側壁・底面粗度の相違が第一種二次流に与える 影響に関する数値実験的検討

NUMERICAL STUDY ON EFFECT OF DIFFERENCE BETWEEN SIDE WALL AND BOTTOM WALL ROUGHNESS COEFFICIENTS ON SECONDARY FLOW IN BEND CHANNEL

八軒啓彰¹・朝位孝二²・渡辺勝利³

Hiroaki HACHIKEN, Koji ASAI and Katsutoshi WATANABE

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程 社会建設工学専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 博士(工) 山口大学教授 大学院理工学研究科 (同上)

³正会員 博士(工) 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (〒745-8585 山口県周南市学園台) .

In this study, we conducted numerical experiments to investigate the influence of the wall and bed roughness to the secondary flow in a bend part in open channel flows. The nays CUBE distributed by the iRIC project was used in this study. Firstly we conformed that the nays CUBE has good accuracy to predict the three dimensional flow by comparing with our laboratory experimental data.

We conducted numerical experiments under the five cases. In the cases that the wall roughness is smaller than or equal to the bed roughness, the circulation near the inner bank wall became bigger as the side wall roughness increased in the entrance of the bend part. On the other hand, in the cases that the wall roughness is greater than the bed roughness, the circulations near the outer bank wall were not clear at the middle of the bend part.

Key Words : Numerical experiment, bend flow, iRIC, roughness, secondary flow

1. はじめに

洪水時の河川において最も危惧されるべき問題は堤防の決壊や越流による氾濫である。特に河川の蛇行部は遠心力に起因する強い螺旋流が生じ、これが護岸や護岸の根固めを破壊することが良く知られている。このため、蛇行部の水理については実験的にも数値計算的にも多く研究が行われている。

主流方向に直交する断面内において発生している流れは二次流と呼ばれるが、その生成要因にしたがってプラントルは二次流を二種類に分類している。遠心力に起因する螺旋流はプラントルの第一種二次流と呼ばれ、直接の外力を持たずに直線部においても発生し得るものはプラントルの第二種二次流と呼ばれる。第二種二次流は乱れの非等方性から発生しており、その大きさは主流の数%程度しかないといわれている。一方、第一種二次流は流路の湾曲の緩急により大きく変動し主流の20%以上となるケースもあるため、河川防災を考える上で無視す

ることは出来ない。第一種二次流に関する問題は河川工学における古典的な問題として広く認識され、そのメカニズムや河床変動などに及ぼす影響について、従来から多くの研究が進められてきている。湾曲部の水面付近の流速分布に着目すると、第一種二次流の効果は水面付近の高速流体塊を遠心力方向に押しやるため、最大流速の生じる横断方向の位置を、外岸側にシフトする効果があるといわれている¹⁾。

河川防災上、二次流を制御することが重要である。例えば、水制あるいはベーン工などの設置による二次流の制御が試みられている²⁾。水制は水跳ね作用により流れの方向を変え、ベーン工は二次流を直接制御する。一方で側壁や底面の粗度を変えて制御することも考えられる。蛇行流路の三次元数値解析は、例えば杉山ら⁴⁾の研究があるが、側壁面、底面の粗度は同一としている。底面と側壁の粗度が異なる開水路の研究として、Naot⁵⁾は、粗度の相違が第二種二次流に与える影響について数値計算を用いて検討した。また、Tominagaら⁶⁾、Hayashiら⁷⁾も側壁、底壁の粗度による主流速および二次流への影響を実

図-1 実験水路の平面図

図-2 計算格子

表-1 計算格子の諸元

	上流側直線部	蛇行部	下流側直線部
水路長距離	3m	4m	2m
流下方向格子数	30	40	20
横断方向格子数	40	40	40
流下方向格子幅	0.1m	0.1m	0.1m
横断方向最小格子幅	0.005m	0.005m	0.005m
横断方向最大格子幅	0.015m	0.015m	0.015m

験的に検討しているが、これらはいずれも直線形状の水路における検討に留まっている。

以上を踏まえて、本研究では蛇行開水路において底面と側壁の粗度係数を変えた場合の数値解析を行い、粗度の差が第一種、第二種二次流の双方に与える影響について検討することを目的とする。

2. 数値解析法と数値計算結果の実験値との比較

(1) 数値解析ソルバー

本研究では三次元解析を行うため河川解析共通プラットフォームであるiRIC^④のNaysCUBE ver3.20.1を使用した。NaysCUBEでは一般座標系における非圧縮性流体の連続の式、レイノルズ方程式、 $k-\epsilon$ 方程式が基礎式である。その詳細は既往論文^{1), ⑧}を参照されたい。乱流モデルは二次非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いた。移流項計算スキーム、分散化手法、時間積分法、圧力・速度緩和法は文献^{1), ⑧}と同様である。

(2) 実験水路と計算格子

計算モデルの妥当性を検討するため実験値との比較を行った。図-1に実験水路の平面図を示す。この水路は直線水路の中に正弦関数型の蛇行部が設けられている。上流部直線水路の長さは3m、下流部直線水路の長さは2m、蛇行部の水路長さは4m、水路幅は0.4mである。側壁、底面とも全てアクリルガラスで製作されている。水路床勾配は0である。供給流量は $0.01\text{m}^3/\text{sec}$ 、で全体的に水路

図-3 水面形の縦断方向分布

中央部の水深が0.08m程度となるように下流側の水深を調節した。下流端水深は0.08mである。水路中央部を原点として右岸方向にy座標をとり、水路に沿った流下方向をx座標とする。

図-2に数値計算で使用した計算格子を示す。水路中央部から側壁に向けて等差数列を用いて格子を形成している。また鉛直方向には16層に分割した。計算格子の諸元を表-1に示す。図中の断面の位置は後述の計算結果を示す断面である。水深はポイントゲージで、流速は電磁流速計(KENEK社 VP2500/VPT-200-08PS)で計測された。これは流下方向と横断方向の2成分の流速計である。

(3) 計算条件

初期条件は静止の状態、一定水深0.08mを与えた。上流端境界条件として一定流量 $0.01\text{m}^3/\text{sec}$ を与え、下流端境界条件として、水深0.075mを与えた。水路床勾配は0であるので水深がそのまま水位と考えてよい。

NaysCUBEでは、底面と側壁に抵抗則としてマニング式が用いられている。一般的にアクリル板のマニングの粗度係数は $0.0090\sim 0.010$ であるので、底面、側壁ともに0.010を与えた。計算は後述するように側壁と底面の粗度係数を変えた場合も行っているが、いずれも初期条件から40秒程度で変化が小さくなり、50秒から60秒で定常となった。以下に示す計算結果はすべて60秒での結果を示している。

図-4 主流速の横断方向分布

(4) 水面形の縦断方向分布

図-3に水面形の縦断方向分布を示す。比較対象は水路中央部($y=0$)の蛇行部開始点($x=3.0\text{m}$)から蛇行部終了点($x=7.0\text{m}$)までである。青色の線が実験値を、赤色の線が計算値を表している。計算結果と実験結果は厳密に見れば2~3mm程度の不一致はあるが、概ね良好な計算結果を示している。

(5) 主流速の横断方向分布

図-4に主流速の横断方向分布を示す。青色の線が実験値で赤色の線が計算値である。また z は底面を原点として鉛直上向きを正とする座標である。 $z=7\text{cm}$, 3cm , 1cm はそれぞれ表層、中層、低層の位置である。

$x=3.0\text{m}$ の断面は蛇行部の前面であるが、蛇行部の影響がすでに現れており、右岸側の流速が若干速くなっている。全層とも、実験値と計算値は良い一致を見ている。

$x=3.4\text{m}$ の断面では全層にわたって右岸側に最大流速が現れている。表層での再現性は良好であるが、中層、低層では若干実験値よりも計算値は小さくなっている。

$x=5.0\text{m}$ の断面は蛇行部の頂点に位置する。最大流速は左岸側に現れている。計算値と実験値は表層と中層においては良い一致が見られるが、低層では水路中央部から左岸側で実験値よりも小さくなっている。しながら定性的には実験値と一致している。

$x=6.4\text{m}$ の断面では最大流速は再び右岸側に現れている。表層における計算値は実測値と良く一致しているが、中層、低層では計算値は実測値よりも若干小さくなっている。しかしながら右岸側に向かって流速が大きくなる傾向は良く再現されている。

計算値は多少実験値と異なる性状を示す場合も見受けられるが、全体的には計算値は実験値に対して良好な再現性を持っていた。NaysCUBEは水平水路においても十

図-5 横断方向流速分布

表-2 側壁と底面の粗度の条件

Case	側壁粗度	底面粗度
A	0.01	0.01
B	0.015	0.01
C	0.02	0.01
D	0.01	0.015
E	0.01	0.02

分対応可能であることが確認できた。

(6) 横断方向流速

湾曲水路ではプラントルの第一種二次流が生じるため、数値計算においても精度良く二次流が再現できているかを検討する必要がある。しかしながら実験で用いた電磁流速計では二次流成分としては横断方向流速しか計測できない。そのためここでは横断方向（y方向）流速の断面分布の比較を行う。その結果を図-5に示す。本図において暖色系の色は左岸方向に向かう流速を、寒色系の色は右岸方向に向かう流速を表す。

$x=3.0\text{m}$ の断面では横断方向流速は小さい、したがって第二種二次流は存在しているものの、第一種二次流はまだ発達していない。 $x=5.0\text{m}$ の断面における実験値では底面近傍では右岸に向かう流速が存在し、水面近傍の $y=0.0\sim 0.1\text{m}$ 付近では左岸に向かう流速が存在している。計算値においても同様の傾向を示していることがわかる。 $x=7.0\text{m}$ の断面における実験値では左岸側水面近傍と水路中央部から右岸側の底面近傍を除いて、左岸向きの流れが生じている。計算値も同様の傾向を示しているが、全体的に実験結果の方が右岸向きの流速が大きく、計算結果の方が左岸向きの流速が大きくなっている様子が確認できることから、定量的には若干相違があるようである。

横断方向流速においても計算値は実験値を定性的には良く再現できている。定量的には一致していないところもあるが、概ね二次流の横断方向成分を再現できているものと思われる。

3. 側壁と底面の粗度係数の比較

(1) 二次流ベクトルと主流速分布

この章では側壁と底面のマンニングの粗度係数を種々変えて二次流のパターンがどのように変わるのかを検討する。表-2に数値実験のケースを示す。Case-A, B, Cは底面粗度を固定して側壁粗度を大きくした場合である。また、これらは底面粗度が側壁粗度よりも小さいか等しい場合である。Case-D, Eは側壁粗度を固定して底面粗度を大きくした場合で、底面粗度が側壁粗度よりも大きい。Case-Aは実験水路と同じ粗度係数であるので、この計算結果を基本として他のケースを検討していく。

$x=3.0\text{m}$ は蛇行部手前の断面である。いずれのケースも左岸から右岸に向かう流れが卓越しており、顕著な螺旋流的な流れは生じていない。しかし、Case-B, Case-Cでは右岸側壁近傍の水面付近で微小な循環が生じている。また主流速の最速部はいずれのケースにおいても、二次流によって若干右岸側にシフトされているようではあるが、全体的には中央部に最速部が残っている。

$x=3.4\text{m}$ ではいずれも全体的に反時計回りの大きな循環流が生じている。また左岸側壁近傍の水面付近では時計回りの補償的な循環流が見受けられる。この循環流はCase-A, B, Cの順で大きくなっていることが分かる。

これらケースでは底面粗度は同一であるので、側壁粗

図-6 二次流ベクトルと主流速分布

度が大きいほど循環流も大きくなっていることが分かる。一方でCase-A, B, Cとは逆に底面粗度の方が側壁粗度よりも大きいCase-D, Eでは、この循環流は逆に側壁粗度が大きいほど小さくなってしまふ。また最大流速の部分は右岸側に現れており、二次流ベクトルで最大流速が左岸側に輸送されていることが分かる。

$x=5.0\text{m}$ ではいずれも最大流速の部分が左岸に現れている。またCase-Eを除いて水路中央部から右岸側壁におい

て反時計回りの大きな循環流が生じている。右岸側壁の底面付近ではこの循環流を補償する時計回りの循環流が現れている。Case-A, B, Cを見ると、この循環流は側壁近傍であるため側壁粗度が大きくなるにつれて小さくなっていくことが分かる。一方でCase-AとDを比較すると側壁粗度は同じであっても底面粗度が大きくなると、この循環流は大きくなり、水路中央部の反時計回りの循環流の規模が小さくなることが分かる。また、Case-D,

Eでは、左岸側壁に沿う上昇流的流れが強くなっている。Case-Eでは半水深位置に左岸から右岸に向かう流れがそのまま右岸側壁に衝突して上昇流と下降流に分離している。顕著な大規模循環流は見られない。

$x=6.4\text{m}$ ではいずれも最大流速は再び右岸側に現れている。特徴的な循環流として左岸側壁近傍の時計回りの流れと右岸側壁近傍の時計回りの流れが挙げられる。左岸側の循環流は側壁粗度が大きくなるCase-A, B, Cの順で小さくなっている。また、Case-D, Eでは底面粗度が大きくなるほど左岸側の循環流が大きくなっている。右岸側の循環流もCase-A, B, Cの順で小さくなっている。一方、Case-D, Eでは時計回りの循環よりも、右岸水面近傍の反時計回りの渦が顕著である。水路中央部には反時計回りの循環流が存在しているが、これはCase-A, B, Cの順で両側壁の渦が小さくなるにつれて、中央部の循環流が大きくなっていく。しかしながらCase-D, Eではこの中央部の循環流が小さく特に、Case-Eでは左岸側の循環流が支配的なため、ほとんど消滅している。

(2) 水深平均流速の平面図

図-6には水深平均流速の平面分布を示している。滝本ら⁹⁾は曲率が一定の湾曲水路で最大流速が現れる場所を検討している。彼らは緩湾曲水路では最大流速が外岸側に現れ、急湾曲水路では最大流速が内岸側に生じてやがて外岸側に移動することを示した、本計算結果ではいずれのケースにおいても $x=3.4\text{m}$ 近傍から内岸側の流速が早くなり、蛇行部頂点を過ぎたところから最大流速は水路中央部に現れる。

4. おわりに

本研究では側壁と底面の粗度係数が蛇行部に発生する第一種二次流にどのような影響を与えるのかを検討する目的で数値実験を行った。その結果、底面粗度が側壁粗度よりも小さいか等しい場合（Case-A, B, C）の結果を比較すると、蛇行部進入直後では、側壁粗度が大きくなるにつれ内岸側の循環流も大きくなることがわかった。しかし、底面粗度が側壁粗度よりも大きい場合その効果は逆転する。

底面粗度が側壁粗度よりも小さいか等しい場合蛇行部頂点では外岸側底面部の循環流が側壁粗度が大きいほど小さくなる。一方、底面粗度が側壁粗度よりも大きい場合、外岸側壁近傍では顕著な循環流が存在しなくなる。さらに流下すると、底面粗度が側壁粗度よりも大きい場合は内岸側循環流が横断面内で支配的となる。

このように側壁と底面の粗度が異なると二次流パターンが大きく異なることが分かった。本研究では実験水路の現象を対象としたが、今後は実河川も対象として蛇行度と底面・側壁の状態の相互作用を検討していく。

図-6 水深平均流速の平面図

参考文献

- 1) 鈴木理沙, 木村一郎, 清水康行: 二次元・三次元RANSモデルによる開水路湾曲部における流況の再現性比較, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.71, No.4, pp.I_601-I_606, 2015.
- 2) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, pp.296-309, 2005.
- 3) 杉山均, 秋山光, 砂糖亮輔: 矩形断面蛇行開水路流れの三次元乱流構造に関する研究, 土木学会論文集 No.628/II-48, pp.149-161, 1999.
- 4) 木村一郎: iRIC software Nays CUBE Tutorial, <http://i-ric.org/ja/download/get/2D4TxH>, 2015.
- 5) Naot, D.: Response of channel flow to roughness heterogeneity, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.111, pp.116-125, 1984.
- 6) Tominaga, A, Neze, I.: Three-dimensional turbulent structure in a straight open-channel flow with varying boundary roughness, *Proc. of 3rd Asian Congress of Fluid Mech.*, pp.608-611, 1986.
- 7) Hayashi, T., Ohashi, M., Kotani, Y.: River flow turbulence and longitudinal vortices, *Recent Studies on Turbulent phenomena, Tokyo Inst. of Tec.* pp.243-295, 1985.
- 8) 木村一郎, Wim S.J. Uijttewaai, 細田尚, Wim van Balen: RANSモデルによる開水路湾曲部における外岸セルの再現性, 水工学論文集, 第52巻, pp.1009-1014, 2008.
- 9) 滝本眞二, 木村一郎, 清水康彦, 細田尚: 急な湾曲部を有する開水路三次元乱流構造に関する数値シミュレーション, 応用力学論文集, Vol.12, pp.749-758, 2009.

(2015. 9. 30受付)