

二次元浅水流による河床変動解析に関する一層および二層モデルの比較

河川環境管理財団	正員	芦田和男
京都大学防災研究所	正員	江頭進治
ニュージェック	正員	劉炳義
J R 九州	正員	○瀧口将志

1. はじめに 流れおよび河床変動の数値解析モデルとしては様々なものが提案されている。これらは、目的に応じて使い分けられている。本研究においては、二次元浅水流一層および二層モデルを用い、蛇行流路における流れおよび河床変動に関する計算結果と水路実験の結果とを比較することにより、流れおよび河床変動の数値解析に関する検討を行う。

2. 流れの計算 二層モデルの流れの計算方法について述べる。一層モデルの流れの計算方法もこれとほぼ同様である。直交曲線座標系において、二次元浅水流二層モデルの連続式・運動方程式は(1)～(3)式で表わされる。ここに、 ℓ は層を示す指標であり、 $\ell=1$ は上層、 $\ell=2$ は下層を示す。渦動粘性係数の鉛直分布は(4)式で与え、上下層別に水深平均して用いる。河床せん断応力は(5)式で与え、また河床抵抗係数 c_f は対数則を用いて計算する。上層・下層間のせん断応力 τ_{sb1} 、 τ_{sa2} および τ_{nb1} 、 τ_{na2} については、(6)式で与えられると仮定する。ここに、 α は二層間のせん断応力の強度を示す無次元パラメータであり、主流方向に対数則分布を仮定し、さらに二次流が二層間のせん断応力に及ぼす影響を無視して、(7)式で与える。変数計算点の配置については、流速 u_s, u_n 、水位 z_s の計算点を互いにずらして配置したスタガード格子を採用する。運動方程式の差分については、移流項に関して風上差分、粘性項に関して中央差分をおこなう。流れの計算にはSIMPLER法を用いる。

$$\sum_{\ell=1}^2 \left[\frac{\partial(u_{\ell s} h_{\ell})}{\partial s} + \frac{\partial(u_{\ell n} h_{\ell})}{\partial n} + \frac{u_{\ell s} h_{\ell}}{r_n} + \frac{u_{\ell n} h_{\ell}}{r_s} \right] = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$S \text{ 方向: } u_{\ell s} \frac{\partial u_{\ell s}}{\partial s} + u_{\ell n} \frac{\partial u_{\ell s}}{\partial n} + \frac{u_{\ell s} u_{\ell n}}{r_s} - \frac{u_{\ell s}^2}{r_n} = -g \frac{\partial z_s}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\tau_{ss\ell}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\tau_{sn\ell}}{\rho} \right) + \frac{1}{h_{\ell}} \frac{\tau_{ss\ell} - \tau_{sb\ell}}{\rho} + \frac{2}{r_s} \frac{\tau_{sn\ell}}{\rho} + \frac{1}{r_n} \frac{\tau_{ss\ell} - \tau_{nn\ell}}{\rho} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$N \text{ 方向: } u_{\ell s} \frac{\partial u_{\ell n}}{\partial s} + u_{\ell n} \frac{\partial u_{\ell n}}{\partial n} + \frac{u_{\ell s} u_{\ell n}}{r_n} - \frac{u_{\ell n}^2}{r_s} = -g \frac{\partial z_s}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\tau_{nn\ell}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\tau_{sn\ell}}{\rho} \right) + \frac{1}{h_{\ell}} \frac{\tau_{nn\ell} - \tau_{nb\ell}}{\rho} + \frac{2}{r_n} \frac{\tau_{sn\ell}}{\rho} + \frac{1}{r_s} \frac{\tau_{nn\ell} - \tau_{ss\ell}}{\rho} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\epsilon = \kappa u_* z \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad \dots \dots \dots (4) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\tau_{sb1}}{\rho} = \frac{\tau_{sa2}}{\rho} = \alpha C_f (u_{1s} - u_{2s}) \sqrt{(u_{1s} - u_{2s})^2 + (u_{1n} - u_{2n})^2} \\ \frac{\tau_{nb1}}{\rho} = \frac{\tau_{na2}}{\rho} = \alpha C_f (u_{1n} - u_{2n}) \sqrt{(u_{1s} - u_{2s})^2 + (u_{1n} - u_{2n})^2} \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\tau_{sb}}{\rho} = C_f u_s \sqrt{u_s^2 + u_n^2} \\ \frac{\tau_{nb}}{\rho} = C_f u_n \sqrt{u_s^2 + u_n^2} \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots (5) \quad \alpha = \frac{u_s^2 + u_n^2}{(u_{1s} - u_{2s})^2 + (u_{1n} - u_{2n})^2} \cdot \frac{h_1}{h_1 + h_2} \quad \dots \dots \dots (7)$$

3. 河床変動の計算 底面流速の算定方法には、主流方向（流れの水深平均ベクトルの方向）については一層・二層モデルとも対数則分布を仮定し、相当粗度高さの流速を用いる。二次流方向（主流に直交する方向）については、一層モデルでは、一樣弯曲流路における発達したらせん流による底面流速式を、流線の曲率を考慮して用いる($N_*=7$)。二層モデルでは、二次流の鉛直分布形として(8)式に示すような半波長のコサインカーブを仮定し、底面流速として相当粗度高さのものをを用いる。ここに、 η は全水深と下層水深の比、 δ は全水深平均の流向がS軸となす角、 δ_2 は下層の流向がS軸となす角である。なお、本研究においては混合砂を対象としているので、河床材料は粒径別に離散化して扱う。流砂量式には、芦田・道上式に河床勾配を考慮したもの¹⁾を用いる。

$$u_h = \eta h \pi \sqrt{u_{s2}^2 + u_{n2}^2} \frac{\sin(\delta_2 - \delta)}{\sin(\eta h \pi)} \cos \left(\frac{z}{h} \pi \right) \quad \dots \dots \dots (8)$$

4. 計算結果 計算は、蛇行長220cm、最大蛇行偏角 35° のSine-generated curveが無限に連なった幅20cmの蛇行流路を想定し、その一波長区間で行った。初期河床勾配 $i=0.01$ 、流量 $Q=3.6(1/s)$ 、平均粒径 $d_m=1.7mm$ 、標準偏差 $\sigma=(D_{84}/D_{16})^{1/2}=2.2$ である。

図-1は、平坦床底面流速に関する一層・二層モデルの比較である。これによると、二層モデルでは側壁周辺で二次流が弱くなっている。また、二層モデルにおいては流路形状に対して約 60° の二次流位相遅れが算定されていることが分かる。実際の現象では、二次流の発達域は、流路形状に対して位相遅れを有している。従って、二層モデルの方が、より合理的であると考えられる。

図-2は、混合砂からなる河床の平衡河床形状について、一層・二層モデルによる計算値と実験値²⁾とを比較したものである。最大洗掘深については、両モデルともほぼ実験値と等しい値が得られている。最大堆積厚については、一層モデルの結果は実験値とほぼ等しいが、二層モデルにおいては実験値の約2分の1程度に算定されている。堆積・洗掘位置は、両モデルともに、実験値より下流側にずれている。これは、両モデルともに、底面流速が適切に算定されていないことを示している。一層モデルにおいては、一樣弯曲流路における発達したらせん流の分布式を用いているが、その式の適用性、およびそれを用いる際の曲率の評価が問題であると思われる。一方、二層モデルにおいては、二層間の抵抗係数の評価が問題であると思われる。

図-3は、二層モデルにおける二層間の抵抗係数が平衡河床形状に与える影響を調べるために、式(7)より求める値を用いて計算したもの、およびその2分の1の値を用いて計算したものを比較したものである。これより、二層間の抵抗係数が、堆積・洗掘位置に大きな影響を与えていることが分かる。

5. おわりに 以上に示したように、浅水流一層モデル・二層モデルを用いて、蛇行流路における河床変動解析を行った。全体的に見れば、両モデルともに現象をある程度再現しているが、堆積・洗掘域が実験値と一致しない問題点がある。これは、底面流速の評価に問題があると思われる。底面流速の評価方法については、二層モデルの方がやや合理的であると思われるが、今後、二層間の抵抗係数の評価法について検討する必要がある。

参考文献 1) 劉炳義：複断面河道における流砂と河床変動に関する研究、京都大学学位論文、1992 (in English) 2) 芦田和男・江頭進治・劉炳義・梅本正樹：蛇行流路におけるSorting現象および平衡河床形状に関する研究、京都大学防災研究所年報、第33号、1990

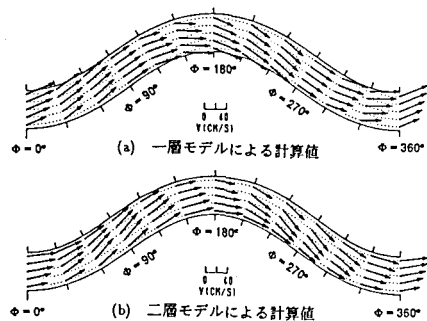


図-1 平坦床上の底面流速に関する一層モデルと二層モデルの比較

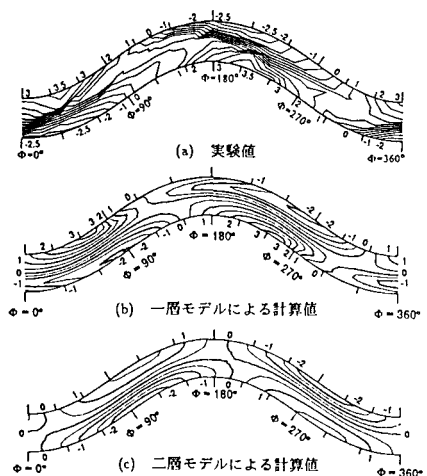


図-2 混合砂よりなる河床の平衡河床形状に関する、実験値と一層モデルおよび二層モデル計算値との比較

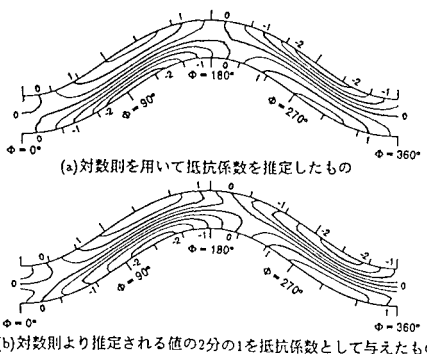


図-3 平衡河床形状に対する上・下層間の抵抗係数の影響