

越流型水制域内の流れ構造に及ぼす 相対水制高の影響

EFFECTS OF RELATIVE DIKE HEIGHT ON FLOW STRUCTURES
IN SUBMERGED SPUR-DIKE ZONES

冨永 晃宏¹・中野 義郎²・井嶋 康二³・長坂 剛⁴

Akihiro TOMINAGA, Yoshiro NAKANO, Koji IJIMA and Go NAGASAKA

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 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

⁴正会員 工修 愛知県 (〒460-8501 名古屋市中区三の丸3-1-2)

To predict and control sediment transport and water quality exchange by using submerged spur-dike, it is necessary to clarify three-dimensional flow structures and instantaneous vortex structures around spur-dike zones. In this study, relative height of super dike to water depth is chosen as a design parameter and its effects on flow structures in spur-dike zones are investigated by using PIV method. Two-dimensional PIV analyses of vertical and horizontal planes reveal the time-averaged flow structures in spur-dike zones with reasonable accuracy. 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 vertical profiles of the longitudinal velocity indicate similarity with respect to the top level of the spur dike. The inverse flow strength becomes larger at an inner part of the spur-dike zone with an increase of the relative height.

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

1. 序論

水制は河岸近傍の流れの減速および水はね効果を与える治水構造物としての機能と、多様な流れ場を創造して豊かな自然環境を提供するという環境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。前者の機能を評価するには河岸の減速効果や水はねを含む平面流速構造の変化とそれによって引き起こされる河床変動を予測することが必要とされる。この場合一般には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、後者の場合は水制背後に土砂堆積を促したり、また深掘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⁾。いずれにしても水制周辺の流れ構造を把握することが必要であり、実験、現地観測および数値シミュレーション等の各種手法を用いて検討していかなければならない重要な課題である。急流河川や一部の特別な場合を除いて、洪水時には水中に没する越流型水制群が多く用いられている。越流型水制群の流れ全体に及ぼす粗度効果や水はね効果および河床変動についてはいくつかの研究が見

られる^{2), 3)}。一対の水制で挟ま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。数値計算についても複雑な三次元構造の予測はまだ困難である。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次元的流れ構造を示すと考えられる^{4), 5)}。水制域内の土砂輸送や水質交換機構を考える上では、三次元的な流れの平均構造の解明とともに、乱れ構造や周期的に変動する組織渦構造を把握することが重要となる場合も考えられる。

水制には多くの設計項目があるが、それらの基本的特性を順次抽出して系統的に明らかにしていくというアプローチの仕方を採用し、ここでは越流型水制の高さに着目し、水制高さとお水深との比である相対水制高をパラメータとして取り上げたものである。本研究では、第1水制とそれに続く第2水制との間の水制域のみを対象とし、水制を2基のみ設置して相対水制高の流れ構造への影響を可視化PIV法を用いた実験によって検討した。PIV計測では二次元の鉛直および水平の

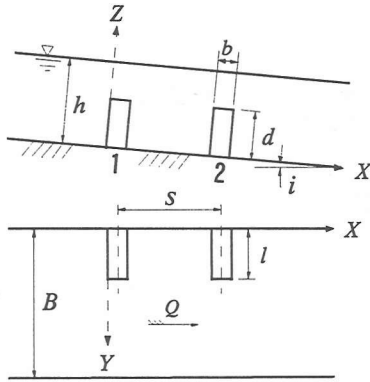


図-1 水制モデル配置図

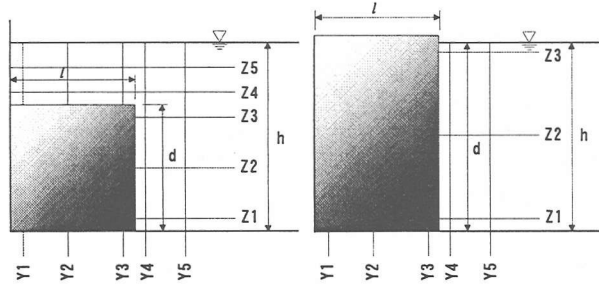


図-2 レーザーシート照射位置

スライス断面の流れ場を計測することになるが、時間平均の三次元構造は十分捉えることが可能である⁶⁾。また、瞬間の組織的渦構造についても、スライス断面の瞬間像の組み合わせと周期パターンの解釈によってある程度推定することが可能である⁷⁾。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、時間平均流速構造と乱れ統計量についての検討のみを行った。

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、上流端から $4.5\sim 4.8\text{m}$ の範囲を水制区間とし、左岸側壁に沿って図-1 に示すような2個の連続水制モデルを設置した。水制モデルはアクリル製で、長さ l を 5.0cm 、幅 b を 2.0cm に固定し、水制高 d を $2,3,4,5,6,8\text{cm}$ と変化させた6タイプを使用した。なお、水制高 $2,3,4,5,6\text{cm}$ は越流型、水制高 8cm は非越流型水制とする。水制間隔 s を 10cm とし、左岸側壁に対して直角に配置した。水制高に対してそれぞれケース名を $SD2,3,4,5,6,8$ とした計6ケースについて実験および解析を行った。流量 $Q=4.1\text{l/s}$ の定常流量を通水し、水制を設置しない状態で、下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 50micron のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3mm のシート状にした

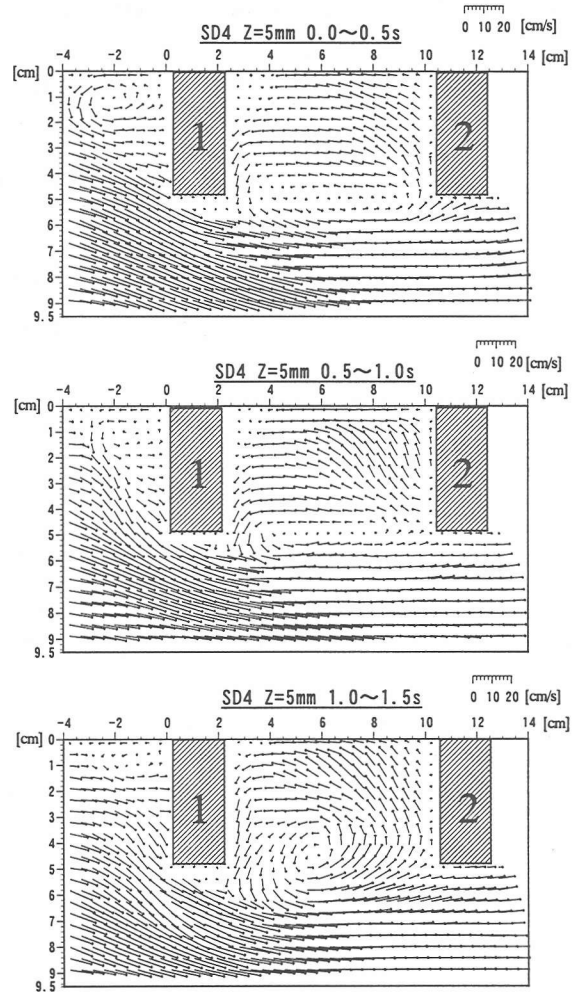


図-3 短時間平均流速ベクトルの一例

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、鉛直断面では、水制側側壁から $5,25,45,55,70\text{mm}$ の5断面、水平断面では、水路床から 5mm 、水制高中央、水制上面から 5mm 下、 5mm 上、 15mm 上の5断面を設定した。なお、非越流型水制の場合、水路床から 5mm 、水制高中央、水制上面から 5mm 下の3断面のみとする。以後、図-2 に示すように鉛直縦断面照射の計測断面を水制側側壁から順に $Y1, Y2, \dots, Y5$ 、水平断面照射の計測断面を水路床から順に $Z1, Z2, \dots, Z5$ と付けることにする。

この可視化画像を高速ビデオカメラを用いて 120F/s 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 640×480 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⁸⁾。第1水制上流 4cm から第2水制後端までの 20cm 程度の範囲を解析対象として計測した。相関法では検査エリアを 32×32 画素、オーバーラップは 50% とした。図-3 に 0.5 秒間 60 枚の平均の平面流速ベクトルの一例を示す。大規模な渦の変形や

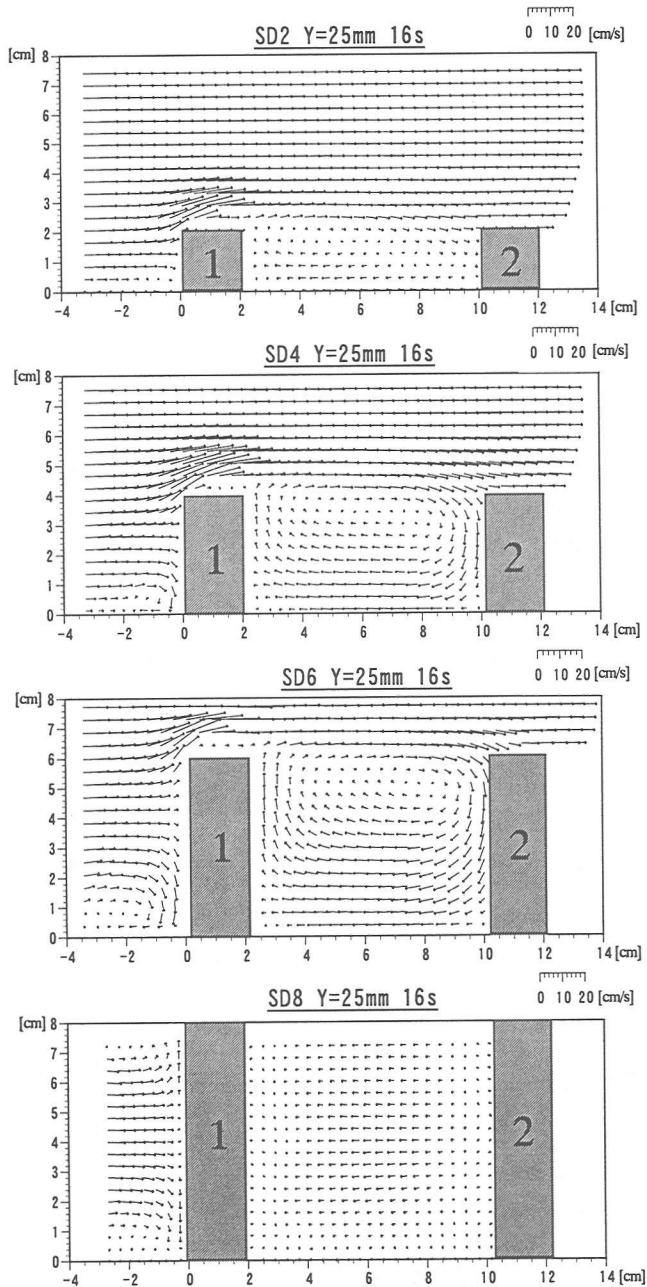


図-4 Y2断面平均流速ベクトル

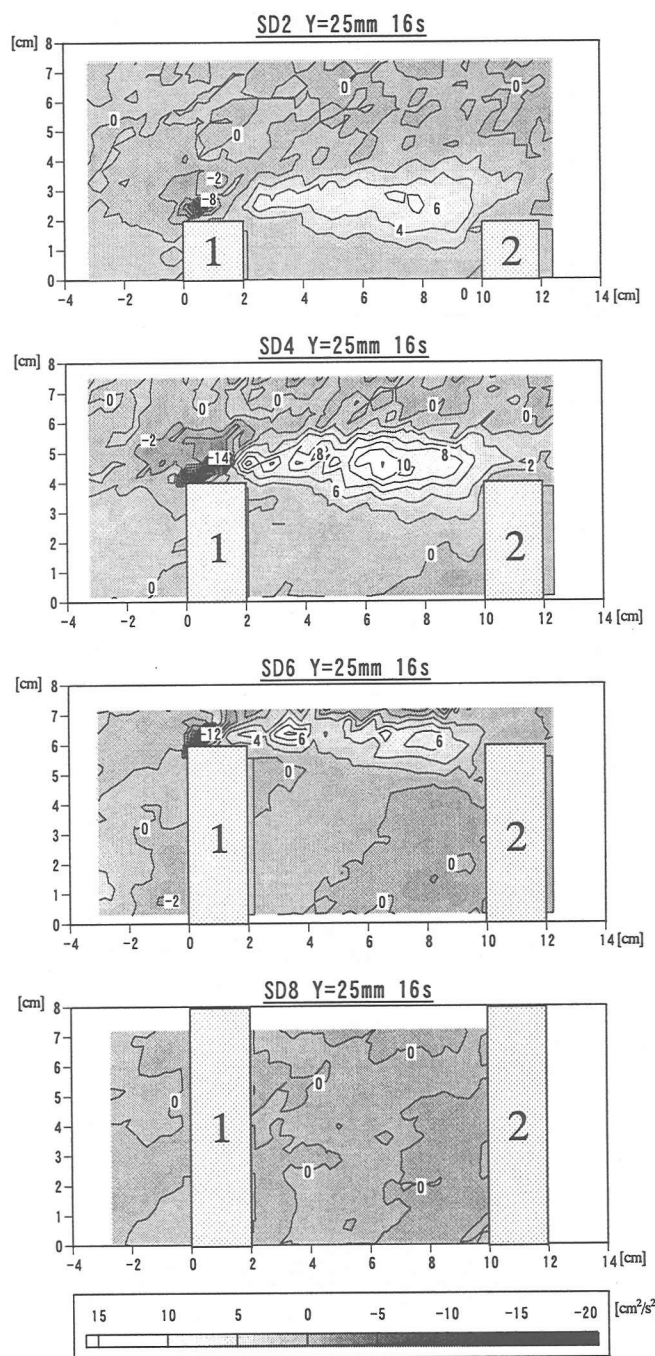


図-5 Y2断面レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ 分布

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. 解析結果および考察

3.1 流速ベクトルとレイノルズ応力

SD2, SD4, SD6, SD8の各ケースの水制長の中央部である鉛直縦断面Y2における全時間平均(16秒間平均の画像データ)の流速ベクトルおよびレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ のコンターを図-4, 図-5に、水制高の中央部である水平断面Z2の流速ベクトルおよびレイノルズ応

力 $-\overline{uw}$ のコンターを図-6, 図-7に示す。

断面Y2では越流型のすべてのケースにおいて、水制域内全体に水制頂部から各水制高の約10~15%下に中心を持つ大規模な横断渦が見られる。水制高が高くなるにつれて底面側の逆流域の幅が大きくなり、またその流速は大きくなっている。渦の流下方向の中心位置は、水制高が高くなるにつれて下流側へ移動している。第1水制前面に着目すると、水制に衝突した流れが、水制高中央付近で水制を越流する流れと、下降して渦を形成する流れに分かれており、この水制根元付近の横断渦は、水制前面の洗掘に関係するものと考えられる。この横断渦

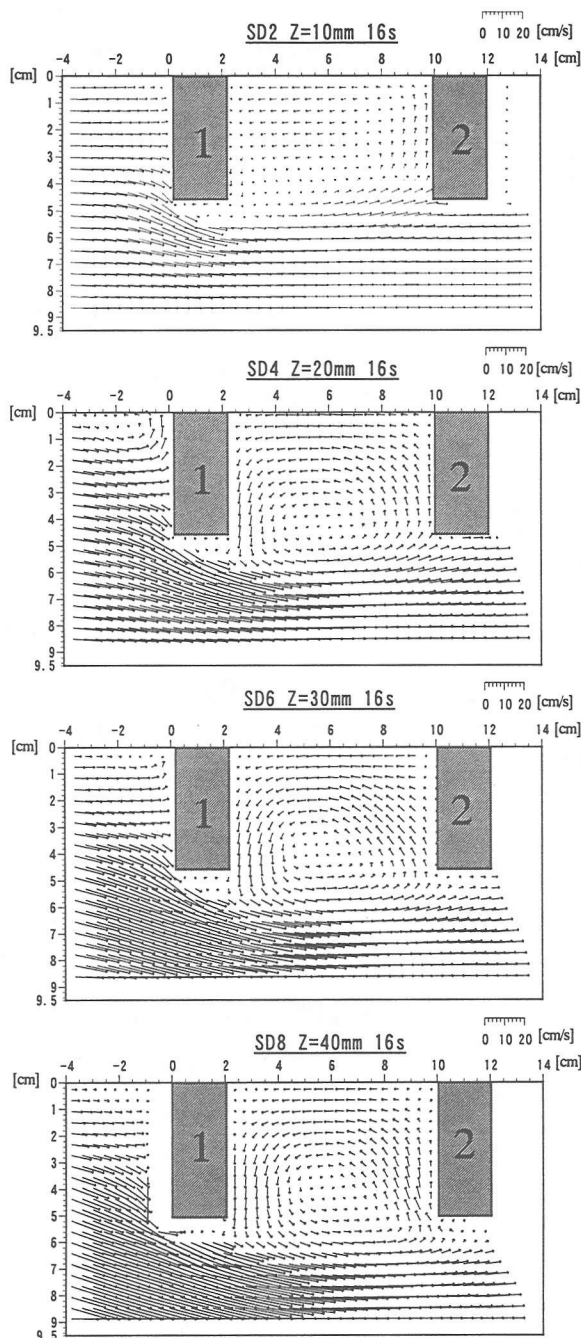


図-6 Z 2断面平均流速ベクトル

は、水制高が高くなるにつれてその規模が大きくなっている。非越流型のSD8では、水制域内に横断渦は見られず、水制間中央付近で逆流が見られ、第1水制背面、第2水制前面付近では弱い流れとなっている。これは、Z断面より、第2水制前面からの流入、第1水制背面からの流出を表しており、全体的に鉛直渦が支配的であることを示している。

レイノルズ応力分布を見ると、越流型水制では、水制頂部を結ぶ線に沿って、負のピーク値が現れている。これは、流下方向の変動流速 u と鉛直方向流速 w が正の相関を有することを意味し、水制を乗り越える流れが平均の流向より上側に振れるときに加速され、下側に振れ

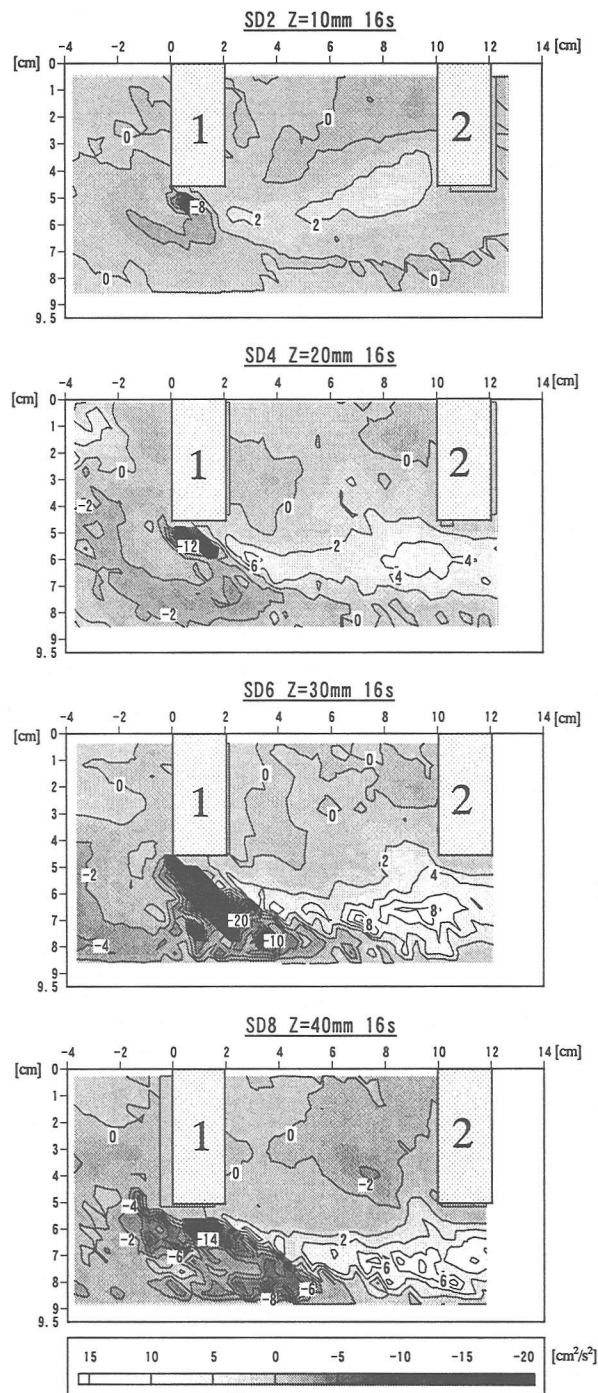


図-7 Z 2断面レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 分布

るときに減速されることを示しているものと考えられる。一方、水制間では、水制頭部高さより5mm程度上で正の大きな値を示す領域がある。これはこの領域の流速勾配に支配された乱れ構造といえる。SD4において最も大きな値を示す。

断面Z2では、すべてのケースにおいて水制域全体に大規模な鉛直渦が形成されているのが認められる。ただし、SD2においては、鉛直渦の中心から、第2水制前面付近にかけて極めて弱い流速を示し、閉じた渦構造を示していない。SD4では第2水制前面に第1水制根元方向

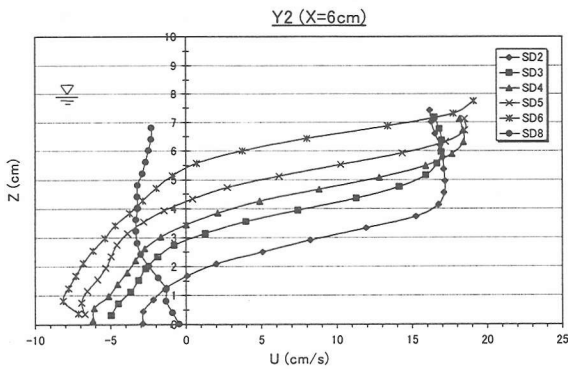


図-8 Y 2断面主流速U分布 (水制間中央)

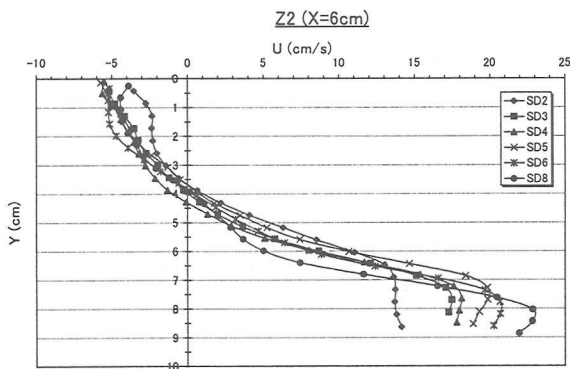


図-9 Z 2断面主流U速分布 (水制間中央)

へ向かう強い流れが現れて、その流れは水制高が高くなるにつれて、流速と角度を増し、SD6で最大となっている渦の中心はいずれも水制頭部を結んだ線より少し内側の水制間中央より少し上流側にあり、水制高による変化はほとんどない。また第1水制頭部では、先端エッジで流れがはく離している様子が捉えられている。

レイノルズ応力分布を見ると、越流型水制では第1水制頭部から、湧き出しているような負の大きな値の領域が存在し、水制高が増すにつれてその範囲が広がっている。これは前述の鉛直縦断面の場合と同じ機構によるものと考えられる。水制間では第1水制後方の角から下流に細長く正の領域が存在し、この領域は水制高が大きくなるにつれて主流域側へシフトし値も増大している。非越流型のSD8では、SD6に比べ小さくなっている。

3. 2 流速分布特性

各ケースについて、水制間中央部 ($x=6\text{cm}$) において主流速 U の断面 $Y2$ における鉛直分布および断面 $Z2$ における横断分布を図-8、図-9 に示す。これらの断面は、鉛直縦断面、水平断面とも水制間中央の分布形を示したものであり、水制間の渦構造を中心付近でスライスした代表分布と考え検討する。

越流型水制において、水制域内での鉛直分布形状は、水制高によらずほぼ相似形を示し、ゼロクロス位置が水

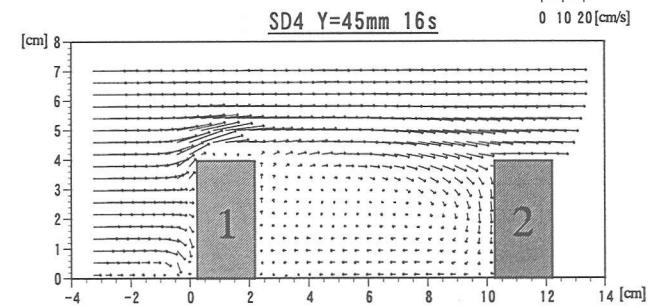
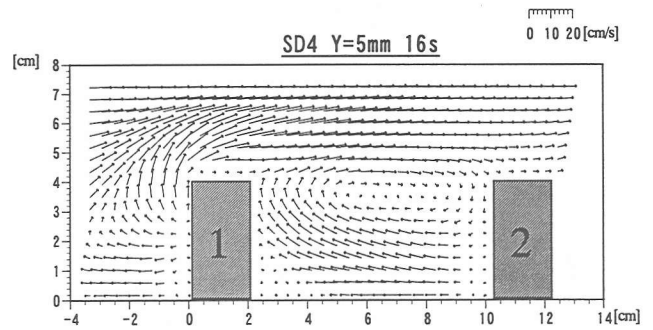


図-10 縦断面全時間平均流速ベクトル

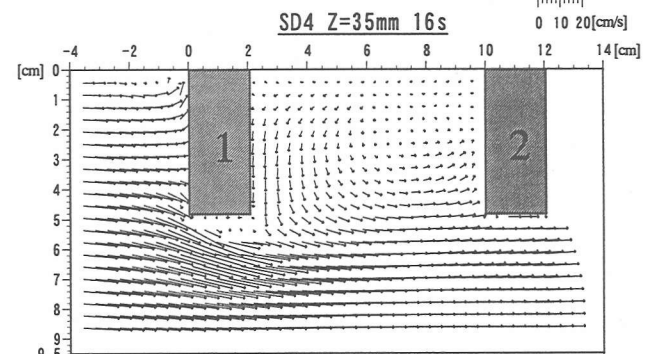
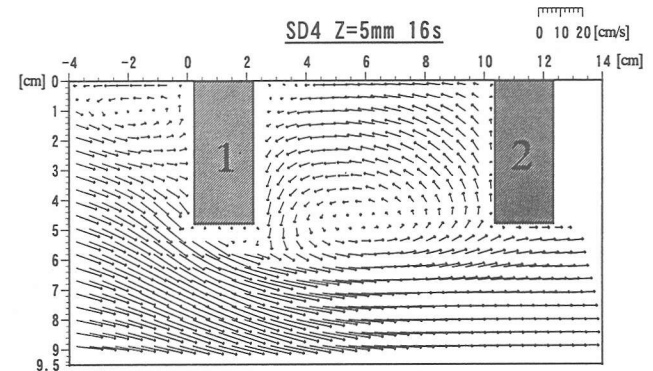


図-11 水平断面全時間平均流速ベクトル

制高とともに上昇し、分布形が上方にシフトしていき、これに伴って逆領域の流速が増大していることがわかる。これより水制域内の逆流の流速変化は、水制高の変化に比例していることが確認できるが、水制域上部の流速にはあまり大きな変化は見られない。また、非越流型水制は越流型水制に比べ、水制域内の流速がきわめて小さいこともこの図より明らかである。

水平断面では、水制域内において縦断面のようなはっきりとした変化は認められず、各ケースとも同じような流速分布を示す。主流速域では $Y>7.0\text{cm}$ において水

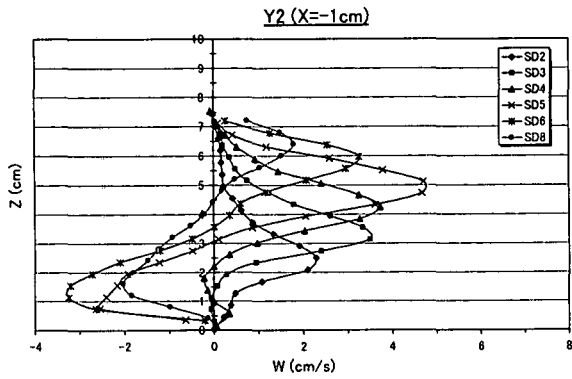


図-12 Y2断面鉛直方向流速 W 分布
(第1水制前面)

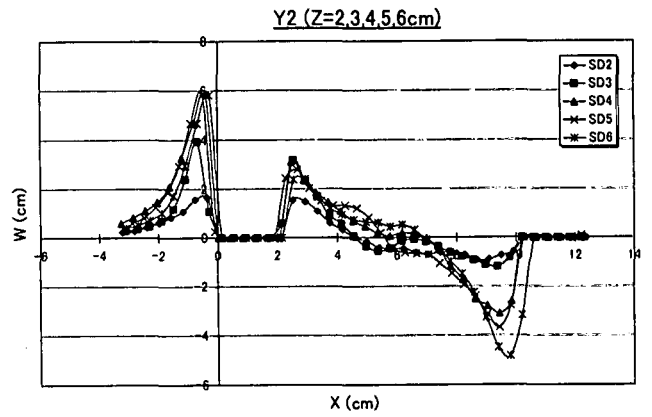


図-14 水制上部境界面鉛直方向流速 W 分布

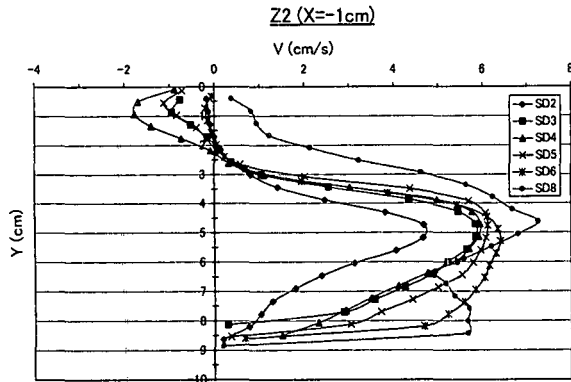


図-13 Z2断面横断方向流速 V 分布
(第1水制前面)

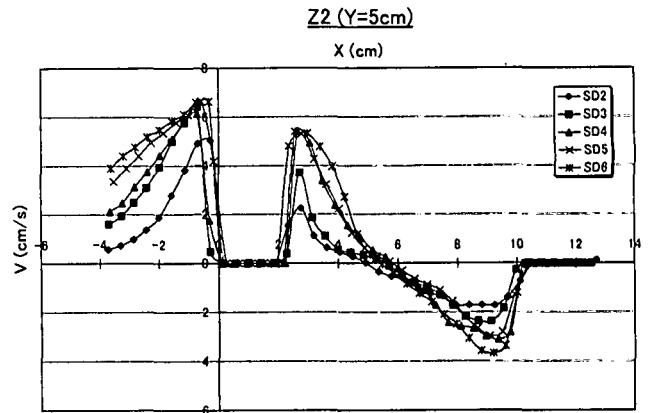


図-15 主流域境界面横断方向流速 V 分布

制高に比例して流速が大きくなっていることがわかる。これは水制高の増大により、遮蔽面積が増大したことによると考えられる。

次に、水制域全体の渦構造について検討するために、代表的ケースであるSD4について、鉛直縦断面の側壁近傍の断面Y1と水制先端付近の断面Y3における流速ベクトルを図-10に示す。側壁側では同様な底面側の逆流が存在するものの、第2水制前面の下降流がなくなり、第2水制前面に沿って側壁側へ向かう横断方向流れがあることを示している。また、第1水制後方の上昇流が卓越するようになる。水制先端付近では、逆流がなくなり横断渦構造は認められず、第2水制前面の下降流のみが卓越する。一方、図-9に示した横断分布形状は水制間に鉛直渦が存在し、その形状が水制高によってあまり変化していないことを示している。図-11に水平断面の底面近傍の断面Z1と水制頭部付近の断面Z3における流速ベクトルを示す。底面近傍では図-6に示す中央高さとはほぼ同構造を示しているが、流速は大きくなり、鉛直渦としては強くなっていることがわかる。水制頭部付近の断面では鉛直渦構造が崩れ、水制域内側の流速はほとんどなく、第1水制後方から主流域への流出のみが卓越している。側壁側では底面から湧き上がりがあることを示している。

次に、越流型の各ケースについて第1水制前 ($x = -$

1cm)の断面Y2における鉛直方向流速Wの鉛直分布および断面Z2における横断方向流速Vの横断分布を図-12、図-13に示す。

鉛直方向流速では、各断面とも各水制高の頂部付近で最大流速が現れている。この上向き流速は水制高の増大とともに大きくなり、SD5でピークを取ってSD6では減少している。SD5、SD6、SD8では底面近くで著しく逆流速が発達している。これは第1水制前面根元付近の横断渦と対応していることより、SD5、SD6、SD8では大きな洗掘が起こることが予想される。

横断方向流速では、各断面ともY=5cm付近で最大流速が現れており、これより主流域側では水制高に比例して流速は大きくなっている。これは、水はねの規模と対応していると考えられる。またSD3、SD4、SD5においては水制側側壁付近で逆流速があらわれ、特にSD4で大きな値となっている。これは、図-6の流速ベクトルを見てもわかるように、SD4では、第1水制前面側壁側の鉛直渦が他のケースに比べて、鮮明に現れている。

3.3 水制域境界からの流出・流入

16秒の時間平均の鉛直方向流速、横断方向流速をもとに、水制域上面及び側面の境界面上(水制域境界と呼ぶ)における水の流出、流入を考察する。

水制域と水制上部の境界面における、Y2断面の鉛直

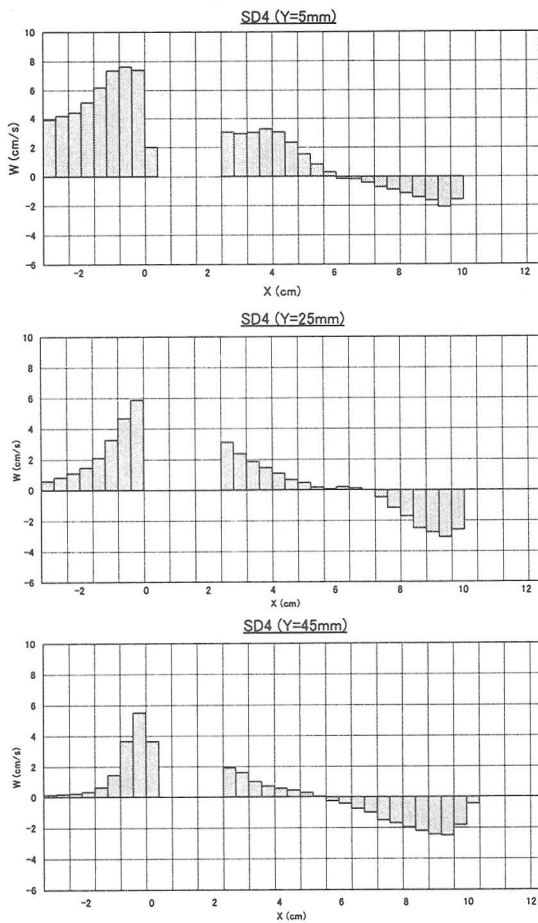


図-16 鉛直方向流速 W 分布 (SD4)

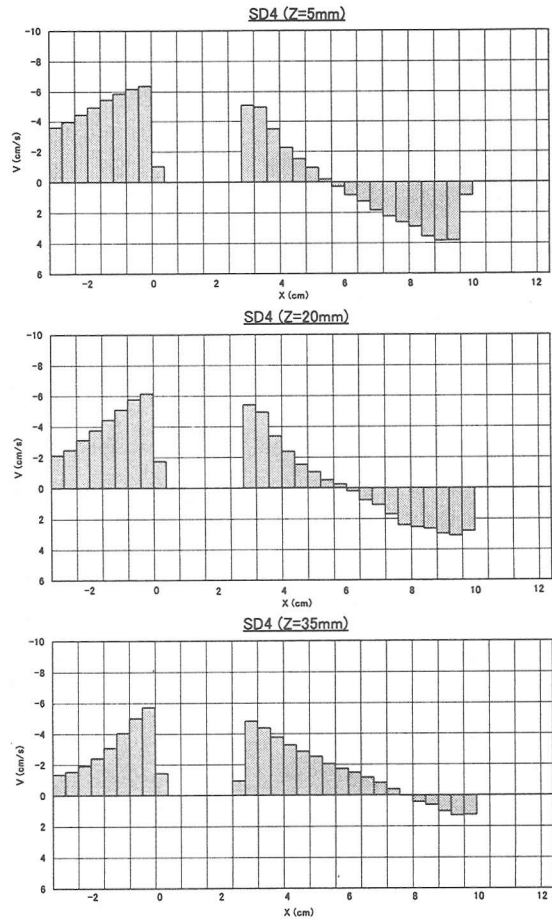


図-17 横断方向流速 V 分布 (SD4)

方向流速分布を図-14 に示し、水制域と主流域の境界面における Z2 断面の横断方向流速分布を図-15 に示す。なお、鉛直方向流速分布および横断方向流速分布は、ともに水制域内および第1水制上流から流出する流れを上向き、水制域内に流入する流れを下向きに表している。

縦断面における境界面上の鉛直方向流速を第1水制上流側に関してみると、SD4 を境に SD2, SD3 では、水制高に比例して流出する流れ、つまり第1水制を越流しようとする流れが大きくなっているが、SD5, SD6 では SD4 と同程度の流速となっている。これは、ある程度水制高が高くなると第1水制に衝突して、二方向に分割された流れの水路底に向かう流れの割合が大きくなり、それによって越流しようとする流量が減少するためであると思われる。水制域内に着目してみると、流出、流入ともに水制高に比例して流速は大きくなる傾向は認められるが、第2水制前面における流入において、SD3 から SD4 にかけて大きく増大していることが注目される。

水平断面における境界面上の横断方向流速を第1水制上流側に関してみると、水制高が高くなるにつれて、第1水制前面のかなり上流の方まで水制の影響をうけ

ていることがわかる。この影響範囲については、撮影範囲をさらに上流側にとって検討する必要がある。しかしながら、水制直前面の水はね流速に関しては SD2 以外の最大値は、ほぼ同一の値を示していることがわかる。図-6 の流速ベクトルからも水はねを示す領域の規模は水制高が高くなるにつれて増大することが確認されたが、水はね最大流速は水制高および計測断面にかかわらず一定の値を示すと考えられる。

水制域内に関しては、流出、流入ともに水制高に比例して流速は大きくなっているが、鉛直方向流速とは逆に、第1水制後方の流出において SD3 から SD4 にかけて著しく増大していることがわかる。

以上より、水制域境界を通しての水の流出、流入総量は水制高の増大につれて大きくなるといえる。しかし、水制高が水深の2倍以上になると、急激に水制域上部の下流側からの流入量と水制域側面上流側からの流出量が増え、これは河床変動および水質交換に大きな影響を与えらると思われる。そこで水制高が水深の1/2倍である SD4 についての水制域内での水の交換機構を知るために、断面 Y1, Y2, Y3 の水制域と水制上部の境界面における鉛直方向流速分布を図-16 に示し、断面 Z1, Z2, Z3 の水制域と主流域の境界面にお

ける横断方向流速分布を図-17に示す。図は流出・流入の収支関係を明らかにするために棒グラフとした。

鉛直方向流速分布より、第1水制を乗り越える流れは、水制側側壁に近いほど強いことがわかる。水制域内において、Y1では流出量が流入量を上回り、Y2では流出、流入がほぼ同程度であり、Y3では流入量が上回っている。横断方向流速分布では、水路床に近いほど水はね流量が大きいことがわかる。水制域内では、Z1では流入量が流出量を上回り、Z2では流出、流入がほぼ同程度であり、Z3では流出量が上回る結果となった。

これらの結果を総合し、流速ベクトル図も合わせて考察すると、図-18のような水の交換機構が支配的であると考えられる。すなわち、越流型水制では、水制の側部境界面によって形成される鉛直渦と、上部境界面によって形成される横断渦が合成され、互いに強めあう部分が卓越した渦構造を形成する。これは結果として、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であると考えられる。水制域外との正味の輸送量については、第2水制前面の底面側における横からの流入と、第1水制後面での水制頭部から主流域向きの流出が卓越し、2次的に第2水制前面での水制上面からの流入と第1水制後面の側壁側の上向き流出とがある。このような構造は相対水制高によって変化するが、総合的に見て、越流型では、横断渦と鉛直渦の相互作用により三次元的な渦構造を形成し、非越流型に比べて底面近傍に大きな逆流が現れることが注目すべき特徴といえる。

4. 結論

越流型水制の相対水制高さが越流型水制2基に挟まれた水制域内の流れ構造に及ぼす影響を、可視化PIV法を用いて実験的に検討した。また、第1水制前面の横断渦や水はね流速についても合わせて検討した。

まず、レーザーシート光と中立浮遊粒子を用いて可視化し、高速ビデオカメラで撮影した画像の相互相関法による流速計測により、水制先端の高速な偏流と逆流を含む水制域内の渦構造を明確に捉えることができた。PIV法による流速計測の精度については、開水路等流において確認している。したがって、水制域内の流れ構造が水制高の変化により変化する様子が定性的のみならず定量的にも明確にされたものといえる。

定性的には図-18に示した越流型水制の渦構造の模式図が得られた主な結果である。この図は、本実験条件の範囲内で考察した結果であり、水制の形状や間隔によっては変化するものと考えられる。鉛直縦断面または水平面でスライスしてみた場合、渦の中心位置

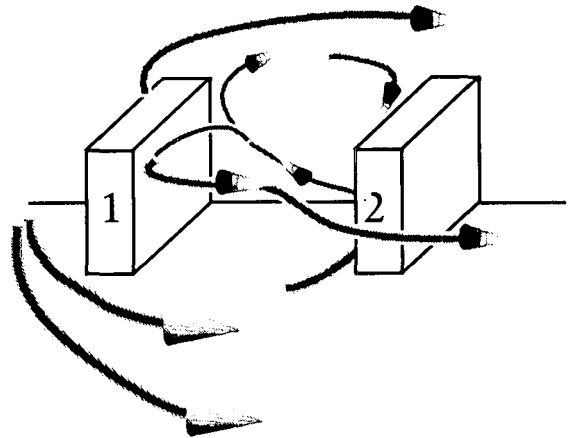


図-18 水制域内の水の交換機構

に大きな変化は無いといえる。相対水制高による違いとして横断渦の中心位置が水制高の増大とともに上昇し、中心より下の逆流域が広がるとともに、逆流の流速自体も線形に増大していることが示された。本研究の実験条件である水制長の2倍という水制間隔においては、越流型水制の場合、非越流よりも強い逆流が発生することとなり、興味深い結果といえる。次に、相対水制高による影響として、水制高が大きくなるにつれて第1水制前面でぶつかって底面に潜り込む流れが強くなること、また、水制頭部からの横断方向流速が増大し、水はね角度、水はね影響範囲も大きくなることわかった。これは、水制高が高くなることにより、流れの遮蔽面積が増大し、水制にぶつかって下向きに流れ方向を変える流量が増大し、その流れが主流側に流出するからであると考えられる。また、水制域境界を通しての水の流出、流入については、各境界面ともに水制高が水深の1/2倍であるSD4を境に大きく変化していることがわかった。

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～豊かな河川環境を目指して～、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、第42巻、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、第42巻、pp.1003-1008、1998。
- 4) 長坂剛・今野威一郎・加藤敦・冨永晃宏：越流型水制群周辺の流れに及ぼす越流水深の影響、土木学会第34回年次学術講演会講演概要集、第2部、pp.202-203、1999。
- 5) 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、第40巻、pp.787-792、1996。
- 6) 藤田享良・長坂剛・冨永晃宏・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。
- 7) 冨永晃宏・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、第44巻、pp.1041-1046、2000。
- 8) 可視化情報学会編：PIVの要点、可視化情報学会、pp.1-25、1998。
(2000年4月21日受付)