

水路構造物湾曲部 2 次流れ解析へ用いる乱流モデルの適用性検討

中国電力(株) エネルギア総合研究所 正会員 ○井上 智子
 中国電力(株) 流通事業本部 正会員 河内 友一
 中国電力(株) エネルギア総合研究所 正会員 及川 隆仁

1. 目的

水路構造物湾曲部流れは、遠心力に起因する 2 次流の発生により影響を受けることが知られている。水路構造物側岸の形状が 2 次流および主流に影響を与えるが、その詳細を把握するには水理実験が必要となる。

本研究では、水理実験の省力化を図るため、矩形断面水路構造物の湾曲部 2 次流構造について、複数の流体モデルを用いて、数値シミュレーションを実施し、既往の研究結果との比較により最適な流体モデルについて検討した。

2. 対象水路の概要

水路構造物湾曲部の流れを数値解析により再現し実構造物へ適用可能な最適乱流モデルを検討するには、2 次流が発生しやすい単純な形状で再現した方が現象をより正確に把握できる。本検討では、湾曲部 2 次流れを詳細に検討した既往の実験結果と比較可能な水路の解析モデルを用いた。(水路幅 $B=90\text{cm}$ 、水深 $h=15\text{cm}$ の長方形断面水路とし湾曲区間の上、下流にそれぞれ 10.8m 、 3.6m の直線部を設け、その中間部に中心曲率半径 $R=2.7\text{m}$ の湾曲角 60° の湾曲水路を挿入) 図 - 1 に水路の解析モデル図を示す。

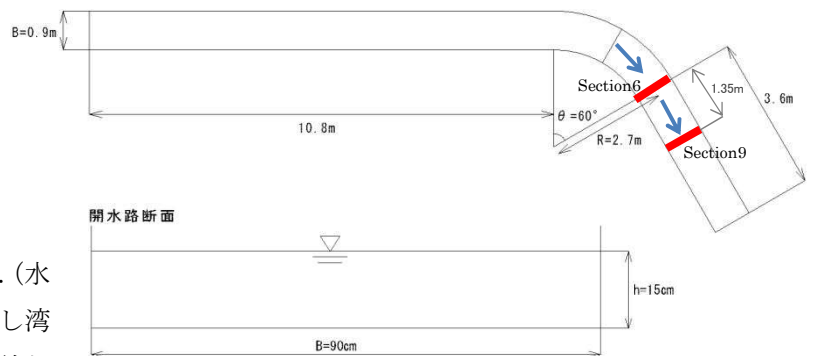


図 - 1 水路の解析モデル図

3. 数値解析

数値解析には汎用 Computational Fluid Dynamics ソフトウェアを使用した。乱流モデルの違いによる現象の再現性を比較するため複数の乱流モデルを用いて数値解析を実施した。解析条件を表 - 1、検討ケースを表 - 2 に示す。ここで、検討に用いた乱流モデルの特性について概説する。

表 - 1 解析条件

流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	流速 $V(\text{m}/\text{s})$	計算格子 (m)	水路条件
0.0415	0.307	0.01 及び 0.005	開水路 非圧縮性流体 $Re=45,738$

(1) 標準 $k-\epsilon$ モデル

乱れの代表量として乱流エネルギー k と乱流消失率 ϵ を導入している。経験定数は既存の研究より設定されており、安定性・計算時間の短さから数値解析で一般的に使用されるモデルである。

(2) RNG (Re Normalization Group analysis) $k-\epsilon$ モデル

標準 $k-\epsilon$ 方程式内に現れる定数群は実験から定められているが、RNG $k-\epsilon$ 方程式はフーリエ解析から理論的に定数が定められている。

(3) MP(Modified Production) $k-\epsilon$ モデル

標準 $k-\epsilon$ 方程式に現れる生成項が、よどみ点近くで過大評価されることを補正できるモデルである。

(4) Realizable $k-\epsilon$ モデル

従来モデルでマイナスエネルギーが発生する矛盾を乱流運動によって生じるエネルギーは決して負にならないという実現性を満足する乱流モデルの 1 つである。形の上では標準 $k-\epsilon$ モデルと同じだが、渦粘性係数に現れるキーワード 2 次流構造、湾曲部流れ、流体モデル

表 - 2 検討ケース

ケース	乱流モデル
①	標準 $k-\epsilon$
②	RNG $k-\epsilon$
③	MP $k-\epsilon$
④	Realizable $k-\epsilon$
⑤	SST $k-\omega$
⑥	非線形低レイノルズ数型

モデル定数が実現性によって表現される．計算時にチェックし乱流の基本条件を満足することが可能である．

(5) SST(Shear-Stress Transport) $k-\omega$ モデル

せん断応力輸送の概念が導入されており，逆圧力勾配下での渦粘性の過大評価を抑え，従来の渦粘性モデルでは捉えられなかった剥離現象を再現できる．精度が高く安定な解析が可能である．

(6) 非線形低レイノルズ数型乱流モデル

渦粘性係数を平均速度の空間勾配を用いて非線形化することで非等方性乱流現象を捉えることができる．

3. 解析結果および考察

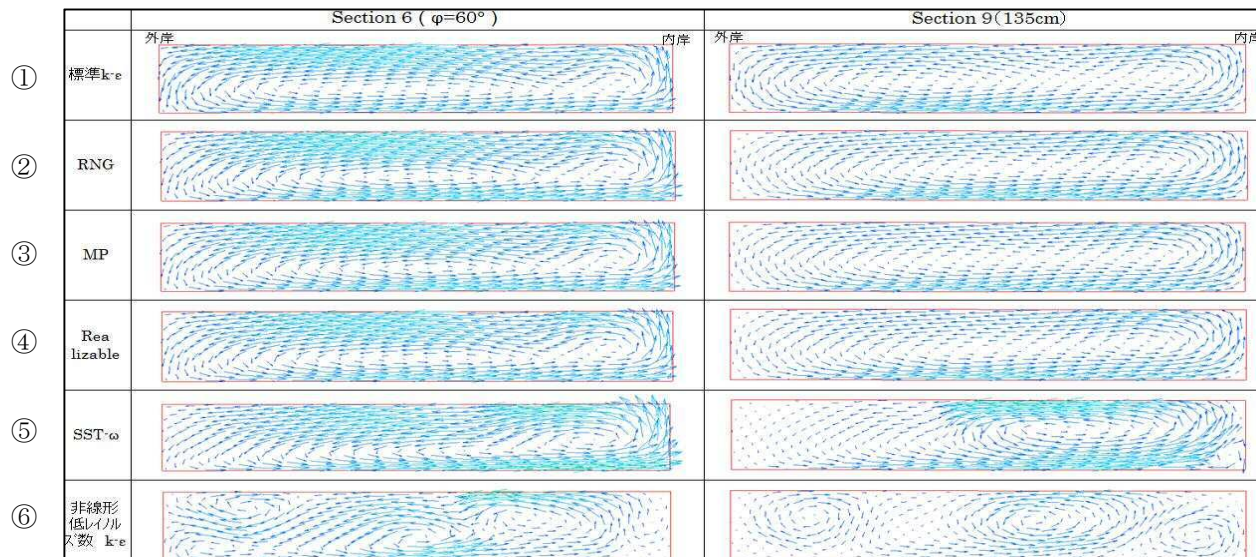


図 - 2 解析結果 2 次流ベクトル図

各乱流モデルを適用した数値解析を実施した．解析結果は富永らが行った既往の研究「台形断面開水路湾曲部の次流構造」の長方形断面の流れ構造実験と比較が可能である．

実験では，湾曲水路の水面で外岸へ向かい，底面で内岸へ向かう湾曲特有の 2 次流が発生し始めるが，外岸の水面側には湾曲による 2 次流とは逆回転の 2 次流が存在する．Section6($\phi=60^\circ$)で 2 次流は最大となり，外岸渦が底面付近にまで達し水深規模の渦となるのに伴い，湾曲渦は水路幅 63cm 付近を中心として下降する水路幅の約 7 割の幅を持つ渦となる．Section9(下流直線部 135cm)においても，ゆっくり減衰しながら同一の渦構造を保持している．

解析結果は 2 次流が最大となる湾曲部 $\phi=60^\circ$ (Section6)及び減衰傾向がみられる下流直線部 135cm (Section9)の断面を既往の実験結果と比較する．検討ケース①～⑥において計算格子を 0.01m に設定し解析を実施した場合，湾曲部 2 次流れ(外岸渦)の発生を再現できなかった．計算格子を半分の 0.005m に設定し解析を実施した．0.005m での解析結果を図 - 2 に示す．

検討ケース①～⑤については外岸渦の発生を再現することができなかった．ケース⑥については外岸渦の発生が認められた．実験結果とは違い湾曲渦がいびつな形状となった．ケース⑥については定常収束していない．

これにより乱流モデルの違いだけではなく計算格子も現象の再現性に影響を与えていると考える．計算格子と適切な乱流モデルの適用により湾曲渦を再現できることが確認された．

4. 主要な結論

水路構造物湾曲 2 次流れを数値解析で再現し，既往の研究成果と比較した．その結果，非線形低レイノルズ数型乱流モデルを適用することで定性的ではあるが既往の実験結果を再現可能となった．

水路構造物流れへの適用にあたっては，計算格子の設定が外岸渦の再現性に影響を与えることを確認した．実構造物の流れ解析では，乱流モデルと格子の適切な設定が重要となる．

参考文献 1) 富永晃宏ら：台形断面開水路湾曲部の 2 次流構造，水工学論文集，第 42 巻，1998