) = 0$ } ---(17)

$$Z = Z_0 \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{X}{2\sqrt{K_0 t}}} e^{-\tau^2} d\tau \right) \quad \text{---(18)}$$

境界条件 $Z(0, t) = Z_0$

$$T_0 = \frac{-X}{2\sqrt{K_0 t}} \quad \text{---(19)}$$

b) $B' = \text{const}$ 満砂 上流端有限の場合

初期条件および下流端条件 ---- (17) と同じ 上流端条件 $\frac{\partial Z}{\partial X} = i_0 - i_c$ ---- (20)

$$Z = (i_0 - i_c)X + Z_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left\{-K_0 \left(\frac{2n-1}{2L}\pi\right)^2 t\right\} \frac{Z}{L} \left\{(i_0 - i_c)(-1)^{n+1} \left(\frac{2L}{(2n-1)\pi}\right)^2 - Z_0 \frac{2L}{(2n-1)\pi}\right\} \\ \times \sin \frac{(2n-1)\pi X}{2L} \text{ ---- (21)}$$

c) $B' = \text{const}$ 中間堆砂の場合

$$Z(X_f, t) = Z_0 + i_0 X_f \text{ ---- (22)}$$

$$X_f = \int_0^t w dt \text{ ---- (23)}$$

(2) 水みち侵食の場合

$$\text{水みち幅 } B_w \approx 5 Q^{1/2} \text{ ---- (24)}$$

B_w, Q は m, sec 単位

$$\text{水みち部の拡散係数 } K_{0w} = \frac{21}{2.0} \frac{1}{1-\alpha} \rho F \frac{Q}{(2F-1)\alpha B_w} \text{ ---- (25)}$$

図-3 満砂状態からの水位低下による河床変動の概念図

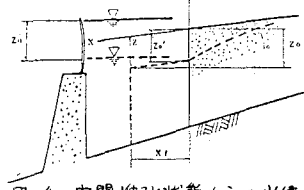


図-4 中間堆砂状態からの水位低下による河床変動の概念図

見かけ上の拡散係数

$$K_0' = K_{0w} \frac{B_w}{B'} \text{ ---- (26)}$$

4 実験的検討

水位低下に伴う堆砂の侵食過程に関して種々の境界条件の場合について研究を行いその特性を明らかにするとともに、その算定法を提案してその適合性を実験により確認した。

(1) 与えられた河道幅に対して(24)式で示される流量よりも大きい場合にはほぼ一様に低下する。一方小さい場合には、水みちが生じ、これが次第に拡がっていくという形で河床低下が生じる。

(2) 満砂状態からの全幅河床低下は(18)式によつて与えられる拡散方程式と(17)式あるいは(20)式の初期条件および境界条件のもとに解いて求められる。この場合の水位低下量が砂堆の高さに比して小さいかもしくは水路側壁この面がきついときには、拡散係数をほぼ一定とみなし(15)式による解析解を用いてせしめかえない。

(3) 中間堆砂状態からの全断面河床低下の場合の平均的河床縦断形状の時間的変化を表わしたものが図-5である。この図よりわかるようにデルタの肩の位置をほとんど上流部は侵食領域、下流部は堆砂領域となり、デルタの肩の位置近傍に河床高があまり変化しない点（一推の不動点）があらわれる。したがって侵食領域に対しては上述の(1)あるいは(2)の方法を、堆積領域に対しては堆積過程の計算方法を適用して堆砂形状を求めることができる。

(4) 水みち侵食が生じる場合における河床低下の特性を明らかにした。すなわち まず水みち部だけの河床が低下し、それは側岸侵食を伴って次第に全幅に及ぶ。図-6は水みちの主流部幅の時間的変化を示したものである。これによると水みちの主流部の幅は時間的、場所的にかなり変動しているように見受けられるが、時間とともに広がっていつたり、狭くなっていつたりする一定の傾向はみられず、平均的にはほぼ一定とみなしてもよいと考えられ、Regime Theoryによつて与えられたものとほぼ等しい。こうした場合の河床低下は、水みち幅と河道幅の比を導入した見かけ上の拡散係数(26)式を用いて算定することゝ可能である。

本研究は「ダム堆砂の排除に関する研究」の中の一研究であり、新日本技術コンサルタント 陳、中西両氏に負うところが多い。ここに深謝する。

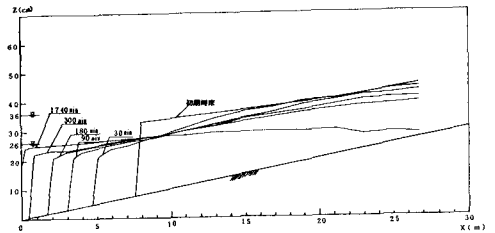


図-5 中間堆砂状態からの水位低下による砂堆変形過程の実験結果(水みちが生じない場合)

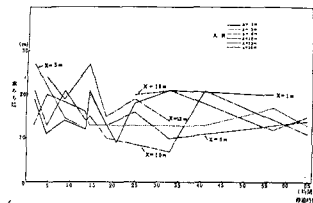


図-6 水みち幅の時間的変化

参考文献 1) 矢野、芦田、定道(1963)、ダム背砂に関する研究、京大防災研年報 2) 芦田(1967)、ダム堆砂に関する研究、京大防災研年報 3) 杉尾(1953)、堰上流の堆砂現象に関する実験、土木学会誌