

植生を伴う流れ場の数値シミュレーションに関する研究

愛媛大学工学部 正 員 鈴木 幸一
群馬大学工学部 正 員 清水 義彦
愛媛大学大学院 学生員 石丸 久人
飛鳥建設(株) 正 員 山本 修

1. 序 論 実河川の河床や河川敷には植生群落や灌木などがしばしば見られる。それが河川流に及ぼす影響を及ぼすかは河川水理学上重要な問題となる。本研究は十分発達した植生粗度を有する乱流場の構造について数値計算的に検討を進めたものである。

2. $k-\varepsilon$ 乱流モデルにもとづく形状抵抗を導入した流れの数値計算法 植生粗度による形状抵抗を考慮した開水路流れの基礎式に乱流のクロージャ-モデルとして $k-\varepsilon$ モデルを採用すると、以下のように定式化できる。

平均流の輸送方程式

$$\frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} = gI_0 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x} - F_x + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2\Gamma \frac{\partial U}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \Gamma \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial y} - F_y + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \Gamma \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ 2\Gamma \frac{\partial V}{\partial y} \right\} \quad (2)$$

乱れエネルギー(k)の輸送方程式

$$U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + P_k - \varepsilon + C_{rk}(F_x U + F_y V) \quad (3)$$

逸散率(ε)の輸送方程式

$$U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} \{ C_{1P_k} - C_{2\varepsilon} + C_{rd}(F_x U + F_y V) \} \quad (4)$$

$$P_k = \nu_t \left\{ 2 \left(\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right\}, \quad \Gamma = \nu + \nu_t \quad (5)$$

連続式

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

ここに、 U, V : 平均流の流下(x)・鉛直(y)方向速度成分、 I_0 : エネルギー勾配、 P' : 静水圧からの偏差分、 F_x, F_y は粗度による x, y 方向の形状抵抗であり、 A を流体の単位体積あたりに占める粗度要素のしゃへい面積、 C_{Dx}, C_{Dy} をそれぞれの形状抵抗係数として次式で与える。

$$F_x = (1/2)C_{Dx}AU\sqrt{(U^2+V^2)}, \quad F_y = (1/2)C_{Dy}AV\sqrt{(U^2+V^2)} \quad (7)$$

また、 ν_t は乱流渦動粘性係数でLaunderらにより $\nu_t = C_\mu k^2/\varepsilon$ として与えられる。さらに、形状抵抗項に関わるパラメータのうち $C_{Dx}=1.0$ (円柱の抗力係数に等しい)、 $C_{Dy}=0$ とし植生域での各格子点には形状抵抗に関わるパラメータに上述の値を設定し、非植生域では 0 として計算する。

3. 植生粗度の特徴づけられた平衡乱流場に関する数値計算結果

$k-\varepsilon$ 方程式中の形状抵抗項にかかるパラメータの値は $C_{rk}=0.07, C_{rd}=0.16$ 程度で植生粗度流れを水理条件にかかわらず表現できることがわかった。これらの値を用いてプロベラ流速計によって計測された平均流速分布の実測値と計算結果を図-1に示す。

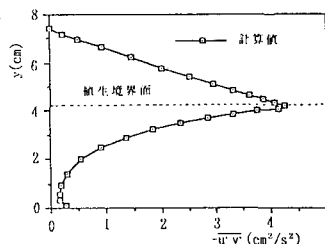


図-2 レイノルズ応力分布

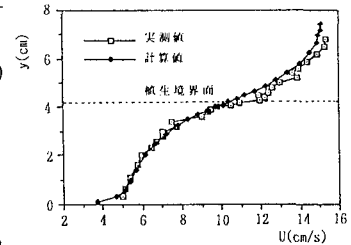


図-1 平均流速分布

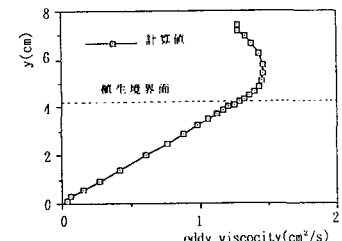


図-3 渦動粘性係数分布

平均流速分布は良好に再現される。また、一成分計測では求められないレイノルズ応力や渦動粘性係数の分布も数値計算から推定できる(図-2,3)。すなわち、各種乱流統計量の分布を上記の計算手法から求めることが可能である。中川ら(1990)¹⁾の計測によると、植生粗度内のレイノルズ応力分布は指数関数を用いて近似可能であることを見出している。

すなわち、

$$-\rho \overline{u'v'} = -\rho \overline{u'v'}_{(k)} \cdot \exp\{\alpha(k-y)\} \quad (8)$$

ここに、 α は減衰係数、 $-\rho \overline{u'v'}_{(k)}$ は植生頂部でのレイノルズ応力である。図-4は数値計算結果を片対数用紙にプロットしたものであるが、ほぼ直線上に集まり指数関数近似を矛盾なく説明できることが分かる。

4. k - ϵ モデルによる浮遊砂の乱流フラックスと濃度分布の推定

乱流場の運動量輸送はレイノルズ応力によって受け持たれる。一方、浮遊砂の輸送は浮遊砂の乱流フラックスによって受け持たれる。浮遊砂は水深全体にわたる乱流場の性状に敏感に反応しながら輸送されるものであるから、乱流構造の変化に着目して植生のある場合の浮遊砂乱流フラックス分布を求めてみる。まず、植生の存在によってレイノルズ応力分布がどのように歪められるかを求めるため、植生によるレイノルズ応力分布の逓減率を $\Omega(\eta) \equiv \tau(\eta)/\{\tau_0(1-\eta)\}$ ($\eta=y/H$; H は水深、 $\tau_0=\rho gH$; g は重力加速度)と定義し、片対数用紙にプロットした(図-5)。この図から次の指数関数形による近似が可能と考えられる。

$$\Omega(\eta) = \exp\{\gamma(\eta - \eta_k)\} \quad (0 < \eta < \eta_k; \eta_k = k/H) \quad (9)$$

また、数値計算結果より得られたパラメータ γ と hI_e/k の関係を図-6に示す。植生がない場合の平衡時における浮遊砂乱流フラックス($\Psi_0(\eta)$)はよく知られているように次式の形で書ける。

$$\Psi_0(\eta) = C_{a0} v_p \exp(-E_0 \eta) \quad (10)$$

ここに、 $E_0 = v_p H / \epsilon_{s0}$ 、 $\epsilon_{s0} = k u_{*0} H / 6$ であり、 C_{a0} は $y=0$ での平衡状態での基準面濃度、 v_p は浮遊砂の沈降速度である。植生が存在する場合の浮遊砂乱流フラックスの逓減率がレイノルズ応力の逓減率に等しいものとすれば、植生が存在する場合の浮遊砂乱流フラックスは $\Psi(\eta) = \Omega(\eta) \Psi_0(\eta)$ と書けるであろう。浮遊砂の乱流拡散係数 ϵ は v_t に等しいとして、濃度分布は次式から求められる。

$$C(\eta) = -\frac{H}{\epsilon} \int_0^\eta \Psi(\zeta) d\zeta + C_a \quad (11)$$

C_a は基準面濃度であり、図-7,8に示すように乱流フラックス分布と濃度分布が推定される。

5. 結論

k - ϵ モデルにもとづく植生流れの数値計算から幾つかの乱流特性を見出すことができた。今後は推定された浮遊砂輸送の特性を実験より確認したいと考えている。

参考文献

- 1) 中川, 辻本, 清水: 植生を伴う開水路流れの構造に関する研究, 水工学論文集第34巻, 1990.

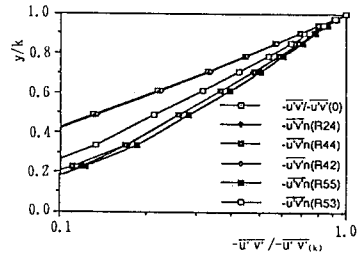


図-4 植生層内でのレイノルズ応力分布の変化 ($-\overline{u'v'}_{(k)}$ で無次元化)

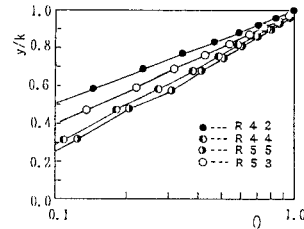


図-5 植生層内でのレイノルズ応力分布の逓減率 ($\Omega(\eta)$) の変化

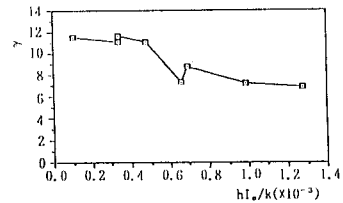


図-6 γ と hI_e/k との関係

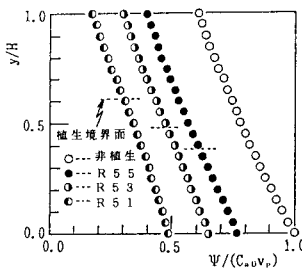


図-7 乱流フラックス分布

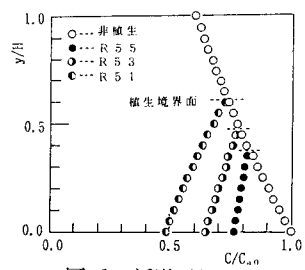


図-8 浮遊砂濃度分布