

直立性植生上の流れの特性と k - ε 乱流モデルの適用

金沢大学工学部 正員 辻本 哲郎
 金沢大学大学院 学生員 ○北村 忠紀
 金沢大学工学部 学生員 岡田 敏治

1. まえがき

植生のような透過性の粗度を有する流れ場では植生層（透水層）内の流れと表面流との相互作用により流れ場が形成され、特に植生層内では表面流の早い流速に引きずられた乱流クエット流が形成される¹⁾。本研究ではこのような流れ場を形状抵抗を考慮した乱流モデルにより再現計算し、滑面・植生面縦断遷移流れ場の実測値と比較・検討する。

2. 形状抵抗を考慮した k - ε モデルによる流れ場の計算

植生による形状抵抗項を考慮した開水路流れの基礎式に k - ε 乱流モデルを取り込むと、x（流下）、y（鉛直）方向の平均流（U, V）の輸送方程式、乱れエネルギー（k）、逸散率（ε）の輸送方程式及び連続式はそれぞれ次のように定式化される²⁾。

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = g I_0 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} - F_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\Gamma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \Gamma \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} \quad (1)$$

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

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

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

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

ここに、P_kは乱れエネルギーの生成項で、

$$P_k = \nu_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (6)$$

ρ：水の密度、g：重力加速度、I₀：エネルギー勾配、Γ ≡ ν_t + ν、ν_t：渦動粘性係数、ν：動粘性係数、p'：静水圧からの偏差、F_x, F_y：植生粗度によるx, y方向の単位質量当りの形状抵抗で、抵抗係数C_{dx}, C_{dy}を用いて次のように与える。

$$F_x = (1/2) C_{dx} \lambda U \sqrt{U^2 + V^2} \quad ; \quad F_y = (1/2) C_{dy} \lambda V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (7)$$

ここに、λ：植生密度（水の単位体積当りの障害物の遮蔽面積）である。渦動粘性係数はν_t = C_μ k² / εとして与え、C_μ = 0.09、C₁ = 1.44、C₂ = 1.92、σ_k = 1.0、σ_ε = 1.3は標準型k - εモデルの推奨値とした。

3. 滑面・植生面縦断遷移流れ場の実測値と数値計算の比較

実験は長さ12m、幅40cmの可変勾配式直線水路内の路床にアクリル板を敷き、水路上流端から6mの地点より下流側に模擬植生として高さ（K=4.6cm）のそろった竹製円柱（直径D=1.5mm）を等しいスペーシング（中心間隔をs=2cmとする正方形配置、植生の密度λ ≡ D/s² = 0.0375 cm⁻¹）で植え付けて行なった。模擬植生は流れに対して変形しない剛なものである。路床勾配i_b = 1/1000、水位は植生高さ以上にし、縦断水面形は植生粗度上でほぼ等流となるように調整した（このため、滑面部では等流水深が植生部に比べて小さいことからやや堰上げ気味となる）。植生粗度部の水深は約9cmである。流速測定には直径3mmの超小型アロペラ流速計を用い、水路中央部において縦断方向に数断面測定した。図1、図2に平均流速分布、乱れ強度（流速変動の標準偏差）分布の実測値を示す。図より、滑面部では路床を壁面と感ずる通常の開水路壁面乱流としての特徴が確かめられる。また、植生部に入ると流速分布は植生頂部付近で変曲点を持つ分布が徐々に形成

され、乱れ強度は徐々に植生頂部付近で大きくなる。このことから植生部ではレイノルズ応力が植生頂部付近で最大となり、すなわち植生頂部を壁面と感じる流れが徐々に形成されていくものと推定され、さらに植生頂部に働くせん断応力は滑面での壁面に働くせん断応力に比べかなり大きなものであることが推定される。

数値計算はImperial CollegeのTEACHコード³⁾を修正して行なった(禰津・中川⁴⁾の方法を参考にした)。植生のある領域には式(7)と同様に円柱の抗力係数程度の C_{dx} を与え、植生の無い領域には C_{dx} を0とする(C_{dy} は常に0)。k, e方程式中の形状抵抗項にかかる係数 C_{rk} , C_{re} はそれぞれ0.10, 0.12とした。これらは、本実験水路全面に模擬植生を敷いた等流状態の流れ($i_b=1/1000-7/1000$, $H/K=1.5-2.0$)に対してk-e乱流モデルにもとづく計算が実測値とよく一致するように定められたものと同程度の値である。計算領域は滑面・植生面の境界から滑面側に30cm, 植生面側に100cmとした。上流側流入部には滑面対数則を与えた。

計算結果を図1, 図2に併示した(乱れ強度分布については計算された乱れエネルギーをRodi⁵⁾の応力代数関係式を用いて配分して評価した。計算値は滑面部でやや乱れ強度が実測値より小さくなるもののほぼ実測値を表わしている。図3・図4にレイノルズ応力及び渦動粘性係数の計算結果を示す。

4. あとがき

数値計算ではあらかじめ計算領域を設定してやらねばならず現象の予測は行えないが、水理実験とうまく組み合わせることで水理実験では測定困難な量を推定することができる。今後、上記の数値計算の妥当性をさらに検討するとともに計算結果を利用して植生のある流れ場の浮遊砂濃度分布などを調べて行きたい。

参考文献 1)清水・辻本・中川(1990)水講34, 2)清水・辻本・北村(1991)水講35, 3)Gosman & Iderish(1976) Imp. Col. Tech. Lon., SW7, 4)禰津・中川(1987)土論387, 5)Rodi(1976) ZAMM56.

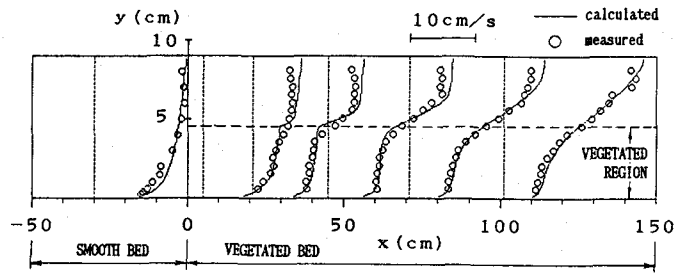


図1 平均流速分布の実測値と計算結果

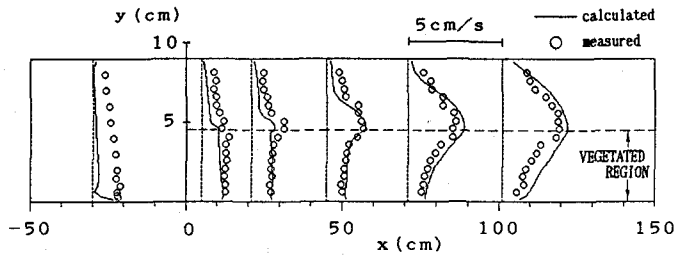


図2 乱れ強度分布の実測値と計算結果

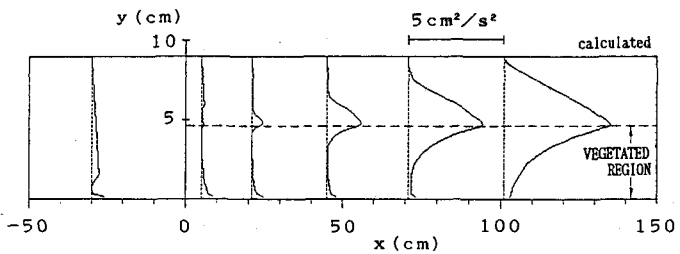


図3 レイノルズ応力の計算結果

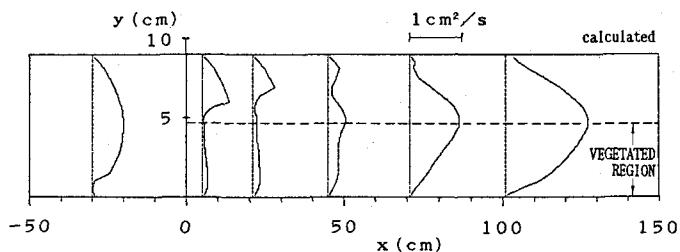


図4 渦動粘性係数の計算結果