

ブランチブロック護岸周辺の河床変動と 流れの特性に関する実験的研究

泉 佳甫* 神田 佳一**

A Study on the Characteristics of Flow and Riverbed Variation Near the Branch Block Revetment

Kaho IZUMI, Keiichi KANDA

ABSTRACT

In recent years, Nature-Oriented River Works are attracting attention. One of example is branch block revetment. Branch block revetment is classified into two categories according to each scheme of the branch parts. One is a downward arrangement in which it raises the downward flow, the other one is an upward arrangement in which it raises the upward flow. In this study, the characteristics of flow and riverbed variation near the block were analyzed using a one-fifteenth block model. As a result, in the case of downward arrangement, the surface flow showed a vortical structure around the block, and local scouring occurred at the riverbed. On the other hand, in the case of upward arrangement, surface flow along the block, and the surrounding sand were deposited on top of the block.

KEYWORDS : branch block, revetment, riverbed variation, local scour

1. はじめに

わが国は、その地形的、気象学的条件から古来より洪水災害に見舞われてきた。その為、自然災害から人々の生命や生活、財産を守ることを目的に、治水・利水を重視した河川改修が行われている。これによって治水能力が向上する一方、瀬や淵が消失し、魚や水生生物の生息場所がなくなるなど、河川の生態系に大きな影響を及ぼしている。こういった背景のもと、近年では治水・利水に加えて、環境に配慮した多自然川づくりが提唱されている。ここで取り上げるブランチブロック工法とは、多自然河川工法の一つで、1本の幹材に6本の枝材を3方向に取り付けたコンクリート製のブランチブロック(写真1)によって、天然石の空石積みを一体化させるものである(写真2)。空石

積みを使用していることから、多くの間隙を有しており、そこが水生生物の生息場や植物の生育場となるなど、多自然化を実現している¹⁾。また、護岸表面に露出するブランチ部材は、水理的には棧型粗度として捉えることができ、部材の配列方向によって昇配列と降配列の2種類に分類される。

これまでに、渡辺ら³⁾によってブランチブロックの配列を昇配列、降配列とした場合に、それぞれ水表面、底壁面に大規模な縦渦構造が形成されることが明らかにされている。また、ブロックの配列形状に伴うブランチブロック護岸模型近傍における流れの概念図が示されている。しかし、これらは固定床かつ低レイノルズ数に設定された水路を用いた実験であり、実際の河川に適用するに当たっては十分でないように思われる。

そこで本研究では、移動床の実験水路にブランチブロック護岸模型を設置し、模型配列、水路床勾配、流量をパラメータとして模型実験を行い、ブランチ部材

* 建築・都市システム工学専攻

** 都市システム工学科



写真1 ブランチブロック²⁾ 写真2 施工例(出石川)²⁾



図1 出石川概要

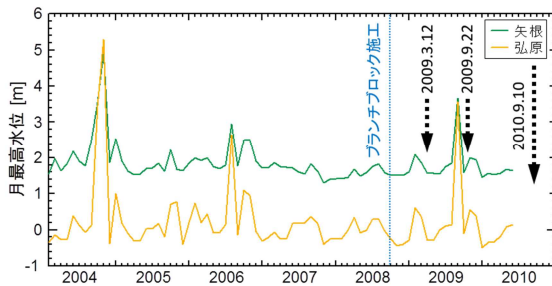


図3 出石川鳥居橋上流付近の洪水履歴

によって護岸表面に形成される棧型粗度が、流れや河床に及ぼす影響を検討する。

2. 出石川での施工事例

ブランチブロック工法は、小鯖川(山口県)や出石川(兵庫県)、阿里山流域(台湾)等で施工されている。ここでは出石川の例(写真2)について述べる。出石川は兵庫県北部を流れる一級河川丸山川水系の一次支流で、豊岡市但東町の南東端にその源を発し、豊岡市の市街地部で丸山川に合流する⁴⁾。また、流路延長35.4 km、流域面積225.0 km²、丸山川合流地点の年平均最大流量 $Q=270 \text{ m}^3/\text{s}$ で、計画流量は $Q_m=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ である。

出石川流域は、頻繁に洪水災害に見舞われており、大正以降段階的に河道改修等が行われている。一方、コウノトリの放鳥や天然記念物であるオオサンショウウオの大量発見を機に、流域の自然環境の復元・保護

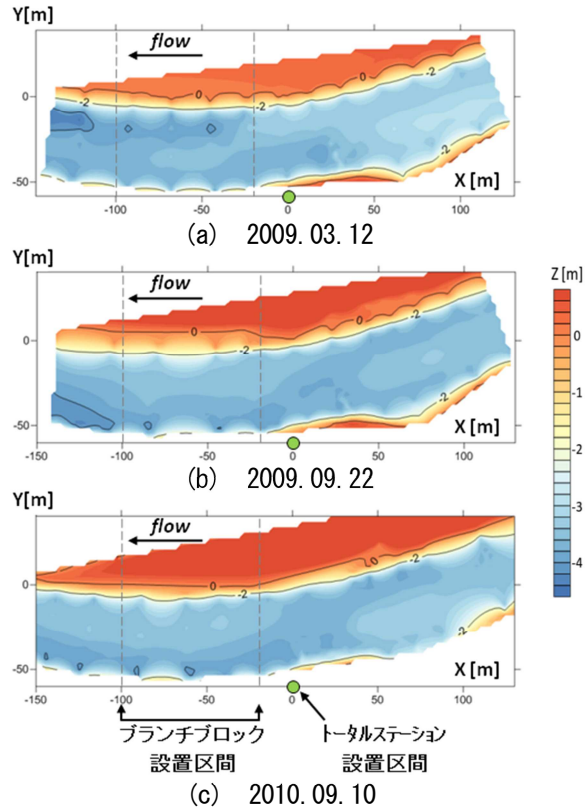


図2 出石川鳥居橋上流付近の河床位コンター図

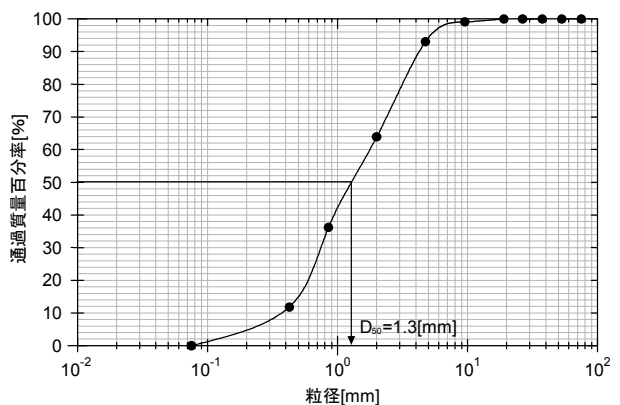


図4 出石川鳥居橋上流付近の粒径加積曲線

が強く望まれている。この為、出石川では「多様な流れの再生・創出」を目標とし、鳥居橋上流区間においては、治水面だけでなく環境面にも配慮し、昇配列のブランチブロック工法が採用されている。

本研究では、ブランチブロック護岸表面にできる棧型粗度が護岸周辺部の流れと河床にどのような影響を与えるかを検証するために、まず、鳥居橋付近を対象として、トータルステーションを用いて現地の河床位を測定した。その経緯を図2に、対象区間の月最高水位の時間変化を図3に示す。ブランチブロックは2008年10月より、図中の $X=20\sim 100 \text{ m}$ の区間に昇配列で設置されている。対象区間の低水路幅は約40

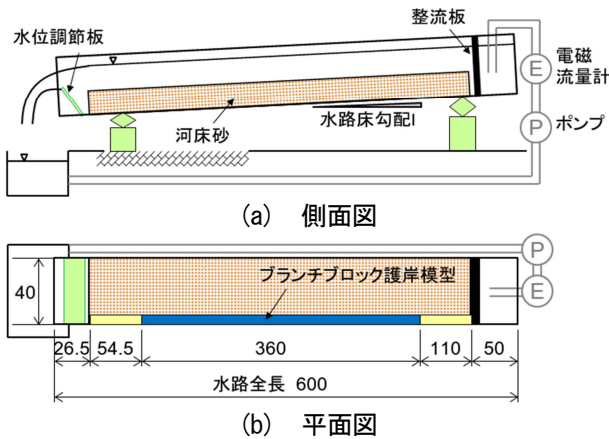


図5 実験装置の概略図 (単位 [cm])

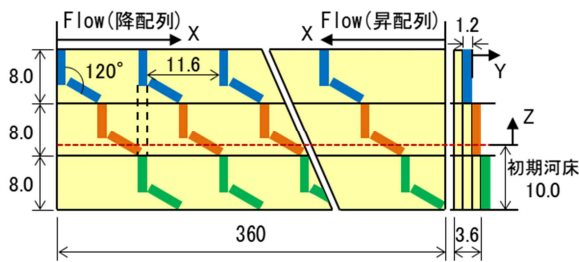


図6 ブランチブロック護岸模型 (単位 [cm])

m であり、わずかに右方向に湾曲している。図 2(a) は、ブロック設置後の平水位の状態であり、図 2(b) は 2009 年 8 月に年最大の出水を経験した直後の河床位である。また、図 2(c) は 2009 年の出水以降は大きな出水はなく、平水位条件下でのものである。図 2 (a), (b) より、上流では右岸側、下流では左岸側で河床が低下し、図 2(c) においても (b) と同様、右岸から左岸側へと河床位が低下している。ただし、左岸側は外岸であるにもかかわらず大きな河床低下は生じておらず、ブロックによって河床低下が抑制されたものと考えられる。2010 年の現地対象区間における河床砂の粒度分布は、図 4 のようである。

3. 実験概要

3.1 実験装置

実験には、図 5 に示す全長 600 cm、幅 40 cm、高さ 28 cm の長方形断面水路を用い、そのほぼ全区間にわたって平均粒径 $d=0.088$ cm の一様砂 (粗度係数 $n=0.014$ 、移動限界摩擦速度 $u_{*c}=2.201$ cm/s) を 10 cm の厚さで敷き均した移動床とした。水路床勾配 I は可変とし、水路の上流端にはフィルター材を用いた整流板を、下流端には任意の角度に調節可能な水位調節板を設置した。

ブランチブロック護岸模型は、出石川に施工されている既成のブランチブロックの諸元に基づき、1/15 ス

表 1 実験条件

Run No.	模型配列	水路床勾配 I	流量 Q [l/s]	摩擦速度 u_* [cm/s]	u_* / u_{*c}	Fr	Re
Run1	降配列	1/1000	5.0	2.237	1.02	0.347	12500
Run2			7.5	2.620	1.19	0.323	18750
Run3			10.0	3.240	1.47	0.228	25000
Run4	昇配列	1/500	10.0	3.402	1.55	0.557	25000
Run5			12.5	4.495	2.04	0.302	31250
Run6			15.0	4.407	2.00	0.384	37500
Run7	昇配列	1/1000	5.0	2.259	1.03	0.337	12500
Run8			7.5	2.426	1.10	0.407	18750
Run9			10.0	3.225	1.47	0.231	25000
Run10	昇配列	1/500	10.0	3.653	1.66	0.450	25000

ケールで作製した。また、背面の石材までを平面と仮定し、図 6 に示すように、1 段の高さが 8.0 cm の板上に、幅 1.2 cm、厚さ 1.2 cm、長さ 6.0 cm の直方体を鉛直及び 120° 傾斜させて設置したもの 3 段分を 1 セットとし、流下方向に 11.6 cm の間隔で、水路壁面に 27 セット設置した。ここで、模型を水路右岸に設置した場合には、模型に沿って水面に向かう流れが生ずるため「昇配列」、逆に左岸に設置した場合には水路床に向かう流れが生ずるため「降配列」となる。なお、ブランチブロック設置区間の最上流端より下流方向に X 軸、護岸壁面から水路幅方向に Y 軸、初期河床面から垂直方向に Z 軸をとった (図 6)。

3.2 実験条件および実験方法

実験は、模型配列、水路床勾配 I、流量 Q をパラメータとして変化させ、計 10 ケース行った。実験条件は表 1 に示す通りである。表より、全ての実験ケースにおいて $u_* / u_{*c} > 1$ であり、水路全体で流砂が生じる動的条件であることが分る。通水時間は河床の変動が安定する時間として、いずれの場合も 60 min とした。また、河床材料及び初期河床高さは一定である。

実験手順は、まず 10 cm の厚さに河床砂を均し、通水前河床位を測定した後、所定の流量で通水を行い、排水後に通水後河床位を測定した。通水中には、表面流速を測定する為に、トレーサーとして平均粒径 50 μ m のプラスチック微粉末を流し、その動きをビデオカメラで撮影した。なお、表面流速の解析には LSPIV 法を用いた。LSPIV 法とは、斜め上方に固定したカメラによって撮影された画像を真上から見た画像に幾何変換し、時間的に連続した 2 枚の画像から、設定した検査領域内における粒子形状の類似度が最大になる時の平均移動量を求めることにより、表面流速を求める手法である。解析には、藤田ら⁹⁾が開発した解

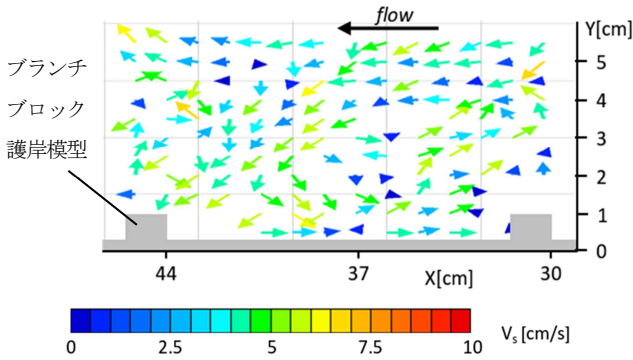


図 7 ブランチブロック模型周辺の表面流速 (Run5)

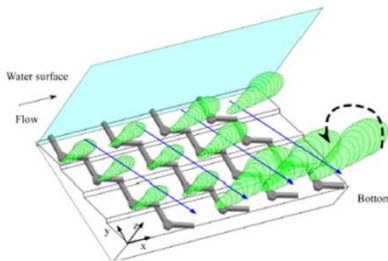


図 8 ブロック粗面上の流の概念図 (降配列)³⁾

析プログラムを用いている。河床位はレーザー距離計を用いて、水路縦断方向に 1 cm ピッチ、水路幅方向に 0.25 cm ピッチで測定を行い、通水前後の河床位を差し引くことによって河床変動量を算出した。

4. 実験結果および考察

4.1 降配列の場合におけるブランチブロック護岸模型周辺の表面流速と河床変動

図 7 は Run5 (降配列, $I=1/500$, $Q=12.5$ l/s, $h_0=10.3$ cm, $u_* / u_{*c} = 2.04$) における表面流速 V_s の測定結果である。表面流速の大きさを、ベクトルの長さおよび色で表している。また、灰色で示す箇所はブランチブロック護岸模型の水表面での位置を示している。図より、ブロックの周囲で小規模の渦状の流れが確認できた。これらは、ブロックを回り込む形で発生し、ブロックを回り込み戻った流れの一部は、流心部の流れへと合流し、下流へと移流する。他方は、再び渦状の流れとなり、ブロックを回り込んでいる。このような表面流況とは、図 8 に示す渡辺ら³⁾によって計測されたブロックに沿って発達する安定した縦渦構造に起因するものと考えられる。図 8 において、水表面近傍では小さい渦が、底面に向かって発達している。本実験においても、水表面で渦状の流れが確認されており、壁面で生じた渦構造が表面流速にも影響を与えていることがわかる。

降配列の場合における河床変動量の結果を図 9 に示す。コンター図の色が寒色に近づくほど初期河床面よ

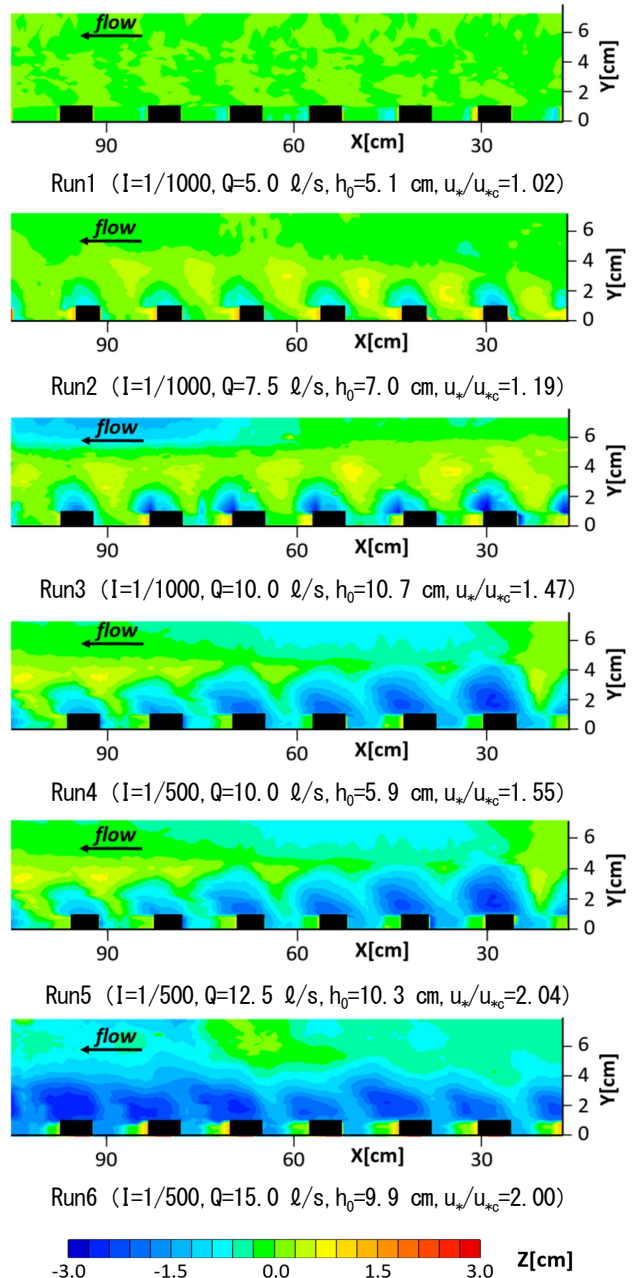


図 9 ブロック模型周辺の河床変動量 (降配列)

り低く、河床が低下していることを示す。また、暖色に近づくほど初期河床面よりも高く、河床砂が堆積していることを示す。また、黒色で示す箇所はブランチブロック護岸模型である。いずれのケースにおいてもブロックの前面で局所的な洗掘が見られた。その形状は、各ブロックの下流先端で最大となり、斜め下流方向に発達している。これは、ブロックの形状に沿って、水面から底面に向かって下降する流れが生ずる為であって、表面流速の結果からも、ブロック間で渦状の流れが観察されている。渦状の流れが生じた範囲と洗掘の範囲が、ブロックから 5 cm 程度の範囲であることから、表面と同様の流れが水深下でも発生しており、

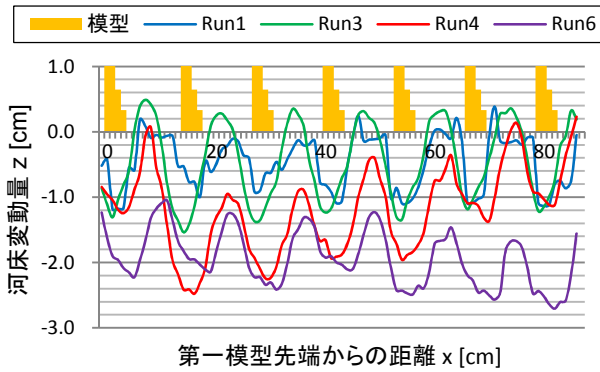


図 10 ブランチブロック護岸模型周囲の洗掘深さ

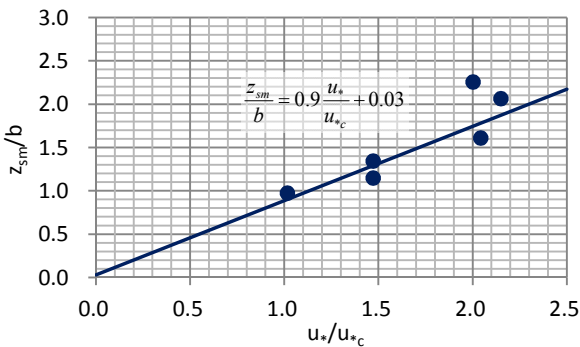


図 11 u^*/u_{*c} と z_{sm}/b の関係 (降配列)

その流れによって、洗掘と堆積が生じたと考えられる。

次に、勾配の違いによる河床変動特性について述べる為、同流量 ($Q=10.0 \text{ l/s}$) で勾配の異なる Run3 ($I=1/1000$) と Run4 ($I=500$) を比較する。勾配を $1/1000$ から $1/500$ に変化させることで、局所洗掘の深さとその影響範囲が大きくなっていることがわかる。また、流量の違いによる河床変動特性についてみると、Run1 では河床全体で大きな変動はなく、最大洗掘深 $z_{sm}=12 \text{ mm}$ で、ブロック周囲の洗掘深も小さい。一方、Run2, 3 では全ブロックの周囲で局所洗掘がみられ、Run2 では $z_{sm}=14 \text{ mm}$ 、Run3 では $z_{sm}=16 \text{ mm}$ であり、流量の増加に伴い、洗掘深が増加していることがわかる。また、Run4~6 においても Run1~3 と同様の結果が得られた。

図 10 は、ブロック前面における河床変動量を示したものである。横軸は第 1 模型先端からの距離、縦軸は河床変動量である。図より、ブロックの周囲で洗掘が生じていること、および Run1, Run3, Run4, Run6 と流量および勾配の増加に伴い、洗掘深さが増大していることが分かる。図 11 は、横軸に流量と勾配の変化を、摩擦速度 u^* と河床砂の移動限界摩擦速度 u_{*c} の比 u^*/u_{*c} の変化として整理したもの、縦軸に最大洗掘深 z_{sm} をブランチブロックの厚さ $b=1.2 \text{ cm}$ で無次元化した z_{sm}/b の変化を示したものである。図より、 z_{sm}/b

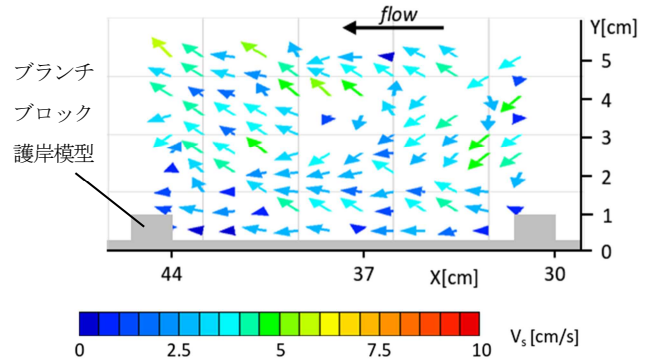


図 12 ブランチブロック模型周囲の表面流速 (Run7)

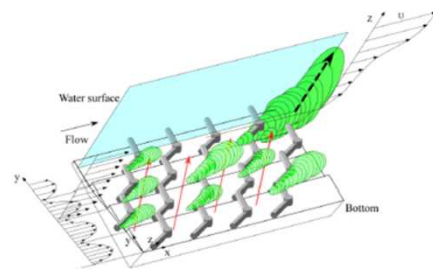


図 13 ブロック粗面上の流れの概念図 (昇配列)³⁾

は u^*/u_{*c} の増加、すなわち流量と勾配の増加に伴って線形的に増加しており、次式で表される。

$$\frac{z_{sm}}{b} = 0.9 \frac{u^*}{u_{*c}} + 0.03 \dots \dots \dots (1)$$

4・2 昇配列の場合におけるブランチブロック護岸模型周囲の表面流速と河床変動

図 12 は Run7 (昇配列, $I=1/1000$, $Q=5.0 \text{ l/s}$, $h_0=5.2 \text{ cm}$, $u^*/u_{*c}=1.03$) における表面流速 V_s の測定結果を示している。図より、ブロック間の表面流はブロックの前面で流心部から壁面に向かい、ブロック間を側壁に沿って流れた後、次のブロックの上流で壁面から離れて流心部に向かっている。これらの結果は、降配列、昇配列ともにブロックの斜め方向に流れが生じていることを示していることから、表面の流れは鉛直方向の流れの影響を受けていると考えられる。渡辺らの実験結果³⁾ (図 13) より、昇配列の場合には底面で生成された縦渦構造が水表面方向に発達している。本実験結果からも、ブロック近傍の水表面に、模型に沿った流れが形成されており、壁面に形成された縦渦構造が表面流速にも影響を与えているといえる。

昇配列の場合における河床変動量の結果を図 14 に示す。昇配列の場合には、ブロックの上部に砂が堆積した。また、上流部では部分的に局所洗掘が見られた。これは、ブロックの形状に沿って、上昇する流れが発生するため、その流れに乗って砂が移動する為である。

なお、堆積部近傍で河床が低下していないことから、堆積した砂は主に上流より掃流されてきた砂であるといえる。

Run9 と Run10 の結果より、勾配が大きくなると、ブロック上部の堆積量及びブロック前面の堆積量が増加することがわかる。また、流量の違いによる河床変動特性についてみると、Run7~9 の結果より、流量の増加に伴い、ブロック上部への堆積量が増加していることがわかる。Run9 では、一部でブロック前面での堆積が見られた。これは、ブロック上部に堆積できる砂の量には限界があり、ブロック上部に堆積しなかったものがブロックの前面に堆積したためである。

図 15 は、ブロック上部の堆積高さについて、流量と勾配の変化を、 u_*/u_{*c} の変化として示したものである。これより、最大堆積高さ z_{dm} を b で無次元化した量 z_{dm}/b は、 u_*/u_{*c} の増加に伴い、緩やかな増加傾向にあり、次式で与えられる。

$$\frac{z_{dm}}{b} = 0.4 \frac{u_*}{u_{*c}} + 0.83 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ただし、近似曲線の傾きは降配列の場合 (図 11) に比べて小さく、ブロック周辺の河床変動は、昇配列の方が小さくなるといえる。

5. まとめ

本研究では、多自然河川工法としてブランチブロック工法を取り上げ、ブロックの配列形状や河床勾配、流量が流れと河床に及ぼす影響について実験的に考察した。得られた主要な知見を以下にまとめる。

- 1) 降配列の場合、表面の流れは、ブロックの周囲で小規模の渦を形成した。河床では、ブロックの前面で局所洗掘が生じた。また、流量と勾配の増加に伴い、局所洗掘の深さとその影響範囲、最大洗掘深が線形的に増加する傾向にある。
- 2) 昇配列の場合、表面の流れは、ブロックの前面で流心部から壁面に向かい、ブロック間を側壁に沿って流れた後、次のブロックの上流で壁面から離れて流心部に向かった。河床では、ブロックの上部に砂が堆積し、上流部では一部に局所洗掘が見られた。また、流量と勾配の増加に伴い、ブロック上部の堆積量及びブロック前面の堆積量、堆積高さが増加する傾向にある。

参考文献

1) 都築隆禎他：自然再生事業と緊急治水対策事業を踏まえた川づくり (円山川水系出石川)，リバーフ

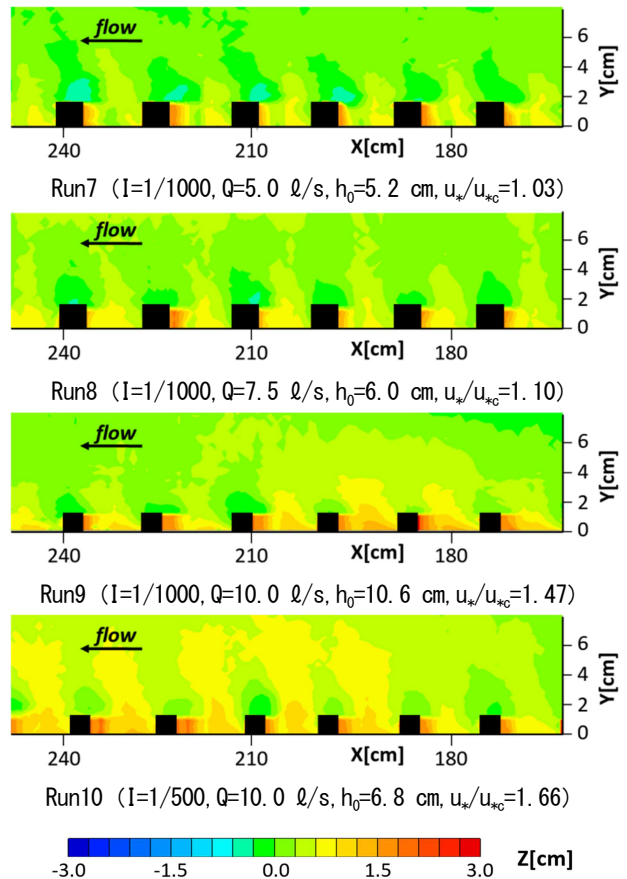


図 14 ブロック模型周辺の河床変動量 (昇配列)

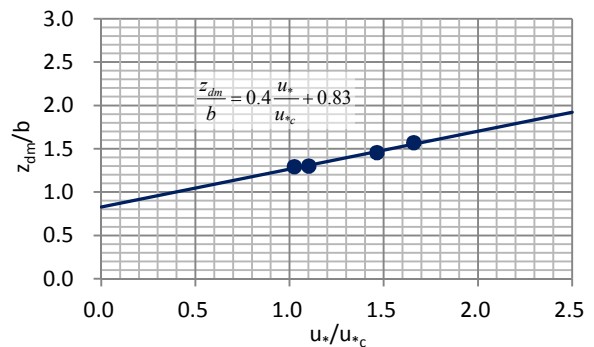


図 15 u_*/u_{*c} と z_{dm}/b の関係 (昇配列)

ロント研究所報告第 19 号, pp.31-36, 2008
 2) 榎吉工園, <http://www.kikkouen.com/bbb/bb.html>, 平成 23 年 8 月 28 日取得
 3) 渡辺勝利他：ブランチブロック護岸模型の枝材配列形状の変化による流れ構造の特長, 水工学論文集第 54 号, pp.1045-1050, 2010
 4) 兵庫県, 円山川水系出石川圏域河川整備計画, 2009
 5) 藤田一郎：PIV 技術の実河川表面流速への応用, 河川技術論文集第 4 巻, pp.41-46, 1998