

急勾配拡幅部における流れと河床変動の特性

神戸市立工業高専 ○日下部重幸
 鳥取大学 工学部 道上 正規
 京都大学 農学研究科 藤田 正治
 鳥取大学 工学部 檜谷 治

1. はじめに： 近年、溪流や河川の自然環境が重視され、その平面形状も複雑なものが計画されるようになってきている。本研究は、急勾配拡幅部における流れと河床変動の特性について実験的に検討し、それらをマッコーマック法を用いた二次元計算により再現することを試みたものである。

2. 計算方法： 基礎式は、図-1の座標系による二次元浅水流方程式と河床変動の式を保存形で表した次式を用いる。

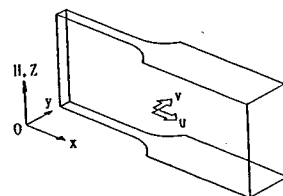


図-1 座標系

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = C + D$$

$$U = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \\ z \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \\ \frac{q_{Bx}}{1-\lambda} \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ \frac{q_{By}}{1-\lambda} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(I_x - I_{fx}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right\} \\ gh(I_y - I_{fy}) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \varepsilon \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \varepsilon \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right\} \\ 0 \end{bmatrix}$$

で、D:人工粘性項、h:水深、u,v:x,y 方向の流速、z:河床高さ、 q_{Bx} , q_{By} : x,y 方向の流砂量、 I_x, I_y : x,y 方向の水路勾配、 I_{fx}, I_{fy} : x,y 方向の摩擦勾配、 ε : 水平方向の渦動粘性係数である。これらの数値計算法としてはマッコーマック法を用い、人工粘性項 D には岡部ら¹⁾の提案した式を二次元に拡張して用いた。流砂量の式

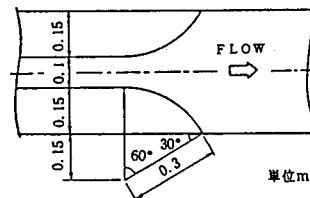


図-2 拡腹部の平面形状

には、芦田・道上の式を用い、横断方向には長谷川の式を適用した。境界条件は、上流端で 流量と流砂量を、下流端でせき上げ水深を与え、水路側壁部には slip 条件を用いた。

3. 実験方法および結果： 実験は、長さ 12m、幅 0.4m、深さ 0.4m の開水路を用い中央付近を幅 0.1m に縮小して図-2のような拡幅部を設置して下流側をせき上げた。移動床では、水路底に 0.05m 厚の一樣砂 ($d_m=1\text{mm}$, $\sigma=2.65$) を敷き、固定床と同様の流量を流し、上流端で平衡流砂量に近い $48.4\text{cm}^3/\text{s}$ を給砂した。条件を種々変化させて実験を行ったが、本研究では同一の水理条件でありながら固定床で複数の水面形が形成されるものを取り上げた。水路勾配 1/50、流量 3.9 l/s 下流端のせき上げ水深 0.05m、拡幅部終了点からせきまでの距離 0.65m のものである。この条件で固定床の実験を行うと、拡腹部付近で跳水を伴う水面形となるが、初期に与える僅かな条件の違いにより図-3の上段に示すような4種類の水面形が形成された。すなわち、板などで主流を右または左に向けると a または b、流れを慎重に調整すると c に示す水面形が出来、せきの高さを徐々に上げると d に示す水面形が得られた。これらの水面形のうち a、b は安定で、c は不安定、d は若干不安定な水面形である。一方、移動床では固定床と同様の水理条件で実験を行っても、ほぼ左右対称な河床の洗掘と堆積が起こり、水面形もほぼ左右対称な形状となる。実験開始から数分経過して比較的安定した河床の洗掘深と堆積高は、図-4の上段に示すようにほぼ左右対称なものとなる。

4. 数値計算および結果： 計算の距離間隔は $\Delta x = \Delta y = 2.5\text{cm}$ 、時間間隔は $\Delta t = 0.002\text{ s}$ とし、固定床での粗度係数 n および渦動粘性係数 ε は 0.01 および $10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$ とした。人工粘性係数は跳水を伴う一次元流れに対する最適な値²⁾を参考に 3.5 とした。また、固定床の計算では下流端を十分せき上げた状態から所定的水深まで徐々に低下させて、定常解が得られるまで計算を繰り返した。実験で得られた4種類の水面形の再現計算でも実験

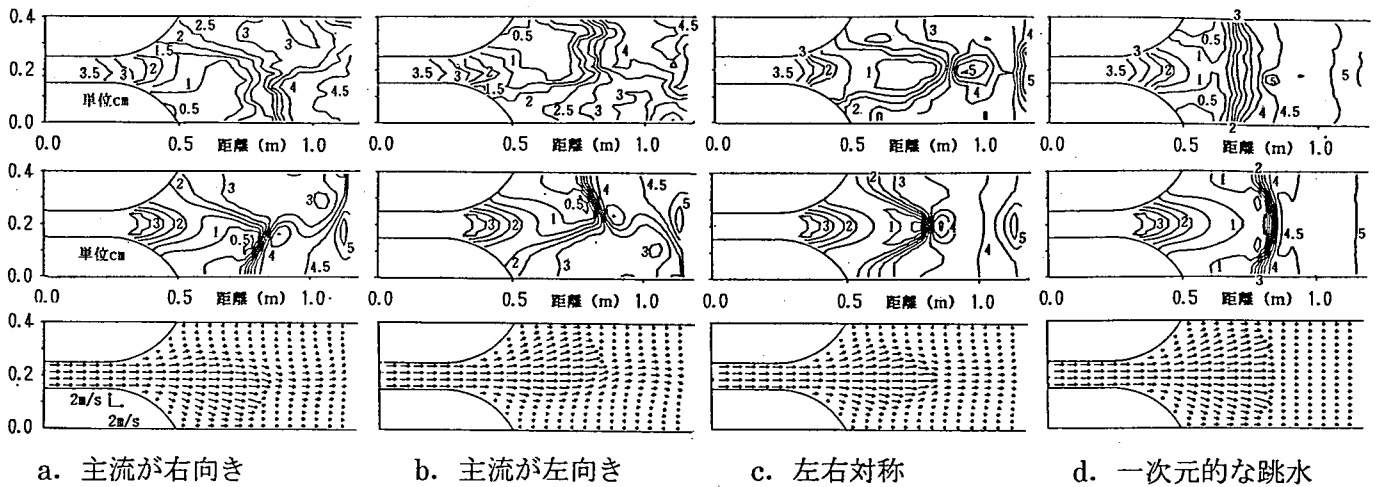


図-3 固定床で形成される水面形 (上段は実験結果の水深コンター図、中段は計算結果の水深コンター図、下段は計算結果の流速ベクトル図を示す)

と同様の条件を与えて計算することができた。計算結果は、図-3の中・下段に示すように特性が比較的良好に再現できている。水面形の安定性についても、実験と同様な傾向になることが再現計算でも得られている。³⁾

移動床の計算には、固定床の定常解を水面形の初期値として用いている。固定床については、前述のように実験・計算ともに4種の水面形が得られているので、初期値として4つの水面形から計算をすることが出来るが、どの水面形から計算しても河床が安定する頃には左右対称でほぼ同様な水面形と河床変動が得られる。主流が右向き (図-3 a) の初期値から計算した河床変動の計算結果を示すと図-4の下段のようである。河床変動の計算結果は、実験値に比べ洗掘・堆積ともに若干小さく厳密な再現性には欠けるが左右対称になる河床変動の特性は再現できていると思われる。図-5は、主流が右向きの初期値を与えて計算した場合の拡幅終了

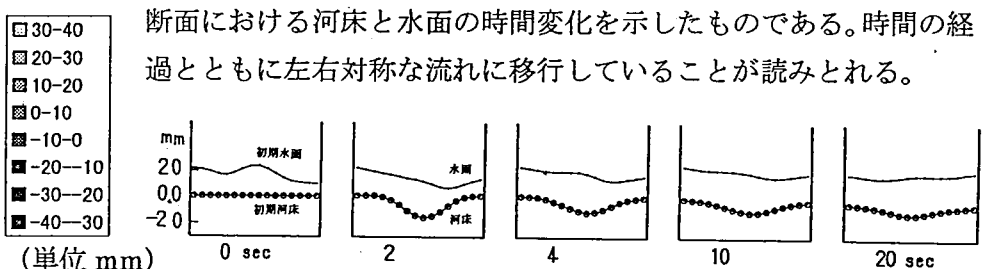
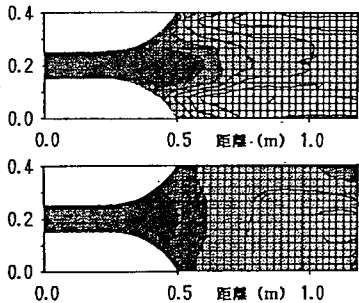


図-4 河床洗掘深コンター図 (洗掘-, 堆積+) 図-5 計算による河床と水面の時間変化

5. おわりに: 急勾配拡幅部の流れと河床変動の特性について実験および数値計算による再現計算を行った。得られた結果はつぎのようである。(1)下流を適当な高さにせき上げた固定床の場合、水理条件が同じでも途中で与える僅かな条件の違いにより、複数の水面形が形成されることがある。(2)これらは、実験とほぼ同じ条件を加えることで比較的精度よく再現計算をすることができる。(3)移動床の場合固定床と同様な水理条件でも水面形・河床変動ともに左右対称な形になることが実験的に確かめられた。(4)これも二次元マッコーマック法を用いてその特性は再現できるが、洗掘深や堆積高など再現精度についてはまだ十分とはいえず更に検討を加える必要があり、今後の課題である。

参考文献: 1)岡部・天羽・石垣: 上流・射流の遷移を伴う不等流の数値計算法について、水工学論文集第36巻、pp.337-342,1992.2. 2)日下部・道上・藤田・檜谷・宮本: マッコーマック法を用いた砂防ダム上流の堆砂計算法に関する研究、水工学論文集第40巻、pp977-982,1996.2. 3)日下部・道上・藤田・檜谷・宮本: 急勾配拡幅部の跳水を伴う流況とそのシミュレーション、水工学論文集第42巻、pp.661-666.1998.2