

連続的側岸凹部を伴う開水路流れの抵抗特性と乱流構造

熊本大学大学院 正会員 大本照憲 熊本大学大学院 学生会員 田中貴幸
 熊本大学工学部 学生会員 中田紘志

1. はじめに

河道側岸に沿う湾状の死水域は多様な生態系の生息環境を育み、主流域との水交換を促し、親水性の高い水辺環境を創出するといった河川環境にとって有益な機能を有している。このように、側岸に凹部を有する流れに関しては、その形状は平水時において流水域に開口部を有する死水域の「わんど」と類似しており、多自然川づくりといった水環境を考慮した河川整備において重要な役割を担う。しかしながら側岸凹部流れは非常に複雑な流れ場となり、このような側岸の河川構造物は必ずしも工学的な配慮に基づいた適正な設計が行なわれていない。実際これまでも側岸凹部流れに関する多くの研究が行なわれているが、これまでの研究は局所流を対象としており、流れの抵抗特性を議論するうえでは流れの平衡状態を形成することが重要である。また、流下方向に連続的に側岸凹部を有する流れ場の検討はこれまでになされていない。そこで本研究では、流下方向に連続的に側岸凹部を有する開水路流れの抵抗特性および運動量輸送特性といった流動機構に関して検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

実験は全長 10m, 幅 $B=40\text{cm}$, 高さ 20cm のアクリル樹脂からなる循環式可変勾配水路を用いて行った。図-1 に示すように、水路左岸側にステンレス板によって遮断物を設置して側岸凹部を形成した。遮断物は流下方向長さ $L_s=30\text{cm}$, 高さ 5.5cm に設定する。また、凹部幅 $B_w=10\text{cm}$, 凹部の流下方向長さ L_c とし、凹部のアスペクト比 L_c/B_w を $0\sim 5.0$ と流量一定という条件の下で変化させていく。実験条件は表-1 のように設定した。いずれの条件においても非越流状態を対象としている。座標系は遮断物上流先端における水路中央の底面を原点とし、流下方向に x 軸, 横断方向に y 軸, 鉛直方向に z 軸をとり右手系とする。また、それぞれの流速成分を u, v, w , 平均値を U, V, W , 変動成分を u', v', w' と表す。

流動機構の検討では流速の多点同時計測を行った。

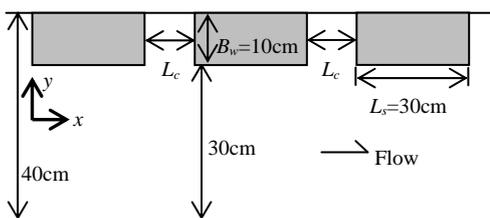


図-1 実験水路概要

表-1 実験条件

凹部幅 B_w (cm)	10
凹部の流下方向長さ 凹部幅の比 L_c/B_w	$0\sim 5.0$
遮断物の流下方向長さ L_s (cm)	30
凹部高さ H_c (cm)	5.5
流量 Q (l/s)	5, 6
水路勾配 I	1/500

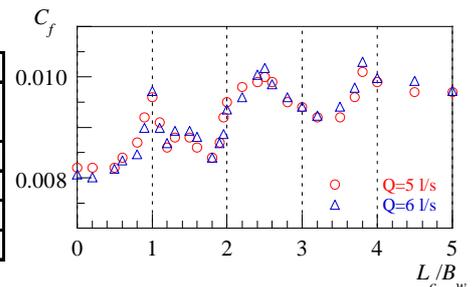


図-2 アスペクト比と抵抗係数の関係

流速の多点同時計測は面的な範囲で測定が可能である PIV (Particle Image Velocimetry)法により行った。PIV は光源に空冷式ダブルパルス YAG レーザー (出力 25mj) を用い、シート光の厚さ 1mm , パルス間隔 $500\mu\text{s}$ に設定し、水路右岸から左岸に向かってレーザーを照射した。流速のサンプリング周波数は 15Hz , トレーサーは粒径 $30\mu\text{m}$, 比重 1.02 のナイロン粒子を使用した。PIV の計測対象領域は水平面 $x=300\text{cm}\sim x=400\text{cm}$ の範囲内であり、計測領域の凹部上流端を $x'=0\text{cm}$ と設定した。

3. 抵抗特性

図-2 に側岸凹部のアスペクト比を変化させたときの抵抗係数 c_f を表す。抵抗係数が極大値をとった $L_c/B_w=1.0$ および 2.5 に注目すると、 $Q=6\text{ l/s}$ の下で抵抗係数 c_f が 0.008 となった $L_c/B_w=0$ に比べ $L_c/B_w=1.0$ では 1.21 倍, $L_c/B_w=2.5$ では 1.26 倍の抵抗係数を示した。これにより、水路全体における遮断物の割合は減少しても、側岸凹部の影響によって流れの抵抗は増大することが明らかとなり、河川に側岸凹部を設置する際には治水安全度の検討を十分に行った上で凹部の形状を選定することが重要であることが認められた。

4. 流動機構

図-2 の結果から、抵抗係数が極大値を示した $L_c/B_w=1.0$ および 2.5 , 極小値を示した $L_c/B_w=1.8$ に関して、流量 $Q=6\text{ l/s}$ の下に平均流速分布や運動量輸送特性といった流動機構に関して検討を試みる。

1) 平均流速分布

図-3 に $L_c/B_w=1.0$ および $L_c/B_w=1.8$ の平均流速分布を示す。いずれのケースにおいても凹部と主流部の境界面 $y/B_w=1.0$ 付近においてせん断層が形成される。また凹部上流側で凹部に流入、凹部下流側では凹部から流出する流れが確認された。 $L_c/B_w=1.0$ では凹部中央を中心とした循環流が凹部形状と同等のスケールで明瞭に形成されている。 $L_c/B_w=1.8$ においては $L_c/B_w=1.0$ ほど顕著ではないが凹部下流側を中心とした循環流が見られ、その横断方向スケールは凹部幅程

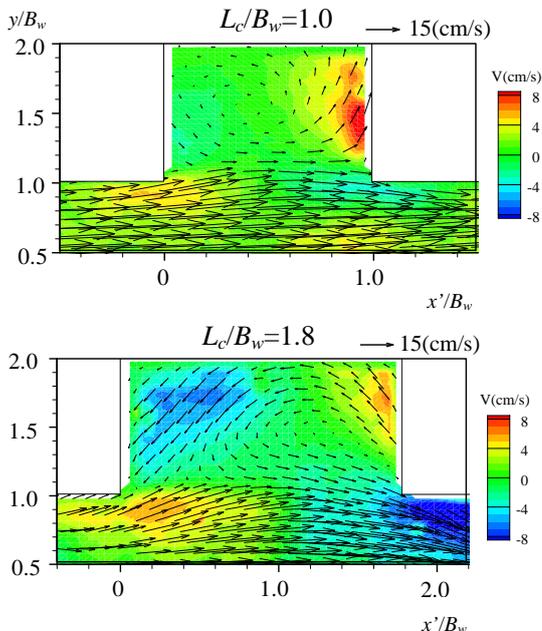


図-3 平均流速分布

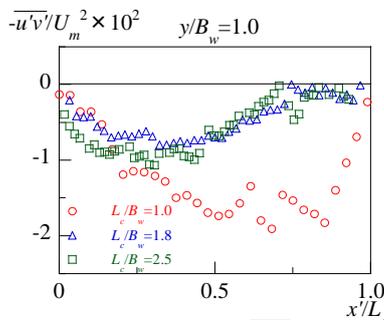


図-4 レイノルズ応力 $-u'v'$ の流下方向分

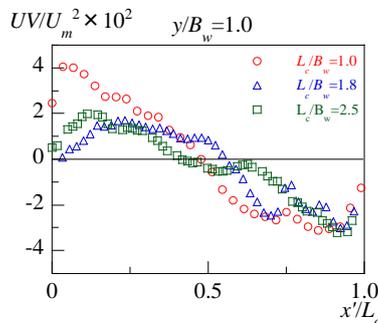


図-5 移流による運動量輸送 UV

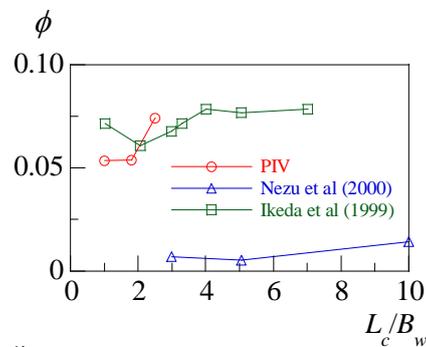


図-6 質量交換率 ϕ

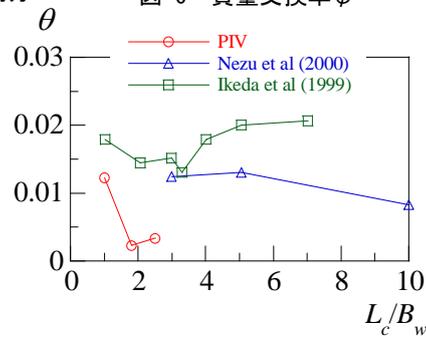


図-7 運動量交換率 θ

度、流下方向にはそれ以上のスケールで存在していること

が伺える。また、凹部の流下方向長さが長くなると凹部内の壁面付近に発生する逆流が発達することが伺え、さらに凹部境界面における主流部と凹部との水交換が活発となることが認められる。

2) 乱れ特性及び移流特性

主流部と凹部の境界付近では主流速が変曲点を持つため質量や運動量の交換が活発となることが予測される。そこで、凹部開口部である $y/B_w=1.0$ における各ケースのレイノルズ応力 $-u'v'$ の流下方向分布を図-4 に示す。凹部内において主流速が激減することから、いずれのケースも $-u'v'$ は負の値となる。 $L_c/B_w=1.0$ ではその他のケースと比べ $-u'v'$ が比較的大きな値を示し、その極大値は凹部下流側に存在する。これは凹部下流において凹部内からの流出流が主流に影響を与えるためと考えられる。 $L_c/B_w=1.8$ および 2.5 では $-u'v'$ の極大値は凹部上流に現われているが、これは凹部上流において逆流が主流部と衝突すること、および $L_c/B_w=1.0$ に比べ凹部下流では主流部と凹部内の流速差が緩和することなどによると考えられる。

図-5 に移流による運動量輸送 UV の流下方向分布を示す。いずれのケースもほぼ凹部中央から上流では移流による運動量は主流部から凹部へ、下流では凹部から主流部へ運ばれている様子が伺える。また、その極値はいずれも凹部上下流端付近であり、この位置で主流部と凹部の水交換が活発となることが認められる。

この移流による運動量輸送と乱れによる運動量輸送を足し合わせた全運動量輸送は各ケースとも乱れに比べ移流による運動量輸送が支配的となることから、全運動量輸送は移流による運動量輸送と類似の分布を示す。

3) 質量・運動量交換率と凹部のアスペクト比の関係

側岸凹部と主流部との境界における質量交換率 ϕ および運動量交換率 θ を次式で表わす。

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1}{2\rho U_m L_c} \int_0^{L_c} \rho |v| dx \\ &= \frac{1}{\rho U_m L_c} \int_+ \rho v dx = \frac{1}{\rho U_m L_c} \int_- \rho v dx \end{aligned} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U_m^2 L_c} \int_0^{L_c} \rho \overline{uv} dx \quad (2)$$

ここで、 \int_+ 、 \int_- は境界面上の横断方向流速が正または負の領域で積分することを表す。図-6 に質量交換率、図-7 に運動量交換率と側岸凹部のアスペクト比の関係を示す。

質量交換率は凹部のアスペクト比が大きくなると増加していき、 $L_c/B_w=2.5$ では 1.0 に比べ約 1.4 倍の値を示した。運動量交換率では抵抗が極小値を示した $L_c/B_w=1.8$ は極大値を示したその他のケースと比べ小さな値を示した。これより、 $L_c/B_w=1.0$ が極端に大きな値となるものの、流れの抵抗係数が大きいケースでは運動量交換率が大きくなる傾向を示すことが確認された。抵抗係数が極大値を示す $L_c/B_w=2.5$ ではその他のケースに比べ質量交換率が大きな値を示すため、凹部の存在が流れの蛇行といった影響を水路全体に及ぼしている可能性が示唆される。さらに、本実験と池田らの実験結果におけるアスペクト比の違いによる質量および運動量交換率の分布傾向は、その増減に関しては類似の傾向をとることが示唆された。

5. おわりに

本研究では流下方向に連続的に側岸凹部を有する流れの抵抗特性と流動機構について検討を行った。側岸に凹部を設置すると抵抗が増大していき、アスペクト比を変化させていくと水深は増減を繰り返すという抵抗特性を明らかにした。質量交換率は凹部のアスペクト比が大きくなるにつれ増大する傾向を示すことが確認できた。また、運動量交換率は流れの抵抗が大きくなった条件において比較的大きな値を示すことが示唆された。