

斜め越流型水制周辺の流れ構造の PIV 解析

PIV ANALYSIS OF FLOW STRUCTURES AROUND SKEWED SPUR DIKES

冨永晃宏¹・井嶋康二²・中野義郎³

Akihiro TOMINAGA, Koji IJIMA and Yoshiro NAKANO

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)

³ 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)

Spur dikes become to be recognized as hydraulic structures for environmental functions as well as for bank protection works. To predict and control flow, sediment transport and water quality exchange by using submerged spur-dike, it is necessary to clarify three-dimensional flow structures around spur-dike zones. In this study, orientation angle of super dike is chosen as a design parameter and its effects on flow structures in spur-dike zones are investigated by using PIV method. The vertical vortices caused by the top flow and transverse vortices caused by the side flow interact with each other and produce characteristic three-dimensional vortex structures. The orientation angle changes this interaction mechanism significantly. The flow structures of downstream-oriented spur dike are very different from those of upstream-oriented and normal spur dikes.

Key Words : submerged spur dike, 3D flow structures, local flow, PIV

1. 序論

水制は、河川断面の一部の流速を弱める働きをし、水はね効果を与えることにより、水は狭められた河川断面に集中して流れることにより水流を河岸から遠ざける効果があるため侵食の危険にさらされた河岸の保護に有効に利用することができるばかりでなく、多様な流れを創造し豊かな自然環境を提供する構造物としての機能を有するものとして認識されるようになってきた。

一般的に水制の機能の評価として、水制周辺の河床に与える影響は小さいほうが望ましいとされるが、自然環境や生態環境面に配慮する場合には土砂堆積を促したり、また深堀れ部を造成する目的に使用したりすることも考えられる¹⁾。多様な目的に対して水制の最適な設置法を考える上で、水制周辺の詳細な流れ構造を知ることは重要な課題である。連続水制群周辺の河床変動と流れ全体への影響については多くの研究があるが^{2), 3)}、一対の水制で狭められた水域を水制域と呼ぶことにすると水制域内の局所的流れ構造については未だ十分明らかにされていない。特に越流型水制では、水制域内の流体の主流域の流れとの交換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次元流れ構造を示すと考えられる^{4), 5)}。本研究では、越流型水制の主流方向に対する水制設置角度の変化が水制周辺における流れ

構造に与える影響を可視化PIV法を用いて実験的に検討した。PIV計測では2次元の鉛直および水平断面の流れ場を計測することになるが、時間平均の3次元構造を十分捉えることが可能である⁶⁾。本研究で設定した水制の流下方向間隔においては、水制域内の渦構造が比較的安定に存在したため、時間平均流速構造についての検討を行った。

2. 実験方法

実験水路は、水路幅 $B=0.3\text{m}$ 、長さ $L=8\text{m}$ 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2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、水制設置角度は主流方向に対して直角、上向き(直角より上向きに 30°)、下向き(直角より下向きに 30°)と変化させた。実際の河川では設置角度は通常 $10\sim 15^\circ$ 程度であるが、実験では角度による変化をより明確に抽出するためそれぞれ 30° とした。実験ケース名は先頭の文字をP、2番目の文字は直角(R)、上向き(U)、下向き(D)を表し、最後の数字は水制高を表す。流量 $Q=4.1\text{l/s}$ の定常流

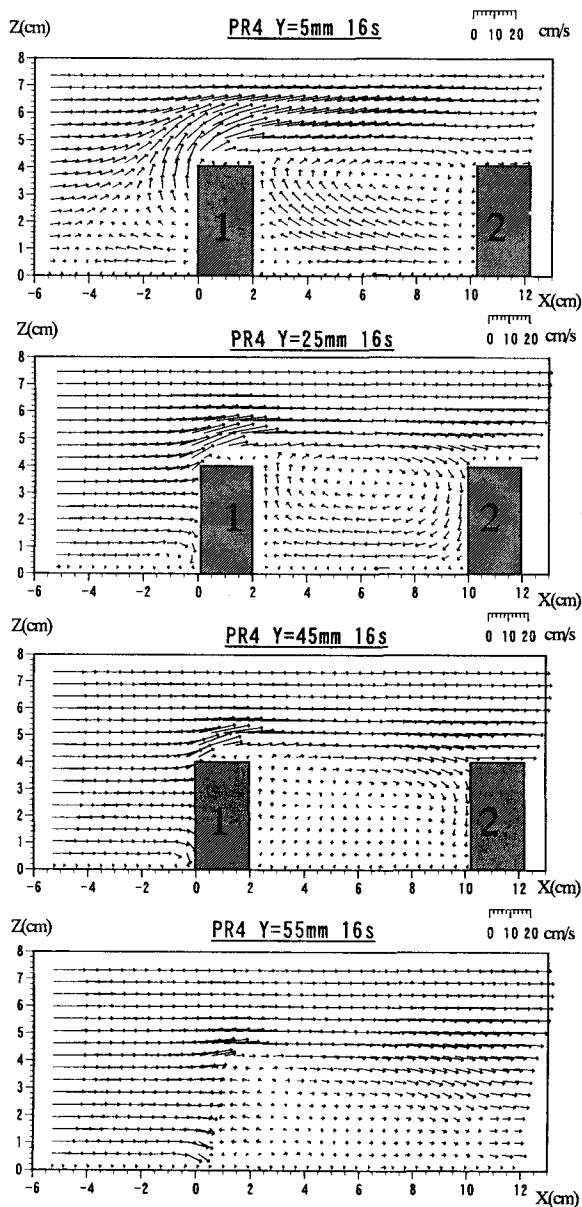


図-1 鉛直断面流速ベクトル (直角水制)

量を通水し、水制を設置しない状態で、下流部での堰上げを調整して水深 $H = 8.0\text{cm}$ とし、すべての実験ケースにおいてこの状態で堰上げを固定した。流れの可視化には、比重1.02、粒径50 μm 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 (Ion Laser Technology) を開水路鉛直断面 ($x-z$ 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、鉛直断面として8断面 (水制側壁から5,15,25,35,45,55,70,90mm)、水平断面として9断面 (底面から5,10,20,30,35,45,50,55,60mm) を設定した。この可視化画像は高速ビデオカメラを用いて1/120sで撮影した。画像は高速ビデオカメラのメモリーに録画された後、ハードディスクに640 \times 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、相互相関法により画像解析した。第1水制上流4cmから第2水制後端までの20cm程度の範囲を解

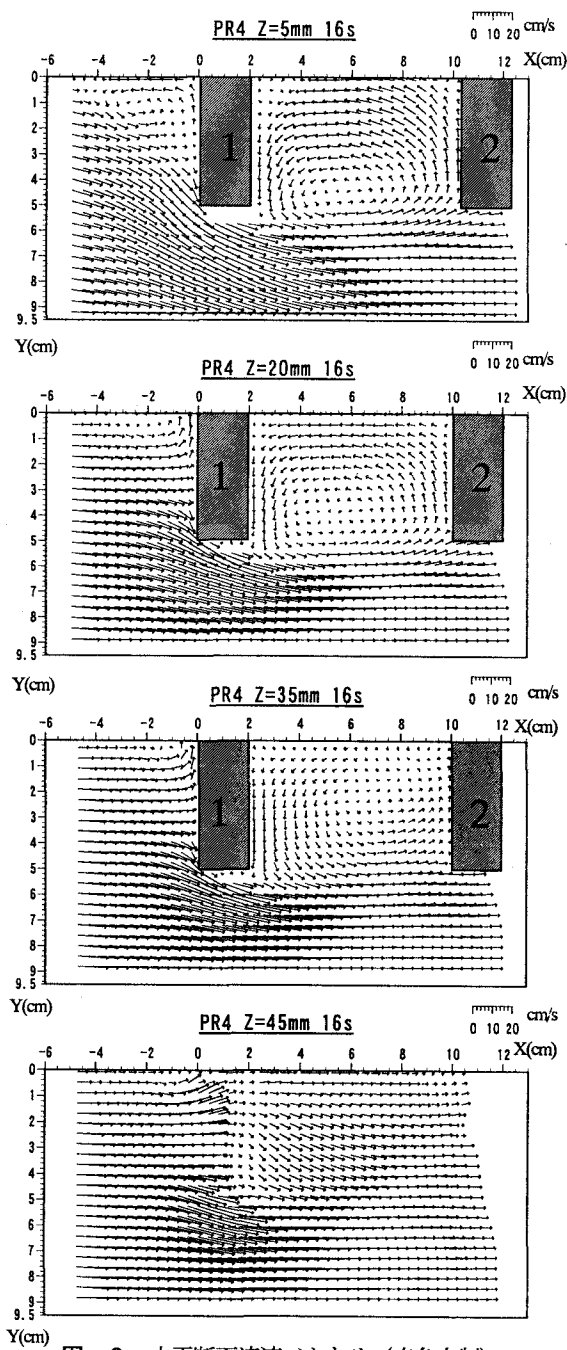


図-2 水平断面流速ベクトル (直角水制)

析対象として計測した。相関法では検査エリアを32 \times 32画素、オーバーラップは50%とした。大規模な渦の変形や移動が認められるものの、平均的な構造に大きな変化は無く、平均流と統計的乱れ特性の把握によって流れ構造を解析できると判断された。したがって高速ビデオカメラで連続撮影可能な計1963枚、約16秒間の流速ベクトルデータを統計処理して時間平均値を得た。

3. 実験結果および考察

(1) 流速ベクトル

直角水制の鉛直断面平均ベクトルを図-1に示す。第1水制に着目すると、第1水制を越流する鉛直

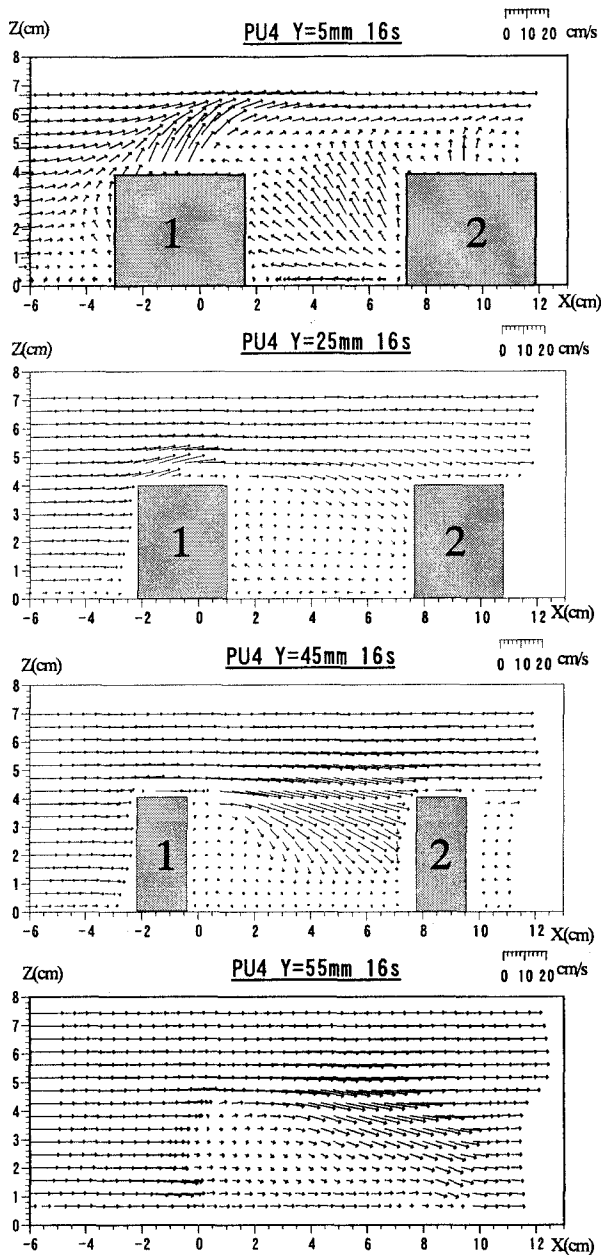


図-3 縦断面流速ベクトル (上向き水制)

方向の水の流れが水制側側壁付近に近い $Y=5\text{mm}$ で大きくなっている。これは水制と側壁により、行き場を失った水が水制上部を越える流れとなったためである。第1水制根本付近 $Y=5\text{mm}$ では第1水制に衝突し、逆流域が形成されている。水制域内に関しては、 $Y=5\text{mm}$ では第1水制を越流する流れが強いため、水制域内に入り込もうとする流速は小さく、第1水制後方に向かって上昇する流れが見られる。 $Y=25\text{mm}$ では越流する流れが弱くなり、水制域内に入り込む流れと水制域外へ出る流れが同程度の割合になって、 y 方向を軸とする横断渦の形状が明確に認められる。 $Y=45\text{mm}$ では主流域側に近いいため越流する流れが小さくなり、第2水制前面で水制域内に入り込もうとする流れが卓越している。また水制域内での流動は小さい。 $Y=55\text{mm}$ では第1水制先端の $X=0\text{cm}$ 付近では流れの剥離が認められ、また $X=5\sim 10\text{cm}$ では、斜め下

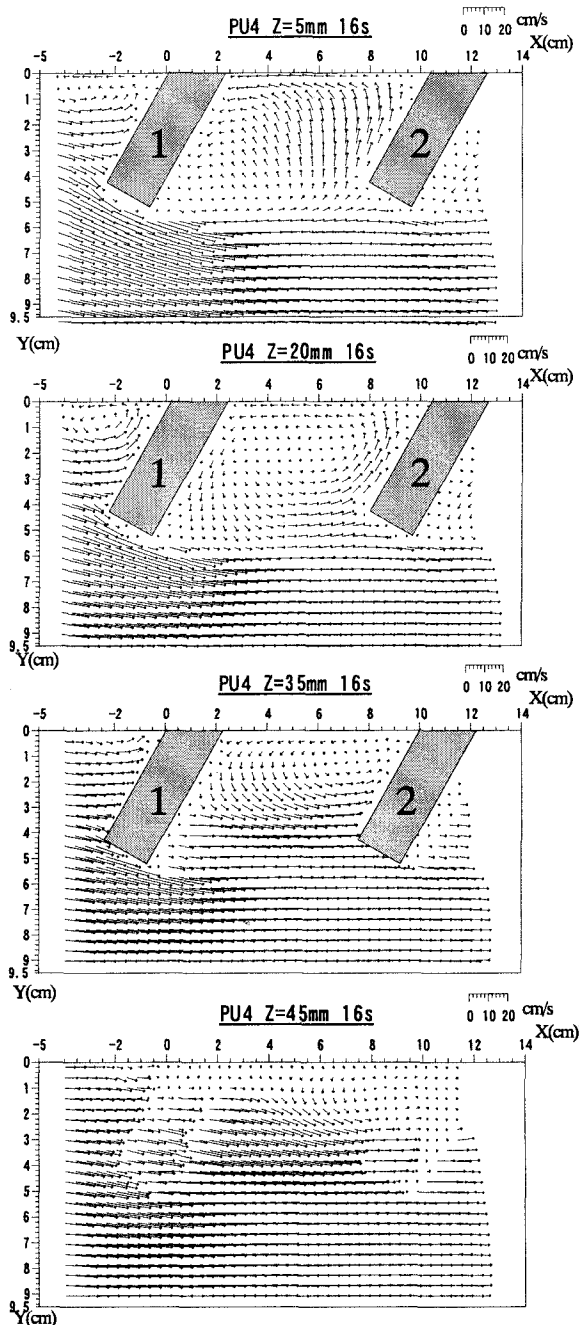


図-4 水平断面流速ベクトル (上向き水制)

向きの流速ベクトルが見られる。

次に水平断面平均ベクトルを図-2に示す。第1水制の根本付近の底面側には渦が形成されている。水制域内に着目してみると、 $Z=5\sim 35\text{mm}$ のすべての水平断面において鉛直方向に軸を持つ平面渦の形状が見られ、第2水制から第1水制に向かう逆流ベクトルは底面側では広い幅を持って現れるが、底面から離れるにつれ小さくなる。 $Z=35\text{mm}$ ではこの側壁側の逆流がほとんど見られなくなり、第1水制後方で主流域側へと向かう流れが顕著となっている。 $Z=45\text{mm}$ では、水制の水はねが確認でき、水制域内で主流域側へ傾いた流速ベクトルを示している。

上向き水制の鉛直縦断面平均ベクトルを図-3に示す。第1水制に着目すると $Y=5\text{mm}$ では第1水制を

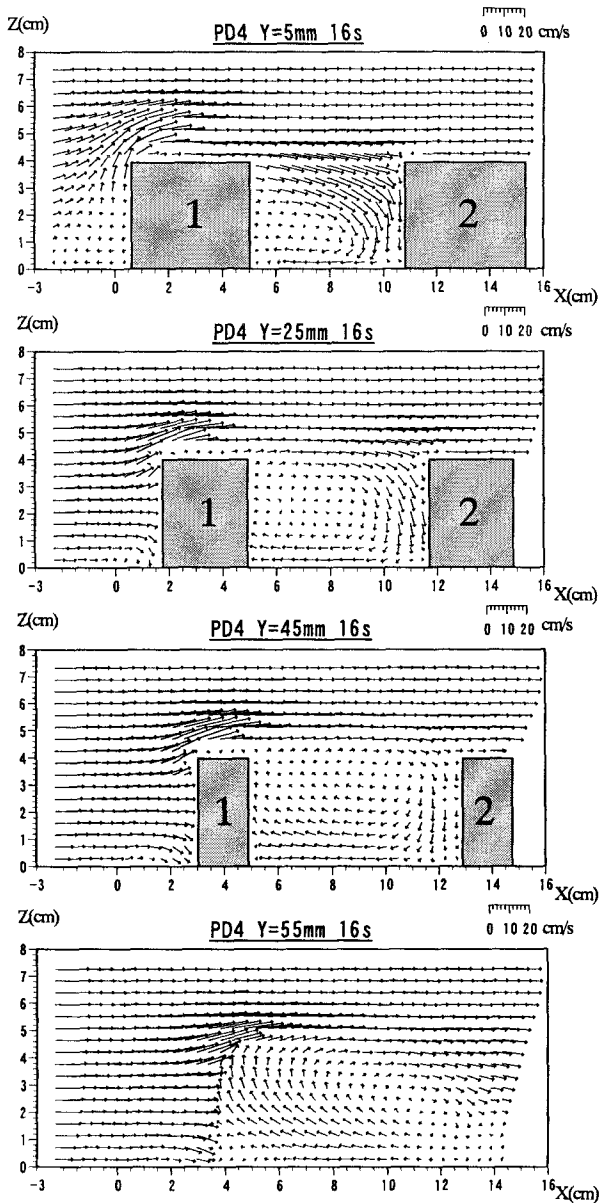


図-5 鉛直縦断面流速ベクトル(下向き水制)

越流する流れが極端に大きく水面付近まで影響を及ぼしているが、側壁から離れるにつれ越流する流れは小さくなる。特に $Y=45\text{mm}$ ではほとんど見られない。水制域内に関しては、 $Y=5\text{mm}$ では第2水制前方付近を最大にして水制域内から流出する流速ベクトルが強く出ている。側壁から離れるにつれ、 $Y=5\text{mm}$ とは逆に水制域内に入り込む流速ベクトルが強くなっている。 $Y=55\text{mm}$ では第1水制の水はねの影響が直角・下向き水制に比べ小さいため、剥離域は小さい。 $X=4\sim 10\text{cm}$ 付近では斜め下向きに向かうベクトルは直角水制に比べ流速が大きい。

次に水平断面平均ベクトルを図-4に示す。第1水制前面根本付近では直角水制と同様、平面渦の形状が見られる。第1水制の水はねについては、水制先端部の角が水流を分断する形になり、先端面に沿う流れが発生し、結果的に水はね角度は小さくなり、また剥離

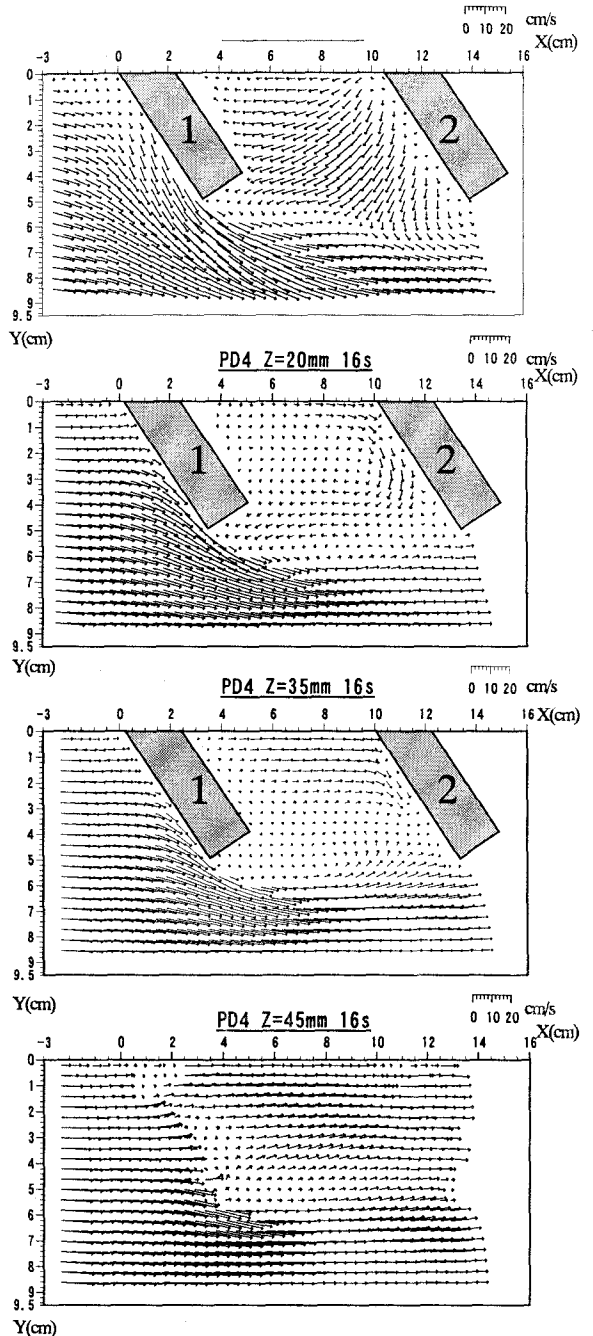


図-6 水平縦断面流速ベクトル(下向き水制)

域もかなり小さくなる。水制域内に関しては、底面側 $Z=5\text{mm}$ では主流域側から水制域内に入り込む流れが顕著である。 $Z=20\text{mm}$ では、平面渦が形成されている。 $Z=35\text{mm}$ でも平面渦がみられるが、 $Z=20\text{mm}$ の平面渦の形状とは異なり側壁付近に認められるのみで、水制先端付近では流下方向の流れが支配的となっている。 $Z=45\text{mm}$ では、第1水制を越流する流速ベクトルは水制上で主流域側へ曲げられており、水制間で側壁側から主流域側へと向かう流れが認められる。側壁付近では水平断面での流動は小さく、これは第1水制の越流における影響で水制域内からの流出が卓越していることを示している。

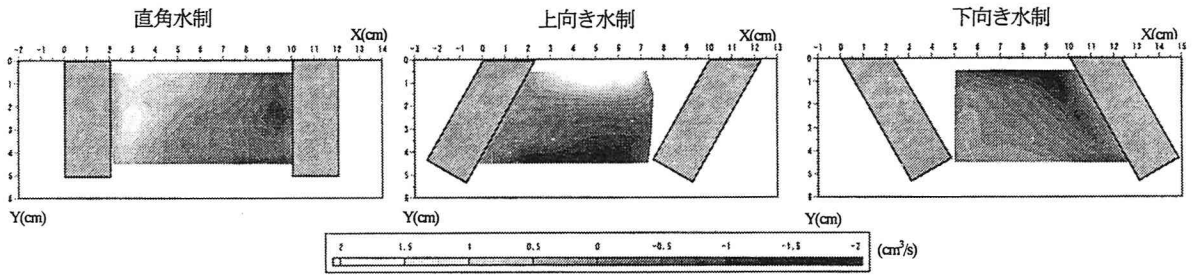


図-7 水制上部水平境界における流出・流入量コンター

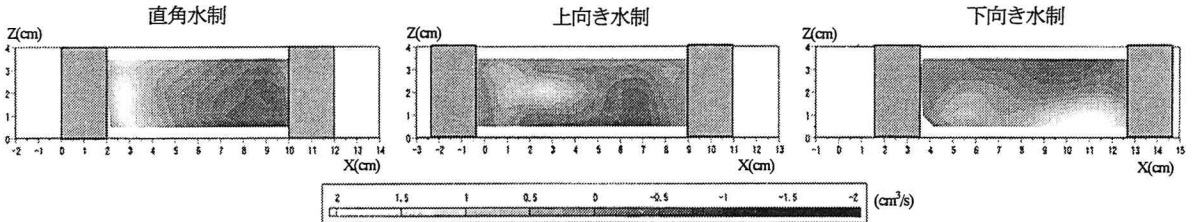


図-8 水制側面鉛直境界における流出・流入量コンター

下向き水制の鉛直縦断面平均ベクトルを図-5に示す。第1水制に着目すると、直角水制、上向き水制に比べ第1水制を越流する流れは最小である。水制域内に関しては、側壁側に近いほど水制域内に流入する流れが大きく、また直角水制ほど明確でないが横断渦が形成されている。水制先端に近づくほど逆流域が大きくなっている。水制域外である $Y=55\text{mm}$ でも横断渦の形状が見られることにより、第1水制の影響による剥離が大きいことがわかる。特に $X=4\sim 6\text{cm}$ では鉛直上向きのベクトルが強く出ている。

次に水平断面平均ベクトルを図-6に示す。前述したように、下向き水制は第1水制の影響による水はねの規模は他の2つよりも大きい。そのため、水制先端の剥離域の規模も大きくなる。第1水制前面根本付近では平面渦の形成にまでは至っていない。水制域内に関しては、底面側に近い $Z=5\text{mm}$ では水制域内から斜め上流側に向かって流出する流速ベクトルが強く出ている。 $z=25\text{mm}$ では第2水制前面に沿って流出し水制頭部付近で逆流となっている。それに対して $Z=35\text{mm}$ では、側壁付近での順流が大きくなり、頭部付近で水制域内に流入するベクトルがわずかにみられる。水制域外となる $Z=45\text{mm}$ では、第1水制を越流した流れが直角水制や上向き水制とは異なり、側壁側に向かう流れとなっている。

(2) 水制域境界を通じた流出・流入量

水制域内への流入を負、流出を正とし、また水制域上面及び側面の境界面上（水平断面境界及び鉛直縦断面境界と呼ぶ）における水の流出、流入を考察する。図-7に水制上面水平断面境界における流出・流入量コンターを、図-8に水制側面鉛直縦断面境界における流出・流入量コンターを示す。

直角水制の水平断面の境界面では第1水制後方から水は流出しており、特に側壁近くでの流出が多くな

っている。また水の流入は、第2水制前方から流入し、特に第2水制の中央で多くなっている。次に鉛直縦断面の境界に関しては、第1水制後方付近から流出し、第2水制前面付近から流入している。両境界面とも水制間中央約 $X=6\text{cm}$ を境に流出と流入が入れ替わり、横断渦構造と平面渦構造による質量変換が同程度に存在していることを示しているが、後者の寄与の方が若干大きい。

上向き水制水平断面の境界面では、第2水制前方側壁付近から水は流出し、第1水制後方の主流域近くから流入が大きくなっている。第2水制水制長の約 $1/2$ ($Y=2.5\text{cm}$) の所で流出と流入が入れ替わっている。次に鉛直縦断面の境界面では、第1水制後方より水は流出し、第2水制前方底面側から流入している。しかし、水平断面の境界面のほうが流出量と流入量の割合は大きく、傾いた横断渦構造の寄与が大きいことがわかる。

下向き水制水平断面の境界面では、第1水制後方の主流域に近い所で僅かに水の流出が認められるが、全体的には流入のほうがはるかに大きく、側壁に近いほど大きくなっている。逆に鉛直縦断面の境界面では、第2水制前方の水面側に僅かに流入があるが、第2水制前方の底面側を中心に流出の割合が多くなっている。したがって下向き水制の場合水制域上面から流入し、水制域側面から流出していくという構造が明確である。

4. 水制設置角度の水制間の流動機構への影響

ベクトル図や水制境界面における水の流出流入図より明らかであるように、水制設置角度が流れ構造に与える影響は非常に違うといえる。直角水制、上向き水制、下向き水制の流れ構造図を図-9(a)-(c)に示す。(a)の直角水制では、鉛直軸を持つ平面渦と越流型

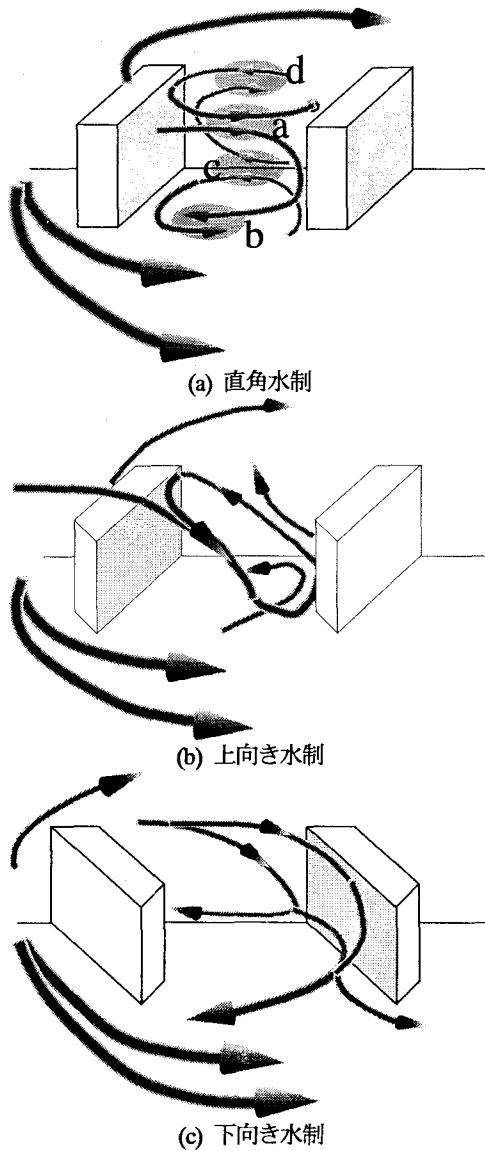


図-9 水制周辺の流れ構造図

水制の特徴である横断方向軸を持つ横断渦が相互に作用する。この2つの渦を合成することを考えると、水制域の主流域側上部角を結ぶ線上（記号 a）と水制根本側底面隅角線上（記号 c）においては両方の渦の流速が強め合い、主流域側底面との交線を結ぶ線上（記号 b）と根本側上部の側壁との交線を結ぶ線上（記号 d）では、両者の流速が打ち消しあうことがわかる。結果的に a, c の流れが支配的になり、第1水制上端と第2水制底部を結ぶ対角面に直角な軸を有する渦構造が形成される。上向き水制でも基本的に平面渦と横断渦の相互作用という形態であるが、第1水制を乗り越える流れが第1水制によって水制軸に垂直方向に曲げられるため、横断渦の軸が水制軸に平行な方向に傾く点異なる。その結果、第2水制先端で下降する流れと第1水制後方で上昇する流れが発生するとともに第2水制底面側で根本側へ向かう流れ、第1水制上部で主流域側に向かう流れも誘起される。これで平面渦が合成されるのであるが、この上向き水制

の場合横断渦の方が強く支配的となる。流速ベクトル図ではこのような特性が明確に認められる。底面では傾いた横断渦と平面渦の成分が強めあう第2水制根本側へ向かう流れが強く現れる。側壁付近では水制上部高さ付近の順方向流れがなくなり、第1水制頂部へ向かう上向きの流れが強く発生している。水制先端部では下降しながら水制域内に入り込む流れが顕著となり、水制上面付近では水制域内部まで主流方向の流れが卓越するようになる。

下向き水制では、横断渦の軸が水制軸に平行な方向に傾くため、第2水制根本で下降する流れと底面上で流向き主流域側に向かう流れが強く現れる。下向き水制では第1水制の水はね角度が大きく、剥離域も大きく主流域へ張り出し水制域内の平面渦の形成が十分でなく、 $Z=20\text{mm}$ や $Z=35\text{mm}$ の高さにおいても平面渦構造は崩れている。軸の傾いた横断渦の第1水制背後の上昇流は $Y=55\text{mm}$ の水制先端を越えた剥離域にも大きく現れている。

5. 結語

水制の設置角度は、横断渦の軸角度を変化させこれと平面渦との相互作用が変化することにより流れ構造が大きく変化する。上向き水制と下向き水制は、直角水制とは異なり境界面によって流出する面と流入する面が明らかに異なってくることより、水制設置角度が流れ構造に大きく影響をおよぼすと考えられ、土砂輸送、水質交換機構に大きな違いが現れることが推測される。ただしこれは本実験の水制間隔における結果であり、水制間隔が変化すればそれぞれ渦の相互作用の仕方が異なる構造となることが予想される。今後はさらに多くの境界条件のもとで設置角度の影響を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 河川環境管理財団大阪研究所編:わんどの機能と保全・創造～豊かな河川を目指して～, 1999.
- 2) 福岡捷二・岡信昌利・川口広司・西村達也:越流型水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, 42, pp.997-1002, 1998.
- 3) 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, 42, pp.1003-1008, 1998.
- 4) 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, pp.787-792, 1996.
- 5) 長坂剛・今野威一郎・加藤敦・富永晃宏:越流型水制周辺の流れに及ぼす越流水深の影響, 第34回年講, 2, pp.202-203, 1999.
- 6) 藤田享良・長坂剛・富永晃宏・中野義郎:平成10年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.193-194, 1999.

(2000.10.2 受付)