

k-εモデルによる植生のある急勾配流れの乱れ特性予測

東北大学工学部 ○平田吉成・真野明・有働恵子・呉修一

背景

植生のある開水路の流れ予測は治水、利水、親水等の目的から数多くの研究がされてきた。題目である植生のある急勾配流れの予測が可能となればそれに対応した状況、例えば堤防越流時の侵食予測が可能になる。特に近年においては局地的豪雨や大雨の頻発により計画高水位超過洪水の危険性が増していることから、この研究への需要は高まると考えられる。

これらの研究の流れ予測は数値解析で行われている。乱流の数値解析においては計算時間が短く、モデルも簡易であるk-εモデルが広く用いられているが、精度の高い予測は困難である。特にk-εモデルを使った植生のある急勾配流れの高精度予測はできていない。そのような中で様々な手法が提案されk-εモデルの改良が行われている。

目的

本研究ではk-εモデルでの高精度予測が困難である、植生のある急勾配流れの乱れ強度予測を改善する事を目的とする。そのために他の論文で提案されているk-εモデルの改良手法を佐藤の用いた式に適応させ、予測精度を高めていくことを基本的な手段とする。

既往研究と提案モデル

植生のある緩勾配流れの予測は清水¹⁾らなどによって多くの研究がなされており、流速、乱れ強度共に高精度の予測をすることができるようになった。しかし植生のある緩勾配流れの予測に比べ、植生のある急勾配流れの予測に関する研究はかなり少ない。

佐藤²⁾は堤防越流を想定した、植生のある開水路での流れと侵食を測定する実験をし、その結果をk-εモデルで予測する研究を行った。彼の実験は堤防を越流した流れが裏法面を流れる現象をモデル化したものである。実験開水路は水路長4.2m、水路幅0.2m、勾配1/10に設定し、植生のモデルは竹ひごを用いて路床全面に2cm間隔で高さ3cmの円柱状のものを千鳥状に配置、流量は5,8,11 m³/s、固定床に用いる砂の粒径は0.1,0.2,0.3mmのそれぞれ3パターンで行われた。計算モデルは一般的なk-εモデルを等流を仮定して1次元化したモデルに植生項を加えたモデルを使用し、植生による抵抗で受ける力と、それによって発生する乱流エネルギーを考慮している。このモデルにより流速を高精度で予測することができたが、乱れ強度の予測は精度が良くなかった。佐藤の植生を考慮1次元k-εモデルを以下に示す。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = g \sin \theta + \frac{\partial}{\partial y} \left((\nu_t + \nu) \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{1}{2} C_{dx} \lambda U \sqrt{U^2} \quad (1)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\nu_t}{\sigma_K} + \nu \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon + C_{fk} \left(\frac{1}{2} C_{dx} \lambda U^2 \sqrt{U^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \nu_t \frac{\varepsilon}{K} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{K} + C_{f\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} \left(\frac{1}{2} C_{dx} \lambda U^2 \sqrt{U^2} \right) \quad (4)$$

key words: canopy flow, k-ε model, turbulence property

連絡先 東北大学災害科学国際研究所災害リスク研究部門災害ポテンシャル研究室

hirata12@potential1.civil.tohoku.ac.jp

ここに、 U, V は流下方向、垂直方向の時間平均流速 (cm/s)、 x, y は流下方向、底面からの鉛直方向距離 (cm)、 K は乱れエネルギー (cm^2/s^2)、 ε は乱れエネルギーの散逸率 (cm^2/s^3)、 ν は動粘性係数 (cm^2/s)、 ν_T は渦動粘性係数 (cm^2/s)、 λ は植生密生度 (cm^2/cm^3) を表し、係数 $C_\mu, C_1, C_2, \sigma_K, \sigma_\varepsilon, C_{dx}, C_{fk}, C_{f\varepsilon}$ はそれぞれ 0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3, 1.3, 0.15, 0.16 とする。これらの式を時間については前進差分、空間については中央差分で離散化し、計算を行った。

Katul³⁾らは植生の抗力によって伴流が生じる際にできる、急速に散逸する小さな渦が持っている乱流エネルギーを考慮に入れたモデルを提案した。この手法により Katul は過去の実験データ、及び従来のモデルと比較し、流速、乱れエネルギー、レイノルズ応力の予測精度が向上した事を確認している。この研究では佐藤の使用したモデル、式(3),(4)の右辺に、Katul が提案した手法、式(5),(6)を新たに加えたモデルを使用した。

$$-\beta_d \left(\frac{1}{2} C_{dx} \lambda |U| \right) K \quad (5) \quad -\beta_d C_5 \left(\frac{1}{2} C_{dx} \lambda |U| \right) \varepsilon \quad (6)$$

Katul が用いた係数 C_5 、 β_d は佐藤のモデルに適応させ、次のように定義した。

$$C_5 = \frac{C_{f\varepsilon}}{C_{fk}} \quad (23) \quad \beta_d = C_\mu^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\alpha'} \right)^{\frac{2}{3}} C_{fk} + \frac{3}{\sigma_k} \quad (24)$$

各係数、数値計算方法は佐藤と同様のものを用いる。

結果

提案モデルの値、佐藤の計算モデルの値、実験で計測された値を比較した図を次に示す。

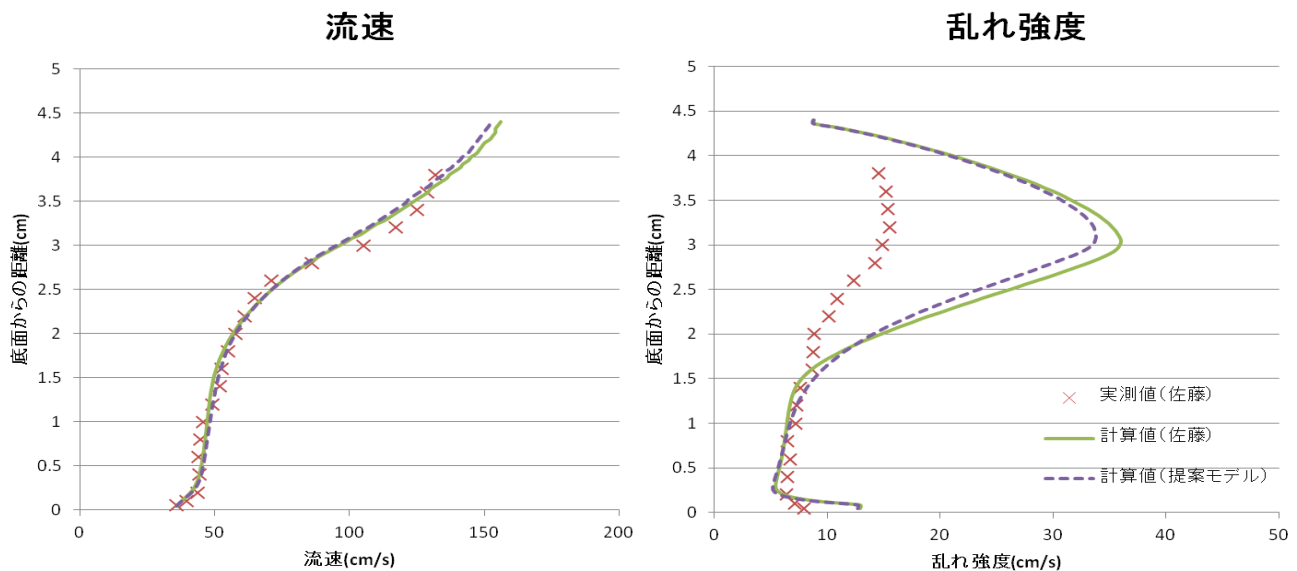


図 1. 粒径 0.2mm、流量 8L/s での流速及び乱れ強度の実測値と提案モデルの計算値

図 1 は粒径 0.2mm、流量 8L/s での結果を示している。流速分布は佐藤の結果とほとんど変わらなかった。乱れ強度分布は最大値付近で改善したが、改善された値は僅かであった。

今後は他の手法を用いて、乱れ強度の予測精度向上を図る。

参考文献 1)清水義彦:直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究 水工学論文集第 44 巻,1992

2)佐藤元泰:越流による堤防裏面侵食に及ぼす植生の影響に関する基礎的研究 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文,2012

3)Gabriel G. Katul One-and two equation models for canopy turbulence Boundary-Layer Meteorol. 113, 2004