

常・射流混在流の河床変動計算

岐阜大学 正 員 河村三郎

岐阜大学 正 員 中谷 剛

岐阜大学 学生員○前田哲史

1. 研究目的

従来、河床変動計算といえば1次元河床変動計算を意味し、縦断的な河床低下の予測や大規模に河道条件が変化する場合の河床変化の予測とその影響評価を目的として行われてきた。しかし、河川における河床変動現象の予測としては、大規模で縦断的な予測だけでなく、湾曲部や河川構造物周辺などの局所的な河床変動予測も重要である。近年では河川環境の整備という立場からもより高い精度の予測が必要となってきた。このような要求に対して既往の計算方法では跳水のような流れの遷移を伴う河床変動計算に十分対応できない。そこで、常・射流混在流の水面形計算に有効なMacCormack法を基にしたTVDスキーム¹⁾を河床変動計算に応用した。

2. 基礎方程式

【水面形の基礎式】

$$(連続式) \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

(x方向の運動方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{1}{2} g h^2 + g h z \right) + \frac{\partial u v h}{\partial y} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_\tau \frac{\partial u h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_\tau \frac{\partial u h}{\partial y} \right) - \frac{n^2 g u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

(y方向の運動方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial v h}{\partial t} + \frac{\partial u v h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + \frac{1}{2} g h^2 + g h z \right) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_\tau \frac{\partial v h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_\tau \frac{\partial v h}{\partial y} \right) - \frac{n^2 g v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここで、 z : 河床高、 h : 水深、 u : x方向の流速、 v : y方向の流速、 g : 重力加速度、 n : Manningの粗度係数、 ν_τ : 渦動粘性係数、である。また、 ν_τ は場所の関数であるが等方性乱流を考えればそのメカニズムはx、y方向で変わらない。

【河床変動の基礎式】

$$(流砂の連続式) \quad \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

(x方向の掃流砂量式—Meyer-Peter-Müllerの式)

$$q_{Bx} = 8 (\tau_{*e} - \tau_{*c})^{3/2} \sqrt{s g d^3} \quad \dots\dots\dots(5)$$

(y方向の掃流砂量式—長谷川の式²⁾)

$$q_{By} = q_{Bx} \left(\frac{v_b}{u_b} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z}{\partial y} \right) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 τ_* : 無次元掃流力、 τ_{*e} : 無次元有効掃流力、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力、 s : 河床材料の水中比重、 d : 河床材料の粒径、 μ_s および μ_k : 河床材料の静止および動摩擦係数、 u_b および v_b : xおよびy方向の河床近傍の流速、である。

3. 計算手法

差分スキームは2次精度のMacCormack法を採用する。この方法は跳水を伴う流れの計算に有効であるが、その際に物理的に無意味な数値振動を生じる。ここでは、時間分割法により基礎方程式をx方向とy方向に分割し、

それぞれの方向について流れの運動方程式をTVDスキームに書き換えて数値振動を制御した。x, y方向の差分演算子を $L_x(\Delta t)$, $L_y(\Delta t)$ のように表すと、解は以下の演算によって求められる。

$$S = \frac{1}{2} \{ L_x(\Delta t) L_y(\Delta t) U^n + L_y(\Delta t) L_x(\Delta t) U^n \} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、演算子の組み合わせ $L_y(\Delta t) L_x(\Delta t) U^n$ は、 $L_x(\Delta t) U^n$ の結果に $L_y(\Delta t)$ を作用させることを意味する。河床変動計算の計算手順は図-1に示すとおりである。

4. 計算結果

1次元河床変動計算の結果を図-2(a)に示す(計算条件は表-1)。この結果から、従来の方法では困難であった常・射流混在流の河床変動を安定に計算することができた。しかし、実験値との比較から固定床直下流部の局所洗掘以外の河床低下傾向は捕らえられているものの水面形に関しては再現しきれていない。そこで、図-2(b)のように局所洗掘の形状を実験値に一致させてみた。図中の▲が実験値を当てはめた箇所である。その結果、一度跳水が発生し、その後、再び常流から射流へと流れが複雑に変化していく様子がかかなり精度よく再現できた。河床変動計算を行う場合、1次元解析では再現しきれない局所洗掘などの洗掘孔の形状が大きな影響を及ぼすものと考えられる。さらに、2次元計算については、等間隔格子を用いたslip条件での計算は完成している。しかし、その条件下での計算では単に1次元の河床変動計算を横に並べたものと同様の結果となり、2次元計算をしたという意味が全く見られない。このことから、2次元計算を行う場合には、不等間隔格子を用いたnon-slip条件を適用する必要がある。現在、流れを任意直交座標系の基礎式を用いたnon-slip条件で計算を行い、また直線河道を対象としているので河床については直交直線座標系で計算を行っている。

参考文献 1) Harten A.: High Resolution Scheme for Hyperbolic Conservation Laws, J. of Comp. Physics, 49, pp. 357-393, 1983.
2) 長谷川和義: 非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究, 土木学会論文報告集, 第316号, pp. 37-50, 1981.

表-1 計算条件

初期河床勾配	$i=1/100$
流量	$Q=0.418(1/s)$
河床材料の比重	$\sigma=2.647$
50%粒径	$d_{50}=1.5(mm)$
90%粒径	$d_{90}=3.0(mm)$
CFL数	$\nu=0.4$
空間間隔	$\Delta x=0.1(m)$

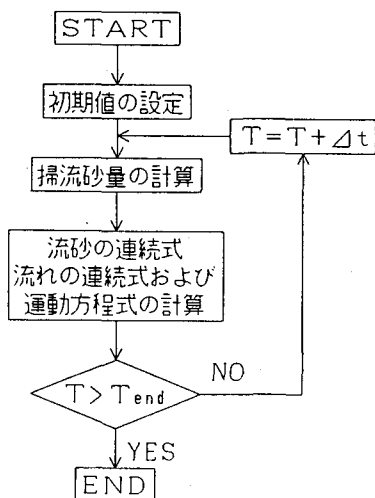


図-1 河床変動計算の流れ図

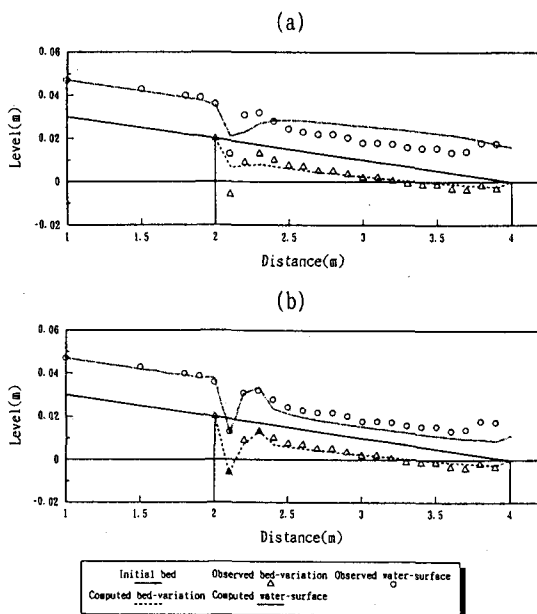


図-2 河床変動の数値実験例