

越流型連続水制群周辺の流れ構造に及ぼす 水制設置角度の効果

EFFECTS OF ORIENTATION ANGLE ON FLOW STRUCTURES AROUND SUBMERGED CONTINUOUS SPUR DIKES

富永晃宏¹・田本典秀²

Akihiro TOMINAGA and Norihide TAMOTO

¹ 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)

² 学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

The flow structures around the continuous spur dikes were investigated by using a PIV method. In this study, the orientation angle of spur dike was chosen as a control parameter and it was varied in three ways. The visual images were recorded by a high-speed camera and analyzed with the cross-correlation method. Combining the two-dimensional PIV analysis of horizontal and vertical planes, we were able to verify the time-averaged three-dimensional flow structures. In the forefront section, obvious differences were observed among the three cases. The flow structure in the second spur-dike zone is controlled by the interaction with the separated flow from the first spur dike. In the backward section, the flow deflection as seen in the forefront section was not observed, but still slight differences are recognized. Particularly, the over flow velocity on the downstream-oriented spur dike becomes much larger than that in the other cases.

Key Words : *submerged continuous spur dike, 3D flow structure, local flow
PIV method, orientation angle*

1. はじめに

水制は河岸を単調化させてしまう護岸被覆工法の代替として、また河岸の環境回復の手段として注目されるようになってきた。水制に関する水理的問題としては、河岸付近の減速効果の把握と抵抗の評価および水制の設置による局所洗掘と河道全体の河床変動に対する影響の予測等が上げられる。水制の設計項目は数多くあり、その組み合わせは無限にあるため、今後は数値モデルを用いた数値実験が有力な手段となると予想される。水制群の抵抗特性を理解した上で2次元の計算に組み込む方法が考えられるが、局所的な洗掘や堆積を予測するには3次元の数値計算が必要となろう。最近水制周辺の流れの数値計算が行われているようになってきた^{1),2),3),4)}。しかし、水制周辺の局所流や河床変動を十分な精度で予測できるモデルの開発は端緒についたばかりであり、比較検討のための実験データの蓄積が望まれる。実験の方針としては、流れと河床変動に対して鍵となる項目を抽出してその効果を明らかにすることが重要であると考えられる。著者らはこれまでに越流型水制の流れ構造に着目して、水制高さ、水制設置角度、水制間隔をパラメータとしてPIV計測による実験的検

討をしてきた。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交換の両方が存在し、両者の相互作用により複雑な3次元の流れ構造を示すことが知られている⁵⁾。著者らは越流型水制の特性を強調して抽出するために鉛直方向のスケールを引き伸ばした実験条件を設定し、越流型水制では水制間の領域における逆流が相対水制高の増大とともに強くなることを示した⁶⁾。次に、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、水制の土砂堆積機構の重要な要因となることを示した⁷⁾。これらの結果は木村らによる非線形k-εモデルによる数値計算と比較されある程度良好な一致を示している⁸⁾。また、2基の水制間隔を変化させた実験も行い、水制間隔が大きい場合には、水制間の渦構造がかなり不安定となり瞬間の渦構造は時間的に大きく変化するが、時間平均流速構造についてみると、結果としてそれぞれの設置角度に特有の渦構造は水制間隔の変化によっても失われなかった⁹⁾。本研究では、実際に設置されるケースが多い連続水制群として置かれた場合を対象とした実験を行った。設置角度をパラメータとし、先頭水制で見られた激しい流れの変化がどこまで維持され、下流の発達安定領域ではどのような差異が現れるのかをPIV計測によって調べた。

2. 実験方法

実験水路は、水路幅 $B=0.3\text{m}$ 、長さ 8m の長方形勾配可変型開水路を用い、路床勾配 $i=1/2000$ とした。水制設置場所は水路の中間部を水制区間とし、左岸側壁に沿って10個の連続水制モデルを配置した。これは先頭水制水はね効果と、水制間の流れ構造を捉えることを目的としたためである。水制モデルは、長さ $l=5.0\text{cm}$ 、幅 $b=2.0\text{cm}$ に固定し、水制高 $d=4\text{cm}$ とした。また水制間隔は水制長の2倍程度が比較的渦構造が安定する $s=10\text{cm}$ とした。流量 $Q=4.1\text{l/s}$ の定常流量を通水し、下流部での堰上げを調整して水深 $h=8.0\text{cm}$ とした。

PIV計測のトレーサとして、比重1.02、粒径 $50\mu\text{m}$ のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3mm のシート状にした 500mW アルゴンレーザー光を開水路鉛直縦断面($x-z$ 平面)と水平断面($x-y$ 平面)に照射した。レーザーシートの照射位置は、鉛直縦断面を $y=5, 15, 25, 35, 45, 55, 70\text{mm}$ の7断面、水平断面を $z=5, 10, 20, 30, 35, 45, 55\text{mm}$ の7断面とした。撮影は第1第2水制間、第2第3水制間、第7第8水制間において行った。この可視化画像は高速ビデオカメラを用いて $1/120\text{s}$ で撮影し、画像はハードディスクに 640×480 画素のTIFFファイルとして記録される。画像計測にはVISIFLOW (AEA Technology) PIVシステムを用い、相互相関法により流速ベクトルを計算した。相関法では検査エリアを 32×32 画素、オーバーラップは 50% とし、高速ビデオカメラで連続撮影可能な計1963枚、約16秒間平均値の流速ベクトルデータを得て統計処理した。平均時間16秒は流速の正確な時間平均値を得るには短いと考えられるが、連続した瞬間流速ベクトルを検討した結果、大きな構造の変化は見られず、流れ構造を把握するには十分な時間であると判断した。

3. 水制域の3次元流れ構造

非越流型水制の先頭水制による水はねによるはく離長は水制長の約5~6倍程度と確認されているが¹⁰⁾、越流型の場合先頭水制のはく離域はかなり短くなることが示されている⁹⁾。第4水制以降は比較的安定した流れの状態となり、第7水制以降はほぼ発達した状態となった。そこで本研究では、変化の大きい第1から第3水制間と安定した第7・8水制間の流れ構造を比較検討した。ここでは3種類の設置角度について、特徴が明確であり土砂輸送等に重要な意味を持つ底面近傍 $z=5\text{mm}$ と側壁近傍 $y=5\text{mm}$ の鉛直縦断面と第7・8水制間の水制頂部近傍 $z=35\text{mm}$ の水平断面と主流域近傍の $y=45\text{mm}$ の鉛直縦断面の流速ベクトル図のみを示し、水制域の水交換の指標となる水制域境界面からの流出入流速コンターを示して考察する。この水制域上面を通しての流出入流速とは、 $x-y$ 平面に直角な流速 W のことであり、この値は $x-z$ 平面のPIV解析によって得られたものである。またこのコンターは各 $x-z$ 平面($y=5, 15, 25, 35, 45\text{mm}$)における W の境界面($z=40\text{mm}$)での値を合成して得たものである。

同様に、水制域側面を通しての流出入流速コンターは、各 $x-y$ 平面($z=5, 10, 20, 30, 35\text{mm}$)のPIV解析によって得られた V の水制域境界面($y=50\text{mm}$)での値を合成して得られたものである。

(1) 直角水制

図-1に直角水制の流速ベクトルを示す。水平断面流速ベクトルから、第1水制のはく離再付着点は底面近傍でちょうど第2水制先端付近にあたることから、第2水制先端では内向きの流れが見られる。第1水制による水はね効果により第1・2水制間では水制長より幅の広い循環流を形成し、渦中心が水制先端付近になるのに対して、第3水制先端では流れは主流に平行となっており、循環流は水制域内にとどまっている。これは水制間隔を水制長の4倍とした過去の実験で得られた水平面のはく離域が水制長の約3倍程度となるという結果を反映して、第2水制後方の外向き流れを抑制し、第2・3水制間の流入を強くしていると考えられる。第7・8水制間と比較して第2・3水制間は後方からの流入が多いものの、ほぼ同様な流れ構造となっている。一方、側壁近傍の鉛直縦断面ベクトルを見ると、第3水制前面で上昇流が発生している点が注目される。これは水制間隔が水制長の4倍のケースの第2水制前面でも見られた現象である。前報では、この現象は間隔が広がった場合第2水制が単独水制の状態に近づいたためであるとしたが、同様の現象が間に水制をはさむ場合にも発生したことは興味深い。第1水制前面からはく離流の再付着が第2水制後方の上昇流を抑制することによって第3水制前面での上昇流が発生したものと考えられる。発達域にあると考えられる第7・8水制間全体を見ると、第1水制の水はね効果によるはく離循環流領域の拡大がなくなり、規模、強さともに縮小した形で同様の3次元な流れ構造が維持されているといえる。

次に、水制域境界面の流出入流速コンターを図-2に示す。これを見ると、第2・3水制間が第1・2水制間と大きく異なっていることがわかる。第2・3水制間では第2水制背後の流出が抑制されて、第3水制前面での流出が現れる。また、流入・流出ともに小さくなっている。第7・8水制間の流出入構造は、大きさは小さいものの、むしろ第1・2水制間の構造と類似している。また、鉛直縦断面 $y=5\text{mm}$ の第7・8水制間では第7水制前面の方が若干上昇流が強いようであるが、この区間でも流れの非定常性が強く間欠的な上昇流の発生が見られたことから、平均時間が十分長くないことによるものと考えられる。

(2) 上向き水制

図-3に上向き水制の流速ベクトル図を示す。水平断面ベクトルでは第2・3水制間の流れに直角水制と同様の第1水制のはく離再付着の効果が認められる。水制間隔を4倍とした実験では上向き水制の場合も水平面のはく離域が水制長の約3倍であった。また、はく離による主流の偏流角度は直角水制より小さい。連続水制の場合、再

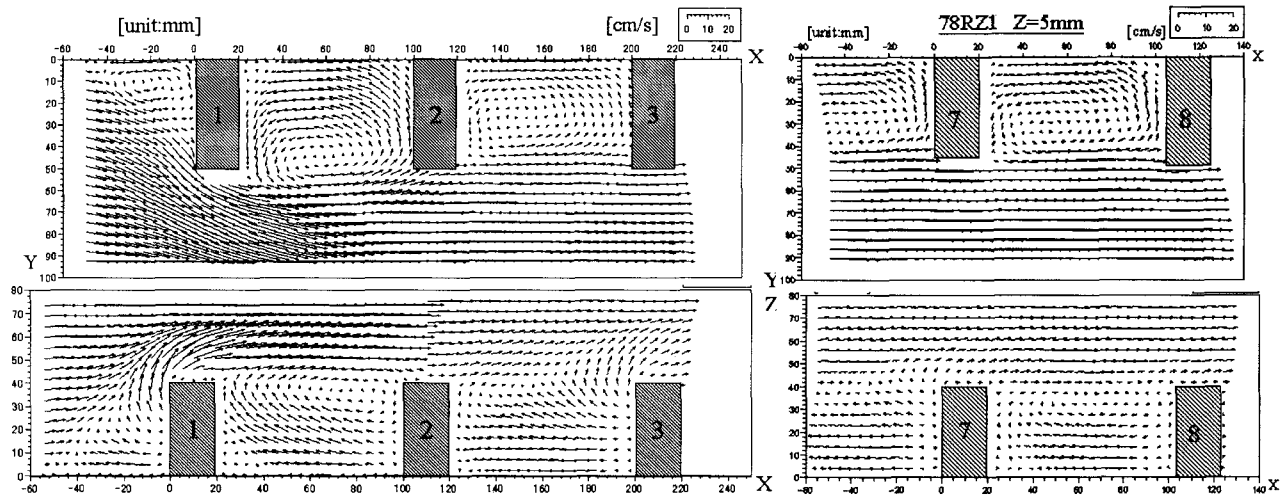


図-1 直角水制流速ベクトル（上：水平断面 $z=5\text{mm}$ ，下：鉛直縦断面 $y=5\text{mm}$ ）

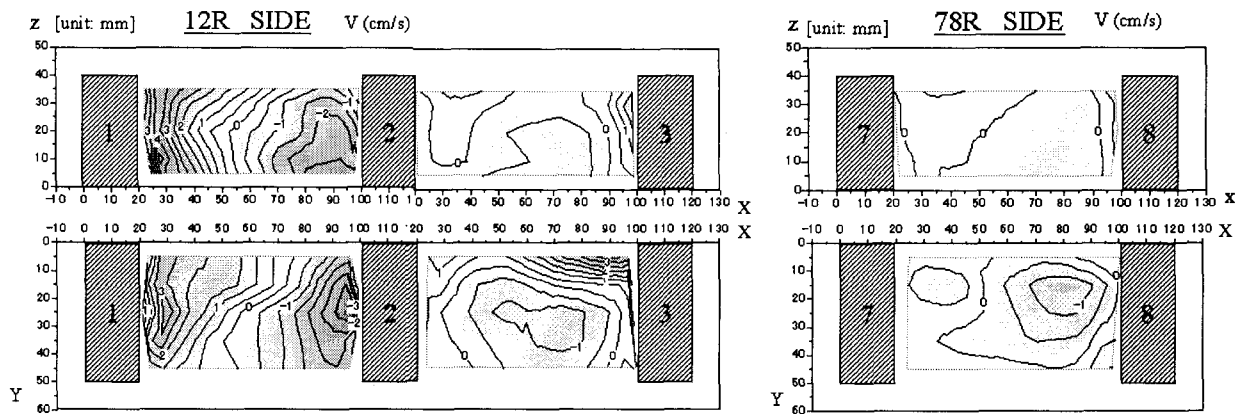


図-2 直角水制域境界面からの流出入流速コンター（上：水制域側面，下：水制域上面）

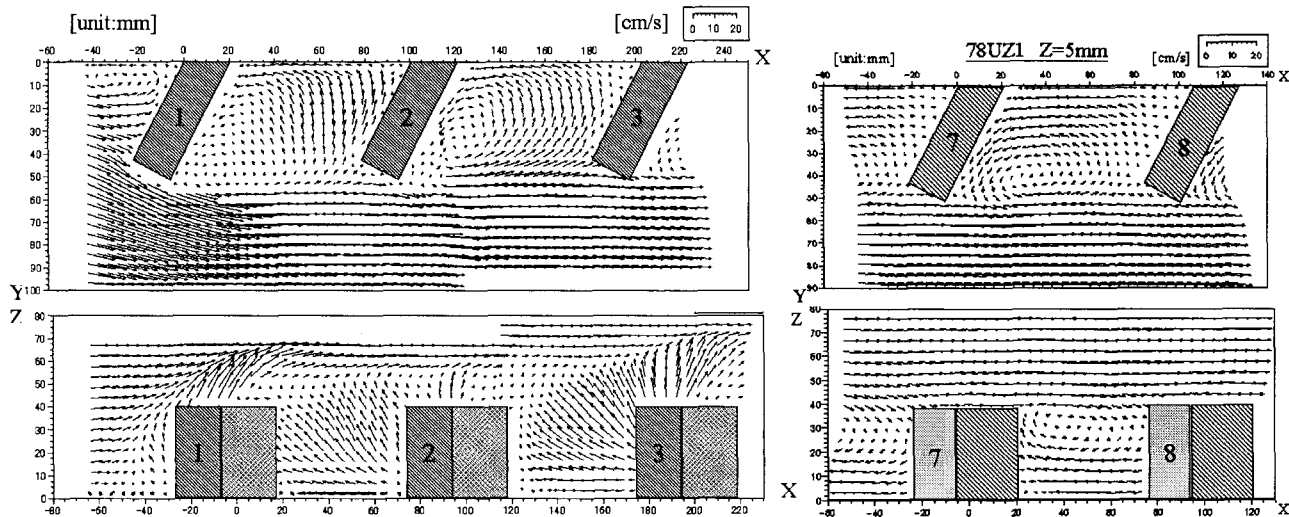


図-3 上向き水制流速ベクトル（上：水平断面 $z=5\text{mm}$ ，下：鉛直縦断面 $y=5\text{mm}$ ）

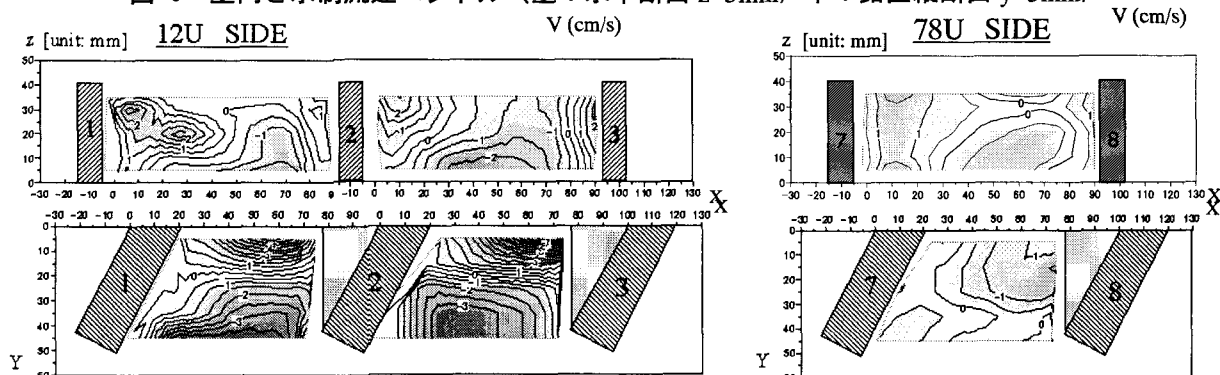


図-4 上向き水制域境界面からの流出入流速コンター（上：水制域側面，下：水制域上面）

付着点領域が第2・3水制間の中間にあたり、もともと強かった内向き流れをさらに強めた流れとなっている。また、第1・2水制間では内側へ向かう1方向的な流れであるが、第2・3水制間では第2水制先端の後方を中心とする渦構造が確認できる。第7・8水制間では渦構造は第2・3水制間と類似しているものの、後方の流入が減少し、側壁近傍の逆流域が広がっている。第2水制後方の外向き流れが強い点が特徴である。側壁近傍の鉛直縦断面では、第2・3水制間でも第1・2水制間と同様に斜め上向きの逆流が支配的であり、第3水制前面の上昇流は第2水制より大きくなっている。このことは、上向き水制上方の流れが大きく減速されていることと、水平面ベクトルで見たように横からの流入が大きくなっていることによると考えられる。第7・8水制間を見ると、このような水制前面の上昇流は全く見られなくなり、第4水制以降で急激に変化している。すなわち、水制長の4倍程度より前方の水制域では第1水制の水はねはく離流れとの干渉により特異な流れ構造が形成されるが、この干渉領域以降では平衡状態に近い流れ場が形成されるものと考えられる。

境界面からの流出入コンターを図-4に示す。これを見ると、直角水制と異なり第1・2水制間と第2・3水制間はほとんど同じ構造を示している。側面からの流出入では第2・3水制間の方が流入が強くなっている点と、上面側壁側からの流出が大きくなっている点が異なる程度であり、

上向き水制の特徴である縦渦的な流れ構造が第2・3水制でも維持されていることがわかる。しかし、第7・8水制間では上面からの流出入構造が大きく変化している。その構造は直角水制の流れ構造に近づいているといえる。ただし、側面からの流出は上向きの方が大きい。

(3) 下向き水制

図-5は下向き水制の流速ベクトルである。底面近傍の水平断面ベクトルは、第1・2水制間および第2・3水制間ともに、強い外向き流れが発生している。下向き水制は水平面における水はね効果が最も大きくなるが、底面近傍では水制域内への上面からの流入が大きくこれに伴う底面からの流出が流れを支配している。第3水制先端の主流域では主流速は大きく減速されている。第7・8水制間では、水制先端付近の主流速も回復し、水制域内で1つの循環流を形成するようになるが、依然として他の2つのケースに比べて水制前面の水はね効果は大きいことがわかる。一方、鉛直縦断面ベクトルを見ると、第1水制による水はねは最も小さく、第2水制前面からの大きな流入が顕著である。第3水制前面では流入はかなり小さくなり、横断渦の形成が認められる。この渦構造は第7・8水制でもほぼ同様で流速が弱くなっている。

流出入流速コンターを図-6に示す。第1・2水制間と第2・3水制間では流れ構造的には変化は小さいことがわか

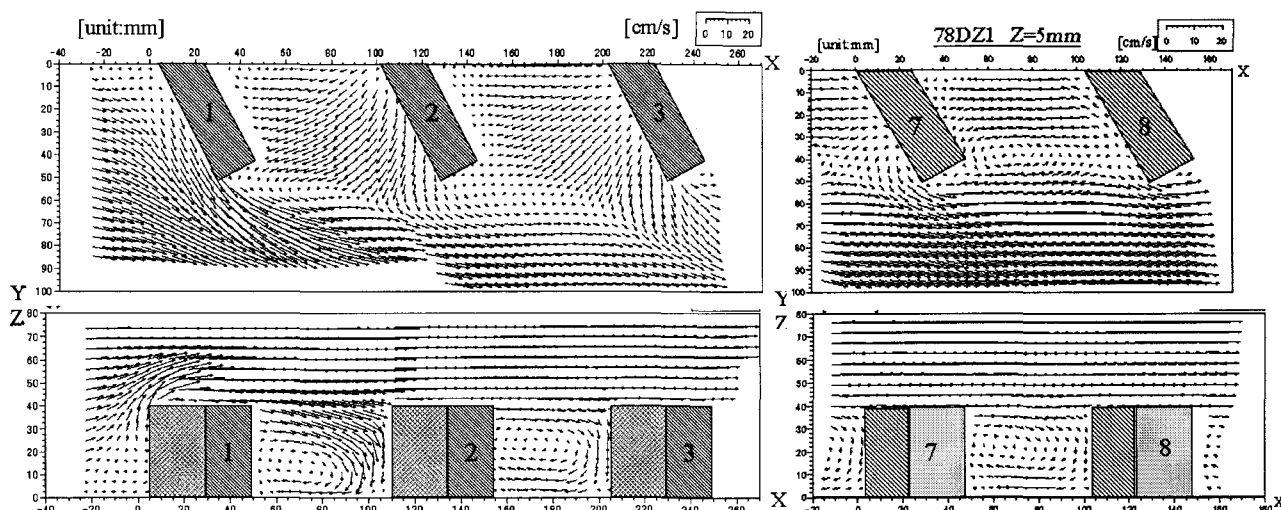


図-5 下向き水制流速ベクトル(上:水平断面 $z=5\text{mm}$, 下:鉛直縦断面 $y=5\text{mm}$)

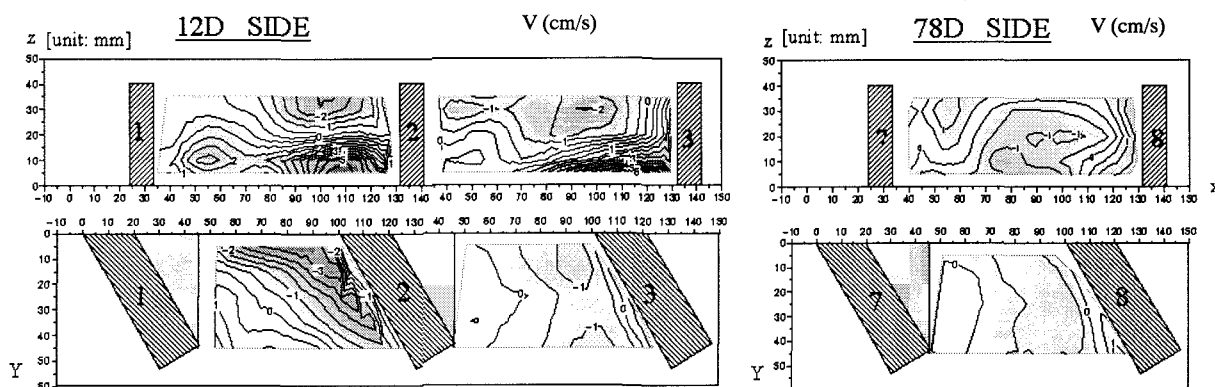


図-6 下向き水制域境界面からの流出入流速コンター(上:水制域側面, 下:水制域上面)

る。水制域側面からは第2・3水制間で水制間上部の中央から上流側にかけて広範囲から流入するようになり、第3水制前面からの流出が現れるようになる。ここには示さなかったが、水制頂部付近の流速ベクトルから第1水制のはく離流の再付着が第2・3水制間に現れるため、この区間の横からの流入が増大したものと考えられる。水制域上面からは第2・3水制間の流入量が第1・2水制間に比べてかなり減少している。第7・8水制間では、側面からの流出入は下向き水制が最も大きいことがわかる。また、後方水制前面からの流出が卓越している。上面からの流出入は他の2ケースが後方水制の根元付近からの流入が多いのに対して、下向き水制は先端付近まで流入が認められる。

4. 水制域周辺の主流速分布への影響

本研究のPIV実験においては、流速測定範囲の制限により連続水制が主流速に及ぼす抵抗の評価は厳密に行うことができなかった。そこで、水制域中央部の主流速分布を各ケースで比較検討した。また、水制域上部の特徴的な主流速横断分布を示す。

図-7は水制間中央(1・2水制間 $x=6\text{cm}$ 、2・3水制間 $x=16\text{cm}$ 、7・8水制間 $x=66\text{cm}$)、 $y=25\text{mm}$ における主流速の鉛直分布を設置角度ごとに示したものである。直角水制の場合、第1・2水制間では上部が加速され水制間は大きな逆流が認められる。第2・3水制間では上部の流速が減少しているが、水制間の逆流はほとんどなくなる。これは第1・2水制間では水制上部越流による横断渦的構造が支配的なのに対し、第2・3水制間では鉛直渦的構造に変化していることを示している。第7・8水制間では水制上部の流速がさらに減少し、水面近傍の流速が水制

頂部付近よりも遅くなっている。これは断面全体に及ぶ2次流の存在を示唆している。また、水制間では逆流が再び増大している。これは第2・3水制で側面からの強い流入による鉛直渦構造の卓越が、下流平衡領域では越流型水制の特徴である横断渦構造と鉛直渦構造の合成された流れ構造になることを示している。次に、上向き水制についてみると、第1・2水制間の水制上部の減速が著しいことがわかる。また、水制間への流下方向順流速の入り込みが大きい。第2・3水制間ではこの傾向がさらに強まり、水制上部は減速し、水制間では加速している。これは主流域からの流入の増大と水制根元付近からの上昇流の増大に起因している。第7・8水制間では、水制上部流速はかなり回復し、直角水制よりも若干大きくなっている。また、水制間の逆流速も直角水制とほぼ同様の分布を示している。したがって、上向き水制の主流速への影響は、連続水制群の先頭領域では著しい減速があるものの後方の平衡領域では直角水制と同程度となるといえる。下向き水制では、第1・2水制間の水制域上部の加速が最も大きい。この傾向は第2・3水制でもほとんど同様に維持されている。第7・8水制間では、水制域内の流速はほとんど変化せず、3ケースともほとんど同様の分布を示している。水制上部の流速は上流域に比べて減速しているが、この平衡領域においても下向き水制は他の2つの水制に比べて大きな流速を維持している。

図-8は3ケースで大きな差が見られた水制上部 $z=55\text{mm}$ における主流速横断分布を示したものである。まず第1・2水制間では、上向き水制の水制根元付近からの減速が著しく、下向き水制の減速が最も小さい。第2・3水制間ではこの傾向がさらに顕著となっている。第7・8水制間の平衡領域では、下向き水制が水制上部で他の2ケースに比べて非常に大きな流速を持っていることが

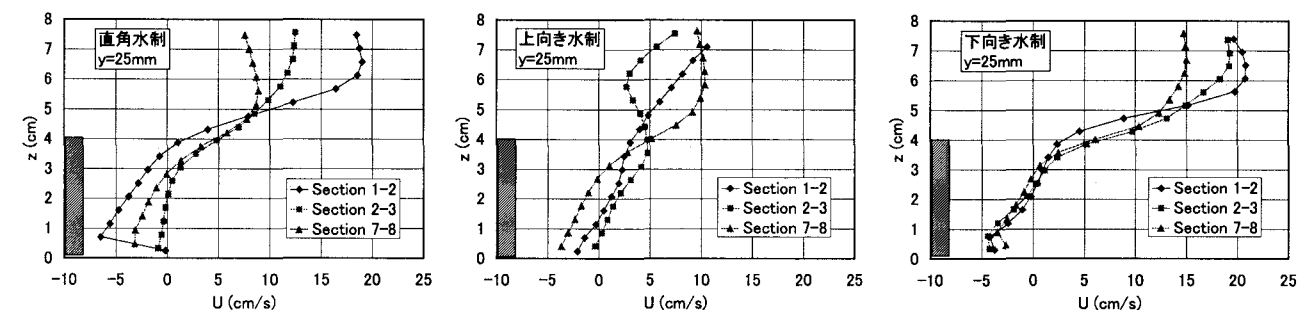


図-7 水制間中央の主流速鉛直分布の流下方向変化

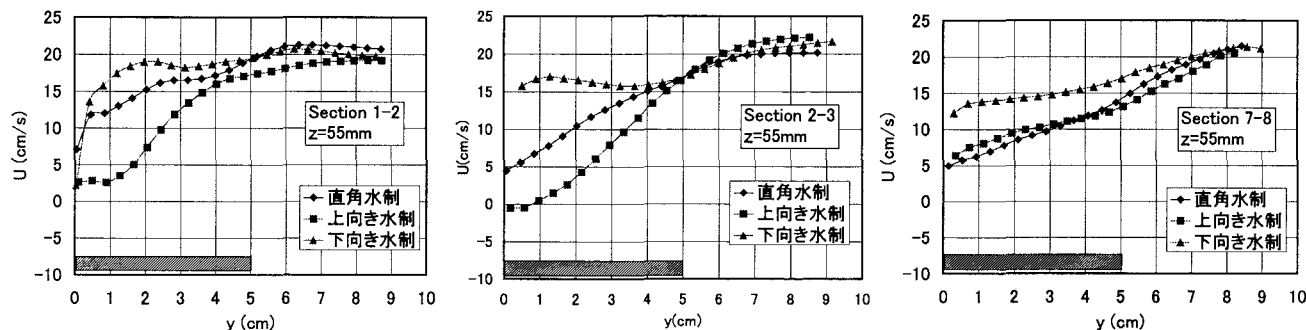


図-8 水制上部 $z=55\text{mm}$ における主流速横断分布

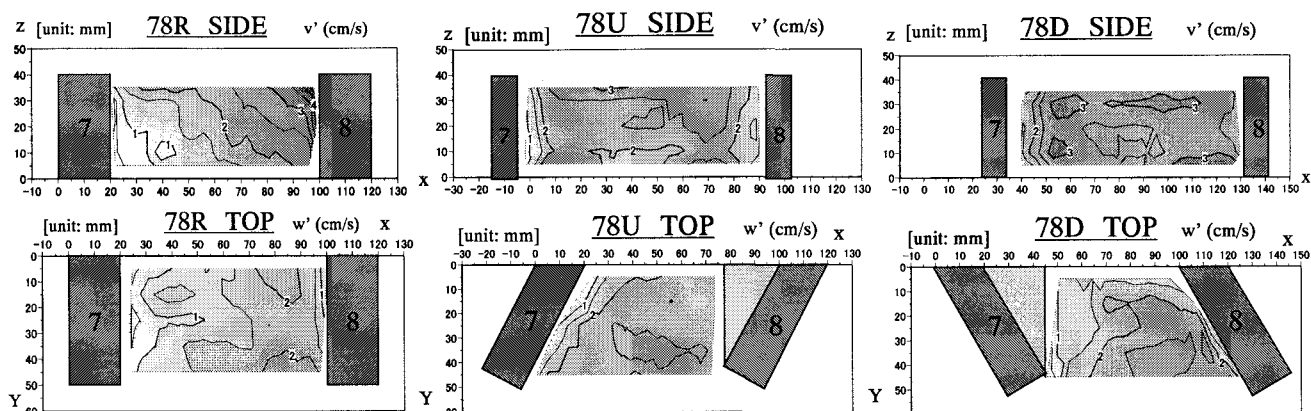


図-9 水制域境界面における乱れ輸送（上：水制域側面，下：水制域上面）

明らかである。直角水制と上向き水制はほぼ同様の分布であるが横断方向勾配は直角水制の方が若干大きい。

5. 平衡領域における水制域境界面の乱れ輸送

連続水制の先頭領域では設置角度による顕著な差が認められたが、後方の平衡領域では流れ構造の差は小さくなった。水制域内への物質輸送を考える上では水制域鉛直縦断面に対する横断方向流速あるいは水制域水平断面に対する鉛直方向流速が重要な役割を果たしていると考えられる。その意味で境界面を通しての実質的な質量輸送の強さは流速の2乗平均である次式で評価できると考えられる。

$$M = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_i + u'_i)^2 dt} = \sqrt{U_i^2 + \overline{u'^2}} \quad (1)$$

ここに、 U ：平均流速、 u ：瞬間流速、 i は考える面に対して垂直な方向を示す。このうちの時間平均部分についてはすでに、図-2, 4, 6に示しており、残りの乱れ変動の部分について、ここでは境界面に垂直方向乱れ強度で代表させて考察する。この場合も境界面流出入コンターの場合と同様に水制域上面ではx-z平面の解析から得られる w' 、水制域側面ではx-y平面の解析から得られる v' を検討する。これらのコンターを図-9に示す。いずれのケースにおいても乱れ輸送成分は平均流速成分よりも大きな値を示している。水制域上面については3ケースで大きな差は見られないが、側面では直角水制の第8水制前面頂部付近の乱れが大きく、下向き水制では第7水制後方の乱れが大きいことがわかる。

6. おわりに

直角、上向き、下向きの連続水制群の先頭領域の第1・2区間と第2・3区間および平衡領域と考えられる第7・8区間の流れ構造をPIV計測によって比較検討した。第1水制の水はねに起因する横断渦および鉛直渦は、流下方向に水制高および水制長のほぼ3倍程度までは発達するという過去の結果と対応して、第2・3水

制間までが大きくこの影響を受ける。すなわち第1水制の水はねの再付着と水制間の流動が相互作用して第2・3水制間では特異な流れ構造を示した。平衡領域である第7・8水制間では流れ構造の大きな差は見られなくなるが、下向き水制は他に比べて大きな水はね効果を示す。また、設置角度による主流速への影響が大きく、下向き水制は水制領域の減速が小さく河岸保護の目的に対しては注意を要する。上向き水制は先頭領域での減速が大きいものの下流平衡領域では直角水制と同様となった。乱れについても設置角度による違いが認められたが、詳細は瞬間流速場の検討が今後必要である。

参考文献

- 1) 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 45，385-390，2001
- 2) Miller R.1, Roulund A., Sumer B.M., Fredsøe J., Truelsen C., Michelsen J., 3-D Numerical Modeling of Flow Around a Groin, Proc. of IAHR Congress, 30, C-2, 385-392, 2003.
- 3) Paquier A., Bristeau M.O., Proust S., Rivière N. and Champagne J.Y., Comparison of 2d Flow Modelling Around a Groyne, Proc. of IAHR Congress, 30, C-2, 393-400, 2003.
- 4) Xu Y., Wang S. S. Y. and Jia Y., Numerical Analysis of Effect of Submerged Dike Alignment on Navigation Improvement In a Curved Channel, Proc. of IAHR Congress, 30, C-2, 543-550, 2003.
- 5) 富永晃宏・中野義郎・藤田享良：越流型水制域内の流れ構造の可視化解析，水工学論文集，44，1041-1046，2000.
- 6) 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.
- 7) 富永晃宏・井嶋康二・中野義郎：斜め越流型水制周辺の流れ構造のPIV解析，水工学論文集，45，379-384，2001.
- 8) 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.
- 9) 富永晃宏・井嶋康二：越流型水制周辺の流れ構造に及ぼす水制間隔の効果，水工学論文集，46，475-480，2002.
- 10) 陳飛勇・池田駿介：水制周りの水平剥離渦の構造に関する実験的研究，水工学論文集，40，787-792，1996.

(2003. 9. 30 受付)