

山地河川流路工の1次元河床変動計算

岐阜大学工学部 正 員 河村三郎
 岐阜大学工学部 正 員 中谷 剛
 岐阜大学工学部 学生員 沢田良二
 岐阜大学工学部 学生員 ○前田哲史

1. はじめに 山地河川流路工のような急勾配流路内の流れは常流・射流の混在する複雑な流れとなっており、常流区間あるいは射流区間を区別することが難しい。そこで、水面形計算では衝撃波獲得法として知られるMacCormack法を利用する。MacCormack法は、跳水を伴うような水面形の計算にも適用が可能であるため、この計算法と流砂の連続式を組み合わせることで、常流・射流の混在する複雑な流れ場でも差分スキームを変えることなく、上流側から下流に向かって河床変動計算を進めることが可能になると考えられる。

2. 差分式 基礎方程式は、流水の1次元運動方程式と連続式、および流砂の連続式である。MacCormack法は跳水のような水理学的に不連続な現象も再現することができるが、その場合物理的に意味の無い数値振動を生ずる。そのため、人工粘性項などを導入して数値的な不安定性を制御する必要があるが、本研究では差分スキームをTVD形式に書き換えて数値振動を抑えた¹⁾。2次以上の差分スキームでは非線形の制限関数を導入することによってのみTVDを安定化することができる。ここでは、制限関数(flux limiter)は何種類かが提案されているが²⁾、D.M.Causon³⁾と同様のものを使用した。

3. 跳水現象の計算例 TVD形式が、どの程度数値振動を制御できるかを斜面上の射流が水平床に達したとき生じる跳水を計算することで調べた。実験は、幅5cm、長さ380cmのアクリル水路内に勾配1/100, 1/50, 1/30, 1/20の水路と水平床の部分を製作し、2種類の流量で跳水を観測した。計算結果と実験値の比較を図1(a)から(d)に示す。

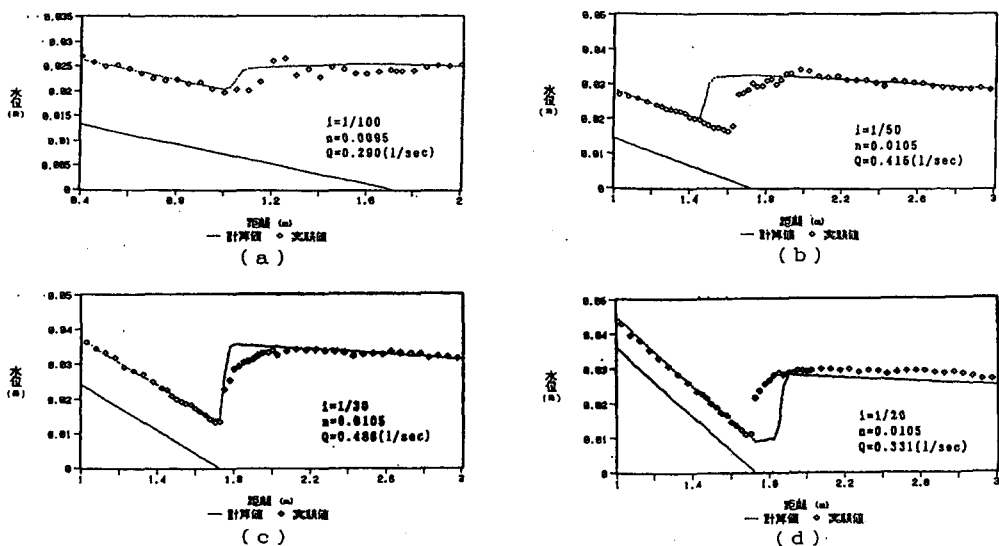


図-1 跳水の計算例 ($dx=0.025[m]$, $dt=0.01[sec]$)

以上の結果から判断して、TVD形式の差分スキームの導入によって無意味な数値振動はほとんど見られず、跳水後の水深は正確に計算が可能であることが分かる。しかし、跳水点の位置は勾配によって誤差が生じる。

これは、上流側のフルード数が1.5から2.5の範囲で行ったため、発生した跳水が波状跳水あるいは弱跳水と呼ばれるもので、安定した跳水ではない。そのため、計算では静水圧分布を仮定しているが、実際の跳水における静水圧分布の仮定に問題があると考えられ、そこで跳水位置のズレが生じたものと思われる。今後は、この点に改良を加えていく必要がある。

4. 河床変動計算 流砂の連続式の差分は計算の安定性を考慮し、Delft Hydraulic Laboratory Method⁴⁾のものを採用した。

$$Z_j^{n+1} = (1-\alpha) Z_j^n + \alpha (Z_{j+1}^n + Z_{j-1}^n) / 2 - \frac{\Delta t}{2 \Delta x} (Q_{b,j+1}^n - Q_{b,j-1}^n) \quad (1)$$

流砂は、山地河川流路工内のような流速などが場所的に変化する場合など水理量が空間的に変化する場合には、非平衡性が卓越していると考えられる。そこで、流砂量は以下に示す非平衡流砂量式を用いて求める⁵⁾

$$Q_{b,j}^n = Q_{b0,j}^n - E s \cdot Q_{b0,j}^n \left(\frac{Z_{j+1}^n - Z_{j-1}^n}{2 \Delta x} - \frac{Z_{0,j+1}^n - Z_{0,j-1}^n}{2 \Delta x} \right) \quad (2)$$

ここに、 Z ：河床高、 λ ：空隙率、 α ：緩和係数、 Q_b ：非平衡掃流砂量、 Q_{b0} ：有効掃流力と平衡流砂量から求められる流砂量、 Z_0 ：平衡河床位、 $E s$ ：河床変化の伝播速度や砂粒子のsaltation運動におけるstep-lengthなどから決定できる流砂の非平衡性を表す無次元パラメータ、である。

実験は幅5cm、長さ400cm、上流側200cmを固定床、下流側200cmを移動床の水路で行い河床変化を観測した。流量0.418[l/s]、勾配1/100、河床材料の粒径 $d_{50}=1.5$ [mm]、 $d_{90}=3.0$ [mm]、である。

計算方法は1次元解析法で、河床変動計算の時間間隔は $\Delta t=0.5$ [sec]とし、1回の河床変動計算後の水面形を $\Delta t=0.05$ [sec]間隔で40回繰り返すことで

求めた。 $\alpha=0.04$ である。図2に計算結果と実験値を示す。計算結果は、床固め工直下流部の局所洗掘を除いて全体的な河床低下傾向は再現できた。しかし、1次元解析法では局所洗掘などは表現できないので、そのために水面形や河床形状を正確には計算できていない。また、流路内に床固め工などの構造物がある場合、境界条件や計算条件の与え方が重要となる。

5. おわりに 1次元解析法を改良する方法として、局所洗掘深を推定するモデルとの組み合わせが考えられる。また、2次元的な影響が取り入れられる2次元解析法への拡張を考えている。

参考文献 1)Harten,A.:High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws,J.of Comp.Physics 49,pp.357-393,1983. 2)Sweby,R.K.:High Resolution Schemes Using Flux Limiters for Hyperbolic Conservation Laws,SIAM J.Numer.Anal.,Vol.21,No.5,pp.995-1011,1984. 3)Causon,D.M.:High Resolution Finite Volume Schemes and Computational Aerodynamics, Nonlinear Hyperbolic Equations-Theory, Computation Methods, and Applications, Notes on Numerical Fluid Mechanics,Vol.24,pp.63-74,1989. 4)Cunge,J.A.,Holly Jr,F.M.,and,Verwey,A.,:Practical Aspects of Computational River Hydraulics,pp. 287-294,1980. 5)木ノ瀬紘一、樽屋啓之、池田博嗣：非平衡掃流砂量の一表示法と河床変化、農業土木学会論文集第147号 pp.111-121

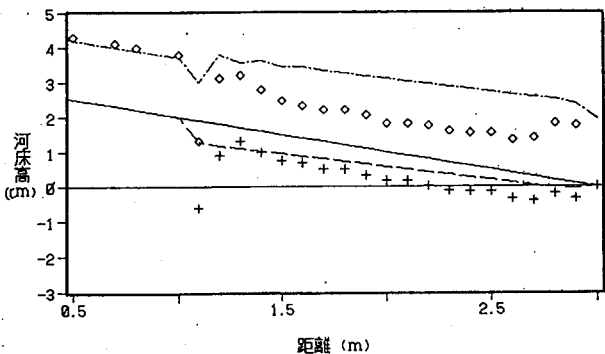


図-2 河床変動の計算例