

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

EFFECTS OF PERMEABILITY ON RIVER-BED FORMATION USING SUBMERGED SPUR-DIKE GROUPS

松本大三¹・富永晃宏²・石川光雄³

Daizo MATSUMOTO, Akihiro TOMINAGA and Mitsuo ISHIKAWA

¹ 学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻博士後期課程 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

² 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³ 学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻博士前期課程 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Continuous submerged groynes can be used to create diverse riverbed configuration. However, scour holes were too large to make groynes unstable in case of impermeable and rigid structures. In order to reduce the scour depth, we used permeable and flexible groynes, that is, gabions. Model groynes with various characteristics were set on a laboratory open channel and velocity distributions and bed configurations were measured. The permeability and embedding effects were investigated experimentally. Three groynes were laid on movable sand bed without embedding. The permeability is necessary to prevent sinking of groynes and can reduce front scour drastically. The third groyne was folded at halfway because of the head sinking by erosion. The permeability decreases the velocity behind groynes and changes the flow structures slightly, but the bed configurations created by groynes were very similar to those of rigid, impermeable and embedded groynes.

Key Words : *submerged groyne, river-bed formation, permeability, 3D flow structure, local flow, orientation angle*

1. はじめに

水制は河岸保護や低水路維持など様々な目的に利用されるが、近年では河川環境に多様性を与える手段として注目されている。水制背後に土砂堆積を促したり、瀬と淵の造成や蛇行の創出を目的に使用することも考えられる。水制群が流れに対する抵抗として水位上昇に及ぼす影響や、河岸付近の減速効果については実験や数値計算による研究が進展し、ある程度の予測が可能になっていると思われる^{1),2)}。水制周辺の局所的流動や河床変動については、水制先端の局所洗掘に関する研究が主であったが^{3),4)}、最近では、越流型水制特有の流れ構造について詳細な検討がなされ、3次元的な流れ構造に及ぼす水制の形状や、設置角度の影響が次第に明らかにされつつある^{5),6),7),8)}。越流型水制では、水制域内流体と主流域の流れおよび水制上部の流れとの相互作用により3次元の流れ構造を示し、設置角度の違いにより水制間領域の流動特性が全く異なり、河床変動に大きな影響を与えることがわかっている。そこで、著者らは、単調化した直線河道に瀬と淵を有する多様な河床形態を創出することを目的として水制群を両岸に交互に配置した実験を行い、特に水制設置角度の効

果を明らかにした。設置角度により河床変動形態は大きく変化することが示された⁹⁾。下向き水制群では側壁に向かう下降流となり、水制背後の側壁付近に洗掘を生じさせる。上向き水制群では水制前面の低層から側壁へ向かう流れが砂を輸送し、水制根元に堆積を促す。ただし、水制先端から前面の洗掘が大きくなるのが施工上の問題点となりうる。

このような問題点に対して、透過型水制は流れに与える抵抗が少なく、河床変動も抑制することができることが知られている¹⁰⁾。富永らは河道湾曲部に杭出し水制群を設置した実験を行い¹¹⁾、洗掘抑制効果を調べており、また、聖牛を急勾配水路に設置した実験を行い¹²⁾、河床低下防止効果を調べている。道奥らは捨石水制群を設置した開水路流れの実験と数値計算を行い、流れに及ぼす透過流の影響を検討している^{13),14)}。

本研究は、多様な河床形態を創出することを目的とした水制群の設置において、局所洗掘を緩和する目的で透過性を有する場合の流れと河床変動に及ぼす効果について実験的に検討したものである。透過型水制として蛇籠を用い、設置角度を変化させて、流速と河床変動を計測し、不透過水制の結果と比較を行った。

2. 実験方法

実験水路は、全長 13m, 幅 $B=59.3\text{cm}$ の勾配可変型長方形断面開水路である。移動床実験では水流が安定する上流側より 4.5m から 10.5m の 6m を移動床区間とし、平均粒径 0.04cm の砂を厚さ 11cm に平らに敷き詰めた。透過水制としては蛇籠を使用した。蛇籠模型は幅 $b=3\text{cm}$, 水制高 $d=2.5\text{cm}$, 水制出し長 $lg=15\text{cm}$, 水制間隔 s は 22.5cm とした。蛇籠はネットに石を積めたもので、石は平均粒径 7.7mm で間隙率 70% である。水理条件は不透過型水制を用いた前報とほぼ同じとした。表-1 に水理条件を示す。表-2 にケース名及び水制条件と配置条件を示す。蛇籠の持つ物理的特性のうち流れと河床変動に影響を与えるものとして根入れと透過性が考えられ、他の条件は同じとしこれらを変化させた実験を行った。不透過としたケース B では、蛇籠をプラスチックラップで包んだものである。根入れ部、地上部ともに不透過とした C は、同一寸法の木の板で作成したものである。地上部のみ透過性有としたケース D は、初期河床以下に木の板を埋め込み、上部に蛇籠を載せたものである。また水制の設置角度を変化させた実験も行った。移動床実験では静的洗掘を対象としており、上流からの給砂は行っていない。水制周辺の河床変動が収束する通水 1 時間後に水を排除し、河床高測定器を用いて河床形状を計測した。計測点は $x=-90\text{cm}$ から $x=170\text{cm}$ までとし、横断方向は 2cm ピッチで縦断方向は 2cm から 5cm ピッチとした。

流速計測はケース A と E について固定床で行った。2 成分電磁流速計を用い、主流速成分(u)と横断流速成分(v)を計測した。座標系は水路中央に沿う方向を x 軸、これに直交し水路を横断する方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とする。計測断面是水制群周辺を細かく、上流 2 断面と下流 5 断面を粗くとり、主流速方向は 33 断面、横断方向には 7 点~12 点、鉛直方向には 4 点とした。

また、透過水制間の流れ構造の変化を調べるために、過去の一連の PIV 実験^{5),6)}と同じ条件で、透過水制を製作し、流れ構造を計測した。この実験水路は長さ 8m , 幅 30cm で、透過水制は、金網で整形した長さ 5cm , 高さ 4cm , 厚さ 2cm の箱の中に平均粒径 10mm の石を間隙率 45% で詰めたものである。

3. 透過水制の物理特性が河床変動に与える影響

蛇籠を砂の上に置いた移動床では図-1に示すように最前部の水制が水制前面の洗掘により河床に沈んだ。最前部の洗掘から下流に河床波状の河床変動が発生した。第2, 第3水制の先端はやや洗掘され頭部が沈み込んでいるのがわかる。図-2は直角水制での河床高コンターを示したものである。また図-3は河床変動後のケース A, B の水制頂部の高さを示したも

表-1 水理条件

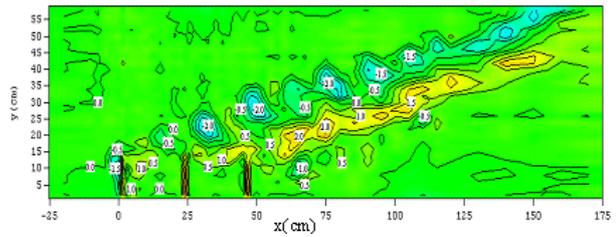
discharge Q (lit/s)	flow depth h(cm)	channel width B(cm)	energy gradient Ie	mean velocity V(cm/s)	Froude Number Fr	Reynolds Number Re
12.4	8.0	59.3	0.001	26.1	0.294	16000

表-2 水制タイプ

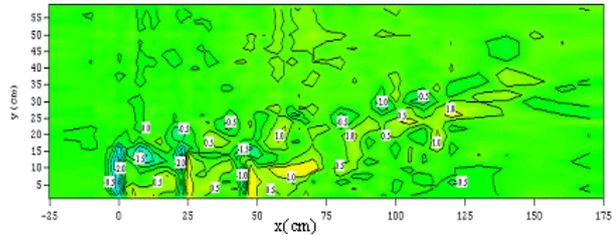
Case	透過性	根入れ	設置角度
A	有	無	90°
B	無	無	90°
C	無	有	90°
D	有	有	90°
E	有	無	上流向き 45°
F	有	無	下流向き 45°



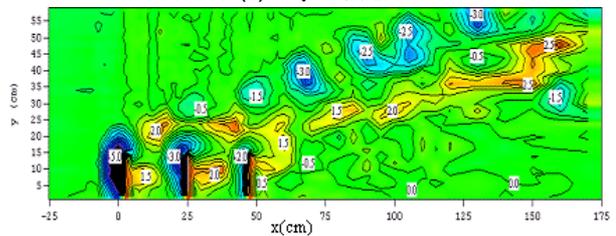
図-1 河床変動の様子 (ケース A)



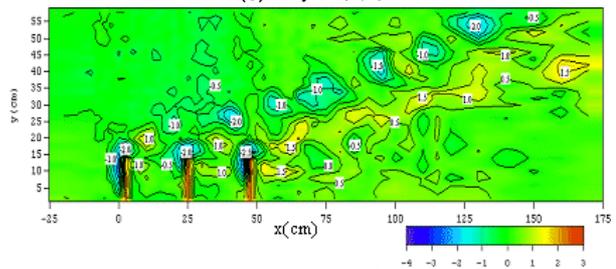
(a) ケース A



(b) ケース B



(c) ケース C



(d) ケース D

図-2 河床高コンター (直角設置)

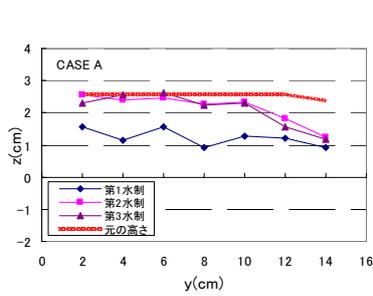
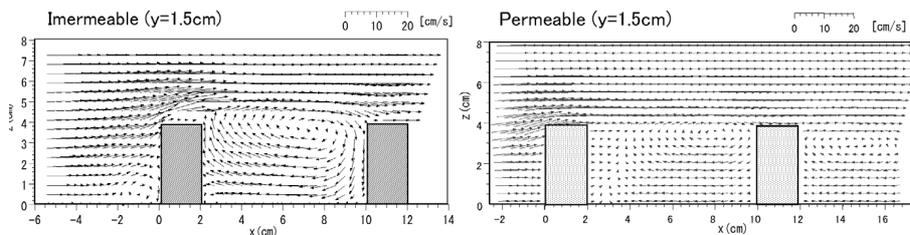
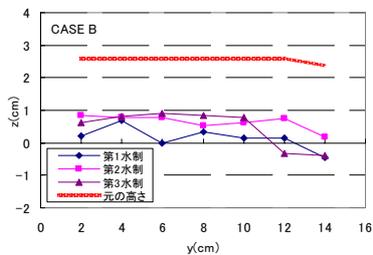
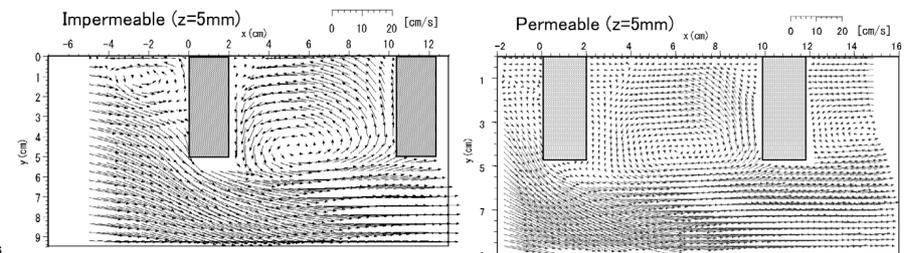


図-3 蛇籠水制頂部高さ



(a) 鉛直縦断面 ($y=1.5\text{cm}$, 左: 不透過, 右: 透過)



(b) 水平断面 ($z=0.5\text{cm}$, 左: 不透過, 右: 透過)

図-4 PIV計測による透過・不透過水制間の流速ベクトル

のである。図-3によると、ケースAでは第1水制が水制前部の洗掘の形に合わせて約1.5cm沈んでいる。最大洗掘深さは約1.8cmであった。第2水制では、水制根元はそのまま、先端部が第1水制と同程度沈んでおり、屈曲した形状となっている。第3水制は第2水制と同様な変化を示す。図-2を見ると第1水制先端から斜め下流に波状の洗掘ラインが形成され、このすぐ下流に第3水制先端を始点とする、これと平行な堆積ラインが形成されている。

次に不透過としたケースBでは、図-3をみると第1水制は $z=0$ の初期河床高より下にほとんど埋まるほど顕著に沈んでいる。第2、3水制もケースAより深く沈み、第1水制と同程度まで沈んだ。その結果、図-2のように河床変動は水制周辺のみとなり、水制背後の河床変動はかなり小さいものとなった。透過性がない場合、透過水制より水制前部で大きな洗掘を引き起こし、これにより水制が沈み込む現象が発生する。結果として河床変動に与える影響は小さくなることがわかった。

不透過で根入れ有としたケースCでは、第1水制前面が大きく洗掘され、最大洗掘深は5cmに達する。第2水制前面で3cm、第3水制では2cmと減少するが、透過型比べて非常に大きい。この大きな洗掘に伴い、水制背後の河床変動も大きくなる。河床変動創出効果は大きいものの、水制自体の安定性に問題が生じる可能性がある。

最後に、初期河床以下を不透過で根入れしたケースDについては、全面不透過のケースCに比べて水制前面の洗掘は減少する。最大洗掘深は2.7cmとケースAの1.5倍となるが、ケースCの1/2となった。第2、第3水制の頭部も第1水制前面と同程度の洗掘が発生している。水制背後の河床変動量も全面不透過に比べて減少し、透過型と同程度になる。水制上部を透過型にすることにより、水制前面の洗掘をかなり抑制

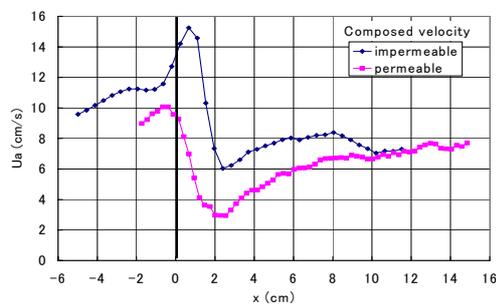


図-5 合成流速の縦断分布 ($y=5.5\text{cm}$)

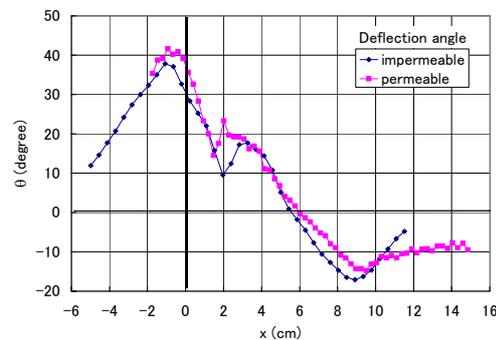
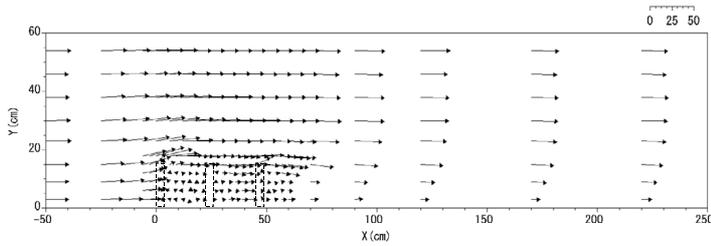


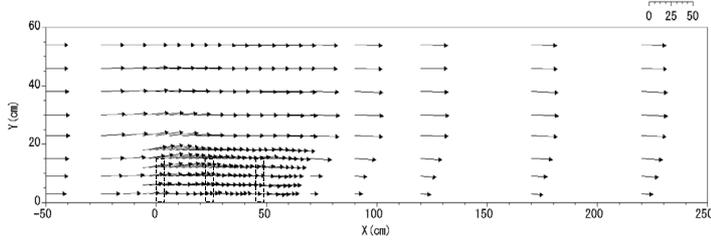
図-6 水はね角度の縦断分布 ($y=5.5\text{cm}$)

できることがわかった。

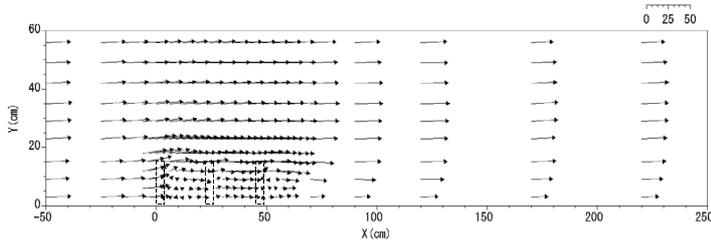
この洗掘のメカニズムは水制前面の馬蹄渦によって説明される。図-4はPIV計測による、透過水制と不透過水制の流速ベクトルの比較を示している。不透過水制のケースでは、横断渦⁵⁾が第1水制前面の根部に見られる。水制に沿った下降流は洗掘を発生させる。水制が透過性のときは、流れは水制内を通り抜けて、横断渦は消滅している。水制間についてみると、不透過水制の場合では著しい逆流が現れている。透過性のケースでは浸透した流れが逆流を弱めていることがわかる。透過性の同様の効果は図-4(b)に示されている水平流れ構造にも見られる。図-5、6にPIV計測による、主流部と水制の境界線 ($y=5.5\text{cm}$) に沿った、合成流速と水はね角度の縦断方向分布を示す。水はね角度の値は不透過水制も透過水制もほとんど



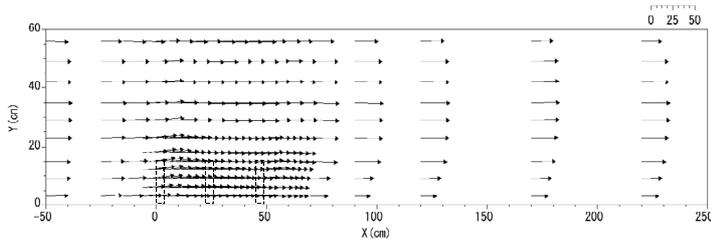
(a) 不透過水制 ($z=2\text{cm}$)⁹⁾



(b) 不透過水制 ($z=6\text{cm}$)⁹⁾



(c) 透過水制 ケース A ($z=1\text{cm}$)



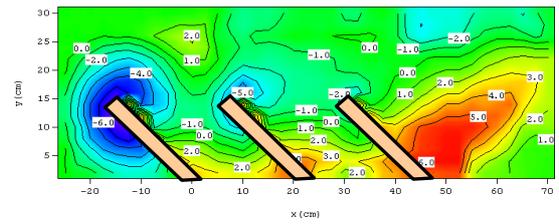
(d) 透過水制 ケース A ($z=6\text{cm}$)

図-7 電磁流速計による平面流速ベクトル

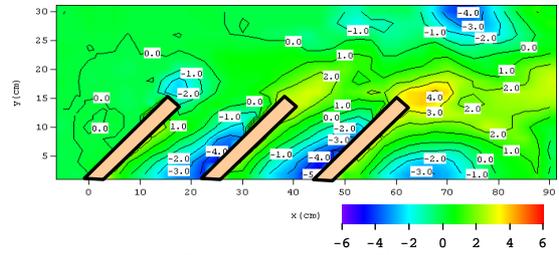
同じであり、最大角度は第1水制の前面部で約 40° である。しかし、透過性のケースでの流速値は不透過のケースよりもかなり小さくなる。水制前面根部での横断渦と水制による水はねの流速が、水制前面および水制頭部の洗掘の原因と考えられる。このことから透過性水制は流れ構造を変化させ、水制前部の洗掘を軽減することができるものと考えられる。

図-7は、不透過水制と今回の透過水制における電磁流速計による水制群を含む水路全体の流速ベクトルを示したものである。透過型では、水制による水はねは不透過型と同様に見られるが、河床近傍で水制間の流速が低減されず水制背後でも減速域が小さくなっている。水面近傍でも水制後方の減速が小さく水制側の側壁へ回りこむ流れがみられなくなっている。したがって、透過水制の流れに与える抵抗は小さいことがわかる。

4. 水制設置角度が河床に与える影響

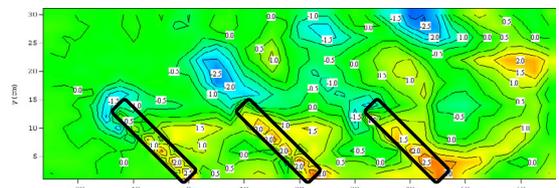


(a) 上流向き水制群

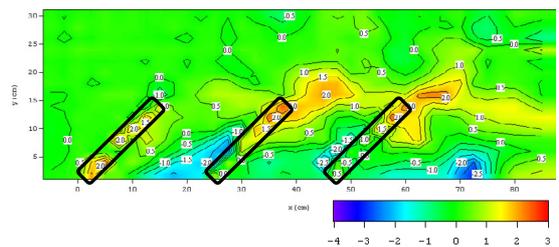


(b) 下流向き水制群

図-8 角度を有する不透過水制群周辺の河床変動⁹⁾



(a) ケース E (上流向き水制群)



(b) ケース F (下流向き水制群)

図-9 河床変動に及ぼす角度の影響

越流型水制の水制設置角度が流れ構造や河床変動に大きな影響を与えることは明らかにされている。

図-8は2006年の松本・富永⁹⁾により得られた不透過で根入れを行った水制によって形成された河床形状である。上流向き水制のケースでは、水制頭部の先端を中心にして円形の洗掘が発生している。頭部周辺の洗掘は第2, 3水制と向かうにつれて小さくなる。第3水制根部では顕著な堆積が起こり、その堆積高は水制の高さを超える程である。下流向き水制では、小規模の洗掘が第1水制頭部の先端で確認されたが、第2, 3水制頭部で洗掘はほとんど起こっておらず、反対に堆積が発生している。しかし第2, 3水制の根部で深い洗掘が現れた。次に、今回得られた透過水制のケースE, Fの結果を図-9に示す。水理条件は不透過のケースと同じであるが、不透過水制の高さは4cm、幅は2cmと今回のケースと異なっている。ケースEでは、

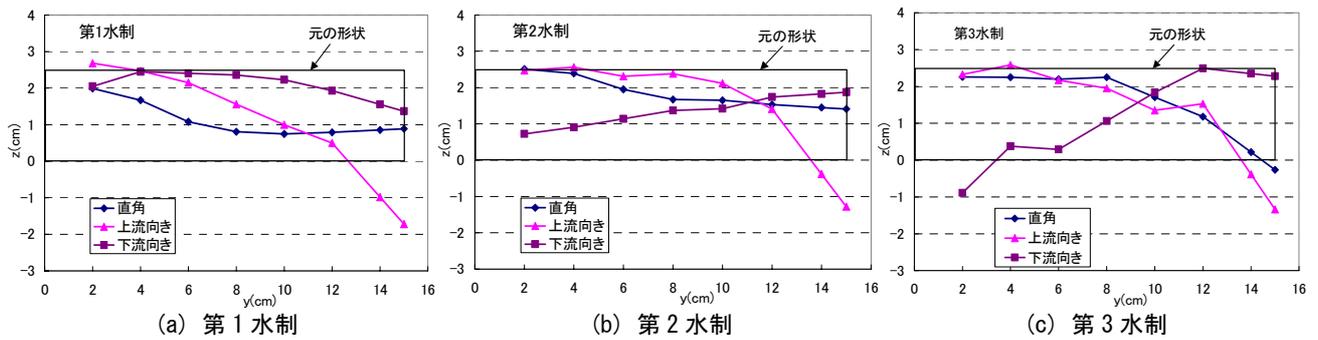
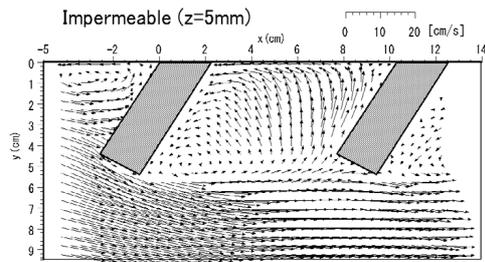
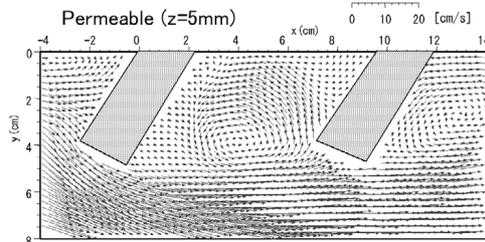


図-10 設置角度による水制変形の比較

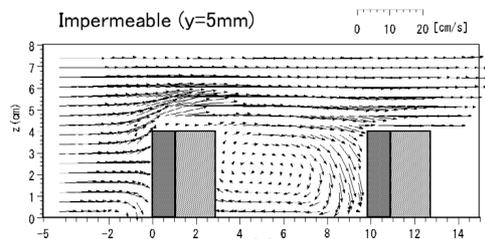


(a) 不透水水制

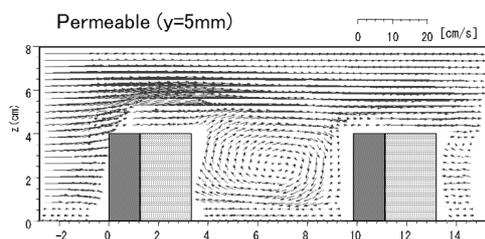


(b) 透過水制

図-11 PIV計測による透過・不透水水制間の流速ベクトル（上流向き水制，z=5mm 水平断面）



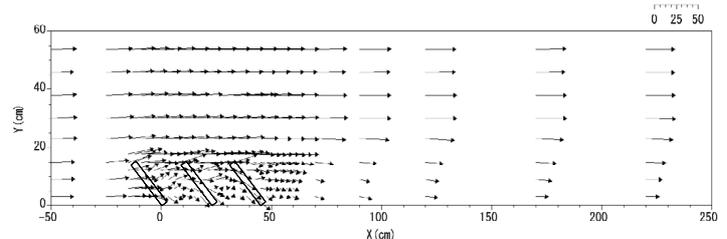
(a) 不透水水制



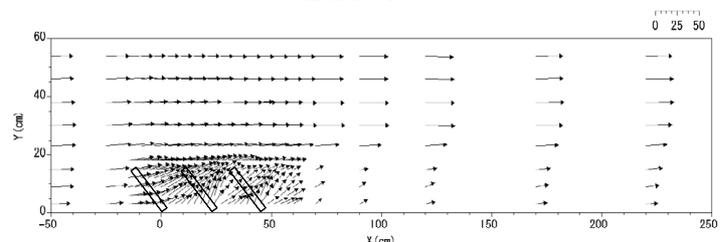
(b) 透過水制

図-12 PIV計測による透過・不透水水制間の流速ベクトル（下流向き水制，y=5mm 鉛直断面）

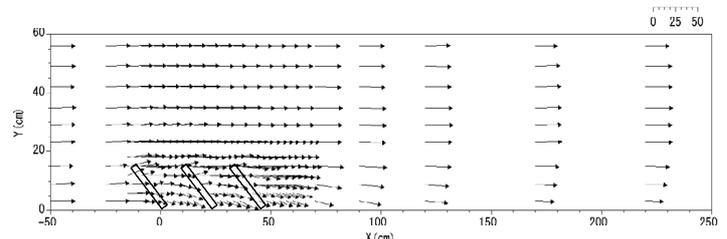
第1水制周辺の洗掘は非常に軽減されていることがわかる。第1, 2水制背後の堆積は、不透水のケースと対照的に水制のすぐ背後に現れた。第3水制背後では、不透水のケースと同様の水制根部に堆積が現れたが、その量は小さくなっている。河床形状は水制内を通過した流れによって抑制されているといえる。



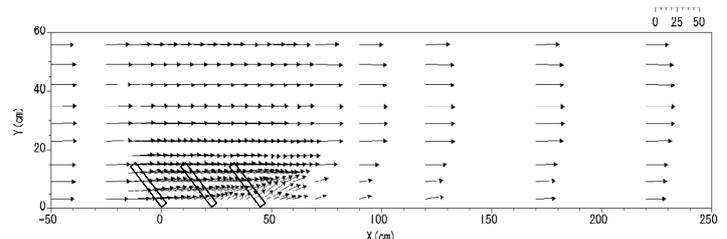
(a) 不透水水制 (z=2cm)⁹⁾



(b) 不透水水制 (z=6cm)⁹⁾



(c) 透過水制 ケース E (z=1cm)



(d) 透過水制 ケース E (z=6cm)

図-13 電磁流速計による平面流速ベクトル

図-10は河床変動後の水制形状の、設置角度の違いによる比較を示す。上流向き水制は、第1, 2水制の頭部が直角の場合より著しく深く沈んでおり、初期河床以下に達している。また、第2水制は約y=10cmで急激に屈倒している。下流向き水制では、第1水制頭部はそれほど沈んでいないが、第2水制では水制根部が頭部側より深く沈んでいる。第3水制頭部は沈んでいないが、根部側が初期河床高を下回るほど沈んで

いる。このように、水制設置角度は透過性水制であっても重要な要素となることが確認された。

PIV計測による不透過水制と透過水制の、上流向き水制の底面近傍水平断面における流速ベクトルを図-11に、下流向き水制の側壁近傍の鉛直縦断面における流速ベクトルを図-12に示す。第1水制前面の洗掘の減少は、直角水制と同様のメカニズムで説明される。上流向き水制では、不透過のケースで見られた河床近傍での内側へ向かう水平の流れが、上流域から下流域へ浸透した流れによって減衰されており、循環渦の形成がみられる。このような流れ構造の変化が水制間の堆積位置の違いを説明するものと考えられる。下流向き水制では、第2水制前面での強い下降流が減少し、上流側へと角度が変化している。これは第2水制の下流からの浸透流の影響と考えられる。その結果、第2、3水制前面の洗掘が抑制されたと考えられる。

図-13は、電磁流速計による上流向き不透過・透過水制のケースにおける水路全体の流速ベクトルの比較を示す。底面近傍では、水制間で水制に沿って側岸へと向かう流れが発生するのが特徴である。透過水制においても、この特徴を有しており、水制を透過した流れが側壁側へ曲げられている。第3水制背後では、直角水制に比べて側壁側へ回り込む流れが強くなる傾向が不透過水制と同様に認められる。水面近傍では、水制上で水路中央へと大きく曲がる流れが特徴である。水制群を超える過程で主流方向流速が減速されるのに対し、横断方向流速は徐々に加速されるため、流速ベクトルの主流に対する角度は、第1水制から第3水制へと下流へ行くにつれて大きくなる。透過水制では、第1、第2水制ではこの流向の変化が小さいが、第3水制において水路中央への流向変化が発生している。このような側岸から水路中央へ向いた流速ベクトルは、水制背後の領域でも維持されている。いずれの高さにおいても、透過水制では水制群背後の減速は不透過に比べてかなり小さくなっている。

5. おわりに

越流型水制群により直線河道に多様化した河床を形成することを目的としてみた場合、水制自体の構造をできるだけ簡易にする必要がある。そこで、局所洗掘が小さいと予想される透過型の蛇籠水制を用い、透過性の実験的に検討した。根入れのない透過水制群は水制周辺の大きな洗掘なしで多様化した河床を拡大させるのに効果的であった。水制内を通る浸透した流れは水制周辺の洗掘の原因となる水制先端の馬蹄渦を減少させた。砂床上に置いた不透過水制は砂床下に沈む傾向があり大きな河床変動を形成できないことがわかった。柔軟性のある水制

は自ら屈倒し、侵食された河床形状に柔軟に対応できる。水制設置角度の影響は、透過水制であっても不透過水制と同様に確認された。上向きのケースでは水制頭部側が沈んだのに対して下向きのケースでは根部側が沈むことが示された。上向き水制は河岸を侵食から保護することができ、かつ多様な河床形状を作ることができる⁹⁾。この結果は限られた水理条件によるものであるため、さらに幅広い条件で実験を行うとともに、数値解析を試みる必要がある。

参考文献

- 1) 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, vol.44, 1065-1070, 2000.
- 2) 川口広司, 渡辺明英, 福岡捷二: 異なる角度の越流型水制周辺流れの二次元数値解析, 水工学論文集 vol.45, 385-390, 2001
- 3) ELAWADY, E., MICHIEU, M. and HINOKIDANI, O., Movable Bed Scour Around Submerged Spur-Dikes, 水工学論文集 vol.45, 373-378, 2001.
- 4) RAHMAN, M. M. and MURAMOTO, Y., Prediction Of Maximum Scour Depth Around Spur-Dike-Like Structures, 水工学論文集, vol.43, 623-628, 1999.
- 5) 富永晃宏, 中野義郎, 井嶋康二, 長坂剛: 越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響, 応用力学論文集, vol.3, pp.805-812, 2000.
- 6) 富永晃宏, 田本典秀: 越流型水制群周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集, Vol.48, 805-810, 2004
- 7) Kimura, I., Hosoda, T. and Onda, S., Prediction of 3D Flow Structures Around Skewed Spur Dikes by Means of a Non-linear k-ε Model, River Flow 2002, 1, 65-73, 2002.
- 8) Zhang, H., Nakagawa, H., Ishigaki, T., Muto, Y. and Baba, Y., Three-dimensional mathematical modeling of local scour, 応用力学論文集, vol.8, pp.803-812, 2005.
- 9) 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, Vol.50, 1009-1014, 2006.
- 10) 富永晃宏, 長尾正志, 長坂剛: 水制背後の流れ構造に及ぼす透過流の影響, 水工学論文集, vol. 44, pp.1035-1040, 2000.
- 11) 富永晃宏, 中居毅, 内藤健, 中村尚子: 開水路湾曲部に設置した透過水制の流れと河床変動に及ぼす影響, 水工学論文集, Vol.48, 547-552, 2004.
- 12) 富永晃宏, 庄建治朗, 内藤健, 松本大三: 伝統的河川工法「聖牛」の水理機能と河床洗掘防止効果に関する実験的研究, 水工学論文集, Vol.49, 1009-1014, 2005.
- 13) 道奥康治, 南条雅志, 石垣泰輔, 前野詩朗: 捨石水制が冠水した開水路流の二次元二層流モデル, 土木学会論文集, No.782/II-70, 31-50, 2005.
- 14) 李最森, 道奥康治, 前野詩朗, 牛田高裕, 藤井淳: 捨石水制群の水理特性について, 応用力学論文集, vol.8, 773-782, 2005.

(2007. 9. 30 受付)