

II-293 任意の法線形を持つ混合砂礫床河道の流れと河床変動解析モデル

ニュー・ジェック 正 員 劉 炳義

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

1. はじめに 本研究は、複断面河道のような複雑な境界形状を持つ混合砂礫床河道における流れおよび河床変動の解析に適用できる汎用性のある数値解析モデルを開発することを目的としている。

2. 支配方程式 流れ場の算定には、Boundary-fitted 直交曲線座標系における二層モデル¹⁾が用いられている。連続式および各層の運動方程式は次のように与えられる。

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

$$u_{\ell} \frac{\partial u_{\ell}}{\partial s} + v_{\ell} \frac{\partial u_{\ell}}{\partial n} + \frac{u_{\ell} v_{\ell}}{r_s} - \frac{v_{\ell}^2}{r_n} = -g \frac{\partial z_s}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\tau_{ss\ell}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\tau_{sn\ell}}{\rho} \right) + \frac{1}{h_{\ell}} \frac{\tau_{sat} - \tau_{sbl}}{\rho} + \frac{2}{r_s} \frac{\tau_{sn\ell}}{\rho} + \frac{1}{r_n} \frac{\tau_{ssl} - \tau_{nn\ell}}{\rho} \quad (2)$$

$$u_{\ell} \frac{\partial v_{\ell}}{\partial s} + v_{\ell} \frac{\partial v_{\ell}}{\partial n} + \frac{u_{\ell} v_{\ell}}{r_n} - \frac{u_{\ell}^2}{r_s} = -g \frac{\partial z_s}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\tau_{nn\ell}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\tau_{sn\ell}}{\rho} \right) + \frac{1}{h_{\ell}} \frac{\tau_{nat} - \tau_{nbl}}{\rho} + \frac{2}{r_n} \frac{\tau_{sn\ell}}{\rho} + \frac{1}{r_s} \frac{\tau_{nn\ell} - \tau_{ss\ell}}{\rho} \quad (3)$$

ここに、 ℓ は層を示す指標、 $u_{\ell s}$, $u_{\ell n}$, h_{ℓ} はそれぞれ第 ℓ 層の $s \cdot n$ 方向の流速および水深、 z_s は水位、 r_s , r_n はそれぞれ s -line と n -line の曲率半径、 $(\tau_{ss\ell}, \tau_{nn\ell})$ と (τ_{sbl}, τ_{nbl}) はそれぞれ第 ℓ 層の上・下面に働くせん断応力の s 、 n 方向成分、 $\tau_{ss\ell}$, $\tau_{nn\ell}$, $\tau_{sn\ell}$ はそれぞれ第 ℓ 層の乱れによる応力の平均値の各成分である。

このモデルは、デカルト座標系を用いたものに比べ、河道形状の表現、計算格子の配置、境界条件の処理などにおいて有利である。また、従来の浅水流モデルに比べ、二層モデルの優れた点は、次のようなものである。すなわち、複断面蛇行流路のように水深が急変するような場での境界条件を適切に表現できること、および河床変動を支配する底面流速を合理的に評価できることである。

河床変動の解析においては、河床材料の粒度分布の時・空間変化も考慮されている。河床材料を離散変量として扱い、質量保存則より、河床位方程式および河床の粒度分布式は、それぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \sum \left(\frac{\partial q_{bsk}}{\partial s} + \frac{\partial q_{bnk}}{\partial n} + \frac{q_{bsk}}{r_n} + \frac{q_{bnk}}{r_s} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_{bk}}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)E_m} \left(\frac{\partial q_{bsk}}{\partial s} + \frac{\partial q_{bnk}}{\partial n} + \frac{q_{bsk}}{r_n} + \frac{q_{bnk}}{r_s} \right) + \frac{1}{E_m} \frac{\partial z_b}{\partial t} \{ \eta p_{bk} + (1-\eta) p_{bk0} \} = 0 \quad (5)$$

ここに、下付き k は粒径階の指標、 t は時間、 λ は河床材料の空隙率、 z_b は河床位、 q_{bsk} , q_{bnk} はそれぞれ粒径階 D_k の $s \cdot n$ 方向の単位幅流砂量、 p_{bk} は交換層の粒径階 D_k の含有率、 p_{bk0} は混合層の下層(遷移層とする)の粒径階 D_k の含有率、 E_m は混合層の厚さ (D_{90} とする)、 η は係数、侵食の時 $\eta = 0$ 、堆積の時 $\eta = 1$ である。縦・横断方向の粒径別流砂量は底面流速の流向および河床勾配を考慮した式¹⁾を用いて求められる。

3. 格子の生成 計算格子の生成法 (grid generation method) には、解析的な方法と代数的な方法とに分けられる。ここでは、解析的な方法を用いて、ラプラス方程式の境界値問題を解くことによって求められている (詳細は参考文献 1) に参照されたい)。図-1 は本計算法によって形成された蛇行低水路を有する複断面蛇行流路の直交曲線格子である。以下に示す計算はこの格子を用いて行ったものである。

4. 計算方法 流れの計算には、S.V.Patankar によって提案された SIMPLER 法、且つ各変数の計算には ADI 法を用いる。二次元河床変動の計算を行う際に、流砂量の計算点や差分法の選定の違いによっていくつかの方法が考えられる。二、三の方法で比較計算を行った結果、式 (1) を図-2 に示すコントロール・ボリュームについて積分することによって得られた差分式を用いる方法が最も安定性に優れ、且つ流れの状態 (射流か常流か) によらず収束解が求められることが明らかになった。一方、河床表層の粒度分布の計算に関しては、従来の混合層の概念に遷移層と堆積層を導入する方法¹⁾が用いられている。

5. モデルの検証 図-3 は図-1 に示された複断面蛇行流路における平坦河床上の流速分布の実験結果と計算結果とを比較したものである。ただし、流路の境界条件および水理条件は、水路全幅 100cm、蛇行低水路幅 20cm、高水敷高 3cm、蛇行長 220cm、最大蛇行偏角 35°、河床勾配 0.01、流量 7.15(ℓ/s) である。図示のように、低水路と高水敷における流れの相互作用によって、高水敷上の流れも蛇行していることや低

水路の凹岸側付近に低流速領域が形成されていることなどの複断面蛇行流の諸特性が本計算モデルによってよく再現されていることが分かる。

図-4と図-5はそれぞれ上記の複断面蛇行流路の低水路における平衡河床形状と河床表層の平均粒径分布の計算結果と実験結果とを示している。実験条件は、流量 $8.3(\ell/s)$ 、平均粒径 1.7mm 、標準偏差（ $=D_{84}/D_{16}$ ）2.2、 $D_{90}=4\text{mm}$ である。これらの図の比較より、全体のパターンとしては、計算値と実験値はほぼ一致していることが分かる。しかし、洗掘・堆積域については、計算値の方がかなり下流へシフトしている。これは、計算モデルにおいて流れの上下層間のせん断応力の評価や底面流速の算定などに問題があることを意味していると思われる。今後、これらの問題点について検討し、モデルの改良を図っていく必要がある。

6. おわりに 以上に示したように、浅水流二層モデルを基礎として、河床材料の粒度分布の時・空間変化も算定できる二次元河床変動の数値解析モデルを開発した。本数値解析モデルは、Boundary-fitted 直交曲線座標系を採用しているため、蛇行流路のような規則的な平面形状をもつ流路は言うまでもなく、任意の形状の流路にも容易に適用される利点を持っている。このように、本モデルは混合砂礫床からなる複断面河道のような複雑な場での流れおよび河床変動を予測するには非常に有効であると考えられる。

【参考文献】 1) 劉炳義: Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels、京都大学学位論文、1991。

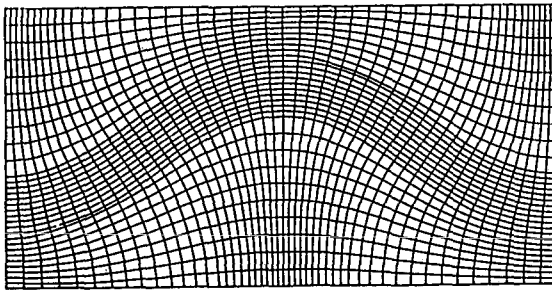


図-1 Boundary-fitted 曲線直交格子

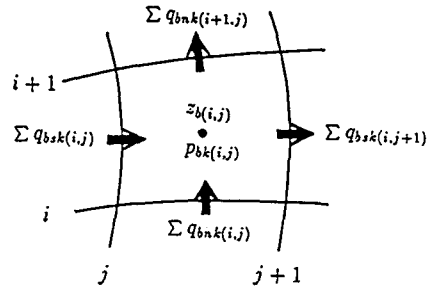


図-2 河床変動計算の模式図

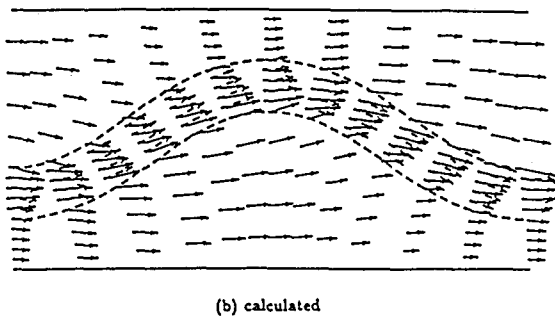
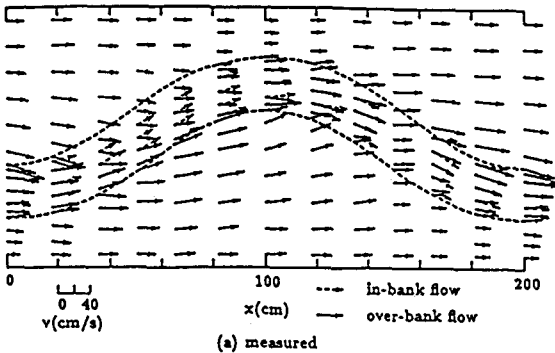


図-3 流れ場の実験値と計算値との比較

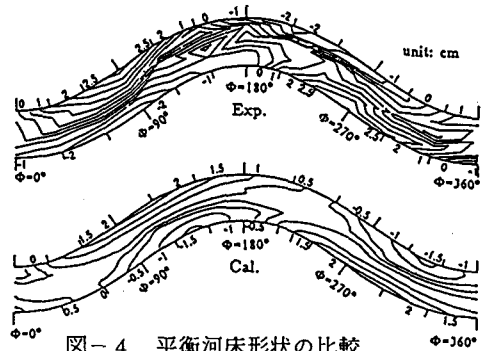


図-4 平衡河床形状の比較

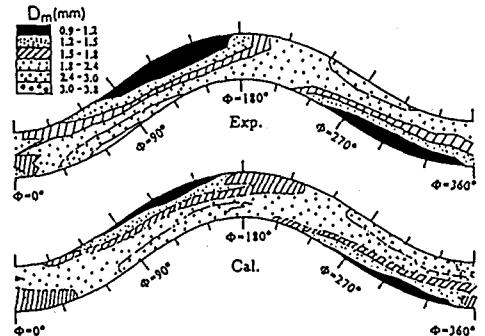


図-5 河床表層の平均粒径の比較