水面変動を伴う側岸凹部流れの 内部流れ構造についての考察

FLOW STRUCTURE IN SIDE CAVITY FLOW WITH SURFACE OSCILLATION

門谷健¹・田中俊史²・藤田一郎³

Ken KADOTANI, Toshifumi TANAKA and Ichiro FUJITA

¹学生員 工修 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 学術博 神戸大学教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1) .

When a rectangular side cavity section is installed to a relatively narrow open-channel flow, water surface oscillation is generated within the side cavity and main channel. However detailed experimental examinations of the three-dimensional flow field for these hydraulic structures have not been conducted so far. So we measured the three-dimensional local flow structure by applying the particle image velocimetry technique (PIV) to multiple vertical and horizontal cross-sections. Numerical analysis by three-dimensional large eddy simulation (LES) is also performed for comparison. It was made clear that the LES yields comparable results to the experiments in terms of the three-dimensional flow structure and surface oscillation.

Key Words: Side cavity flow, surface oscillation, LES, PIV, 3D flow structure

1. はじめに

都市河川は空間上の制約から、通水断面を確保するために鉛直方向に深く掘り込まれることが多い反面、河川周辺に住んでいる住民のアクセシビリティという面は考慮されていないものが多かった。しかし近年生活領域における親水空間の役割が見直される中で、階段を設置し住民が河川の流れにアクセス出来るように改修が行われるケースも増加している。河川へ降りる階段を設置する場合、側岸に凹部が設けられそこに階段工が設置されることが多い。しかしこのように凹部を設ける場合、それが河川の流況に与える影響は必ずしも考慮されているとは言えない。側岸凹部を有する河川の流れ構造に与える影響としては、流れ抵抗による水深の上昇や、周期的な水面変動¹⁻⁵⁾などが知られている。木村・細田ら²⁻⁵⁾は、正方形の凹部を設置すると、水面のセイシュ(自由水面振動)が起こるケースがあることを実験および二次元浅水流解析モデルによって確認している。このとき、せん断不安定による渦が凹部内で発生するセイシュと共鳴したときに大規模渦へと発達することがあり、セイシュの発生と水面振動の振幅はフルード数に依存することなどを指摘している。

側岸に凹部を有する場合はワンド周辺の流れとも見なせ、実験的研究や数値シミュレーションによる検討も行われているが⁶⁻⁸⁾、水面変動現象が問題となるのは側岸凹部の規模が主流の幅に対して無視できなくなる比較的小規模で勾配の急な都市河川である。このような観点からこれまで藤田・椿ら⁹⁻¹³⁾は非構造二次元浅水流モデルに基づく解析を行い、いくつかの重要な知見を得ている。

しかしながら、小規模な河川に設置される側岸凹部の場合、主流に対する影響や凹部内流れの三次元性が相対的に強くなるものと考えられる。側岸凹部流れの三次元解析については、禰津ら¹⁴⁾、矢野・禰津¹⁵⁾などが行ったLESによる比較的低フルード数の流れ場に対する詳細な検討、および門谷ら¹⁶⁾による比較的高いフルード数($Fr=0.6\sim0.8$)の流れ場を対象にした解析などがある。

水面変動に対する実験としては藤田・椿¹⁷⁾がステレオ撮影画像を用いて、ステレオ水面形計測を行い水面変動特性に関する考察を行っている。藤田ら¹⁸⁾はステレオ水面形計測と水面流速のPIVの同時計測を試みている。門谷ら¹⁶⁾は、LES解析によって藤田ら¹⁸⁾の実験結果の再現を行っている。この結果、特定の凹部形状において強い水面振動が発生することが確認され、このとき水面が周期的な振動を起こすとともに、凹部内の流速も周期的な変動を起こしていることが確認されている。

図-1 水路模式図（図中の座標の単位はcm, h_r は基準水深の計測線, h_s は水面変動の計測点, u_s は相関解析の基準点を示す）

表-1 実験ケース

Case	B (cm)	b (cm)	L (cm)	Q (m ³ /s)	h_r (cm)	Fr
A1	10	5	30	0.0015	4.2	0.56
A2			35			
A3			30	0.002		
A4			35			
B1		10	30	0.0015	4.2	0.56
B2			35			
B3			30	0.002		
B4			35			
C1	20		30	0.004	4.1	0.77

以上のように、側岸凹部流れに関する研究は精力的に進められてきたが、実験における計測対象は表面流速や水面の振動に限られ、三次元流れ場の速度計測はほとんど行われてこなかった。そこで本研究では藤田ら¹⁸⁾が指摘した水面変動が大きくなるいくつかのケースを対象として、PIVによる多断面計測から三次元的な流れ場の構造の把握を試みた。また、同一条件を対象としてLESによる数値解析も行い、実験結果との比較からモデルの妥当性や詳細な流れ構造に関する検討を行った。

2. 実験概要

実験は藤田ら¹⁸⁾の実験ケースに合わせて行った。長さ400cm、幅70cmの水路内に、アクリル板の仕切りで図-1に示すような水路幅 $B=10$ cmの水路を設け、上流から200cmの箇所に、奥行 $b=5$ cmおよび10cm、長さ $L=30$ cmおよび35cmの凹部を設置した。水路勾配は $Q=0.0015$ m³/sのケースで1/500, $Q=0.002$ m³/sのケースで1/333である。凹部を設置していない直線水路の水深が $h=4$ cmでその場合の Fr 数が、概ね0.6および0.8となるように下流端のセキ上げを調整した。また、主流幅が水面変動へ与える影響を検討するために、凹部下流端でもっとも顕著な水面変動が見られたケースについて、主流幅を20cmにしたときの計測も行った。実験ケースの諸条件を表-1に示す。ここに、 h_r は $x=-5$ cmの位置で計測した時間平均水深を表し、 Fr もこの値を元に行っている。

図-2 水平断面流速分布（ベクトルは u - v 成分、コンターは u 成分を表す）

流れ場の計測では水路側面からレーザーシートを照射して上方から撮影した画像を用いた水平断面、および水路底面側からのレーザー照射画像を側面から撮影した縦断面の多断面計測を行った。水平断面計測の撮影画像サイズはA1-A4は1024×496(pixel), B1-C1は1024×992(pixel), フレームレートは200fps～500fpsとし、40～16秒間撮影した。計測断面は底面からの鉛直距離 $z=0.5$ ～3.5cmの6断面とした(水面変動が顕著にあらわれたケースB3に関しては～3.0cmまでの5断面)。PIVのテンプレートサイズは50pixel, ベクトル間隔は10pixel(実スケールで約0.5cm)とした。鉛直断面の計測では2台のカメラを使用し、それぞれ凹部の上流部分と下流部分を撮影した。画像サイズはどちらも1024×496(pixel), フレームレートは500fpsとし16秒間撮影した。計測断面は、凹部の側壁から1cm間隔で主流部の $y=-4$ cmの位置まで計測を行った。

3. 凹部内の流れ構造

図-2にA1,A2,B1,B2のケースにおける半水深の水平断面($z=2$ cm)での実験および数値解析による時間平均流速ベクトルを示す。いずれのケースにおいても剥離渦は凹部下流端壁に再付着しており、凹部内全体で大きな循環流を伴う逆流域が形成されている。本研究での実験ケー

図-3 横断面時間平均流速分布 (v - w 成分)。(ベクトルは v - w 成分を表す)

スでは凹部長さ L に対しては大きな差を設けていないため、循環構造の違いは明確に現れていないが、凹部奥行 b の大きいケースで顕著に循環構造が形成されている。また、凹部奥行が短い場合は循環流の中心が凹部の中心付近に位置しており流下方向に長い渦構造を取っているが、長い場合では凹部の中心よりも下流側に循環流の中心が位置しているのが特徴的である。数値解析では循環流の中心位置の若干のずれや逆流強さに多少の違いが見られるが、上述のような特徴は良好に再現されている。ここには示していないが、他の解析ケースにおいてもこのような循環渦が形成されることを確認している。実験と数値解析の結果に若干の差異が生じた原因としては、乱流モデルの精度や格子解像度の影響が考えられる。

図-3に水平面・縦断面の計測結果から合成した横断面内の二次流ベクトルを示した。横断面としては、凹部の中央($x=15, 20\text{cm}$)および下流端に近い断面($x=29, 34\text{cm}$)を選んだ。図-2にも示したが、全体的な傾向として下流端

に近い横断面では、剥離流が再付着するために二次流ベクトルが y 軸の正の部分で左右に分かれていることがわかる。再付着の左右の位置は底面付近を除けば鉛直方向に大きな変化はなく、大局的に見れば平面二次元的な傾向を示している。ただ、下流端の底面付近では主流方向に向かう上向きの流れ、凹部内では側岸側のコーナーに向かう流れが発生しており、これらが側岸凹部内の全体的な流れ場を三次元的にする一つの駆動力となっている。凹部内に注目すると、このような二次流のパターンは凹部深さの小さいケースの方で特に特徴的であり、三次元性がより強いことが推察される。

数値解析は実験結果が示す傾向を概ね捉えているが、下流端に近い断面($x=29, 34\text{cm}$)で側壁に向かう二次流の大きさは実験値よりも大きくなった。水面変動が最も激しいB3のケースでは二次流ベクトルの上下方向の向きにも違いが出た。これは水面変動が激しいために、データのサンプリング時間によってベクトルの向きの平均値が

図-4 点(10, 0, 2)の流下方向速度 u_s に対する相関分布

図-5 点(10, 0, 2)の横断方向速度 v_s に対する相関分布

異なってしまったためと考えられる。このことは、後述の図-7で示すように、数値解析は水面変動に関しては良好な結果を出していることから推察される。

次に、図-4と図-5に参照点 $(x, y, z) = (10, 0, 2)$ cm (図-1の青丸)での流下方向速度 u_s と横断方向速度 v_s に対する $u(x, y)$ および $v(x, y)$ の相関分布をそれぞれ示す。まず、図-4(a)～(d)の比較より、フルード数の増大とともに正の相関分布が流れ方向に伸長していることがわかる。これは相対的な主流速度の増大によるものである。上のケースでは、凹部長さの相関分布への影響はフルード数が同じであればほとんど見られない。すなわち、凹部長さが長い場合($L=35$ cm)の相関分布を $x=30$ cmまでの分布と重ねるとほぼ同じ分布形状を呈しており、下流端の位置が上流側の相関分布に及ぼす影響は見られない。このような傾向は、B1とB2のペアについても同様である。以上の特徴は図-5(a)～(f)に示した横断方向の相関分布についても成り立つ。ただし、凹部奥行長さの影響は明瞭であり、B1およびB2では強い負の相関が主流部にまで及んでいることがわかる。これは、図-5(e) (f)の横断方向の強い相関分布からもわかるように、横断方向の水面振動が主流部にまで及んだ結果と考えられる。また、正・負の相関のピークが交互に現れているのは、側岸凹部内の流れが定常ではなく、凹部への入り口でせん断不安定によって発生する剥離渦が流下するためである。いずれにしても、相関分布を比較するとA1からB2までのケースでは側岸凹部で発生した剥離渦はあたかも下流端の鉛直壁が存在しないかの如く振る舞っていることがわかる。

ところが、残りのB3とB4のペアは他のペアとはかな

図-6 点(10, 0, 2)の横断方向速度 v_s に対するLESによる相関分布

り異なる特徴を示している。すなわち、図-4のペアでは凹部長さが変わると主流部と凹部内の下流側の相関分布が逆転している。図-5の横断方向の相関分布では凹部長さが長くなると相関領域の規模が急激に縮小している点も他のケースと異なる。図-6には同一条件における数値解析の結果を示すが、相関のピーク値が全体的に低く見積もられていることを除けば、正負の相関ピーク位置や

図-7 水面変動計測のための撮影画像

表-2 凹部下流端における水面変動の比較

		h_s	$h_s'_{rms}$	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_v
A1	Exp.	4.32	0.13	0.85	1.7	0.41	0.84
	Calc.	4.39	0.11	0.43	0.87	0.38	0.85
A2	Exp.	4.40	0.13	0.73	0.32	-	0.73
	Calc.	4.44	0.10	0.74	0.39	0.7	1.63
A3	Exp.	4.45	0.28	0.44	-	-	0.42
	Calc.	4.61	0.17	0.47	1.2	-	2.07
A4	Exp.	4.56	0.21	0.39	0.76	1.54	0.74
	Calc.	4.68	0.14	0.82	0.41	1.42	1.86
B1	Exp.	4.31	0.11	0.49	0.93	1.49	0.91
	Calc.	4.38	0.08	1.48	0.94	0.57	1.5
B2	Exp.	4.19	0.15	0.41	0.84	1.41	0.81
	Calc.	4.40	0.11	0.81	1.38	0.56	0.82
B3	Exp.	4.59	0.39	1.33	2.62	-	1.3
	Calc.	4.63	0.37	1.31	2.62	-	1.31
B4	Exp.	4.61	0.16	1.56	0.49	1.22	1.57
	Calc.	4.69	0.16	1.53	0.5	1.07	1.53
C1	Exp.	4.29	0.12	1.2	0.67	-	1.23
	Calc.	4.33	0.15	1.13	0.66	-	1.56

相関分布形状に関するこれまでの考察と矛盾しない結果が得られている。特に、他のケースとは異なる傾向を示すB3とB4のペアについてもその特徴を良好に再現できている点は強調してよい。相関ピークの間隔は凹部上流端から供給される剥離渦の平均的な間隔、あるいはせん断不安定の波長に対応すると考えられるが、B3の横断方向の変動は凹部の中央に正負の2つのピークがあり、周期的な流れ場の振動とセイシユ的な横振動が共鳴して水面変動が強調されたものと考えられる。

4. 凹部下流端における水面変動

凹部を設置した流れ場では形状抵抗により特に凹部下流端で水面の上昇が起こる。加えて、水面変動も凹部下流端で最も振幅が大きくなること藤田ら¹⁸⁾の実験などにより明らかになっている。そこで本研究では、側壁から1cmの距離にレーザーシートを当て、水面の斜め上から撮影して得られた画像(図-7)の凹部下流端から1cmの位置(図-1中の h_s)に引いた検査線(図-7中の赤線)から時空間画像を作成し、二値化処理を行って水面形を

図-8 凹部下流端における水面変動の実験値および解析値の比較

検出し変動量を測定した。

表-2に実験および解析結果から求めた水面変動の卓越周波数、また参考値として点(10,0,2)における横断速度変動から求めた卓越周波数 f_v を示す。 h_s は時間平均水深、 $h_s'_{rms}$ は水面変動量のrms値、 f_1 、 f_2 、 f_3 はそれぞれ卓越周波数の第1、第2、第3ピークを示す。全体的にみると h_s は解析結果の方が大きく、 $h_s'_{rms}$ では実験結果の方が大きくなるという傾向があるものの、フルード数 Fr が相対的に小さいケース(A1,A2,B1,B2)に対して Fr の大きいケース(A3,A4,B3,B4)では水面変動が大きくなっている事が確認できる。ただし、B3のケースにおいては実験結果、解析結果ともに突出した変動量を示しており、A3においても比較的大きな変動量を示している。

つぎに水面変動の周波数について個別に見ていくと、凹部奥行が5cmのケースではA1については f_1 - f_2 (実験値-解析値)、A2については f_1 - f_1 、A4については f_1 - f_2 と対応して比較的近い値となっている。A3については実験値の f_1 と解析値の f_1 がほぼ同じ値を持っており、この周波数が非常に卓越していた。同様に、凹部奥行が10cmのケースではB1については f_2 - f_2 、B2については f_2 - f_1 および f_2 - f_2 、B4については f_1 - f_1 および f_2 - f_2 、B3については f_1 - f_1 その倍の周波数 f_2 - f_2 が実験と解析でほぼ一致しており、こちらもA3同様に卓越していた。C1については実験値の f_1 と解析値の f_1 が対応している。これらのことから、いずれのケースにおいても水面変動は固有の周期を持っており、それらは凹部の幾何形状や流速などの水理条件に依存して変化するということが推定できる。速度変動の周波数については水面変動のピーク周波数のいずれかと一致しているケースがほとんどであり、水面変動場と速度場が互いに影響を及ぼしあっていることがわかる。

図-8に、B3,B4,C1のケースにおける凹部下流端 h_s での水面変動を比較した。B3では二つの頂点を持つ非常に周期的な強い振動がみられる。B4,C1でも、特に数値解析結果のほうで周期的な振動は見られるが、B3のケースほど明らかな周期性は現れていない。これらのことからB3では他のケースと比較して特に流れ場の振動が強

くなる強振動モードが再現されている。このモードが発生するのは、側岸凹部の幾何形状だけでなく、せん断不安定を伴う流れ場の波長と凹部長さの関係が共振関係を満足したためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、藤田ら¹⁸⁾のステレオ水面計測実験によって明らかになった強い水面変動を引き起こす側岸凹部流れを対象として詳細な三次元計測を行い、門谷ら¹⁹⁾がLESによって得た結果に対して実験的な検証を行った。その結果、横断面内二次流のLESによる解析と実験値は定量的には必ずしも一致しないが、凹部内流れを特徴づける全体的な流れのパターンについてはその特徴を概ね再現できた。すなわち、凹部奥行が小さなケースでは、凹部内で相対的に流れの3次元性が強くなるのに対し、凹部奥行が大きくなると凹部内の流れが2次元的になることを確認した。また、半水深の水平断面における流速分布を用いて行った相関分析からは、凹部内剥離渦の位置と間隔に関する情報が得られ、特に水面変動が強いB3のケースでは、横断方向流速の相関分布において凹部内で正負の強いピークが現れることを明らかにした。このことから、このケースでは剥離渦によって生成される流れ場と水面変動場が共振して強い水面変動を生じさせていることが推察された。さらに、同一条件で主流幅を増したケースC1では強い振動は発生せず、水面変動の卓越周波数も多少変化することから水面振動に横断方向のスケールが関与していることを明らかにした。このような特徴は、実験とLES解析の両方で確認され、LESによる解析モデルが局所的な水面変動の解析に有用であることがわかった。また、本研究で対象としたような主流幅の狭い側岸凹部流れで発生する水面変動は、幾何形状だけでなくせん断不安定の波長や剥離渦の配置も共振の要因となることを示すことができた。

参考文献

- 1) 藤田一郎, 小澤純, 長浜弘典: 直線水路に設置された側岸凹部が主流に与える影響について, 応用力学論文集, Vol.4, pp.549-556, 2001.
- 2) 木村一郎, 細田尚, 友近文志: 死水域を伴う開水路流れの非定常振動特性, 水工学論文集, 第38巻, pp.425-430, 1994.
- 3) 木村一郎, 細田尚, 安永良, 村本嘉雄: 開水路流れ死水域周辺の水面振動, 流体混合特性, 水工学論文集, 第41巻, pp.711-716, 1997.
- 4) Kimura, I. and Hosoda, T.: Fundamental properties of flows in open channel with dead zone, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.123, pp.98-107, 1997.
- 5) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄, 安永良: 開水路流れにおける死水域内の流体振動に及ぼす水理パラメータの効果, 水工学論文集, 第39巻, pp.779-784, 1995.
- 6) 中川研造, 河原能久, 玉井信行: ワンド内の流れの水理特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第39巻, pp.595-600, 1995.
- 7) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 池谷和哉: PIVを用いた開水路凹部流れにおける水平渦構造の解析, 土木学会論文集, No.677/II-55, pp.53-61, 2001.
- 8) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 矢野勝士: 側壁に凹部を有する開水路乱流の組織構造に及ぼすフルード数の影響, 土木学会論文集, No.733/II-63, pp.77-88, 2003.
- 9) 椿涼太, 藤田一郎, 中野淳: 湾曲部に設けた側岸凹部流れに関する研究, 水工学論文集, 48巻, pp.59-864, 2004.
- 10) 藤田一郎, 椿涼太, 竹島雄介: 側岸凹部を有する開水路流れの水面変動特性に関する研究, 応用力学論文集, Vol.7, pp.969-977, 2004.
- 11) 藤田一郎, 椿涼太: 中小都市河川に設置された側岸凹部構造物の非構造格子有限体積法による影響評価, 水工学論文集, 47巻, pp.523-528, 2003.
- 12) Tsubaki, R. and Fujita, I.: Estimation of flow past a side cavity using a finite volume method with an unstructured grid, *Proceedings of the Sixth International Summer Symposium*, p.149-152, 2004.
- 13) 椿涼太, 藤田一郎: 非構造格子浅水流数値モデルを用いた側岸凹部流れの水面振動構造の解析, 水工学論文集, 50巻, pp.763-768, 2006.
- 14) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 矢野勝士: 側壁に凹部を有する開水路流れのLES解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.403-408, 2002.
- 15) 矢野勝士, 瀬津家久: 開水路ながれにおける側壁凹部流れのPIV計測およびLES計算, 応用力学論文集, Vol.7, pp.961-968, 2004.
- 16) 門谷健, 藤田一郎, 椿涼太, 松原隆幸: 水面変動を考慮したLESによる側岸凹部を有する開水路流れの解析, 水工学論文集, 第51巻, pp.655-660, 2007.
- 17) 藤田一郎, 椿涼太: ステレオ水面計測法とPODを用いた側岸凹部流れの水面振動構造の解析, 水工学論文集, 第49巻, pp.535-540, 2005.
- 18) 藤田一郎, 松原隆幸, 椿涼太: 水深と流速の同時ステレオ計測による開水路サイドキャビティ流れの振動モード解析, 応用力学論文集, Vol.10, pp.813-824, 2007.
- 19) 門谷健, 藤田一郎, 椿涼太: 開水路側岸凹部のアスペクト比の違いが三次元流れ構造に及ぼす影響, 応用力学論文集, Vol.11, pp.881-888, 2008.

(2010. 9. 30受付)