

II - 260

k-ε 乱流モデルによる開水路凹部流れの乱れの解析

日水コン 正 員 池上 迅 神戸大学工学部 正 員 神田 徹
 岐阜大学工学部 正 員 藤田一郎 神戸大学工学部 正 員 宮本仁志
 神戸大学大学院 学生員 小出大輔

1. はじめに

筆者らは、これまで開水路凹部区間において画像解析手法を用いて流れの特性を調べるとともに、3次元k-ε乱流モデルによる現象の再現性を検討してきた¹⁾。本稿では、主に乱流量についてk-εモデルの解析結果を示すとともに、段上がり部周辺における乱流エネルギーの分布の再現性について検討する。

2. 数値シミュレーションの概要

対象とする開水路凹部形状の模式図を図-1に示す。流入水深 H_0 、断面平均流速 U_0 を用いて物理量を次のように規準化する。【座標】 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) = (x/H_0, y/H_0, z/H_0)$ ，【平均流速】 $(\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{W}) = (U/U_0, V/U_0, W/U_0)$ ，【乱流エネルギー】 $\tilde{k} = k/U_0^2$ ，【乱流エネルギー散逸率】 $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon H_0/U_0^3$ ，【渦動粘性係数】 $\tilde{\nu}_t = \nu_t/U_0 H_0$ 。計算方法・境界条件は前報¹⁾と同じである。計算条件は、レイノルズ数は $Re = U_0 H_0 / \nu = 3800$ ，凹部深さは $\tilde{D} = D/H_0 = 2/3$ ，凹部長さは $\tilde{L}_l = L_l/H_0 = 20/3$ ，凹部幅は $\tilde{L}_w = L_w/H_0 = 20/3$ とし、凹部上流端で剥離した流れが凹部底面で再付着する流れを考える。上記の諸式において“ $\sim$ ”を冠した量が無次元量である。

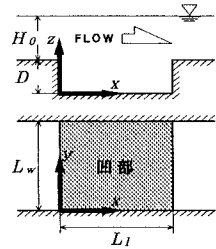


図-1 凹部形状

3. 計算結果

平均流速 $\tilde{U}$ 、 $\tilde{W}$ についてk-εモデルによる計算結果とPIVによる実験結果を図-2に示す。凹部の浅い本ケースでは、段落ち部で剥離した流れが凹部床で再付着する。計算値と実験値を比較すると、流速 $\tilde{U}$ については良好な一致がみられる。また、流速 $\tilde{W}$ については、上流側凹部の死水域において若干の差はあるが、その値が主流速 $\tilde{U}$ の5%程度の微小流速であることを考慮すると概ね良好に現象を再現していると考えられる。

図-3, 4に乱流エネルギー $\tilde{k}$ および渦動粘性係数 $\tilde{\nu}_t$ の鉛直中央断面における分布を示す。乱流エネルギー $\tilde{k}$ の値は、段落ち部下流の自由せん断層において乱れが生成されるため、(凹部-主流)境界において大きな値を示している。また、上流側の死水域を除いて、乱れが凹部内で発達しているのが確認できる。段上がり部近傍においては、 $\tilde{k}$ の値は急激に大きくなっている。渦動粘性係数 $\tilde{\nu}_t$ については、凹部内で下流側ほど値が

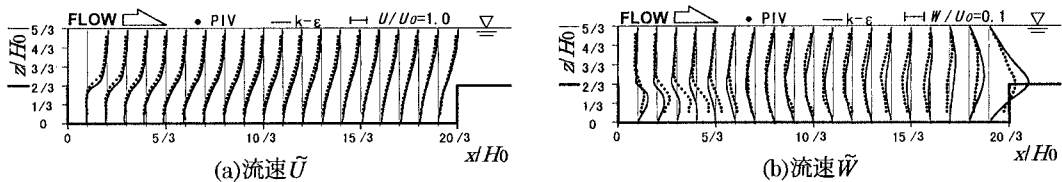
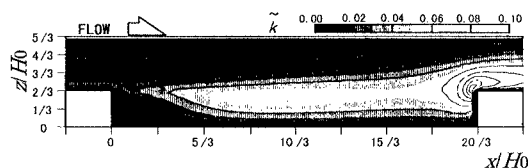
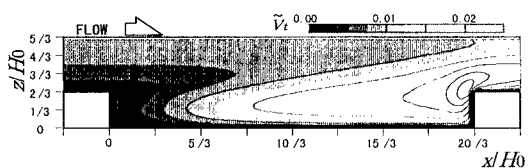


図-2 鉛直中央断面における平均流速分布図(実線：計算値，点：実験値)

図-3 乱流エネルギー $\tilde{k}$ の分布図-4 渦動粘性係数 $\tilde{\nu}_t$ の分布

キーワード：開水路，凹部，数値解析，k-εモデル，乱流エネルギー

連絡先 〒657 神戸市灘区六甲台町1-1 TEL 078-881-1212 FAX 078-803-1050

大きくなっており、また、乱流エネルギーと同様に、段上り部近傍で大きな値を示している。一般に、流れが固体壁面に衝突する領域においては、標準型の k-ε モデル(渦粘性モデル)では乱流エネルギーが過大評価されることが従来指摘されている²⁾。本解析において段上り部近傍で乱流エネルギー $\tilde{k}$ が大きな値を示すのも、段上り壁に流れが衝突する領域であるためと考えられる。

4. 改良型モデルの導入とその結果

衝突領域における乱流エネルギーの過大評価は、その輸送方程式中の生成項 P_k のモデル化に問題があるとされている。ここでは、村上ら²⁾による応力テンソルのノルマル成分を除去した生成項モデルと Launder-Kato³⁾により提案された生成項モデルの二つのモデルを導入することにより、段上り部近傍の乱流エネルギー分布の改善を試みた。それぞれの乱流エネルギー輸送方程式の生成項モデルを以下に示す。

①標準型 k-ε モデル

$$P_k = \tilde{\nu}_t \left(\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial \tilde{x}_j} + \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial \tilde{x}_i} \right) \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial \tilde{x}_j} = \frac{1}{2} \tilde{\nu}_t \left(\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial \tilde{x}_j} + \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial \tilde{x}_i} \right)^2 \quad (1)$$

②ノルマル成分除去型モデル

$$P_k = \tilde{\nu}_t \left(\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial \tilde{x}_j} + \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial \tilde{x}_i} \right) \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial \tilde{x}_j} - 2\tilde{\nu}_t \left\{ \left(\frac{\partial \tilde{U}_1}{\partial \tilde{x}_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{U}_2}{\partial \tilde{x}_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{U}_3}{\partial \tilde{x}_3} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

③ Launder-Kato のモデル

$$P_k = \tilde{\nu}_t S_{ij} \Omega_{ij} \quad S_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial \tilde{x}_j} + \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial \tilde{x}_i} \right)^2}, \quad \Omega_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial \tilde{x}_j} - \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial \tilde{x}_i} \right)^2} \quad (3)$$

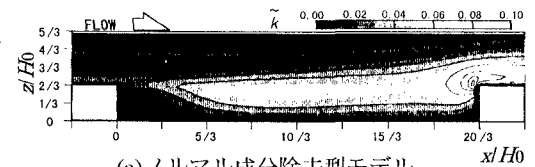
図-5(a)にノルマル成分除去型モデルにおける乱流エネルギー $\tilde{k}$ の分布を示す。図-3と比較すると段上り部における $\tilde{k}$ の値はある程度小さくなるものの顕著な改善はなされていない。図-5(b)に示す Launder-Kato モデルによる乱流エネルギー $\tilde{k}$ の分布では段上り部における $\tilde{k}$ の過大評価が改善されていることがわかる。また、段上り部以外では、 $\tilde{k}$ の分布にほとんど変化がない。図-6に示す渦動粘性係数 $\tilde{\nu}_t$ の分布についても段上り部近傍での値がかなり小さくなっている。

5. まとめ

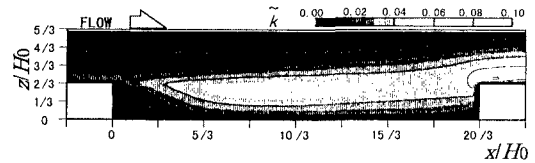
標準型 k-ε モデルにより開水路凹部区間の乱れ量を再現したところ、段上り部近傍で乱流エネルギーが過大評価される傾向がみられた。対応策として二種類の改良型モデルを導入したところ、Launder-Kato のモデルによって過大評価傾向が改善された。

参考文献

- 1)宮本ほか：PIVによる開水路凹部流れの計測および数値解析，水工学論文集，第41巻，pp.1049-1054,1997.
- 2)村上ほか：建物周辺気流の数値シミュレーションの診断システムに関する研究(第6報)，生産研究，Vol.41, No.1, 472号，pp.44-47，1989.
- 3)Kato,M. and Launder,B.E.：The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinder, Proc.9th Symp. Turbulent Shear Flows, Paper,10-4-1~6, 1993.



(a)ノルマル成分除去型モデル



(b)Launder-Kato のモデル

図-5 乱流エネルギー $\tilde{k}$ の分布

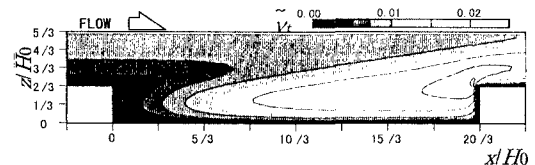


図-6 Launder-Kato のモデルによる渦動粘性係数 $\tilde{\nu}_t$ の分布