

ブランチブロック護岸模型周辺の流況特性

CARACTERISTICS OF FLOW STRUCTURE NEAR THE BRANCH BLOCK BANK PROTECTION MODEL

渡辺勝利¹・吉村隆顕²・原 隆³

Katsutoshi WATANABE¹, Takaaki YOSHIMURA² and Takashi HARA³

¹ 正会員 工博 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒775-8585 山口県周南市学園台3538)

² 非会員 代表取締役 (株)吉工園 (〒759-2152 山口県美祢市西厚保町原1675-2)

³ 正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (同上)

The branch block is a reinforced concrete block which consists of one trunk part and three branches part. In this study, basic hydraulic properties of the branch block bank protection were examined using the one-fortieth block model. Velocity measurements and flow visualization were carried out in a turbulent open channel flow in which the block models are set up along the side wall of the channel. The results of the velocity measurements show that the primary velocity over side wall is relatively low due to the strong secondary flow toward opposite side wall. Local low speed region were generated over the region of the junction of upper and lower branches of the block model. The results of flow visualization show that the large-scale longitudinal vortical structure is formed over the block model. It is inferred that these vortical structure contribute to generate characteristics of the velocity profiles.

Key Words : Branch block, bank protection, hydraulic property, flow visualization

1. はじめに

ブランチブロックとは、図-1に示すように1本の主軸（幹材）に、その両端から3方向に突起（枝材）を配置した鉄筋コンクリート製ブロックである。これをハニカム状に配置し、その背後に石材を空積みすることにより、図-2のような擁壁を築造できる工法をブランチブロック工法という。本工法は、①環境調和機能を有する、②工期の短縮・省力化が可能、③多様な地形に対応、④現地発生材が使用可能、という4つの特徴を有している。環境調和機能とは、空積み方式を採用していることから、石材の間に樹木を植栽することができ、中詰材の間隙は小動物等に住空間を与えられるということを意味している。ブランチブロック工法は人工構造物と自然石を組み合わせたハイブリッドな工法と位置づけられ、擁壁としての強度と環境保全機能を併せ持つことから、本工法の河川護岸への適用が期待されている。

ブランチブロック工法を河川護岸に適用するには、ブロックの水理学的特性を把握する必要がある。そこで、本研究では、ブランチブロック護岸模型を作成し、護岸周辺の流速計測、内部流況の可視化実験を行い、ブロック護岸周辺の流れに関する基礎的な水理学的特性を検討



図-1 ブランチブロック概観



図-2 ブランチブロック工法による法面施工例

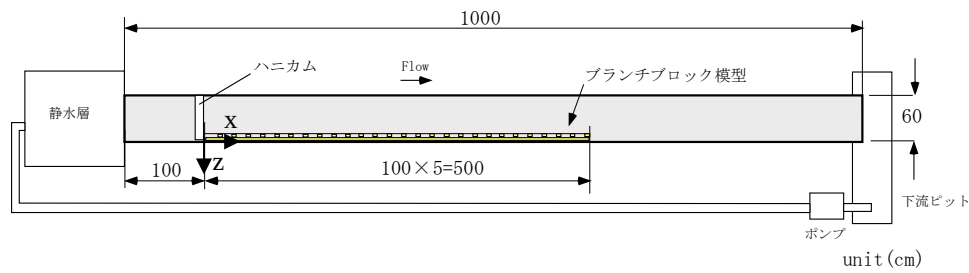


図-3 実験水路平面図

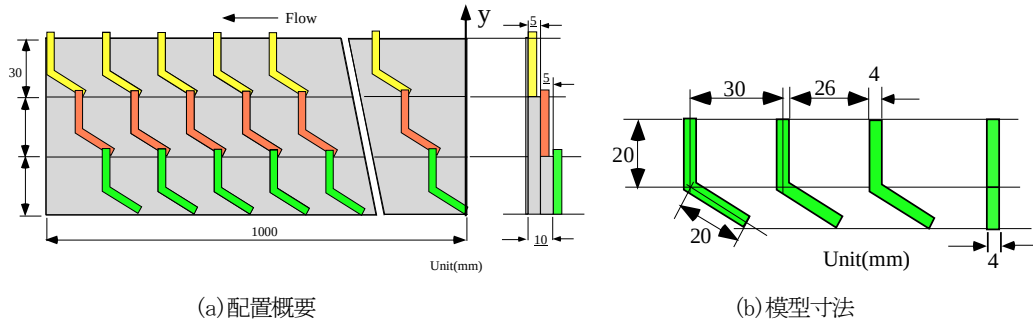


図-4 ブランチブロック護岸模型

表-1 実験条件

Case	B(cm)	H(cm)	B/H	ν (cm ² /sec)	Q(cm ³ /sec)	Um(cm/sec)	Re(UmH/ ν)	Fr((Um/gH) ^{0.5})
A	60	9.1	6.6	0.01204	3250	6.0	4536	0.064
B	60	4.3	14.0	0.01204	2150	8.5	3019	0.130
C	60	8.5	7.1	0.01308	2464	4.9	3168	0.053
D	60	9.1	6.6	0.01204	2150	4.0	3001	0.042

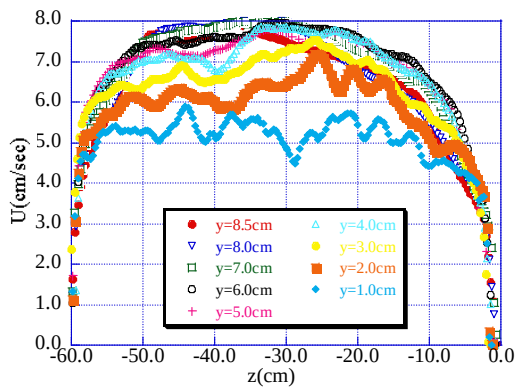
した。

2. 実験装置および方法

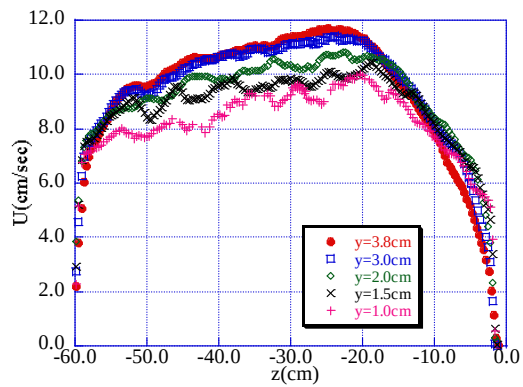
本実験には、図-3に示すような総アクリル樹脂板製の全長10m、幅60cm、高さ15cmの可変勾配式開水路を使用した。本水路の上流1mの位置から下流5m区間の右岸側壁にブランチブロック護岸模型を設置した。模型製作においては、ブランチブロック護岸上の流れを、鉛直および傾斜した枝型粗度が流れ方向に規則的に並んだ粗面流れと捉えた。実際のブロックでは、ブロックが重なり合って斜面を作り、その表面は70度程度の傾斜角度を有する。このため護岸の傾斜による二次流れへの影響が懸念されるが、粗面の効果を明確にするために、ブロック面は階段状の鉛直面とした。ブランチブロック護岸模型の詳細は図-4に示すとおりである。模型縮尺は1/40であり、高さ9cm、長さ1mのプラスチック板に1辺4mmのアクリル棒材を鉛直および斜め方向に貼り付けた。ブランチブロックの前方の枝材は3本であるが、その内の1本は施工の際、砕石の中に埋設されるため、法面上には2本が出現することになる。これを考慮して、模型では図のように2本の枝材を設置した。これにより、枝材の配置は階段状を呈するため、設置方向によって枝材の効果が異なると考えられる。本実験では、枝材が下流方向に

階段を登っていく方向に設置することにした。

流れ場の流速計測にはPTV(Particle Tracking Velocimetry)を採用した。トレーサーには粒径100 μ m、比重1.04のリルサン粒子（アルケマ株式会社）を、照明にはスライドプロジェクター（1Kw）による厚さ2mmのスリット光膜を使用した。粒子の流動状況の撮影では、スリット光膜を水平（あるいは鉛直）方向に照射し、上流から注入されたトレーサー粒子がスリット光膜を通過する際の流動画像をデジタルビデオカメラ（Sony DVX2000）を用いて撮影した。得られた粒子流動画像から流速ベクトルを求めるために、画像の輝度、角度、鮮明度を調整し、ビスマップ画像に変換した。その画像を1/30秒間毎に60秒間（1800枚）に亘ってコンピュータに取り込み、ソフトウェアFlow PTV（㈱ライブラリ）を用いて解析した。護岸模型周辺の流況観測には、蛍光染料注入法を用いた。トレーサーには蛍光染料水溶液（比重1.005）を、照明にはブラックライト、前出のスリット光膜を採用した。実験では、2m程度上流から200cc程度のトレーサを静かに注入し、初期の攪乱部分が流下した後に、照明とトレーサーによって可視化された流体運動を前出のビデオカメラで撮影した。なお、横断面視の場合は、流れの影響を及ぼさない下流1.5m程度の位置に小さな鏡を設置して撮影した。実験条件は表-1に示すとおりである。表中のBは水路幅、Hは水深、 ν は動粘性係数、Umは断面平均流速にそれぞれに対応している。

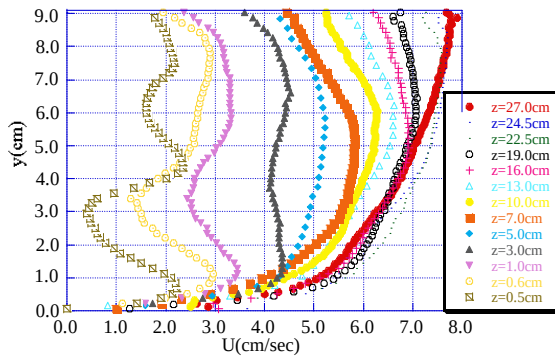


(a) H=9.1cm (Case A)

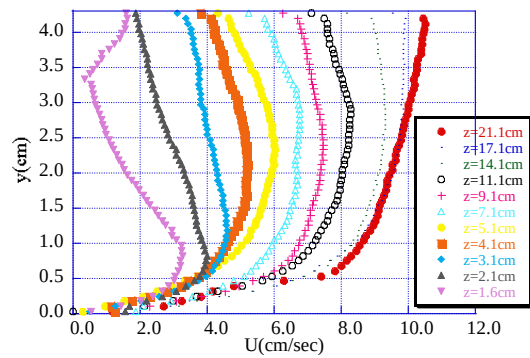


(b) H=4.3cm (Case B)

図-5 主流速横断方向分布



(a) H=9.1cm (Case A)



(b) H=4.3cm (Case B)

図-6 主流速鉛直方向分布

また、 Re はレイノルズ数、 Fr はフルード数を示している。

3. 実験結果および考察

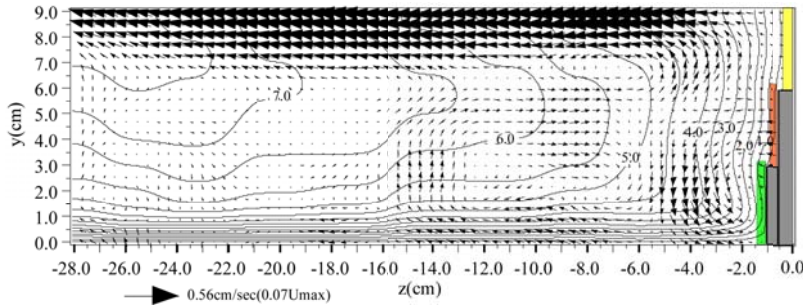
(1) 流速計測結果

図-5は、主流速の横断方向分布である。横軸の $z=0$ cmが、ブランチブロック護岸模型（以下、護岸模型と呼ぶ）を設置した右岸側壁、 $z=-60$ cmがアクリル樹脂滑面側壁にそれぞれ相当する。(a)は $H=9.1$ cm (Case A)の条件における流速分布である。壁面付近では平均時間の不足から分布のばらつきが見られるが、護岸模型側の主流速は滑面の左岸側と比較して低減傾向にあることが認められる。また、側岸近傍の速度勾配 ($\partial U / \partial z$) は護岸模型周辺では左岸のそれに比べて相対的に小さいことも認められる。(b)は $H=4.3$ cm (Case B)における主流速分布である。これより、護岸模型側の主流速の低減がより顕著であることが明瞭であり、これに伴う流量欠損を補うために、水路中央付近の右岸側で最大流速が生ずる特徴的な分布が形成されている。また、護岸模型付近の速度勾配 ($\partial U / \partial z$) は、左岸のそれに比べて小さく、そ

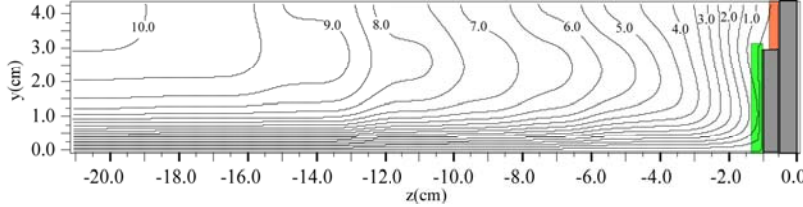
の傾向は、水表面方向に顕著になっている。

図-6には、主流速鉛直方向分布を示している。(a)に示したCase Aにおいては、護岸付近においては $y=3.0$ cm、 6.0 cm付近で局所的な低速域が形成され、鉛直方向にS字を2回描くような特徴的な分布を呈している。この局所的な低速域は、図-4に示した護岸模型の枝材の先端部が交差する地点に相当している。また、開水路側壁近傍で見られる半水深位置が水表面よりも高速となる流速分布が水深の2倍以上の $z=-24.5$ cmまで認められる。Case Bでも(b)に示すように、護岸付近では $y=3.0$ cm付近が低速領域となり、S字を描くような分布を呈している。また、護岸から離れた $z=-14.1$ cmまで半水深位置が高速化、水表面付近が低速化する分布が認められ、護岸模型の影響が水深の3倍を超える範囲まで及んでいる。

図-7は、Case A、Bの護岸模型周辺の主流速の等値線図を示している。これより、護岸模型周辺の主流速の低減、護岸の階段部分で局所的な低速域が形成されること、半水深付近が高速となる流速分布の特徴がより明瞭に理解される。Case Aには、二次流ベクトル (V, W) を重ねて示している。これにより、護岸模型から対岸方向への顕著な横方向流れが形成されていることが明らかである。

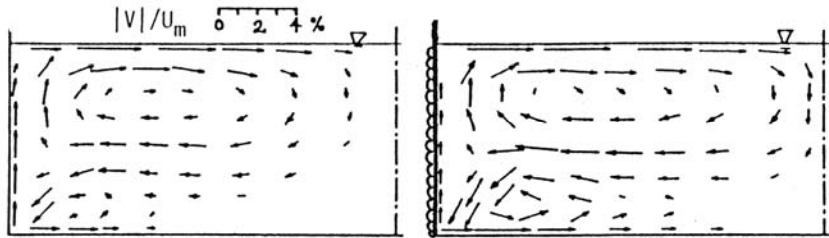


(a)主流速等値線，二次流重合図 (Case A)



(b)主流速等値線図 (Case B)

図-7 主流速等値線分布



(a)側壁が滑面の水路

(b)側壁が粗面の水路

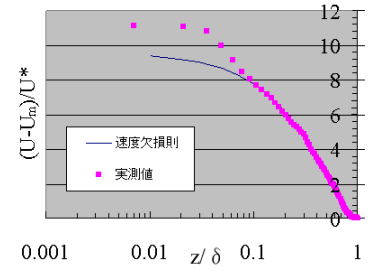
図-8 側岸に粗度を設置した開水路流れの二次流の構造¹⁾

また、枝材が交差する付近での局所的な低速域に対応する領域では同様に対岸向きの二次流れが形成されており、全体として、ブランチブロック護岸模型固有の二次流構造が形成されていると考えられる。

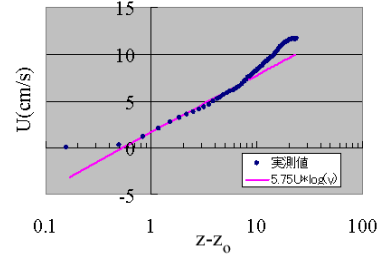
このような、側岸に粗度を有する開水路流れについては図-8に示すように、Naot¹⁾が側岸付近の水表面と底面渦が強くなることを数値計算結果から示している。この予測された流れ場の特徴と本実験との流速分布の特徴の類似性が認められる。

(2) 粗度係数評価

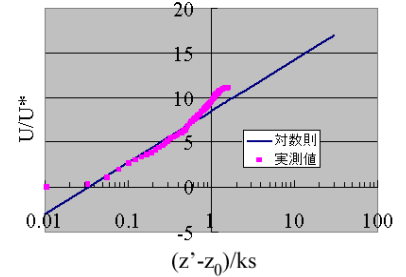
護岸ブロックの水理特性の1つとして、流速計測の結果から粗度係数に関する検討を行った。その方法としては、護岸ブロック試験マニュアル²⁾を参考にした。一般的に護岸ブロックの力学特性を示す指標としては、抗力係数 C_D と揚力係数 C_L 、相等粗度 k_s 等が求められる。これらを求めるには、レイノルズ数が 1×10^4 以上でかつ、 5×10^5 の条件を含むケースを実施することを原則としている。また、通常、流れの二次元性を保つために、護岸模型は底壁面に設置した形で実験が行われる。本実験では使用したポンプ性能の限界から、高レイノルズ数を実現できない。また、護岸模型が側壁に設置されている、



(a)速度欠損則



(b)原点補正



(c)対数分布式

図-9 相等粗度 k_s の算定過程

$$\frac{U}{U_*} = 8.5 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{(z' - z_0)}{k_s} \right) \quad (1)$$

$$\frac{U - U_m}{U_*} = -9.6 \left(1 - \frac{z'}{\delta} \right) \quad (2)$$

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66 \sqrt{g}} \quad (3)$$

という2つの制約を前提として、護岸のマニングの粗度係数を評価した。

マニングの粗度係数を求めるために、Case A,Bにおける主流速の水表面付近の横断方向分布に(1)式の対数速度分布を適用した。本式中の U は主流速、 U_* は摩擦速度、 z' は粗度上端からの水平方向距離、 z_0 は仮想原点位置、 k_s は相等粗度を示す。摩擦速度 U_* を求めるには、式(2)の乱流境界層の速度欠損則³⁾を採用した。本式中の U_m は乱流境界層においては外層の一樣流速を与えるが、ここでは主流速の横断分布における最大値を与えた。 δ はその最大流速の99%の値が生ずる z の値とした。図-9は(a)、

表-2 粗度係数評価結果一覧

Case	y(cm)	U_* (cm/sec)	z_0 (cm)	K_{sm} (cm)	K_{sp} (m)	$n(m^{-1/3} \cdot s)$
A	8.9	0.47	0.35	4.5	1.80	0.046
A	8.5	0.45	0.35	3.9	1.56	0.045
B	3.8	1.05	0.35	15.0	6.00	0.057
B	3.0	0.79	0.35	5.0	2.00	0.047

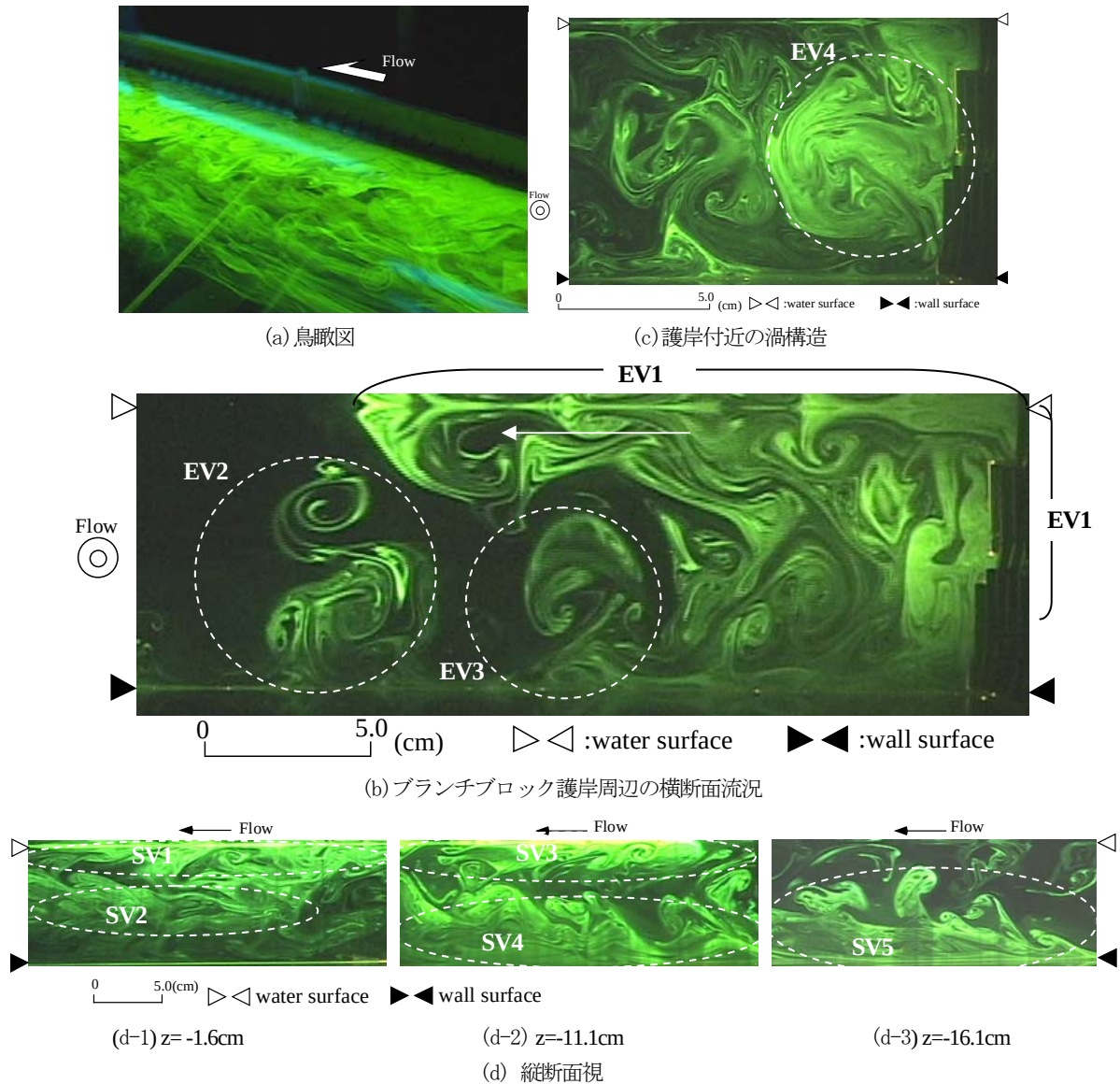


図-10 ブランチブロック護岸模型周辺の内部流況 (Case C)

Case Aの $y=8.9\text{cm}$ における主流速横断方向分布に式 (2) を適用した結果を示している。本式は $y/\delta > 0.15$ で良好に一致することが知られているが、本実験結果においても良好な一致が認められる。同図(b)は仮想原点を求める過程で作成された。ここでは仮想原点 z_0 を仮定し、 $(z - z_0)$ と U をプロットした描点の傾きが $5.75U$ と等しくなるように z_0 を調整した。摩擦速度 U_* および仮想原点 z_0 を求め、それらを(1)式に代入し、相等粗度 k_s を求めた。同図(c)は、(a)、(b)から得られた摩擦速度 U_* 、仮想原点 z_0 を式 (1) に代入し、相等粗度 k_s を調整したものである。

以上のようにして求められた模型の相等粗度を k_{sm} とし、

それに縮尺を乗じた値を原型値 k_{sp} とした。これを、式 (3)に代入してマンニングの粗度係数 n を求めた。なお、対数速度分布を適用した断面は、側壁から発達した境界層が底壁からの影響が少ないと考えられる水表面の極近傍領域を選んだ。表-2には、Case A,Bの各高さ (y) において得られた摩擦速度 U_* 、仮想原点 z_0 、模型の相等粗度 k_{sm} 、実際の相等粗度 k_{sp} 、マンニングの粗度係数 n の一覧を示した。マンニングの粗度係数 n については0.045～0.057の値が得られた。これらの値の範囲としては、掘削あるいは浚渫水路の概略値に相当している⁴⁾。

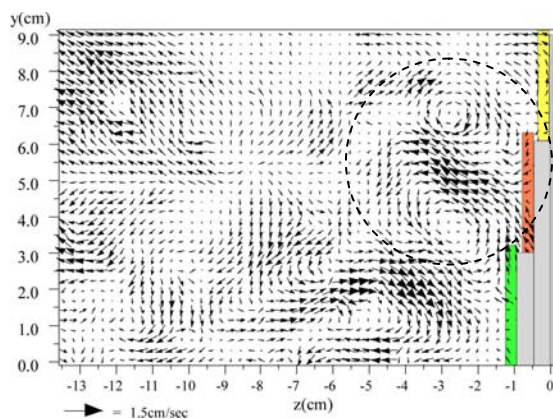


図-11 護岸模型周に形成された瞬時二次流れ (Case D)

(3) 流れの内部構造

ブランチブロック護岸模型周辺における主流速の顕著な低減や特徴的な主流速鉛直方向分布、対岸方向への顕著な二次流れの形成因を検討するために、流れ場に形成された組織構造の特徴を検討した。

図-10は、護岸模型付近の内部流況の可視化結果を示している。護岸模型周辺の底壁および側壁には、(a)のような染料トレーサの滞留域が形成された。この滞留域の横断面流況の一例を同図(b)に示す。流況観察からは、護岸模型上および底壁上にEV1～EV3のような縦渦構造が形成されていることが明らかとなった。VS1のような大規模構造は、複数の渦構造を内包しており、その横断方向スケールは水深の2～3倍程度あるものと推察された。また、本構造の組織運動によって図中に矢印で示されるような対岸方向への二次流れが誘起されていることが推察された。

主流速の鉛直方向分布において、ブロックの枝材が重なる領域で局所的な低速領域が形成される特徴が見出された。この領域では同図(c)に示すように、その周辺に付け根をもつ縦渦構造 (EV4) が長時間に亘って形成されていることが認められた。また、同領域では、横断面PTVの解析において図-11に示すような時計、反時計方向の旋回流 (図中の丸印) が頻繁に形成されることが観察された。

(d)は、護岸周辺の縦断面視の一例を示している。(d-1)は護岸模型の極近傍 $z=-1.6\text{cm}$ の縦断面視である。ここでは、水表面側には上述の大規模渦構造の縦断面形象 (SV1)、半水深位置には枝材の重なる部分に安定して形成される縦渦構造の縦断面形象 (SV2) がそれぞれ観察された。それらの間には染料の存在しない相対的に高速と思われる領域が形成され、鉛直方向に2回S字を描く護岸極近傍の主流速鉛直方向分布の特徴に対応していると推察された。(d-2)は $z=-11.1\text{cm}$ の縦断面視である。この領域では、底壁面から発達する縦渦構造の縦断面形象 (SV3) と側壁の大規模渦構造の縦断面形象 (SV4) が観察され、半水深位置には染料を含まない領域が頻繁

に形成された。この領域の主流速の鉛直方向分布は半水深位置が相対的な高速域となるが、この特徴は相対的に低速域を形成する渦構造が水表面および底壁に形成されるためと考えられる。(d-3)の $z=-16.1\text{cm}$ では、底壁から発達する渦構造 (SV5) が支配的となっており、通常の壁乱流に近い状態であることが認められた。

渡辺らは、縦渦構造の時空間的な集中が、強い旋回状の二次流れとその領域内の低速化の主要因であることを明らかにしている⁵⁾。これを踏まえると、護岸模型上に形成された大規模な縦渦構造が強い対岸向きの二次流れや局所的な低速域の形成に主要な役割を果たしていることが推測されるが、その詳細な相互関係については今後の重要な課題である。

4. 結 論

本研究では、ブランチブロック護岸の水理特性を検討するために護岸模型を用いた流速計測、流れの可視化実験を行った。以下に本研究において得られた主要な知見を述べる。

- (1) ブランチブロック護岸模型周辺の主流速は粗度の効果による顕著な低減傾向が認められた。また、その内部には対岸方向への顕著な二次流が形成されることが明らかとなった。
- (2) 低レイノルズ数の条件のもとで、ブランチブロック護岸のマニングの粗度係数 n を評価し、概略値として、0.05程度の値を得た。
- (3) ブランチブロック護岸模型上には複数の渦構造を内包する大規模な縦渦構造が形成される。とくに枝材の重なり合う部分には、縦渦構造が長時間に亘って形成される。これらの縦渦構造は、対岸方向への強い二次流れや護岸周辺の主流速の低減、局所的な低速領域の形成に寄与していることが推察された。

謝辞：本研究を進めるあたり、徳山高専平成18年度特別研究促進費の交付を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Naot, D. : Calculation of secondary currents in channel flow, *J. Hydraulics ASCE* 110, pp.1568-1587, 1984.
- 2) 財団法人 土木研究センター：岸ブロックの水理特性試験法マニュアル (第2版)。
- 3) 中村育雄, 大坂英雄：科 流体力学, 共立出版。
- 4) 土木学会水理委員会, 水理公式集[平成11年度版], 丸善。
- 5) 渡辺勝利, 佐賀孝徳, 國弘 栄司：底壁面に縦向き粗度を設置した開水路乱流に形成された並列らせん流の内部構造, 土木学会論文集B, Vol. 62, No. 2, pp.186-200, 2006.

(2006. 9. 30受付)