

設置角度の異なる越流型上向き水制の 河床変動特性に関する実験的研究

CHARACTERISTICS OF BED DEFORMATION AROUND
SUBMERGED UPSTREAM-POINTING GROINS FOR DIFFERENT ANGLE

原田守啓¹・高岡広樹¹・大石哲也¹・萱場祐一²・藤田裕一郎³

Morihiro HARADA, Hiroki TAKAOKA, Tetsuya OISHI, Yuichi KAYABA and Yuichiro FUJITA

¹正会員 博(工) (独) 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

²正会員 博(工) (独) 土木研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム (〒300-2621 茨城県つくば市南原1-6)

³フェロー 工博 岐阜大学流域圏科学研究センター教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Numerous spur-dikes and groins had been built for the purpose of preventing bank erosion, or stabilizing channel alignments. In each purpose, groin angle and arrangement has been studied comprehensively through past studies. It is known that horizontal angle of groin has different influence on riverbed deformation. In this study, flume experiments with movable-bed are conducted in order to discuss characteristics of bed deformation around submerged groins for different horizontal angle for the purpose of finding the fundamental shapes of the submerged groin which are suitable for channel stabilization of the small and medium-sized rivers in Japan. In results, the fundamental effect of groin angle is observed. As the angle becomes large, local scour around the tip of groin decreases. Furthermore, it is shown that scour volume is considerably reduced by devising the shape of the groin.

Key Words : submerged groins, groin angle, local scour, channel stabilization, stream barbs

1. はじめに

我が国の水制は古くは「出し」と呼ばれ、各地の河川において様々な形式の水制が水衝部河岸の防御、航路の維持等の目的で用いられてきた。かつて、水制工の導入は、経験的になされてきたが、昭和30年代以降、秋草らの研究¹⁾を端緒として、水制の水理的機能について、実験と理論の両面から研究が進められ、近年は、技術者が計画設計の拠り所とする専門書²⁾も編まれるようになり、さらには、水制の配置計画検討にあたり、平面流況解析に水制の効果を取り込んで検討する手法³⁾が実務の場面でも一般的になりつつある。

また、従来の設置目的に加え、水制により創出される流れ、河床形状、底質分布等の多様性に着目して、水生生物の生息環境への好ましい影響を企図して水制の設置が計画される事例⁴⁾⁵⁾も増えてきている。

水制が流れと河床変動に及ぼす影響は、水制の構造、角度、川幅に対する相対長さ、水深に対する相対高さ、

配置等によって異なり、水工学分野における過去の研究では、これらの緒元について、移動床並びに固定床の水路実験、近年発展の著しい数値解析を主な研究手段として知見の蓄積がなされてきた。

水制近傍に生じる洗掘・堆積の傾向が水制の平面設置角度により異なることは古くから知られており、大正時代の技術書において既に言及されている⁶⁾が、その後の研究により、平面設置角度の影響は非越流型水制と越流型水制では異なることが知られている。Ahmed⁶⁾は、非越流型水制の平面設置角度を変化させた実験から、下向きより上向きの方が局所洗掘深が大きくなることを示したが、大本ら⁷⁾は、越流型水制ではその反対に、上向きの方が洗掘深が小さくなる傾向を実験により確認し、その要因を水制周辺の流れの構造により検討している。越流型水制の設置角度の効果に着目した研究は、主に流れの構造に着目して進められ⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾、上向き、下向きそれぞれ30°程度までの範囲について検討されている。また、我が国における施工事例の平面設置角度は、秋草ら¹⁾の

統計的研究によれば、大多数が河岸直角から上向き15°以内の範囲に収まっているとされている。

一方、北米の河川工法で、spur dikesの一種であるstream barbs¹¹⁾は、河岸への元付け部を河岸高とし、先端が低くなるように勾配を付けた水制を、河岸直角から60°から70°も上流側に角度を向けて、湾曲部の外岸に複数配置することにより、河岸侵食を防御する工法として用いられている。日本国内でも、主に北海道において、stream barbsと同様に、かなり上向きの角度で、河床から突出する高さを抑えた越流型水制様の構造物（バープ工という）が、流砂を捕捉して寄り洲を形成したり、河床形状と流れに変化をつけたりする目的で、用いられてきている（図-1）。

我が国の中小河川は、自然河道に比して狭くて深い単断面河道への改修¹²⁾がなされてきており、著者らの行った多数の中小河川の現地調査¹³⁾では、河床材料が流失して河床低下傾向を示している河川が多く確認されている。著者らは、そのような改修済みの中小河川における河床環境の改善に資する工法としてバープ工に注目している。

以上の背景を踏まえ、本研究では、河床から突出する高さが低い越流型水制について、平面設置角度を直角から上向き80°近くまで変化させた移動床水理実験を行い、平面設置角度が河床変動に及ぼす効果について考察するとともに、「洪水を極力阻害せず、流砂を捕捉して寄り洲を形成する」機能を発現するための水制形状について、基本的な検討を行った。

2. 実験方法

(1) 実験の概要

実験水路は、長さ8m、底面幅30cm（アルミ製）、側壁高さ20cm（アクリル製）の長方形断面水路である。水路上流端を0mとして、2mから4mの区間及び最下流端の1m区間を、水路床より9.5cmの高さまで板材を重ねて固定床区間とし、その間の3m区間を移動床区間として設定した。移動床区間には、粒径0.6mmのほぼ均一な珪砂（比重2.6、水中安息角34°）を満たし、固定床区間には同じ砂を塗布した粗度板を設置した。水路床勾配 n_b は1/200とし流量は8.0L/sとした。

実験ケースは、水制模型の形状により設定し、各ケースの水制模型は、3m長の移動床区間の上流端から1.2mの位置に単体で設置した。

構造物周辺の河床変動を対象とした移動床実験の水理条件は、水路平均の掃流力が河床材料の移動限界を下回り構造物近傍のみ土砂が移動する静的平衡洗掘の実験と、河床全体が移動する状況で下流からの流出土砂量に平衡する土砂を上流から供給しながら行う動的平衡洗掘の実験とに区分され、水制に関する既往の研究の多くは実験が比較的容易な静的平衡洗掘条件下で行われている。

本研究では、河床低下傾向の中小河川において、高さ

の低い水制が河床変動に及ぼす影響を検討するため、水路平均の掃流力が常時移動限界を上回る状況下で、上流からの給砂は行わず実験を行った。すなわち、本実験は動的かつ非平衡の条件にあたる。通水が続けるにつれて河床低下が進行して同一流量に対する流砂量が減少すること、なおかつ水制の効果によって河床低下の進行に差があることから、実験時の水理条件は、水制を設置しない条件での値を代表値として表-1に示す。

また、通水時間は水制を設置しない条件での予備実験を踏まえ、通水30分程度で移動床区間の流砂量が減少し河床低下の速度が鈍化したことから、各ケースについて、30分通水後の水路中心における水位縦断分布と、1cmメッシュでの河床高を計測した。水位の計測はサーボ式水位計(KENEK製)、河床高の計測はレーザー変位計(KEYENCE製)により行い、計器を固定した台車を縦断方向に往復させながら、計器の出力電圧をAD変換カード(KEYENCE製)によりノートPCに記録し、予め用意した検定式により水路床からの比高に換算して整理した。河床高の計測中は、河床変動を停止させるため、水路下流端をせきあげ、砂の移動を停止させて計測を行った。また、水制模型周辺の三次元的な流れの構造を考察するため、ビデオ撮影を実施した。

(2) 実験ケースの設定

実験ケースは、水制なしの1ケース(Case0)、平面角度の検討のためのケースを6ケース(Case1-6)とした。さらに、水制形状の効果を検討するため、平面角度の検討結果よりCase5を基本形として抽出して、形状の異なる3ケース(Case5a,5b,5c)を追加した。

水制模型は厚さ18mmの木材を加工して、高さ10cmとして、初期河床高から5mm程度露出するようにした。横断方向は水平を基本とした。水制模型の断面形は長方形を基本とし、先端部のみ丸く加工した。水制長は、側壁から水路の1/3幅にあたる10cmまで確保することを共通事項としたため、上向き角度が大きくなるにつれて水制長は長くなった。

水制形状の検討のための追加3ケースは、以下のよう



図-1 バープ工の施工事例
(左：精進川放水路、右：日高門別川)

表-1 水理条件

Discharge Q (L/s)	**Flow Depth H (cm)	Channel width B (cm)	Bed Slope I_b	**Energy Slope I_e	**Shields Number τ^*	**Froude Number Fr
8.0	7.0	30.0	0.0050	0.0028	0.20	0.46

* = values at reference Case0 as representative

に設定した。北米のStream barbs¹⁾、北海道のバープ工も、先端に向けて勾配がつけられていることから、水制先端を1cm下げ、横断面上では1:10の勾配となるケース(5a)、水制周囲に法面をつけたケース(5b)、横断勾配と法面の両方を適用したケース(5c)を設定し、Case5と比較した。平面角度の検討のための実験ケースを表-2に、水制模型の形状の効果について検討するための実験ケースを表-3に示す。

3. 実験結果及び考察

表-2 実験ケース (平面角度の検討)





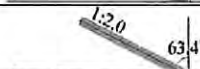
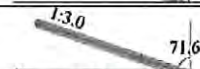
Case	平面角度	平面形状
1	0° (-)	
2	26.6° (1:0.5)	
3	45° (1:1.0)	
4	56.3° (1:1.5)	
5	63.4° (1:2.0)	
6	71.6° (1:3.0)	

表-3 実験ケース (水制形状の検討)

Case	横断勾配	法面	平面形状(5b,5cのみ)及び側面図
5	水平	なし	
5a	あり (1:10)	なし	
5b	水平	あり (1:1.0)	
			
5c	あり (1:10)	あり (1:1.0)	
			

(1) 河床低下による縦断形の変化

移動床区間における横断方向平均の砂面高の縦断分布を、図-2に示す。全てのケースにおいて、上流側から河床低下が生じており、移動床区間下流端が固定された形で上流から河床低下が進み、水制を設置しないCase0では、移動床区間上端から約30cmの位置で2cmあまり河床低下を生じた。河床全面に生じた砂堆の波長は20-30cm程度であった。水制模型を設置したケースでは、水制そのものが流砂量に影響を与えるため、河床低下の度合いにばらつきがある。これより、水制の効果を検討するにあたって、初期砂面高を基準とした整理では傾向が把握しづらいため、水制を設置しないCase0の河床縦断形を直線近似した平均縦断砂面高(図-2破線)を基準高として洗掘深等を整理して示す。

(2) 水平設置角度の効果

Case1~6の最大洗掘深を図-3に、水制近傍で洗掘を受けた体積を図-4に、砂面高の平面分布を図-5に示す。

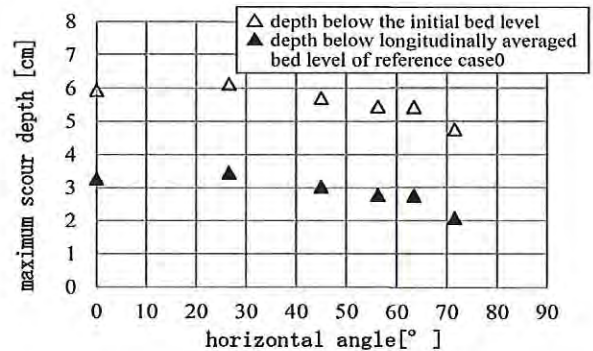


図-3 水平設置角度と最大局所洗掘深

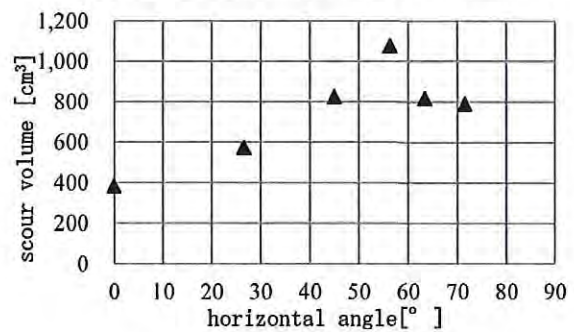


図-4 水平設置角度と洗掘体積

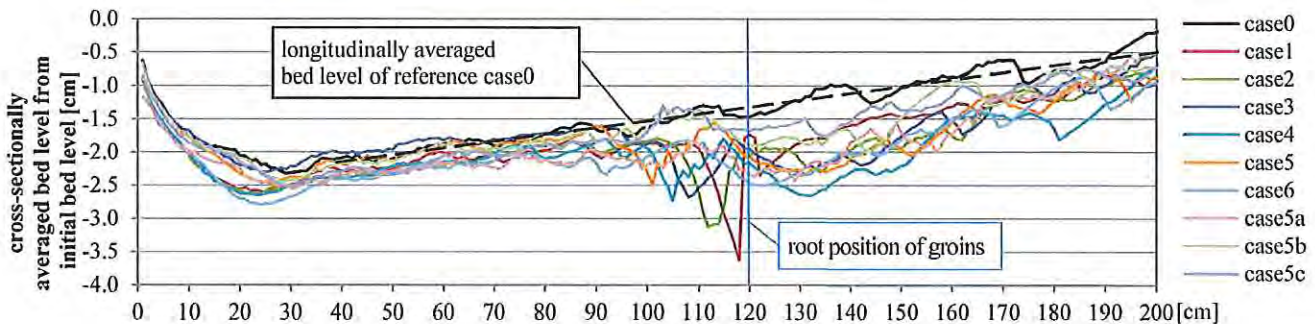
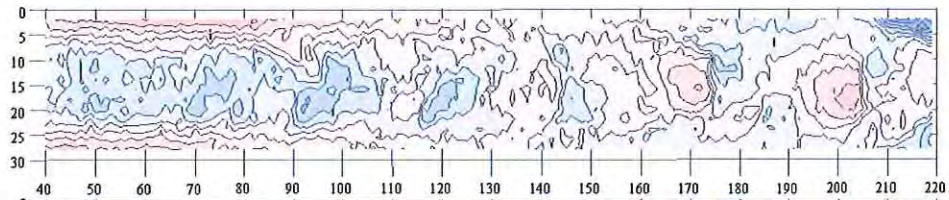


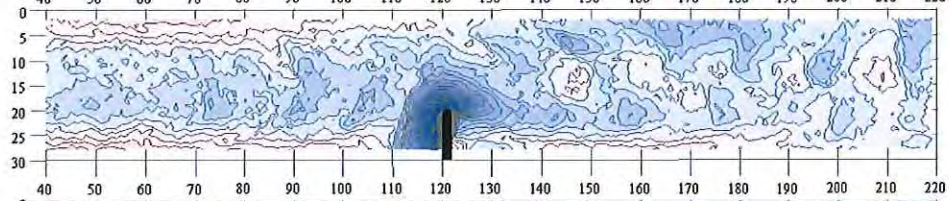
図-2 横断方向平均した砂面高の縦断分布

Case 0
水制なし

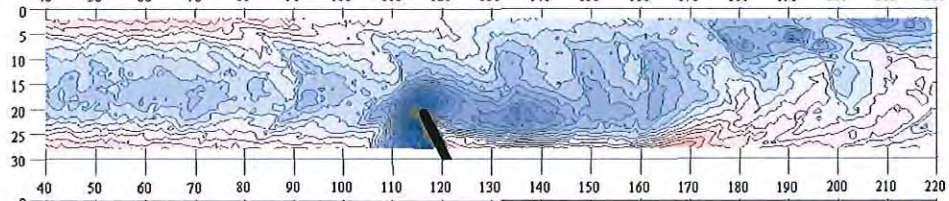


移動床区間
上流端から
の距離
[cm]

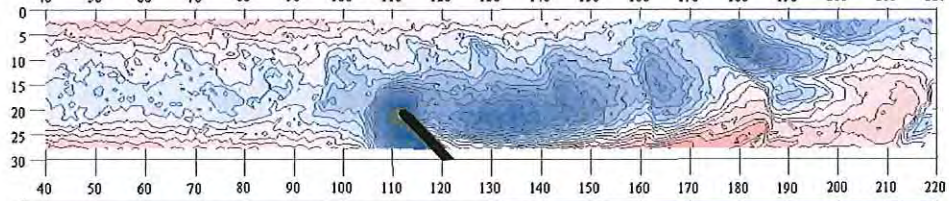
Case 1
角度 0°



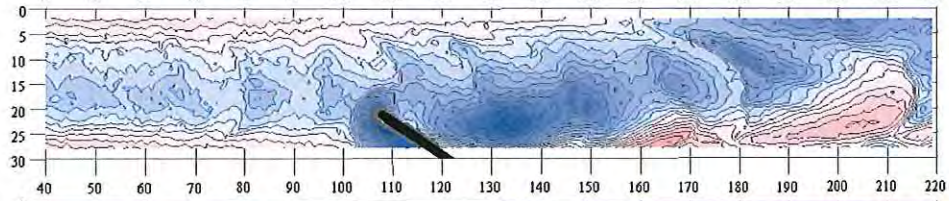
Case 2
角度 26.6°
(1:0.5)



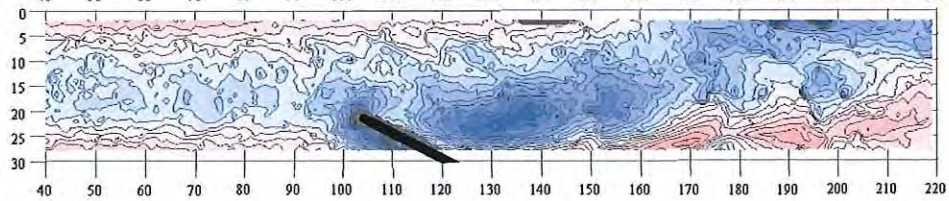
Case 3
角度 45°
(1:1.0)



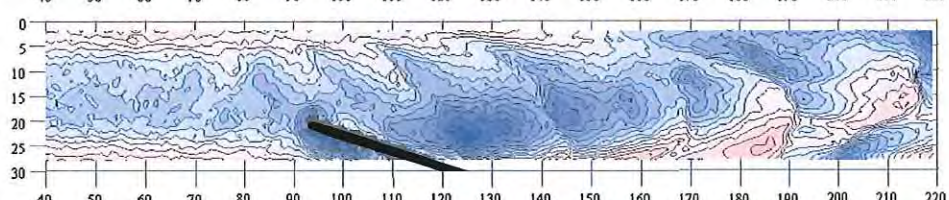
Case 4
角度 56.3°
(1:1.5)



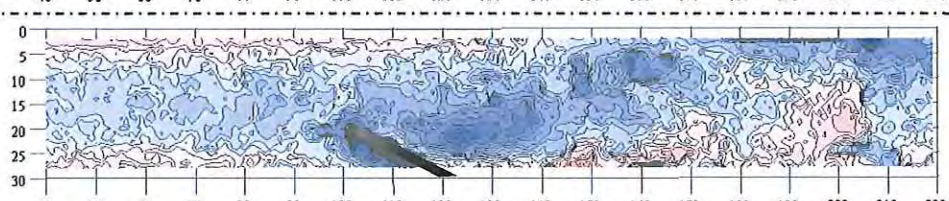
Case 5
角度 63.4°
(1:2.0)



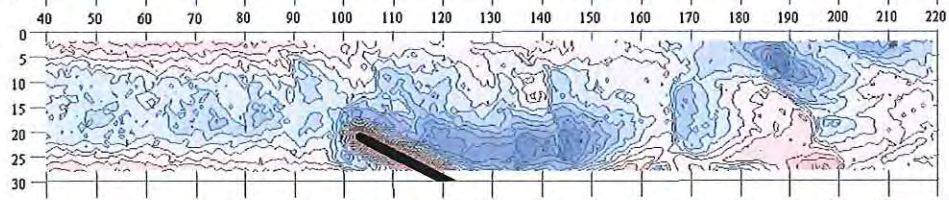
Case 6
角度 71.6°
(1:3.0)



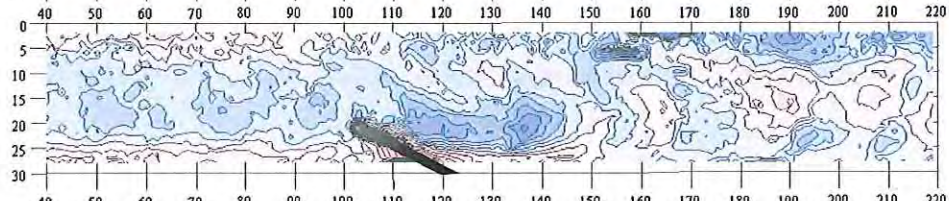
Case5a
・勾配あり
・法面なし



Case5b
・勾配なし
・法面あり



Case5c
・勾配あり
・法面あり



河床変動量
[cm]

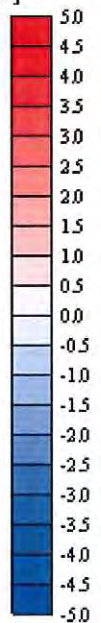


図-5 通水後の砂面高平面分布 (Case0 平均縦断砂面高基準)

なお、洗掘体積は、砂堆による凹凸と区別するために、Case0の平均縦断砂面高を基準とし、水制近傍で1.5cm以上砂面が低い領域について集計した。

水平設置角度が最大洗掘深に与える影響は、全般的には上向き角度を大きくするほど減少する傾向にあるが、初期河床高を基準とすれば、その差は小さい。一方、洗掘体積は、角度を大きくするほど増加しており、角度 56.3° のCase4において最大となった。この理由は、図-5の平面形状が示すとおり、水制を上流側に傾けるにつれ、水制先端から上流側にみられる洗掘孔とは別に、水制を斜めに越流した流れに起因すると考えられる下流側の洗掘孔の拡大によるものである。Case4より更に角度を大きくしたCase5,6では、下流側の洗掘孔が縮小し、侵食量が減少している。

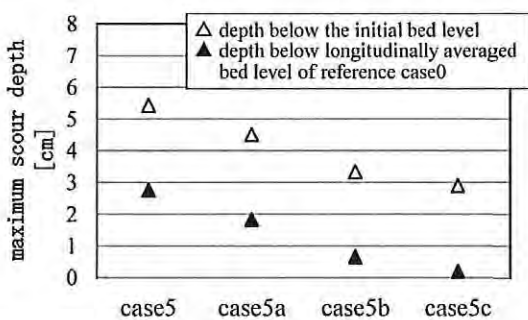


図-6 水制形状と最大局所洗掘深

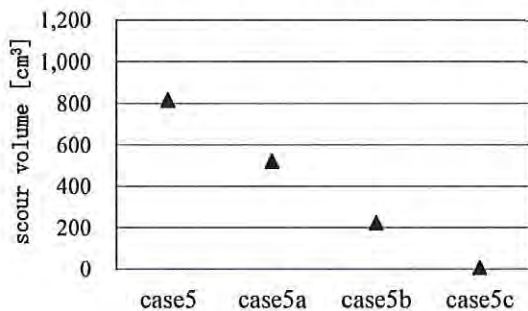


図-7 水制形状と洗掘体積



図-8 水制周辺の河床形状

(3) 水制形状の効果

局所洗掘深が抑制され、かつ水制下流側の侵食量が小さい上向き角度 63.4° のCase5を基本形として抽出し、形状の異なる3ケースとの比較により、水制形状の効果について検討した。最大洗掘深を図-6に、洗掘体積を図-7に示す。

先端を下げたCase5aは、通水直後には先端洗掘を生じることなく、付け根付近に土砂の堆積を生じたが、砂面が低下し、水制が露出し始めると、Case5同様に先端洗掘を生じ、水制根元に向けて次第に拡大した。洗掘深、侵食量はCase5より減少したが、河床低下が進むにつれて、先端を下げた効果は不明瞭になると考えられる。

Case5の水制の側面に勾配1:1.0の法面を追加したCase5bでは、水制先端から上流側根元にかけての局所洗掘が抑制され、最大洗掘深、洗掘体積ともに大幅に減少した。しかしながら、水制付近に流砂を捕捉するには至らず、通水後に水制全体が露出した。

Case5a同様に先端を下げ、かつ勾配1:1.0の法面を設けたCase5cは、通水開始から計測までの間、局所洗掘を生じることなく、かつ水制の根元付近に流砂の堆積を生じた。上流から河床が低下する過程で、砂堆が水制付近を通過する際に、他のケースでは、砂堆前縁線が局所洗掘孔に差し掛かると、洗掘孔に常在する橋脚周りの馬蹄型渦に類似した縦渦によって急速に砂が流出するが、本ケースでは、砂堆が水制を乗り越えるように進み、水制先端の河床高は回復し、水制付け根の上流側と下流側には砂が捕捉され、計測時まで維持された。図-5に示した砂面高平面図は、レーザー変位計が壁面と干渉するため壁面近傍の砂面形状が捉えられていないことから、Case5と5cの計測時の河床形状の比較写真を図-8に示す。写真に示すとおり、Case5では水制先端から上流側に沿って局所洗掘が進行しているのに対し、Case5cでは水制の根元まで砂が堆積している。

以上の検討から、限られたケースではあるが、水制形状の効果をもとめれば以下のとおりである。まず、水制先端を下げることは、局所洗掘の抑制に一定の効果が期待できるが、河床が低下し、水制が露出するとその効果は相対的に低下する。

水制側面に法面を設けることは、局所洗掘の抑制に非常に効果的であるが、水制天端が水平では、上流からの流砂を捕捉・維持することはできなかった。

水制先端を下げ、側面に法面を設けることにより、局所洗掘を抑制しながら、流砂を水制近傍に捕捉・維持することができた。

4. おわりに

本研究では、河床から突出する高さが低い越流型水制について、平面設置角度を直角から上向き 80° 近くまで変化させた移動床水理実験を行い、平面設置角度が河床

変動に及ぼす効果について考察した。また、「洪水を極力阻害せず、流砂を捕捉して寄り洲を形成する」機能を発現するための水制形状について、基礎的な検討を行った。本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 上向き角度を大きくするにつれ、局所洗掘深は減少する傾向にあるが、水制を斜めに越流する流れにより下流側に形成される洗掘孔が拡大することにより、洗掘体積は増加する。
- (2) 水制の先端を低くすることにより、局所洗掘を抑制する一定の効果が得られるが、水制が露出すると局所洗掘が進行する。
- (3) 水制の先端を低くし、かつ流れの剥離を防ぐ法面を設けたケースでは、局所洗掘が大幅に抑制され、さらに水制の根元の高さまで流砂が堆積した。

以上の結果より、バープ工による寄り洲の形成機構は、上向き角度が大きく、かつ先端を下げた低い水制が、出水中に水制の高さまで掃流砂を堆積させる働きによるものと考えられる。

本研究では、水制の角度の効果よりも形状の効果の方がより支配的である可能性が示唆されたが、形状の比較は上向き角度を固定して検討しているため、今後、適切な角度と形状の組み合わせを見出すべく、系統的な実験を継続し、検討成果の一般化を図る。

また、構造物設計の観点から、以下の検討を行っている。水制の設計にあたっては、基礎の根入れ深さを決定するために、洗掘深の予測が重要であることから、従来の洗掘予測式の適用性について検討を行う。同様に、構造物に作用する流体力の算定が必要であるが、川口ら¹⁴⁾は、水制に作用する流体力を抗力係数、揚力係数により整理しており、本研究が対象としているバープ工についても、同様の整理が必要であると考えている。また、松本ら¹⁵⁾は、水制の構造体を蛇籠等の透過性材料とすることで、局所洗掘が抑制されることを示している。透過性材料の利用は、現地材料の利用やコスト縮減の面でも利点が見込まれるため、今後検討を行う。

最後に、本研究では現象を単純化するために単一粒径の材料を用いた移動床実験を行ったが、水谷ら¹⁶⁾が示すように、現地河川における河床材料は通常混合粒径であり、水制近傍の河床変動特性に影響を与えることから、混合粒径の効果についても検討を行っていく。

謝辞：北海道におけるバープ工の施工事例と貴重なノウハウを惜しみなくご紹介いただいた（株）北海道技術コンサルタントの岩瀬晴夫氏、バープ研究会の皆様、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋草勲, 吉川秀夫, 坂上義二郎, 芦田和男, 土屋昭彦: 水制に関する研究, 土木研究所報告第170号, 1960.
- 2) 山本晃一: 護岸・水制の計画・設計 一歩先そして一歩手前, 山海堂, 2003.
- 3) 福岡捷二, 西村達也, 高橋晃, 川口昭人, 岡信昌利: 越流型水制工の設計法の研究, 土木学会論文集, No.593/I1-43, pp.51-68, 1998.
- 4) 福岡捷二, 藤田真二, 福岡捷二: 淵環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価, 水工学論文集, 第54巻, pp.1267-1272, 2010.
- 5) 山本晃一: 日本の水制, 山海堂, pp.102-224, 1996.
- 6) Ahmed, M.: Experiments on design and behavior of spur dikes, *Proc. International Hydraulic Convention*, ASCE, pp.145-159, 1953.
- 7) 大本照憲, 平川隆一, 井出賢正: 越流型水制群に対する二次流と流砂の応答, 水工学論文集, 第42巻, pp.1003-1008, 1998.
- 8) 木村一郎, 細田尚, 音田慎一郎, 富永晃宏: 越流型水制周辺の非定常三次元流れ構造に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, 第47巻, pp.841-846, 2003.
- 9) 川口広司, 福岡捷二, 渡邊明英: 設置角度の異なる越流型水制周辺の流れと流体力分布特性, 水工学論文集, 第48巻, pp.811-816, 2004.
- 10) 松本大三, 富永晃宏: 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす水制設置角度の影響, 水工学論文集, 第50巻, pp.1009-1014, 2006.
- 11) U.S. Department of Agriculture Portland, Oregon Natural Resources Conservation Service: *Engineering Technical Note 23 Design of Stream Barbs Version 2.0*, 2005.
- 12) 原田守啓, 藤田裕一郎: 中小河川の断面形状と河道粗度設定手法の変遷に関する考察, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.I_1291-1296, 2012.
- 13) 大石哲也, 高岡広樹, 萱場祐一, 原田守啓: 中小河川の効率的・適確な維持管理に向けて～岐阜県の複数河川を対象にした河道タイプの把握と成立要因の分析～, 河川技術論文集, 第18巻, pp.221-226, 2012.
- 14) 川口広司, 岡信昌利, 福岡捷二: 越流型水制群に作用する流体力の特性, 水工学論文集, 第44巻, pp.1065-1070, 2000.
- 15) 松本大三, 富永晃宏, 石川光雄: 越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす透過性の影響, 水工学論文集, 第52巻, pp.637-642, 2008.
- 16) 水谷英朗, 中川一, 川池健司, 馬場康之, 張浩: 混合砂河床における水制周辺の局所洗掘及び粒度変化に関する研究, 水工学論文集, 第54巻, pp.805-810, 2010.

(2012. 9. 30受付)