

II-299

固定床の露出を伴う混合砂礫床の1次元河床変動計算法

徳島大学大学院 学生員 穴瀬康雄

徳島大学工学部 正会員 岡部健士

徳島大学大学院 学生員 榎本真二

1. はじめに 筆者らは、MacCormack法を用いて、常・射流混在場でも安定した解をもたらす混合砂礫床の1次元河床変動計算モデルを構築し、水路実験への適用を通してその妥当性を検証している¹⁾。一方、基岩床や排砂トンネルなどの固定床上の掃流砂量を算定する際に必要な指標である、滑面固定床上の流れが土砂を堆積させることなく流送しうる最大輸送量（以下、堆積限界掃流砂量と呼ぶ）の算定式を提案している²⁾。

本文では、これらを統合した計算モデルを用いて、水路実験の再現計算を行った結果を紹介する。また、TVD型の人工粘性に関する有用な知見を報告する。

2. 計算モデル モデルに用いた基礎式は、漸変流の仮定に従う不定流の連続式と運動方程式、そして、流砂の連続式と交換層の粒度分布変化式であり、(1)式～(4)式のように表示される。抵抗則には、粗面对数則を用い、移動床上の掃流砂量は芦田・道上の粒径別掃流砂量式によって算定した。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = gA \left(-\frac{\partial H}{\partial x} - I_f \right) \quad (2) \quad \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial (Bq_B)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial t} + \frac{1}{aB(1-\lambda)} \frac{\partial}{\partial x} (Bq_{Bj}) + \frac{P_j^*}{a} \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

ここに、 H : 水位、 I_f : エネルギー勾配、 P_j : 交換層の粒度分布、 a : 交換層厚、 q_{Bj} : 粒径別単位幅掃流砂量、 P_j^* : $\partial z / \partial t \geq 0$ のとき $P_j^* = P_j$ 、 $\partial z / \partial t < 0$ のとき $P_j^* = P_j^\circ$ 、ただし P_j° : 交換層直下の粒度分布である。(5)式は、堆積限界未満の混合砂礫が固定床上を流れている状態を表現したものであり、(6)式は、この流砂を伴う流れの平均流速を簡単に表記したものである。これらの具体的な関数形などについては前報³⁾などを参照されたい。本来ならば、上流からの流入土砂量を与条件として、(1)(2)(5)および(6)式は連立して解くべきであるが実用的ではない。ここでは、通常行われるように、相当粗度を適当に与えて流れは独立して解いたのち、エネルギー勾配を与条件とした(5)、(6)式の連立解をもとめ、 $\partial q_s / \partial u_{*b} = 0$ を満たす q_s を堆積限界掃流砂量とした。固定床上の掃流砂量は、この堆積限界掃流砂量と上流からの土砂供給量を比較して、前者が後者よりも小さければ堆積が生じるので移動床としての取り扱いをし、逆に大きければwash loadと同様に後者がそのまま通過すると考える。

$$q_s = \frac{u_*^2 - u_{*b}^2}{Sg \sum \mu_m (P_j / v_{sj})} \quad v_{sj} = f \left(\frac{u_* d_j}{\nu} \right) - \sqrt{\frac{\mu_m}{\mu_c}} f_c \left(\frac{u_{*c} d_j}{\nu} \right) \quad (5)$$

$$q = \text{function} \{ u_{*b}, h, u_*, d_m \} \quad (6)$$

ここに、 u_* : みかけの摩擦速度 ($= \sqrt{ghI_f}$)、 u_{*b} : 底面近傍の摩擦速度、 μ_m, μ_c : 砂礫の動・静摩擦係数、 v_{sj} : 粒径 d_j の砂礫の平均移動速度、 f, f_c : 流砂を伴う流れの流速分布関数および滑面对数則、 d_m : 混合砂礫の平均粒径である。

数値解法には、TVD型の人工粘性を付加したMacCormack法を用いた。種々のTVD型があるが、Causon⁴⁾はつぎのような形式を提案している。伝播方向が明らかでない一階波動方程式（変数 U ）の人工粘性項は次式で表される。

$$TVD_i = [G^+(r^+_i) + G^-(r^-_{i+1})] \{U_{i+1} - U_i\} - [G^+(r^+_{i-1}) + G^-(r^-_i)] \{U_i - U_{i-1}\} \quad (7)$$

$$G^\pm(r^\pm_j) = \frac{1}{2} \frac{\nu}{|U|} (1 - |r^\pm_j|) \{1 - \Phi(r^\pm_j)\} \quad (8)$$

$$r^-_i = (U_{i+1} - U_i) / (U_i - U_{i-1}) \quad (9)$$

ここに、 ν : クーラン数である。(7)式では、形式上、解の伝播方向が正あるいは負のみの場合の人工粘性が単純に足し合わされた結果となっており不合理である。そこで本モデルでは、 ν の正負に応じて G^+ あるいは G^- のいずれかの効果がなくなるように(8)式を次のように修正した。

$$G^{\pm}(r^{\pm}_i) = \frac{|\nu| \pm \nu}{4} (1 - |\nu|) \{1 - \Phi(r^{\pm}_i)\} \quad (10)$$

著者らがテスト計算を行ったところ、CausonによるTVDを付加したMacCormack法では、勾配の急変などの厳しい幾何条件を与えた場合でも、不定流の時間収束解として得られる不等流の水面形は十分満足のゆくものであった。しかし、流量は数値振動を起こしており、特に跳水部においては流入流量を基準にして10%程度の振幅を持っていた。それは時間とともに増長はしないようであるが、河床変動といった移動境界の問題に適用する際には発散する可能性を含んでいる。一方、修正を行うと、水位は前者同様で問題なく、流量の振動はほとんど見られなくなった。

3. 水路実験の再現計算 本モデルの妥当性を検討するために水路実験を行った。水路は図-1に示すような川幅が10cmから40cmの範囲で変化する直線水路である。下流から4～8mの間には、高さ11cm程度のところに、基岩を模した固定床を設置してある。実験砂は、粒径0.6～6.2mmの砂礫で構成される混合砂で、平均粒径は2.2mmである。実験は、河床を図-1に示すような初期形状に成形したのち、流入流量4.4 l/s、下流端を15cmに固定する条件で行った。そして、河床縦断面形および水面形の時間変化を観察した。

図-1において、実験値は描点で、実験値は実線で示されている。いずれの時間においても、河床形、水面形の適合性は概ね良好であり、数値振動も見られない。計算値は、時間経過に伴う固定床の露出や跳水の位置が下流に移動している現象など良好に再現している。

4. おわりに 水路実験の再現計算を通して本モデルの有用性が示された。今後は、人工粘性について残された問題について検討したい。また、基岩が再被覆される場合について検討する必要がある。

「参考文献」1) 松井・岡部・穴瀬: 常・射流混在流れによる混合砂礫床の1次元河床変動の数値計算法, 2-A, pp. 440-441, 1995. 2) 穴瀬・岡部・松井: 滑面固定床上の堆積限界掃流砂量, 第50回年講, 2-A, pp. 410-411, 1995. 3) 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.

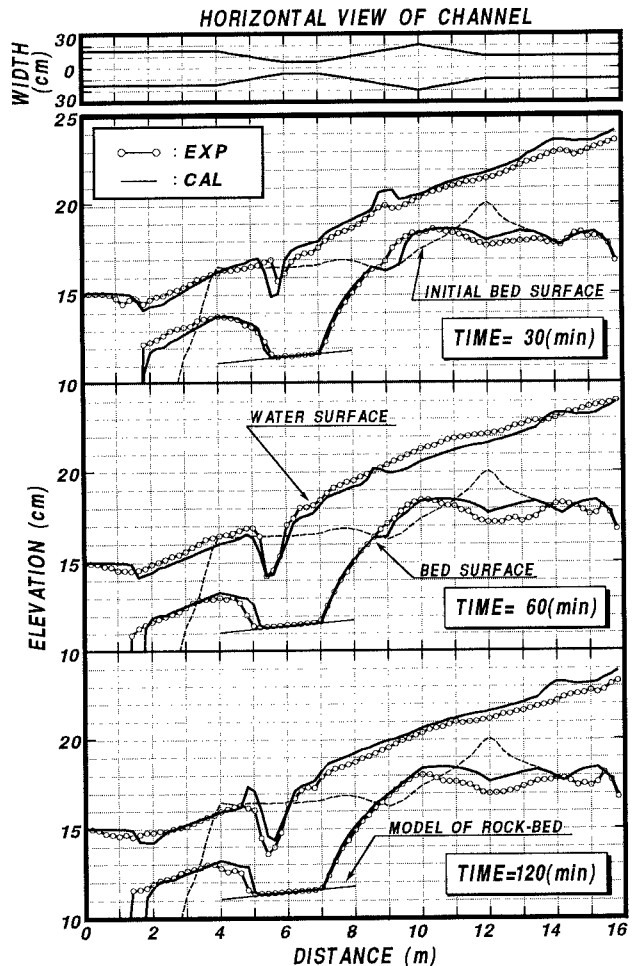


図-1 河床位と水位の縦断形状