

不侵食床の露出を伴う1次元河床変動の数値計算法

徳島大学工学部 正 員 岡部 健士

徳島大学大学院 学生員 山下 秀基

徳島大学大学院 学生員 ○松井 義幸

1. はじめに 山地河川では沖積河川には見られないいくつかの特徴がある。山地河川では、河床勾配や河幅が大幅に、かつ急激に変化するので、常流と射流が混在した流れが発生しやすい。また、河床は必ずしも全区間において厚い不安定土砂で構成されておらず、上流からの土砂の供給次第で、不侵食性の基岩床が露出したり、再被覆されたりする現象が各所で認められる。本文では、このような条件下の1次元河床変動の数値計算法を示すとともに、実験結果との比較を通してその有用性を検討する。

2. 基礎式 横からの流入がなく漸変流の仮定が適用できる1次元長方形開水路不定流の連続式と運動方程式は(1)および(2)のように記述できる。また、土砂の連続式は(3)式のようなものである。河床変動の計算は、(1)、(2)および(3)式に適当な流れの抵抗則と流砂量式を加え、これらを適当な初期条件と境界条件のもとで連立させて解くことに帰着する。本文の計算例では、抵抗則として対数型の(4)式、移動床土上の流砂量式として(5)式に示す芦田・道上式を用いている。しかし、固定床区間では、上流からの土砂供給量があたかもwash loadのように通過することもあり、通常の流砂量式をそのまま適用することはできない。そこで、流れが土砂を堆積させることなく輸送し得る限界の単位幅流砂量 q_T を定義し、ついで、掃流砂量 Bq_T と上流からの供給流砂量 Q_{BM} の大小関係によって(6)および(7)のように q_B を算定する。 q_T の評価法としては、すでに筆者らが提案している(8)式を用いた。なお、(8)式の各変数の意義については文献1)を参照されたい。

3. 計算法 数値計算には、流れの遷移断面付近における水理量の急変を、忠実に再現できるように注目されている、MacCormackの差分法²⁾にTVD型の人工粘性^{3) 4)}を付加したものを採用することにした。ただし、(3)式にMacCormack法をそのまま適用すると、計算

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\lambda}{1-\lambda} \frac{\partial}{\partial x} (Bq_B) \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = gA \left(-\frac{\partial H}{\partial x} - I_f \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial}{\partial x} (Bq_B) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{v}{u_*} = \frac{v}{\sqrt{g h I_f}} = 6.0 + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{k_s} \quad (4)$$

$$q_B = 1.7 \tau_{*c}^{1/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \sqrt{s g d^3} \quad (5)$$

$$Bq_T \geq Q_{BM} : q_B = q_T \quad (6)$$

$$Bq_T < Q_{BM} : q_B = Q_{BM}/B \quad (7)$$

$$\frac{q_T}{u_* d} = \frac{1}{\mu_*} \left(\frac{1}{\mu_{*n}/\mu_*} \right) (\tau_* - \tau_{*c}) f \left(\frac{u_* d}{\nu} \right) \quad (8)$$

$$\left\{ 1 - \sqrt{\frac{\mu_{*n}}{\mu_*}} \sqrt{\frac{C_{Dc}}{C_{Dn}}} \frac{f_c \left(\frac{u_* d}{\nu} \right)}{f \left(\frac{u_* d}{\nu} \right)} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right\}$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} B_i (1-\lambda) \Delta z_i = (Bq_B)_{i+1} - (Bq_B)_i \quad (9)$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} B_{i-1} (1-\lambda) \Delta z_{i-1} = (Bq_B)_i - (Bq_B)_{i-1} \quad (10)$$

$$\Delta z_i = (\Delta z_i)_1 + (\Delta z_i)_2 \quad (11)$$

$$z_i + (\Delta z_i)_1 = (z_i)_1 \quad (12)$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} B_i (1-\lambda) (\Delta z_i)_1 = (Bq_B)_{i+1} - \left\{ (Bq_B)_i + \frac{\Delta x}{\Delta t} B_i (1-\lambda) (\Delta z_i)_2 \right\} \quad (13)$$

$$\Delta z_{i-1/2} = \frac{B_i}{B_{i-1}} (\Delta z_i)_2 \quad (14)$$

t : 時間, x : 下流端からの距離, A : 流域, Q : 流量, λ : 空隙率, B : 河床幅, z : 河床位, g : 重力加速度, H : 水位, I_f : 摩擦損失勾配, q_B : 単位幅流砂量, v : 平均流速, u_* : みかけの摩擦速度, κ : Karman定数, k_s : 相当砂粒粗度, h : 水深, τ_{*c} : 無次元有効掃流力, τ_{*n} : 無次元限界掃流力, τ_{*c} : 無次元掃流力, s : 砂の水中比重, d : 砂の代表粒径, i : 下流から順に付した番号

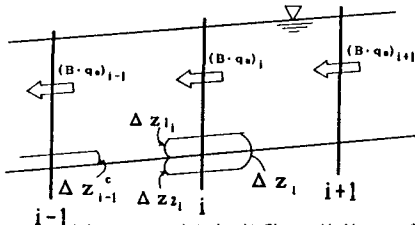


図-1 河床変動の計算モデル

上,ある(i)断面の河床高さ $z(i)$ がその断面の不侵食床高さ $z_r(i)$ 以下まで侵食される事態が起こり得る。このときには $z(i)=z_r(i)$ とする必要があるが,このような修正を施すだけでは,計算対象区間全域における土砂収支の合理性が損なわれる。そこで,以下のように流砂量にも修正を加えることにした。まず,河床変動の基礎式は,(i)および(i-1)断面についてそれぞれ(9)および(10)式のように離散化できる。いま,(i)断面で,図-1のように計算結果が不侵食床高さ $z_r(i)$ を下回った場合の河床変動量 $\Delta z(i)$ を(11)式のように $\Delta z_1(i)$ と $\Delta z_2(i)$ とに分けて考える。ここで, $\Delta z_1(i)$ を(12)式のように仮定する。つまり, $\Delta z_1(i)$ を不侵食床に到達するまでの河床変動量に設定し,もし計算結果が不侵食床以下となるような場合には, $\Delta z_2(i)$ がその不合理な変動量となる。次に,(11)式を(9)式に代入し,変形すると(13)式が得られることから, $\Delta z_2(i)$ が(i)断面の流砂量を減少させることが分かる。さらに,これらの修正は,下流側(i-1)断面の河床変動量 $\Delta z(i-1)$ に対して,(14)式に示された $\Delta z^*(i-1)$ の修正を加えることと同義である。

4. 実験結果との比較 実験には,図-2のような全長16m,10cm~40cmの範囲で河幅が変化する長方形断面・直線水路を用いた。下流端から4m~8mの高さ12cmの位置には,不侵食床を想定した合板をほぼ水平に設置し,図のような縦断形状で一樣砂を敷き詰めた。そして,上流から3.5l/sを通水し,15分,60分,180分における河床位と水位を計測した。計算値と実験値との全体的な合致は概ね良好である。しかし,細部では,180分における2m~4m付近での計算値と実験値との差異,さらに,いずれの時間においても水面形に若干の違いがみられる。水面形の不一致は抵抗則の問題であると考えられ,今後検討する必要がある。

5. おわりに 以上,不侵食床の露出がある場合の河床変動計算に対して,今回提示した計算モデルの有用性を示した。今後は,抵抗則の問題を検討し,この計算モデルを混合砂の問題に拡張していくつもりである。

[参考文献]

- 1)岡部健士・穴瀬康雄・山下秀基:滑面固定床上における堆積限界掃流輸送量,水工学論文集,第38巻,pp.633-640,1994.
- 2)日本機械学会:流れの数値シミュレーション,コロナ社,pp.106-108,1989.
- 3)潮田智道・河村三郎:一次元保存則系差分法による数値解析の際に生じる数値振動の除去法について,水工学論文集,第36巻,pp.349-354,1992.
- 4)D. M. Causon: High Resolution Finite Volume Schemes and Computational Aerodynamics, Non-linear Hyperbolic Equation theory, Computation Methods and Applications, Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vol. 24, pp.63-74, 1989.

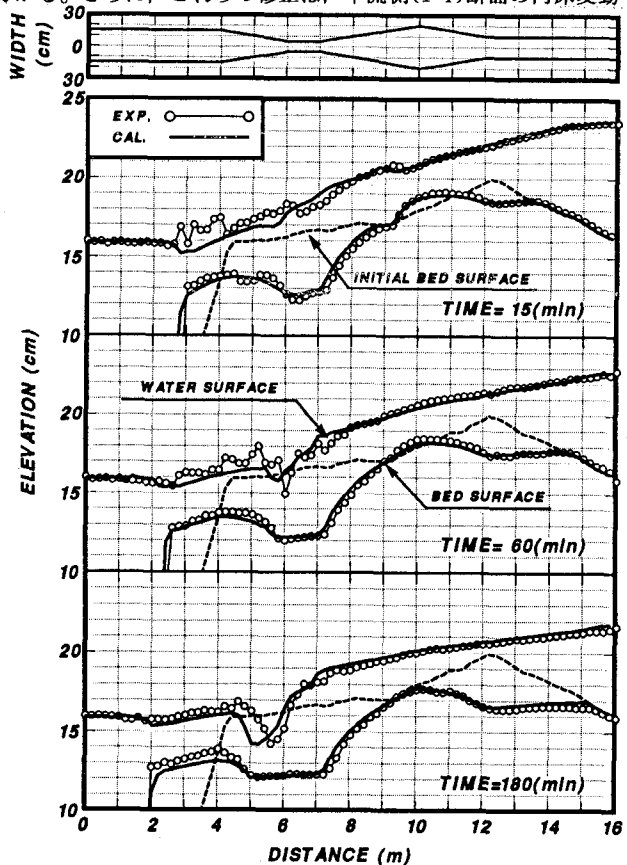


図-2 実験値と計算値の比較