

越流型水制域内の流れ構造に及ぼす 水制断面形状の影響

EFFECTS OF CROSS-SECTIONAL SHAPE OF SPUR DIKE
ON FLOW STRUCTURES IN SUBMERGED SPUR-DIKE ZONES

富永 晃宏¹・大島 昌志²・鄭 載勲³・田本 典秀⁴

Akihiro TOMINAGA, Mashashi OHSHIMA, Jaehun JONG and Norihide TAMOTO

¹正会員 工博 名古屋工業大学院教授 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²学生会員 名古屋工業大学研究生 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博士前期課程 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

⁴正会員 工修 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 つくば市旭 1 番地)

The flow structures around submerged spur dikes with triangular cross section were studied by using a PIV method. In this study, an angle of the front and back of spur dikes was chosen as a design parameter and it was varied in four ways. Long-time averaged flow structures and instantaneous coherent structures were investigated. The front angle of spur dike changes the streamwise scale of separation vortices and the reattachment length in a spur-dike zone. Instantaneous velocity vectors were clearly caught and they show significant differences among all cross-sectional conditions. Though the back angle of spur dike has little effects in long-time averaged velocity structures, it changes the stability and location of instantaneous separation vortices behind the first spur dike. As a result, the front and back angles of the submerged spur dikes are important parameter for flow structures and sediment transport around spur dikes.

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

1. 序論

水制は河岸近傍の減速と水はね効果によって河岸を保護する治水機能と、河岸に多様な流れ場を提供する環境機能を有するものとして注目されている。水制は流れに対して局所的に激しい渦運動を引き起こし、移動床では大きな洗掘や堆積を発生させるため、水制の設置にあたっては水制周辺の流れ構造を的確に把握することが必要とされる。水制には多くの設計項目があるが、著者らは水制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を採用し、これまでに越流型水制において水制高さ、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せん断による渦構造が存在し、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示された¹⁾。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²⁾、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³⁾。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良好な一致を示している⁴⁾。3次元の数値モデルを用いた数値実験が多数行われるようになり^{5),6),7)}、今後は有力な手段となると予想されるが、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さらに望まれる。本研究では、水制の設計項目として水制の前面および後面の傾斜角度を取り上げる。富永・田本は三角形断面を有する栈粗度上の流れに関する実験を行い、三角形栈粗度では正方形や円形の栈粗度よりも抵抗が大きくなることを示している⁸⁾。このことから、水制前後面の傾斜角度は重要なパラメータとなることが予想される。またこの傾斜角は水制先端部における渦構造に影響を及ぼすと考えられる。本研究では、実験として可視化 PIV 法を用い、二次元の鉛

直および水平のスライス断面の流れ場を計測し、時間平均の三次元構造について特徴を明らかにするとともに、土砂輸送や水質交換機構を考える上で重要な要素となる瞬間の組織的渦構造についても検討した。

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。水路床は塩化ビニル板、側壁はガラスである。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 、高さ d を 2.0cm に固定し、図-1に示すように断面が直角二等辺三角形の組み合わせで3種類の条件を設定するとともに、幅 5mm の直方体の薄板を比較のため用いた。ケース名は水制の前後面傾斜をケースTB、後面傾斜をケースTD、前面傾斜をケースTUとし、薄板をケースRSとした。水制間隔 s を 10cm とし、左岸側壁に対して直角に配置した。流量 $Q=2.0\text{ l/s}$ の定常流量を通水し、水制を設置しない状態で、下流部での堰上げを調整して第1水制設置位置で水深 $h=4.0\text{cm}$ とした。

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 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。ここに、 x は第1水制上流端を原点とする流下方向座標、 y は水制根元側を原点とする横断方向座標、 z は水路床を原点とする鉛直方向座標である。レーザーシートの照射位置は、鉛直縦断面では、側壁から $5, 15, 25, 35, 45, 55, 70\text{mm}$ の7断面、水平断面では、水路床から $2.5, 5, 10, 15, 18, 22, 25, 27.5\text{mm}$ の8断面を設定した。この可視化画像は高速ビデオカメラを用いて 120F/s で撮影され、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た。PIV 画像計測には VISIFLOW (AEA Technology) を用い、相互相関法により流速ベクトルを計測した。相関法では検査エリアを 32×32 画素、オーバーラップは 75% とした。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得、統計処理した。

3. 実験結果および考察

3.1 時間平均流速ベクトル

まず、4 ケースの代表断面における全時間平均の流速ベクトルを比較検討する。図-2 は水制中央にあたる $y=25\text{mm}$ 鉛直縦断面の全時間平均の流速ベクトルであ

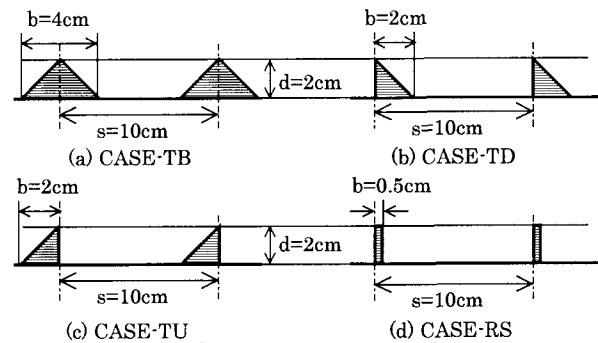


図-1 水制断面形状と配置

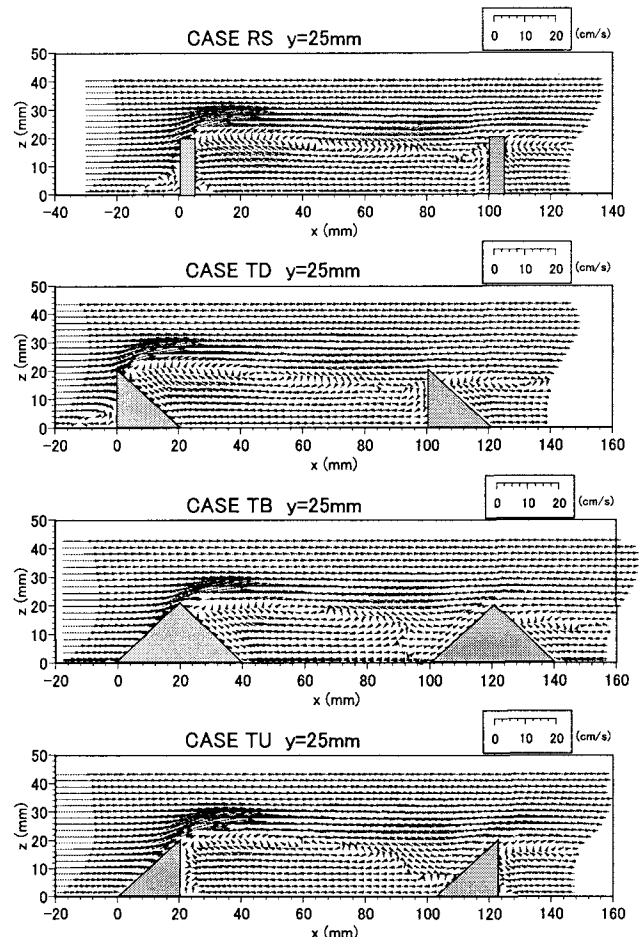


図-2 鉛直縦断面 (水制中央 $y=25\text{mm}$) における時間平均流速ベクトル

る。水制前面が鉛直のケースRSとケースTDを比較すると、両者で流速ベクトルに大きな違いは見られない。水制前面壁が鉛直の場合、水制前面において底面に回りこむような横断渦が見られるのが特徴である。ここに、横断渦とは横断方向 (y 方向) 軸を有する渦と定義する。水制背後では、水制間中央より少し上流側 ($x=40\text{mm}\sim 50\text{mm}$) の水制頂部高さより少し下 ($z=18\text{mm}$) 付近に中心を持つ扁平な横断渦構造が認められ、第2水制前面では下降流が見られる。したがって水制域内の大部分で逆流となっている。この逆流は第1水制背面に近づくにつれて上昇していくが、鉛直の場合底面近くで横断渦が発生する以外は大きな差は

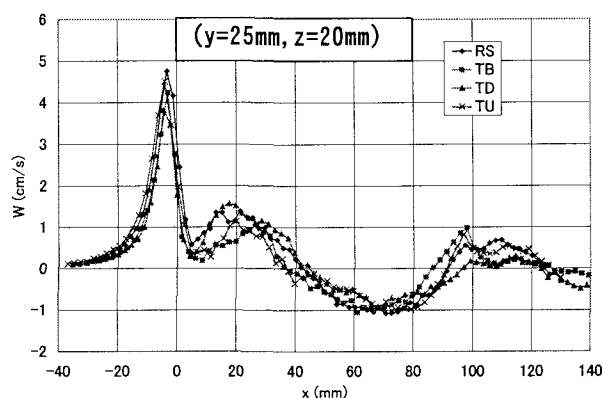


図-3 水制頂部高さにおける鉛直方向流速縦断分布

ない。水制後面の傾斜角はほとんど流れ構造に影響していないといえる。水制前面が傾斜しているケースでは、水制の斜面に沿って上昇流が発生し、鉛直壁で見られた横断渦の発生はみられない。しかし、水制頂部からの水はねの大きさと規模は、鉛直壁の場合とそう変わらない。水制背後では鉛直壁の場合と相対的にはほぼ同様の位置に中心を持つ扁平な横断渦が形成されている。前面傾斜の場合の最も大きな相違点は第2水制前面付近に見られ、第2水制に近づくにつれて下降流が現れ、斜面に沿う上昇流が発生している。この場合も基本的に下流側傾斜の影響はほとんどない。

図-3に水制中央の $y=25\text{mm}$ の水制頂部高さにおける鉛直方向流速 W の縦断方向分布を示す。 x 座標は水制頂部位置が一致するようにずらしている。第1水制によって引き起こされる横断方向流速の強さを意味する水はねの大きさはすべてのケースで同程度であり、前面傾斜の影響はあまりみられない。水制間領域においてもほぼ相似な分布形状を示しているが、第1水制背後において水制前面が鉛直のケースが上昇速度が大きい点が認められる。また、第2水制前面ではケースTBの上昇速度が大きく、ケースTDはほとんど上昇流がみられない。

次に、底面近傍の $z=5\text{mm}$ における全時間平均の水平断面流速ベクトルを図-4に示す。この場合も水制前面が鉛直のケースでは、図-2に示した鉛直縦断面ベクトルと同様に、両者はほぼ同様の流れ構造を示している。第1水制先端下流側に中心を持つ鉛直渦が形成され、水制域下流側で水制域内に入り込み大部分で逆流となっている。ここに鉛直渦とは鉛直方向(z 方向)軸を有する渦と定義する。ただし、ケースRSの方が鉛直渦の中心が若干下流側になっている点と、水はねの範囲が大きいことがわかる。このように底面近傍の流れ構造には水制断面形状の影響が表れている。

ケースTB、TUでは、第1水制の水はねの大きさは前面鉛直のケースと同程度であるが、横断方向に偏流する領域、すなわち横断方向流速 V の値が大きな領域は前者に比べて狭くなっていることがわかる。前面傾斜の大きな特徴は、水制域において水制域内へ入り込

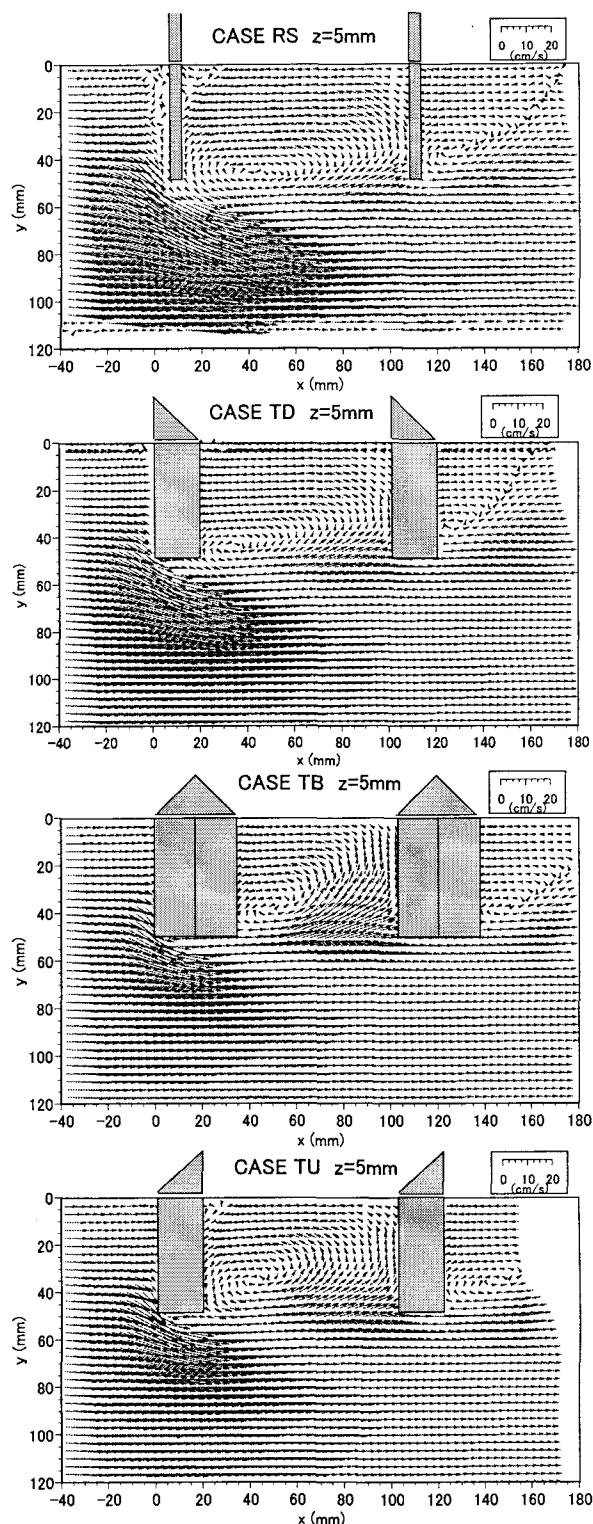


図-4 水平断面（底面近傍 $z=5\text{mm}$ ）における時間平均流速ベクトル

む流れが強いことである。水制域内に見られる鉛直渦の中心は前面鉛直に比べて若干側壁側に移動し、下流側において側壁に向かう横断方向流速が大きくなっている。特にケースTBにおいてこの傾向が顕著である。

図-5に底面近傍の $z=5\text{mm}$ における水制先端断面の $y=50\text{mm}$ と少し主流側の断面 $y=70\text{mm}$ における横断方向流速の縦断分布を示す。水制先端断面では、第1水制による水はねの強さを表す横断方向流速は、傾斜角

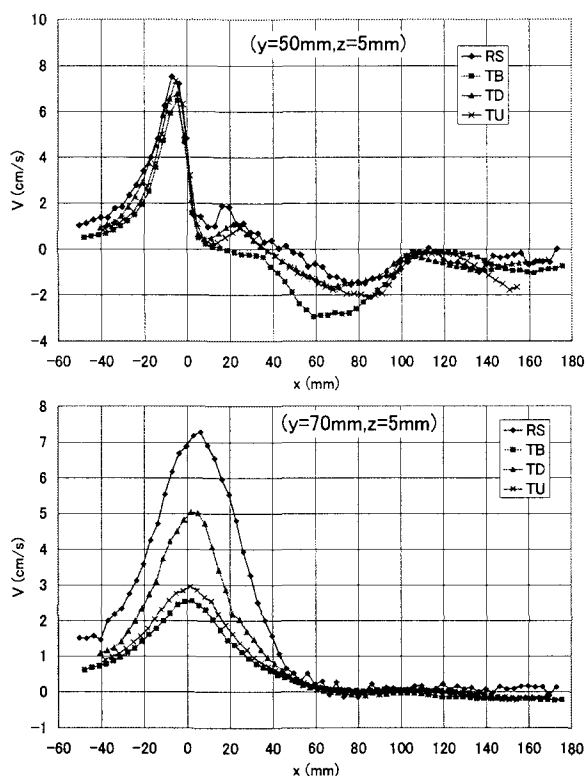


図-5 底面近傍($z=5\text{mm}$)における横断方向流速縦断分布
(上: $y=50\text{mm}$, 下: $y=70\text{mm}$)

の違いによらずほぼ同程度である。水制域内においては、ケース TB が側壁へ向かう流速が大きい以外はほぼ相似な構造を示しており、傾斜角による顕著な違いは見られない。 $y=70\text{mm}$ では、水はねの範囲が流下方向に拡大するが、横断方向流速の大きさに傾斜角による大きな違いが明らかである。水制前面が鉛直の場合が大きな値を示し、ケース RS が最も大きく、次に TD が大きい。したがって水制後面の傾斜が影響していることがわかる。このことは、水制前端からはく離流と水制後端に発生するはく離渦との相互作用が関係しており、後面の傾斜によってこれらの距離が遠ざけられることが原因と考えられる。一方、水制前面が傾斜している場合は両者とも小さな値を示している。この場合は前面の傾斜の影響が大きいため、相対的に後面の傾斜の影響が小さくなったものと考えられる。

その他の断面についてみると、鉛直縦断面では水制先端付近を除きほぼ同様の構造であった。水平断面ではむしろ底面近傍の違いが最も大きかった。ケース TB と TD の $y=45\text{mm}$ 鉛直縦断面の流速ベクトルを図-6 に示す。ケース TB では水制間領域全体において下流方向の水平な流れとなり、第 2 水制に沿って上昇するのに対して、ケース TD では第 1 水制背後に横断渦が認められ、水制域中央付近から下降流が顕著となっている。また、 $z=18\text{mm}$ 水平断面の流速ベクトルを図-7 に示す。両ケースは同様の流れ構造を示しており、底面近傍で見られたような前面傾斜角の影響はほとんど見られない。ケース TD の方が水制域中央の流下方向流

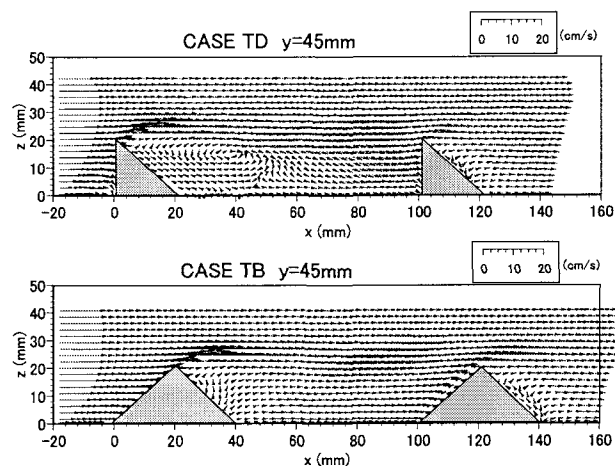


図-6 $y=45\text{mm}$ 鉛直縦断面の流速ベクトル

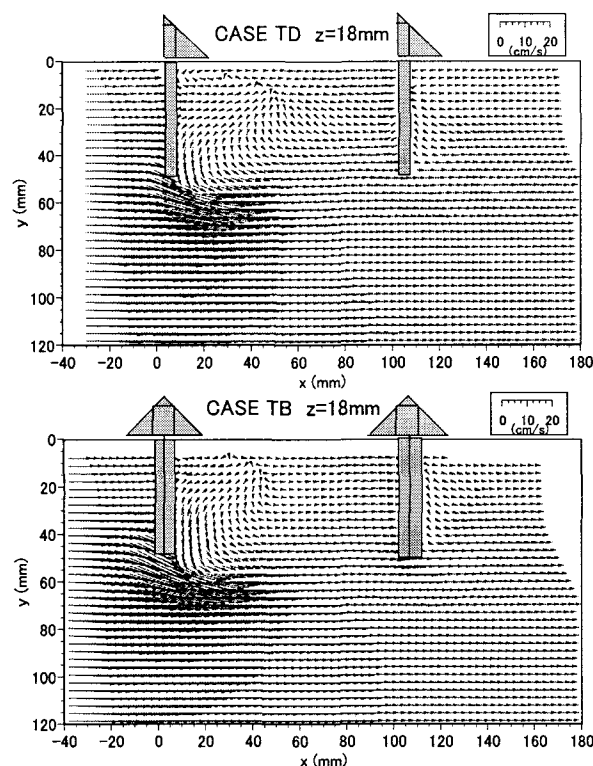


図-7 $z=18\text{mm}$ 水平断面の流速ベクトル

速が若干小さくなる程度の相違しかない。

3. 2 組織渦構造

全時間平均の流速ベクトルから見た流れ構造は瞬間の渦構造とは異なりかなり平滑化されたものとなっている。水制周辺の物質輸送を考える上では瞬間的な組織渦構造とその瞬間的な大きさが重要となる。時間平均的に見て水制後方の傾斜角は流れ構造にほとんど影響を及ぼさなかったが、瞬間の渦構造については若干の相違が見られた。そこで、ここではケース TD とケース TB および後面傾斜のケース TU について瞬間渦構造を比較する。ただし、渦構造を見やすくするために $1/120$ 秒間隔の流速ベクトルを 12 枚平均した 0.1 秒平均の流速ベクトルの一例を示して検討する。各ケースの瞬間流れ構造において、特徴的構造が繰り返し発生

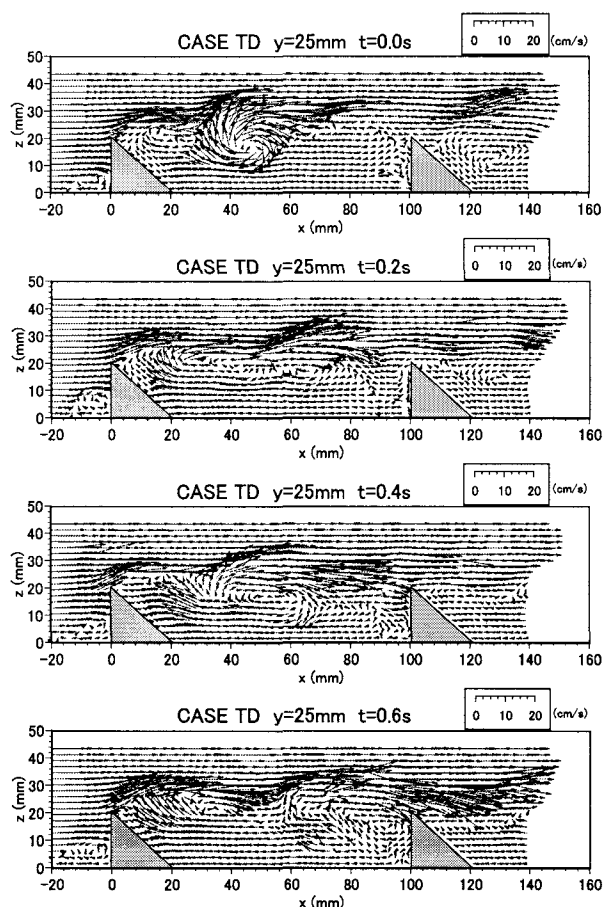


図-8 0.1秒平均の鉛直縦断面流速ベクトル (TD)

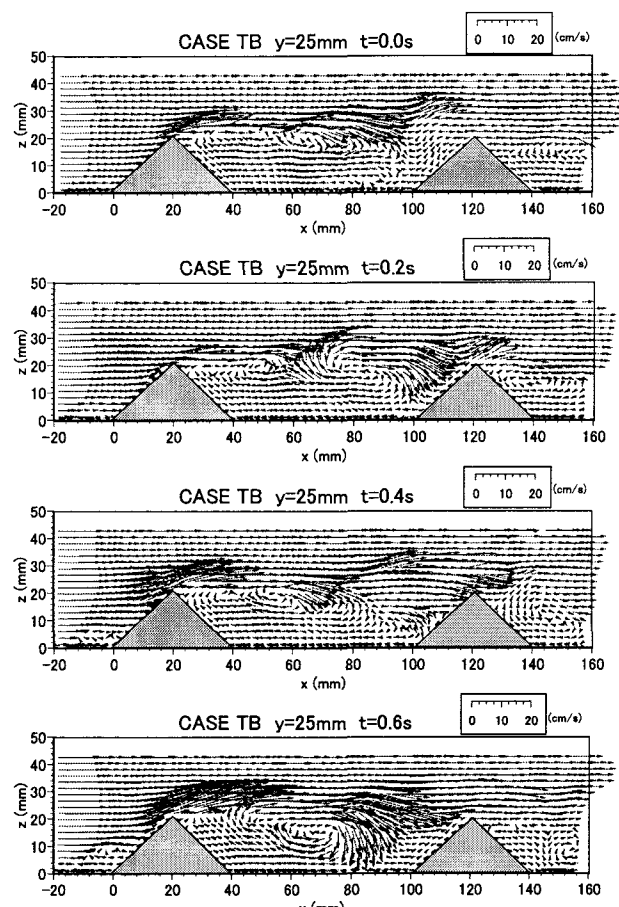


図-9 0.1秒平均の鉛直縦断面流速ベクトル (TB)

するようすが認められたため、代表的なパターンが現れている時間の流速ベクトル図を抽出した。図-8, 9, 10 に $y=25\text{mm}$ 鉛直縦断面の瞬間流速ベクトルを示す。

ケース TD では、第 1 水制前面に沿って底面へもぐりこむ横断渦が観測される。第 1 水制頂部において流れは水面側へ大きく偏流しはく離を引き起こしている。このはく離渦は第 1 水制背後で常に存在しており、上流向きの上昇流が発生している。このはく離渦は下流へ移流されて水制間中央付近で大きく発達する。このケースでは、最大 3 個程度のはく離渦が水制頂部高さを結ぶ線に沿って並ぶパターンが多く見られた。これがさらに下流へ移流されると、しだいに渦構造が明瞭でなくなり、第 2 水制頂部に渦の下流端がぶつかり、水制前面に沿う下降流と水制頂部を越える流れに分かれ、下降流は第 2 水制前面の横断渦を形成する。水制域の底面近くは常に逆流となっておりはく離渦の侵入は第 2 水制前面付近に限られる。

ケース TB では、第 1 水制の前面斜面に沿って上昇流が発生し水はねを生じているが、直下流のはく離渦が発達せず、水制間の中央付近まで流下して渦が発生している。したがって、第 1 水制背後の上昇流は小さい。この水制間中央のはく離渦は下流へ流下し、下流端が第 2 水制の前斜面にほぼ直角に衝突する形となる。ときにこのはく離渦は大きく発達し下降流が第 2 水制

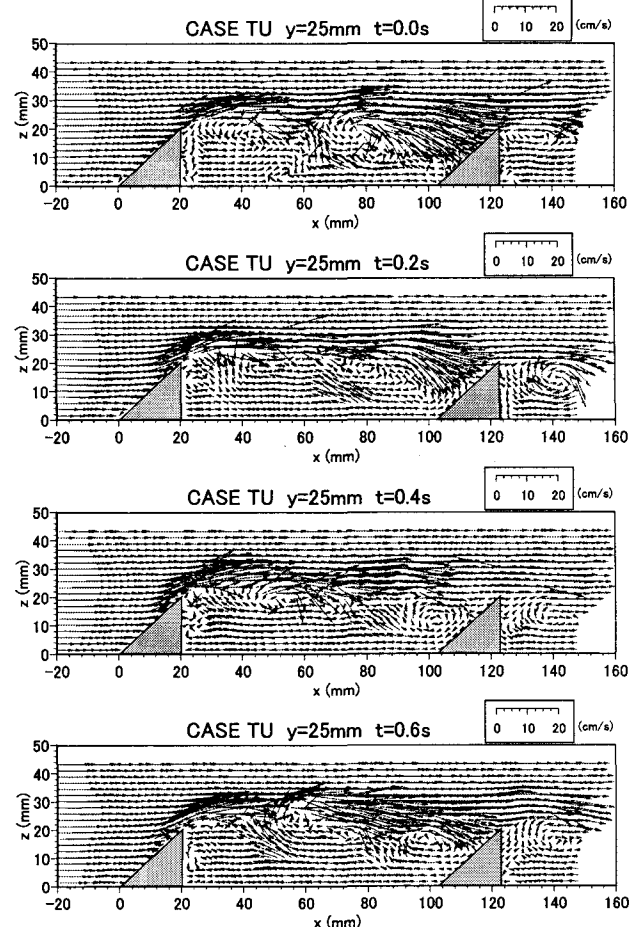


図-10 0.1秒平均の鉛直縦断面流速ベクトル (TU)

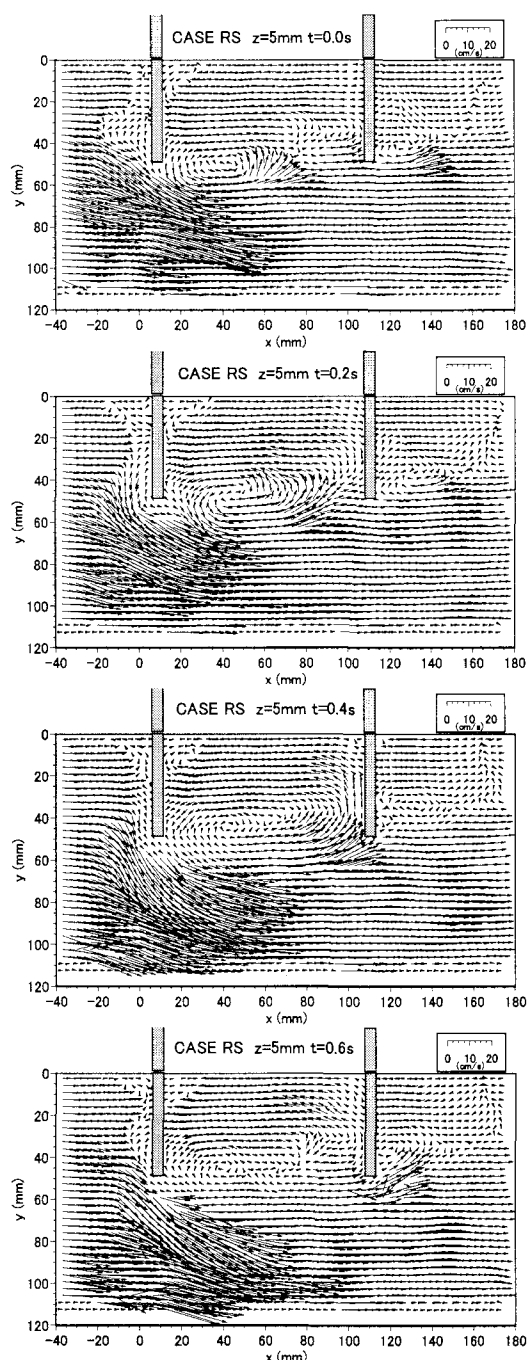


図-11 0.1秒平均の水平断面流速ベクトル (RS)

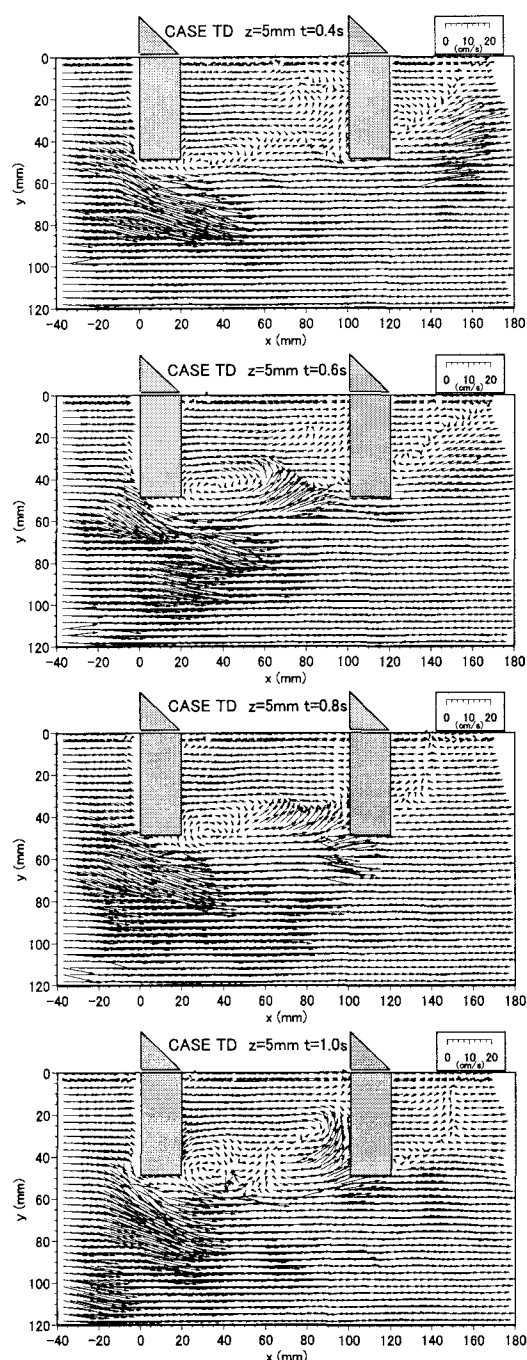


図-12 0.1秒平均の水平断面流速ベクトル (TD)

上流側の底面にまで達する。このケースでは瞬間的な渦構造はそれほど複雑に変化せず、図に示したパターンが支配的であった。

全時間平均ではケースTBとTUの違いはあまり見られなかったが、瞬間ベクトルで見ると若干違いが見られ、ケースTUではケースTBほどはく離渦の構造が安定せず、第1水制直後にはく離渦が発生し流下していく様子が認められる。はく離渦が流下するにつれて発達し第2水制斜面にぶつかる流れパターンは同様である。また、第2水制後方ではケースTBに比べて瞬間的に強い横断渦が発生しているのが見られた。

図-11, 12, 13, 14に全ケースの $z=5\text{mm}$ 水平断面の瞬間流速ベクトルの一例を示す。薄板のケースRSで

は、第1水制前面の水はねに引っ張られるように背後のはく離渦が発生している。これらが近接しているため全体として大きな水はねを形成している。はく離渦は中心を下流に移動させながら流下方向に引き伸ばされて第2水制前面に達し根元側へ向かう流れとなっている。そして水制間領域根元側の大部分の領域で逆流となっている。ケースTDでは、第1水制による水はねが顕著であるが、水はねの角度は時間とともに大きく変動している。前縁部によるはく離が、第1水制先端の直下流における渦を発生させているが、ケースRSほど両者は接近しておらず相互作用は小さい。この渦は同様に伸張り水制域内への流入速度が増大するが、渦中心が固定されRSほど発達しない。このはく離渦

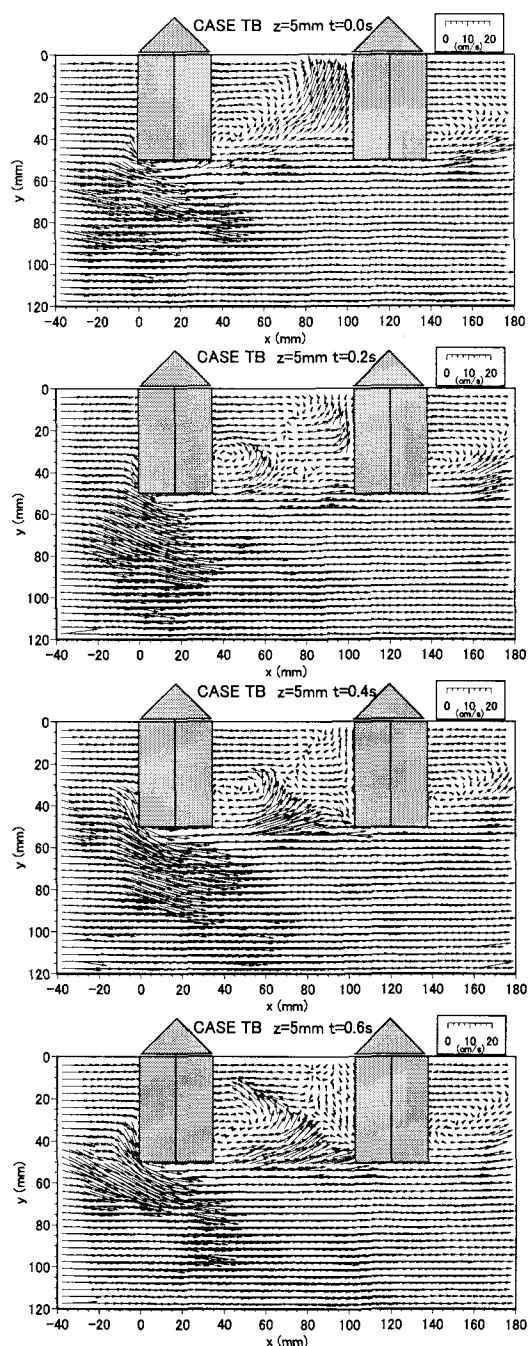


図-13 0.1秒平均の水平断面流速ベクトル (TB)

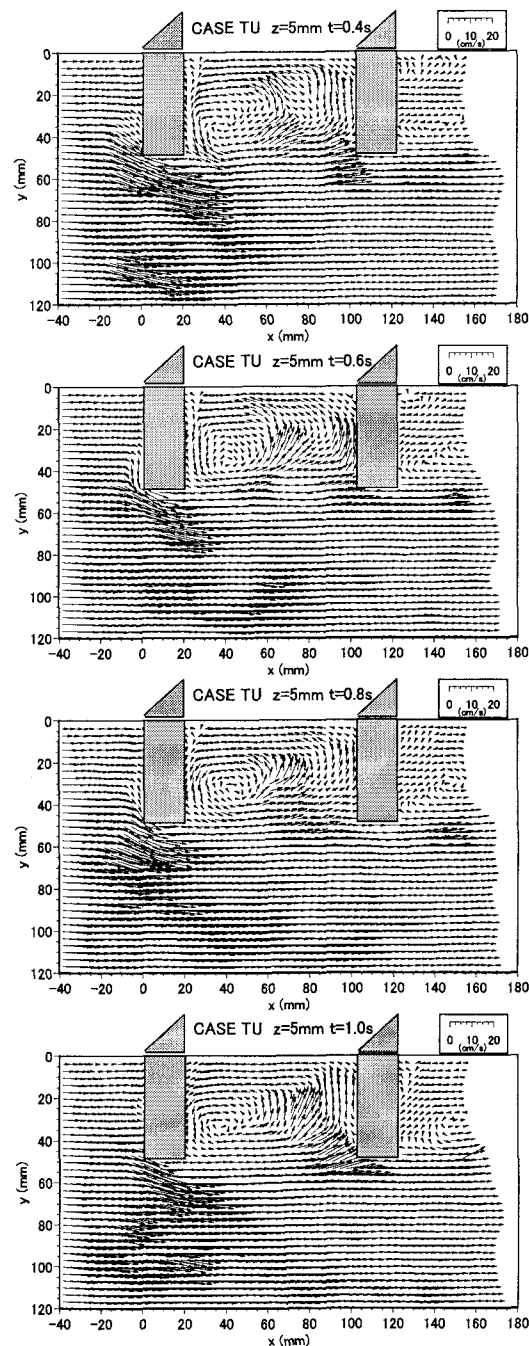


図-14 0.1秒平均の水平断面流速ベクトル (TU)

は常に存在しており、この渦が伸張した後分裂して、下流側では第2水制前面に沿って側壁側への流入が見られる。

ケース TB では、第1水制前縁の偏流が生じているが、先端の断面で流れが剥離していない。その結果、第1水制の後端部からはく離渦が発生している。このく離渦の中心はケース TD では水制先端部にあったものが、TB では水制先端より側壁側に現れる。この渦は水制域内へ回り込むように発達し、水制域境界部の下流側の広範囲から流入を発生させている。この渦が第2水制根元に達する流れが $t=0.0s$ において見られる。このように渦が第2水制に達する前には第2水制前面は逆流になっておらず、逆流は上流部だけとなってい

る。

ケース TU では、第1水制先端部の流れはケース TB と類似しているが、第1水制背後で発生するく離渦の規模が TB に比べて大きいのがわかる。また、この渦は比較的安定に存在しており、水制域長さの半分程度の流下方向スケールを持っていて、水制域中央付近から側壁側への流入を与えている。これとは別に第2水制前面にぶつかり水制前面に沿って根元側へ流れる渦が頻繁に見られ、水制域側壁側では常時逆流が生じている。このように、ケース TB とは異なる瞬間渦構造が認められ、全時間平均では顕著でなかった後面の傾斜の有無による流れ構造への影響が瞬間的な組織渦構造には影響を及ぼしている。

3. 2 乱れ強度分布

瞬間の組織渦構造からそれぞれの傾斜面の位置により渦の発達や安定性に違いが見られた。ここでは、2次流成分の乱れ強度について検討する。図-15は $y=25\text{mm}$ 鉛直縦断面における鉛直方向流速の乱れ強度 w' のコンターである。乱れは水制頂部を結ぶライン上を中心として大きな値をとる。ケース TD では第1水制頂部から4cm程度下流にピークが現れ、第2水制を越える付近まで大きな値を示している。ケース TB は最も乱れが小さい。これは瞬間の渦構造が比較的安定していたことと一致する。

次に、 $z=5\text{mm}$ 水平断面における横断方向流速の乱れ強度 v' のコンターを図-16に示す。全体的傾向として、第1水制先端斜め上流側と水制域内の第2水制前面に大きな乱れの領域が存在する。ケース TD では、第1水制先端付近の乱れが最も大きく、先端から主流側の広い範囲において大きな乱れの領域が広がっている。ケース TB では、第1水制前面の乱れ強さが小さく、大きな乱れの範囲も上流側にとどまっている。水制域内の乱れはケース TB では第1水制後端から第2水制前面にかけての領域で大きな値を示し、この領域はケース TD よりも側壁側に寄っている。水制域内ではむしろこのケースの方が大きい乱れを示している。

4. 結論

水制の断面形状として水制前後の傾斜を取り上げその流れ構造に及ぼす影響をPIV法を用いた実験によって検討した。水制前面の傾斜の影響が特に顕著に見られ、前面の傾斜があると水制域内のはく離循環流の流下方向スケールが小さくなり再付着距離が短くなる。これは、横断渦構造と底面近傍の鉛直渦構造の双方について言える。比較的長時間の平均流速ベクトルを見る限りでは、後面の傾斜の影響は顕著でなかったが、瞬間流速ベクトルを見ると、後面傾斜の有無によって水制背後のはく離渦の位置や安定度が異なり、支配的渦構造に違いが現れた。後面の傾斜ははく離渦を安定させ下流への発達を抑制しているように見える。以上の効果は乱れ強度分布にも現れている。水制の前後面の傾斜角は水制周辺の土砂の洗掘や堆積にかなりの影響を及ぼすものと考えられ、今後移動床や水制先端傾斜の実験を行いさらに検討していきたい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 富永晃宏・井嶋康二・中野義郎: 斜め越流型水制周辺の流れ

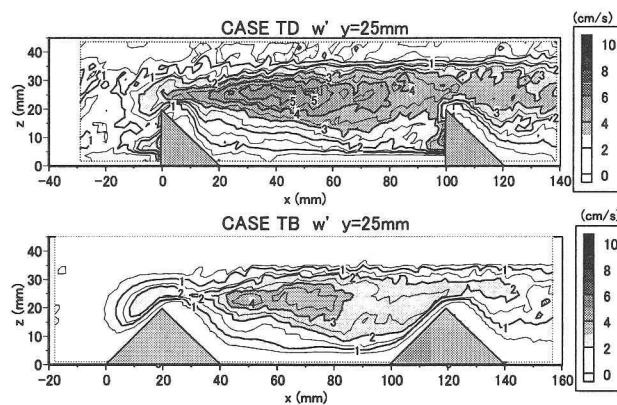


図-15 鉛直縦断面 ($y=25\text{mm}$) における鉛直方乱れ強度コンター

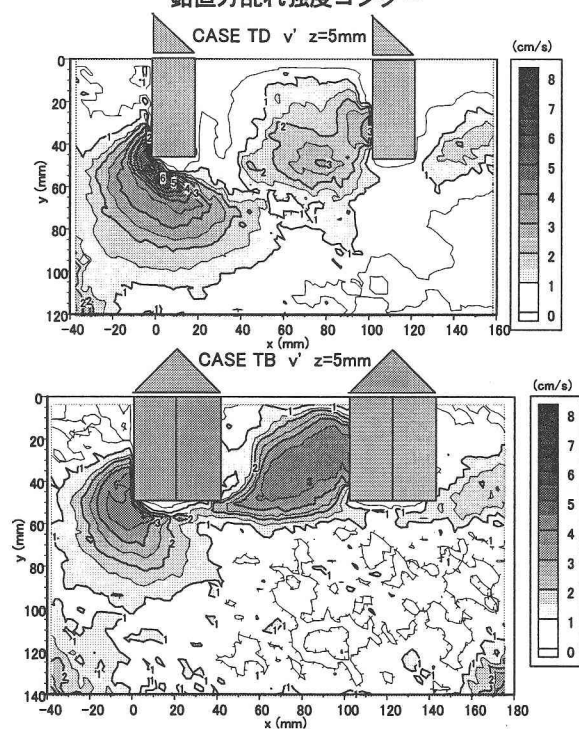


図-16 水平断面 ($z=5\text{mm}$) における横断方向乱れ強度コンター

構造のPIV解析, 水工学論文集, 45, 379-384, 2001.

- 4) 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.
- 5) Miller R.I., 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.
- 6) 川口広司・福岡捷二・渡辺明英: 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 48, 811-816, 2004.
- 7) 梶川勇樹・道上正規・松原雄平・檜谷治: 緩傾斜護岸周辺における剥離渦に伴う局所洗掘現象の数値解析, 水工学論文集 48, 853-858, 2004.
- 8) 富永晃宏・田本典秀: 三角形断面積粗度を有する開水路流れの乱流構造, 応用力学論文集, Vol.5, 727-734, 2002.

(2000.4.16 受付)