

開水路流れの段落ち側壁付近の乱流特性

徳山工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○蒲生 諒
 徳山工業高等専門学校 正会員 渡辺勝利
 徳山工業高等専門学校 正会員 佐賀孝徳

1. はじめに

実河川では、流れの減勢のために落差工が用いられる。落差工の下流の河床は、流水や落石による損傷を防ぐために床止めによって保護されている。しかし、図-1に示すように、落差工の側壁部にも損傷が生じることが指摘されている。これらの損傷は局所的であるが、そのまま放置すれば護岸全体の崩壊に繋がる危険性を有している。よって、その発生因や対策を見出すことは河川防災上の重要な課題であると考えられる。

これまでに、段落ち流れに関する研究は行われており、様々な知見が得られているが^{1) 2) 3)}、そのほとんどは水路中央部に関するものであり、側壁部の流れの特徴については十分な究明がなされていない。また、開水路側壁部固有の流れ構造であるコーナーフローの段落ちに伴う変化過程や実河川に見られる護岸隅角部の破損との相互関係は重要な研究課題と考えられる。

以上を踏まえて、本研究では開水路流れに段落ち部を設置し、流速計測、流れの可視化実験を行い、流速分布および組織構造の特徴について検討を行った。

2. 実験装置および方法

実験には、図-2に示した透明アクリル樹脂板製の滑面直線開水路(長さ10m,幅60cm,高さ15cm,水路勾配1/1000)を用いた。厚さ2cmの塩ビ樹脂板を水路の上流端から5m下流まで設置し、その下流端を段落ち流れとして取り扱う。図-3には段落ち部水路形状および座標系を示した。

実験では、PTV(Particle Tracking Velocimetry)による流速



図-1 落差工付近の護岸被災状況

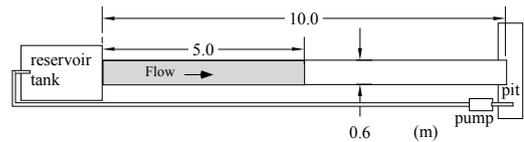


図-2 実験水路概要

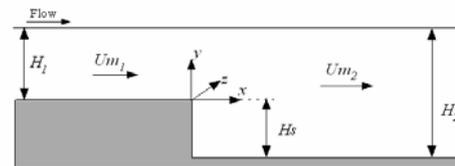


図-3 段落ち部水路形状および座標系

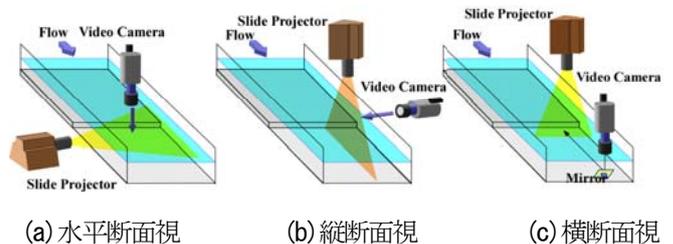


図-4 実験方法概略

表-1 実験条件

Case	H1 (cm)	H2 (cm)	B (cm)	Q (cm ³ /sec)	Um ₁ (cm/sec)	Um ₂ (cm/sec)	v (cm ² /sec)	Re (UmH/v)
A	4	6	60	2475	10.3	6.9	0.009233	4468
B	4	6		2480	10.3	6.9	0.009090	4547
C	4	6		2372	9.9	6.6	0.009070	2372

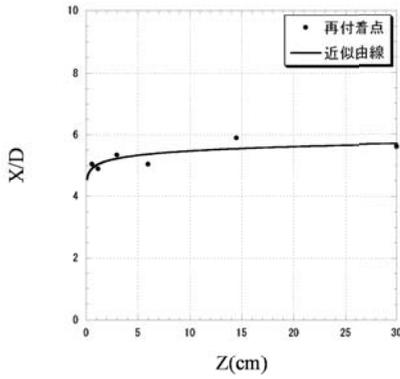


図-6 再付着点の形成領域(Case A)

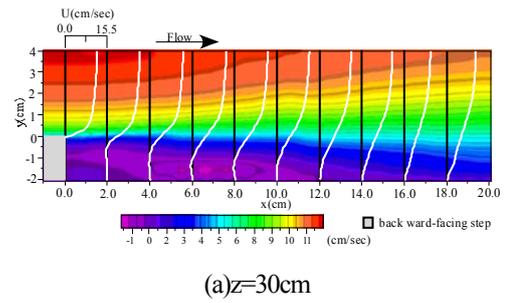
計測，蛍光染料水溶液注入による流れの内部流況の可視化を行った．PTVの解析には解析ソフト「Flow PTV」((株)ライブラリ)を用いた．流れの内部流況の可視化では蛍光染料水溶液を注入し，スライドプロジェクターの照明を用いて，図-4に示すように縦断，横断，水平断面視を撮影した．実験条件は表-1に示すとおりである．

3. 実験結果および考察

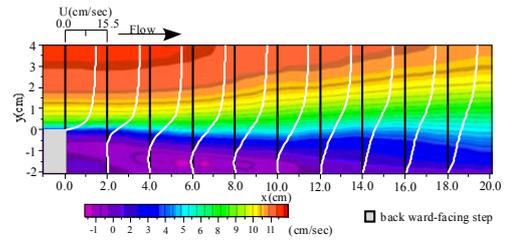
(1) 平均流速分布

図-5は，PTVによる流速計測によって得られた横断方向の各地点における平均主流速分布 $U(y)$ を示している．これらの図より，段落ち下流ではどの地点においても常に逆流域が存在している．また，水路中央部($z=30\text{cm}$)では水表面に存在する最大流速点が側壁に近づくにつれてそれは水表面以下へ移動していることが明らかである．また，図-6は，図-5の各地点における再付着点の位置を示したものである．再付着点とは，段落ちによって底壁面から剥離した流体が再び底壁面に付着する点である．本研究では，この再付着点を底壁面上における速度勾配(dU/dY)が0となる位置として決定した．これより，側壁付近における再付着点の位置は $X/D=5$ 付近となっており，水路中央部におけるそれ($X/D=5.8$)と比較してわずかに減少している．

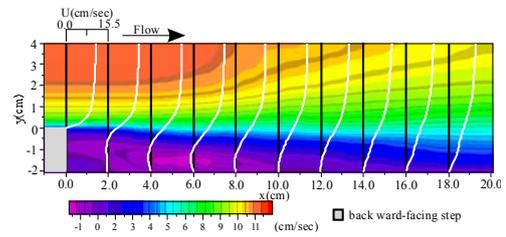
図-7は，各横断面における主流速の等値線分布および二次流分布をベクトル表示したものである．これらの図より，側壁付近の二次流れは，段落ち上流の $x=7.5\text{cm}(X/D=3.75)$ においては側壁付近において典型的な側壁近傍のコーナーフローが形成されている．段落ち直下の $x=2.5\text{cm}(X/D=1.25)$ ではコーナーフローが強まり，破線で示した底壁面方向の下降流と長方形で囲んだ剥離



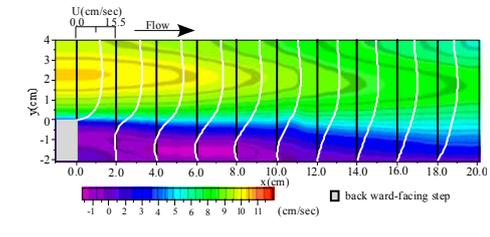
(a) $z=30\text{cm}$



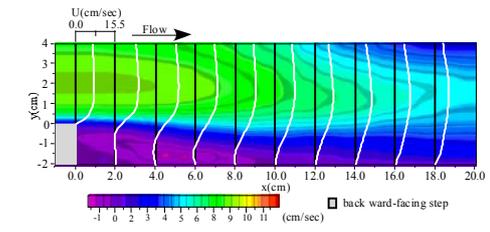
(b) $z=14.5\text{cm}$



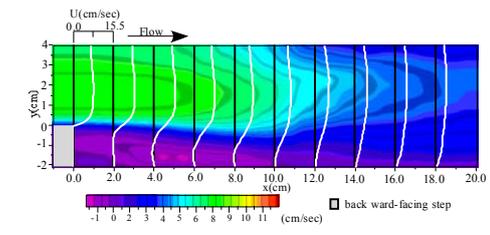
(c) $z=6\text{cm}$



(d) $z=3\text{cm}$

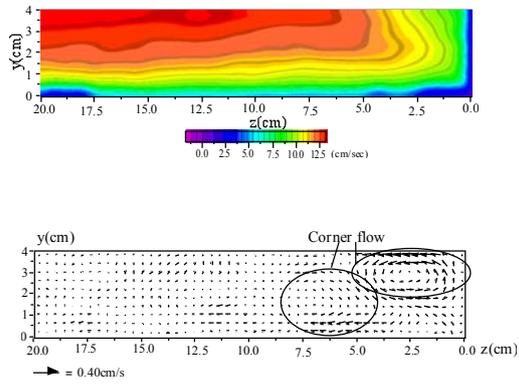


(e) $z=1.2\text{cm}$

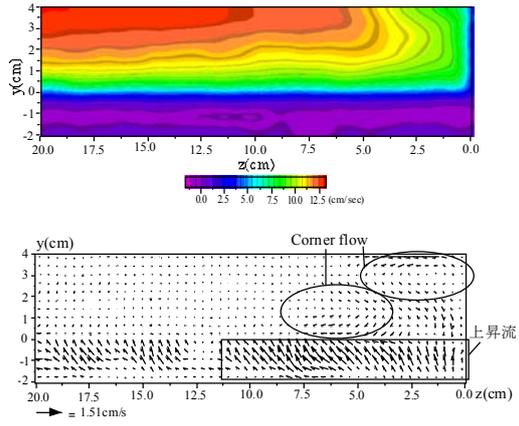


(f) $z=0.6\text{cm}$

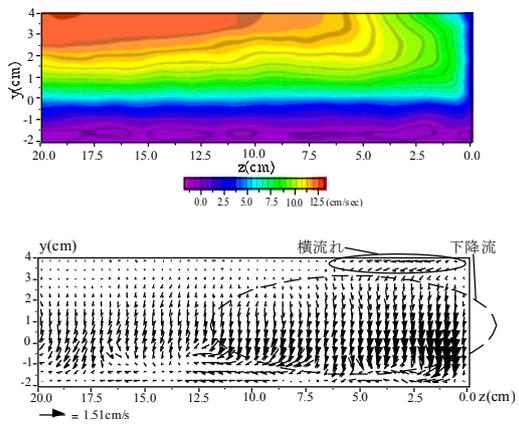
図-5 縦断面視主流速分布(Case A)



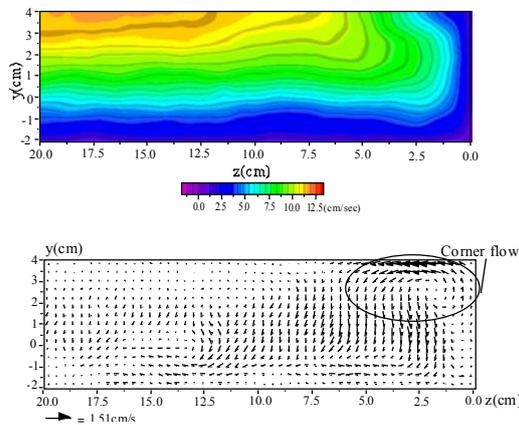
(a) $x = -7.5 \text{ cm} (X/D = -3.75)$



(b) $x = 2.5 \text{ cm} (X/D = 1.25)$

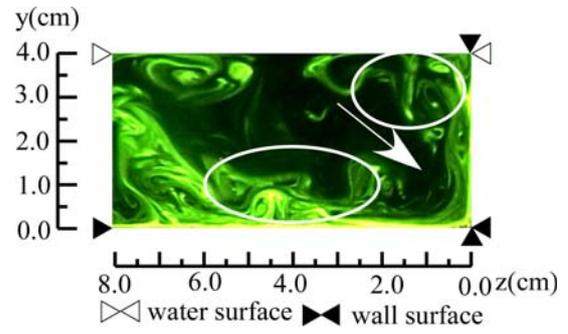


(c) $x = 8.5 \text{ cm} (X/D = 4.25)$

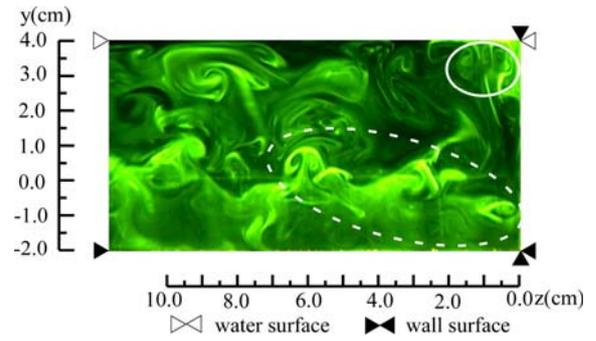


(d) $x = 19.5 \text{ cm} (X/D = 9.75)$

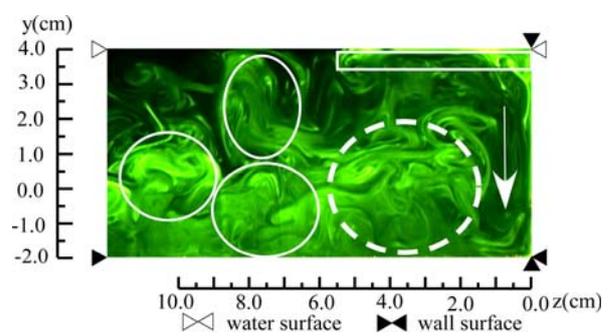
図-7 横断面視主流速分布および二次流分布(Case B)



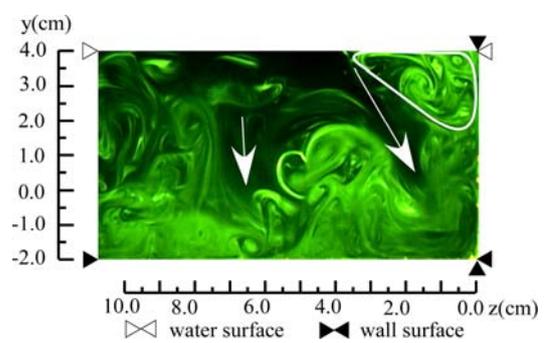
(a) $x = -10 \text{ cm} (X/D = -5)$



(b) $x = 5 \text{ cm} (X/D = 2.5)$



(c) $x = 8 \text{ cm} (X/D = 4)$



(d) $x = 18 \text{ cm} (X/D = 9)$

図-8 組織構造の特徴(Case C)

域における上昇流との明瞭な境界が形成される。 $x=8.5\text{cm}(X/D=4.25)$ ではコーナーフローは消失して、図中に丸印で示したように、対岸向きの横流れと破線で示した下降流が顕著になる。この横流れは増加を続け、 $x=19.5\text{cm}(X/D=10)$ 付近で側壁の水表面隅角のコーナーフローのみ出現することが明らかとなった。

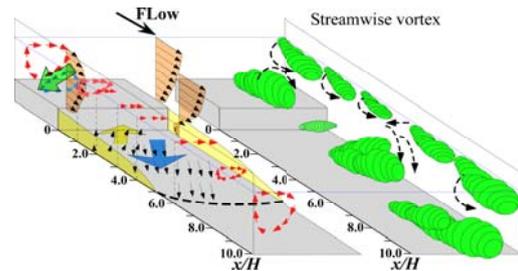


図-9 流れの概念図

(2)組織構造の特徴

図-8には、段落ち上流10cmから下流18cmまでの各断面における側壁付近の横断面視の一例を示している。(a)の段落ち上流10cm($X/D=5$)の位置では、図中に丸で囲んで示しているように側壁と底壁上に縦渦構造が形成され、その両者が隅角方向への矢印のような二次流を誘起していることが推察された。このような開水路側壁隅角の組織構造については佐賀ら⁴⁾によって詳しく研究されている。(b)の $x=5\text{cm}$ では、図中に破線で示したように、側壁上に定常的な横断方向に軸を持った渦構造の形成が認められた。この断面位置は実河川の局所的な洗掘が発生する場所に相当しており興味深い。また、側壁から発達する水表面付近の組織構造が(a)の $x=10\text{cm}$ に比べそのスケールが小さくなっていることが観察された。(c)の $x=8\text{cm}$ では、側壁付近に破線で囲んで示した渦構造によって、下降流が誘起されていることが観察された。また、四角で囲んで示したように側壁部の水表面隅角から対岸方向へ発達する組織構造の形成が観察された。この構造は、図-7(c)の $x=8.5\text{cm}$ における顕著な横流れを誘起していることが推察された。(d)の $x=18\text{cm}$ では側壁の下降流と白線で囲んで示した側壁の渦構造が再び形成されることが確認された。

以上の組織構造の可視化の結果から、側壁の水表面隅角に形成される渦構造は段落ちに伴って減少するが、再び増大する傾向にあることが認められた。また、段落ち高さの2倍程度下流の側壁上に横断方向に軸を持った渦構造が定常的に形成されることが明らかとなった。

以上の知見を踏まえ、図-9に流れの概念図を示す。

4. おわりに

本研究では、段落ち流れ側壁付近の乱流構造の特徴を、流速計測および組織構造の可視化により検討した。

以下に、本研究によって得られた主要な知見を示す。

- (1) 側壁付近の主流速分布は段落ち下流においては最大流速点が水表面以下に現れ、底壁付近には逆流域が形成される。
- (2) 側壁付近における再付着点の位置が $X/D=5$ 付近となり、側壁付近においても水路中央部と比較するとわずかに減少することが明らかとなった。
- (3) 側壁付近の二次流れは、段落ち上流においては側壁方向へのコーナーフローが形成されているが、段落ち下流側ではそれが弱まって徐々に消失して、対岸向きの横流れと下降流が顕著となり、 $X/D=10$ を過ぎると側壁部のみ形成されることが明らかとなった。
- (4) 側壁の水表面付近の縦渦構造のスケールは、段落ちに伴って減少するが、その後徐々に増加する。
- (5) 段落ち高さの2倍付近の下流の側壁上には横断方向に軸を持った渦構造が定常的に形成されることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Nezu, I. et al : Turbulent structure of backward facing step flow and coherent vortex shedding from reattachment in open-channel flows, *Turbulent Shear Flows* (ed. Whitelaw, J.H et al), Springer-Verlag, Vol.6, pp.313-337, 1988.
- 2) Silveira, N.A. et al : A numerical investigation of coherent vortices in turbulent behind a backward facing step, *J.FluidMech*, Vol.256, pp.1-25, 1993.
- 3) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 造士快竹, 森大輔 : 段落ち流れにおける乱流構造と瞬間圧力との関係, 応用力学論文集, Vol.12, pp. 841-849, 2009.
- 4) 佐賀孝徳, 渡辺勝利, 大成文博 : 開水路乱流側壁領域の組織構造と二次流れの形成機構, 土木学会論文集, No.677/II-55, pp.33-41, 2001.
- 5) 玉井信行, 祢津家久, 小松利光, 大成文博, 大橋正和, 浅枝隆 : 委員会報告 乱流における組織構造の役割, 土木学会論文集, 第423号II-14, pp.25-41, 1990.