

水制背後の流れ構造に及ぼす透過流の影響

EFFECTS OF PERMEATING FLOW ON FLOW STRUCTURES BEHIND SPUR DIKES

富永晃宏¹・長尾正志²・長坂剛³

Akihiro TOMINAGA, Masashi NAGAO 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フェロー会員 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 工学研究科社会開発工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

In recent years, spur dikes are expected to demonstrate various functions. Permeating flow through the spur dike can control the flow field, structures of separation vortex and bed configuration around the spur dikes. In this study, velocity fields behind the solid, straightly permeating and inclined permeating spur dikes are measured and compared. The resistance and scour depth at the head of the spur dike are reduced by the permeating flow through the dike. Spur dikes with inclined permeating flow were proved to have several advantages. The inclined permeating flow reduces the strength of the separation vortex, keeping almost similar deceleration effect and reattachment length. Furthermore, it decreases the turbulence intensities behind the spur dike and maintains relatively lower velocity over a long distance behind the spur dike, even in the case of movable bed.

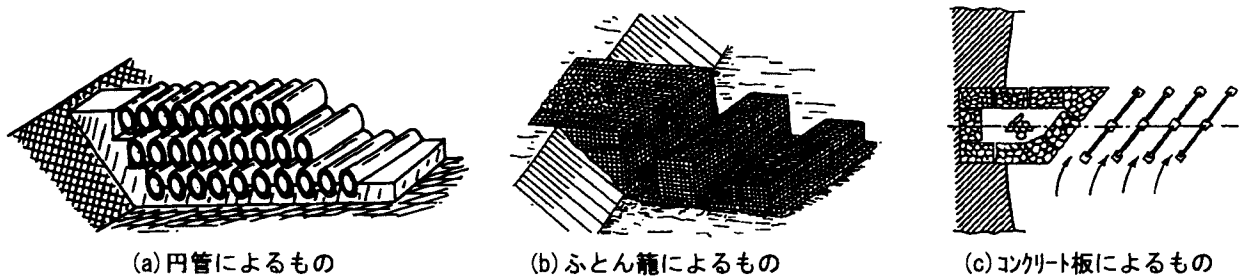
Key Words : spur dike, permeating flow, flow structure, separation, vortex, movable bed

1. 序論

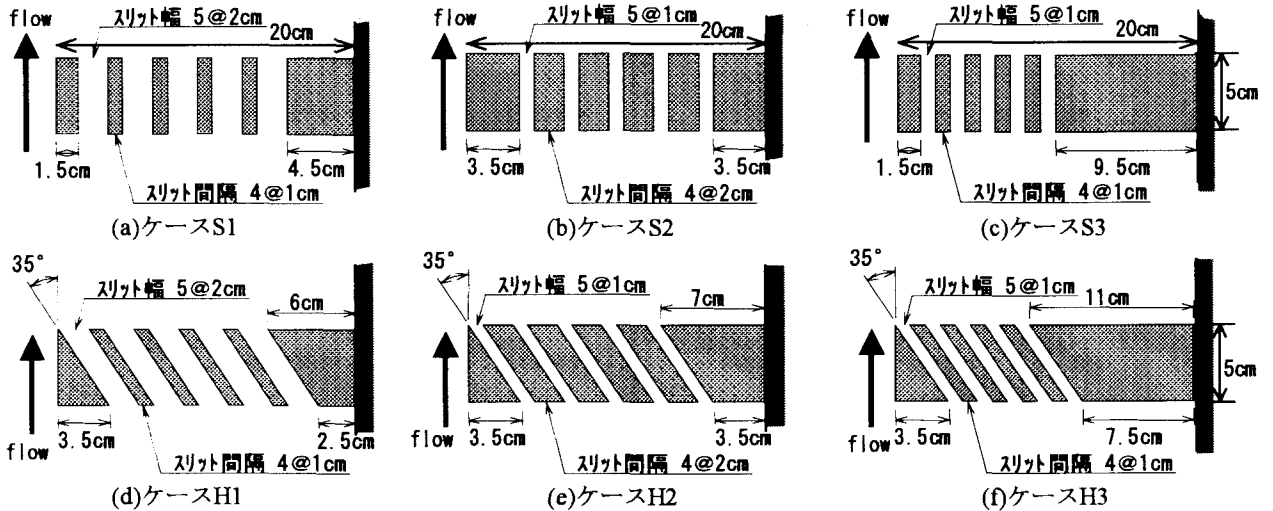
水制は流れに対する粗度効果と水はね効果により河岸浸食防止あるいは護岸の破損防止などを主目的に設置されるものであるが、構造物周辺の流れが多様なため河岸植生や水生生物にとって良好な環境が創造でき、生態系の保全・育成に大きな効果があることが注目されてきている。従来、経験に基づき河川の特性に合わせて様々なタイプの水制が用いられている¹⁾。水制は非常に多くの設計項目を要し、流れと河床変動に対する影響が複雑であるため、その最適な設計法を確立するのは未だに困難である。河道湾曲部などの水制配置による水衝部の制御に関する研究や^{2),3)}、各種水制群を有する開水路流れの流動形態と抵抗特性に関する研究^{4),5),6),7)}、また、このような水制周辺流れの数値計算に関する研究^{8),9)}等が盛んに行われており、流れに対する抵抗やマクロな流動変化についてはある程度予測可能になってきていると言える。しかし、水制の形状や形式に対する水制背後の乱れや混合機構および土砂堆積機構等の応答変化特性についてはいまだ不明な点が多く、検討の余地が残されている。楊・石井¹⁰⁾は河川景観の面から水制のタイプと代表的土砂堆積の関係を論じているが、水理学的にこのような水制の役割を合

理的に説明できていないように思われ、水理面からのさらなる研究が必要であると考えられる。

本研究では、流下方向に対して角度を有するスリットによって水制背後の渦や河床変動をコントロールすることのできる透過型水制に注目し、その水理的特性を明らかにすることを目的とする。このタイプの水制は、文献11)にハイドロバリア水制として紹介されているものである。ハイドロバリア水制は、流れに直角方向に出された水制構造内部に透過流あるいは通水路部分を有し、この透過流部分は構造体の軸に対して $\alpha = 30^\circ \sim 40^\circ$ の角度で設けられるものである。文献11)によれば、図-1(a)~(c)に示すようなタイプの水制の例が挙げられている。このハイドロバリア水制の機能として、次のことが考えられる。水制構造内の透過流部を通過する水流は河心方向へ曲げられ、河岸から遠ざかる。ハイドロバリア水制頭部の前方を通過する水流は、偏位現象により逆に河岸方向へ曲げられる。このベクトルの異なる二つの水流が、構造体の下流で再び合流して互いに激しくぶつかり合うことにより、エネルギー逸散を促進するというものである。しかも、二つの水流の合成ベクトルは、河岸に対してより鈍い角度となり、また水流の河岸への到達点は不透水制よりさらに下流側へずれるため、水制間距離をより大きく取る



図一 ハイドロバリア水制の例 (イヴァン・ニキティン¹¹⁾ より抜粋)



図二 透過水制断面図

ことができる。さらに透過流の存在により水制頭部の洗掘が小さくなることが期待される。以上のような長所を有すると考えられるハイドロバリア水制であるが、その水理機能については不明な点が多い。本研究は、水制構造内部に透過部を設けた実験によって、透過流が水制背後の流れに及ぼす影響と透過流に角度をつけたときの効果を検討したものである。透過水制の透過流に着目した研究としては、福岡らによる樹木群水制の研究があるが^{12),13)}、ここでは斜め方向の透過流の影響を検討した点が異なる。

2. 実験装置および方法

実験は、長さ13m、幅60cmの勾配可変型開水路において水制模型を設置して行われた。実験に用いた水制模型の形状は、長さ20cm、幅5cmの非越流不透過型水制を基本とし(ケースNS)、この基本構造に対してスリットを入れたものを透過水制モデルとした。透過流部は流下方向に対して平行なケース(直進透過型)と、流下方向となす角35°の斜めのケース(斜め透過型)を設定した。水制全長に対するスリット幅の比を1/2と1/4の2種類設定し、1/4のものについてはさらにスリット位置を水制全体型と先端部集中型の2種類設定した。水制はいずれも非越流型としている。以上の水制模型の形状を図一2に示す。水制は水路の上流端から6mの位置に1基設置した。

水路勾配は1/2000、流量は7200cm³/s、水深は下流部を堰上げ、水制設置断面で6cmとなるようにした。

流速計測には、2成分I型電磁流速計(東京計測製)を用い、主流速と横断方向流速を計測した。座標軸は流下方向をx、横断方向をy、鉛直方向をzとしている。水制より上流1mから下流2.9mまでを19断面に分割し、横断方向に12点、鉛直方向に2点、合計448点で計測を行い、サンプリング周波数100Hzで41秒計測したデータについて解析した。また、水深はデジタルポイントゲージにより計測した。

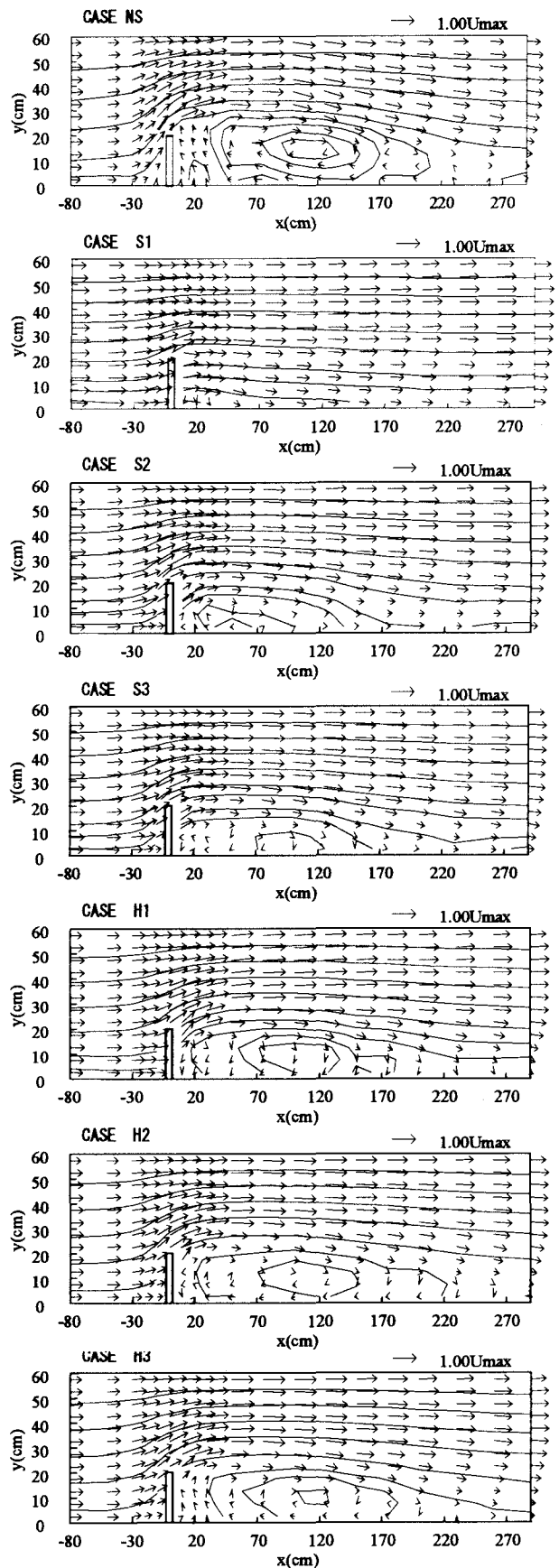
水制背後の大規模平面渦構造の周期的挙動を調べるために、おがくずを水面に散布し表面流況をビデオカメラによって撮影する可視化実験を行った。得られた画像から相互相関法によってPIV画像解析を行い、流速ベクトルを計算するとともに、瞬間の流線を求め、その時間変化を検討した。ただし、水制背後の渦構造の流下方向長さは200~300cmもあるため1画面で捉えるのが困難であったため、2~3画面に分けて撮影した。

次に、水制周辺の河床変動への影響を調べるため平均粒径0.05cmの砂を水制上流1.4mから下流4.0mまで厚さ10cmで敷き詰め移動床とし、通水を120分間した後最終洗掘形状を計測した。また河床変動による流れ特性の変化を明らかにするために、固定床の場合と同様に電磁流速計によってz=3cmの1断面において流速計測を行った。

3. 点計測による実験結果

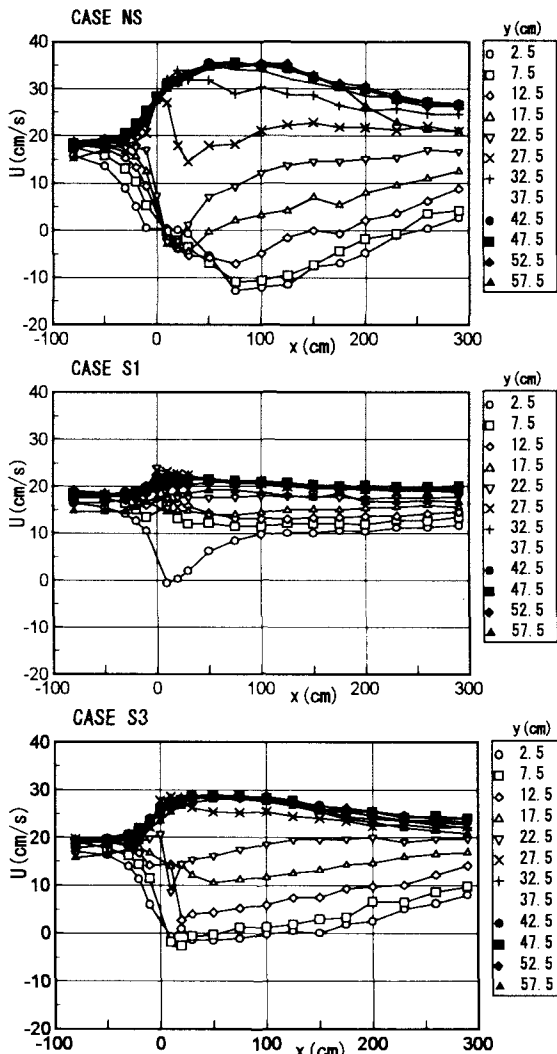
図一3に全ケースの水深平均された平面流速ベクトルと流線を示す。不透過型のケースNSでは、主流が水制先端部から主流域側に大きく水はねされて膨らみ、下流で再び水制域側へ戻る流れを伴う湾曲した流れ構造を示す。その結果、水制背後に水制長さよりも大きな幅を持つ剥離渦を形成する。直進透過型で透過面積比1/2のケースS1では水制先端で水はねは見られるものの、水制を透過する流れが存在するため、水制根元部ごく近傍を除いて水制背後に逆流域は見られない。直進透過型で透過面積比1/4のケースS2では、透過流の減少によってS1に比べて水制背後の流速が減少する。直進透過型であるにもかかわらず、水制内を通過した流れは主流域側へ曲げられ、小さな剥離渦が形成されている。同じく透過面積比1/4で水制先端部を透過型としたケースS3では、水制根元の不透過部の増大によってより明確な剥離渦を形成しているが、水制背後の減速や流線形状はS2とほとんど変化がない。次に、斜め透過型で透過面積比1/2のケースH1では、水制先端部の水はね角度が不透過型より小さくなり、下流での水制域側への戻り流れも小さくなる。透過流の影響によって剥離渦の主流域側への膨らみがなくなり、逆流の強度も減少しているが、剥離渦は流下方向に長く存在している。透過面積比を1/4としたケースH2では、水はね角度が若干大きくなり剥離渦の幅も大きくなる。逆流強度は小さくなるが、再付着点距離は大きくなる。透過部を先端に設けたケースH3では、さらに水はね角度が大きくなり不透過型に近づくものの、剥離渦の大きさはH2とほぼ同程度である。

図一4にケースS2とH2を除く各ケースの水深平均主流速の流下方向分布を示す。ケースS2, H2はそれぞれS3, H3とほぼ同様の傾向を示した。また、表一1に水制周辺流れの特性量と考えられる、流速分布から計算される水制内部の透過流量率 β の値、水制前後の水位差 Δh （水制前面10cmと水制背面10cmの平均水深の差）、水制先端の水はね角度 α 、再付着点距離 L 、水制域側壁近傍の逆流速度の最大値 U_b 、計測範囲最下流の主流速の横断方向偏差 ΔU_d を示す。再付着点距離 L は図一4から水制側側壁に最も近い測線の流速0をクロスするx座標を再付着点として求めた。実際の透過流量率は透過面積比1/2で約20%と、流水断面積に対する水制内透過部の面積比1/5に相当する流量が通過していることがわかる。斜め透過型は若干これより少なくなっている。透過面積比1/4では流水断面積比1/9よりも小さな値となり、これも斜め透過型の方が小さい。水制前後の水位差は透過型でかなり減少し、抵抗が減少することを示している。水はね角度 α は透過部を設けることによりかなり減少する。直進透過型では透過面

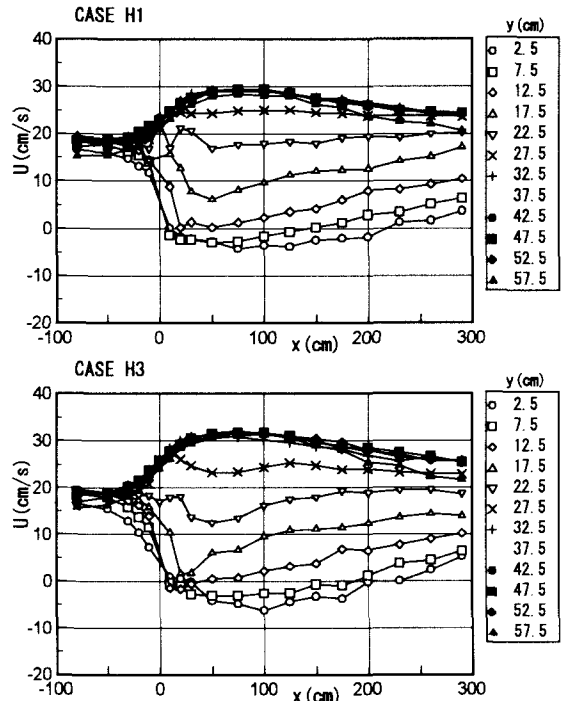


図一3 水深平均流速ベクトルと流線

積比1/4で約15°と不透過の1/2程度となる。斜め透過型では透過面積比によって余り変化せず、20°程度となる。再付着点距離は、不透過型で $L=250\text{cm}$ とな



図—4 水深平均主流速縦断分布



表—1 水制周辺流れの特性量

	β (%)	Δh (mm)	α ($^\circ$)	L (cm)	U_{max} (cm/s)	U_b (cm/s)	ΔU_d (cm/s)
NS	0	8.4	33.6	255	35.7	-12.8	23.8
S1	20.6	1.6	9.7	10	22.4	-0.6	7.6
S2	8.8	3.9	14.1	70	28.1	-2.8	14.5
S3	8.8	3.9	15.8	105	29.0	-2.6	15.3
H1	18.6	4.1	19.3	220	29.4	-4.3	20.7
H2	7.5	4.8	20.0	265	31.9	-6.2	23.9
H3	8.2	5.2	16.2	210	32.0	-6.3	21.2

り水制長さの12.5倍に達する。直進透過型では当然小さくなるが、斜め透過型では不透過型とさほど変わらない再付着点距離を有する。ただし、逆流の最大値 U_b をみると、斜め透過型では4cm/sから6cm/sと不透過型の1/2に減少している。主流域の最大流速 U_{max} も不透過型より13%程度減少し、全体として主流速の横断方向偏差はかなり減少している。直進透過型の透過面積比1/4のケースでは U_b は約1/5に減少し、 U_{max} は約20%減少している。最後に横断方向偏差 ΔU_d は不透過型と斜め透過型のH2が最も大きく、その他の斜め透過型がこれに次いで大きい。全般に斜め透過型は不透過型に比べて水制直後の流速変化は小さいが、再付着点より下流の位置における流速差はほぼ同程度となり、流速差の回復が遅い。直進透過型の透過面積比1/2のS1では、水制直後の流速差も小さいが、この差が下流まで維持されている。これらは水制背後の乱れに関係し、乱れが弱い場合、流速差の回復が遅くなるものと考えられる。

図—5 に不透過型のNSと斜め透過型のH3のレイノルズ応力 $-uv$ および乱れ強度 u', v' のコンターを示す。まず不透過型についてみると、レイノルズ応

力 $-uv$ は水制先端より約7.5cm主流域側、20~30cm下流地点に非常に大きな値を持つピークが存在する。ここから下流に向かって剥離剥離渦の外縁に沿って大きな値の領域が広がる。これは流速の横断勾配が大きい領域に対応しているが、下流ではかなりばらつきが大きい。乱れ強度 u' はレイノルズ応力のピーク付近を中心として大きな値をとる領域が流下方向に放射状に広がり、やはり剥離渦外縁に沿ってピークが続く。また、再付着点の前後において乱れの大きな領域が存在する。この領域はレイノルズ応力 $-uv$ による乱れ発生が大きい領域とは対応せず、剥離渦の大規模な変動によるものと考えられる。 v' は u' と同様に水制先端斜め後方をピークとして大きな値の領域が広がる。乱れのピーク値は u' とほぼ同程度であるが、再付着点付近に乱れの大きい領域はみられない。斜め透過型では乱れのピーク位置が水制側に寄る点を除き乱れの大きい領域は不透過型とほぼ同じであるが、大きさはかなり減少している。このことは、水制先端を回る流れと水制内を透過する流れの合流によってエネルギー逸散を促進するという効果はあまり無いことを意味する。

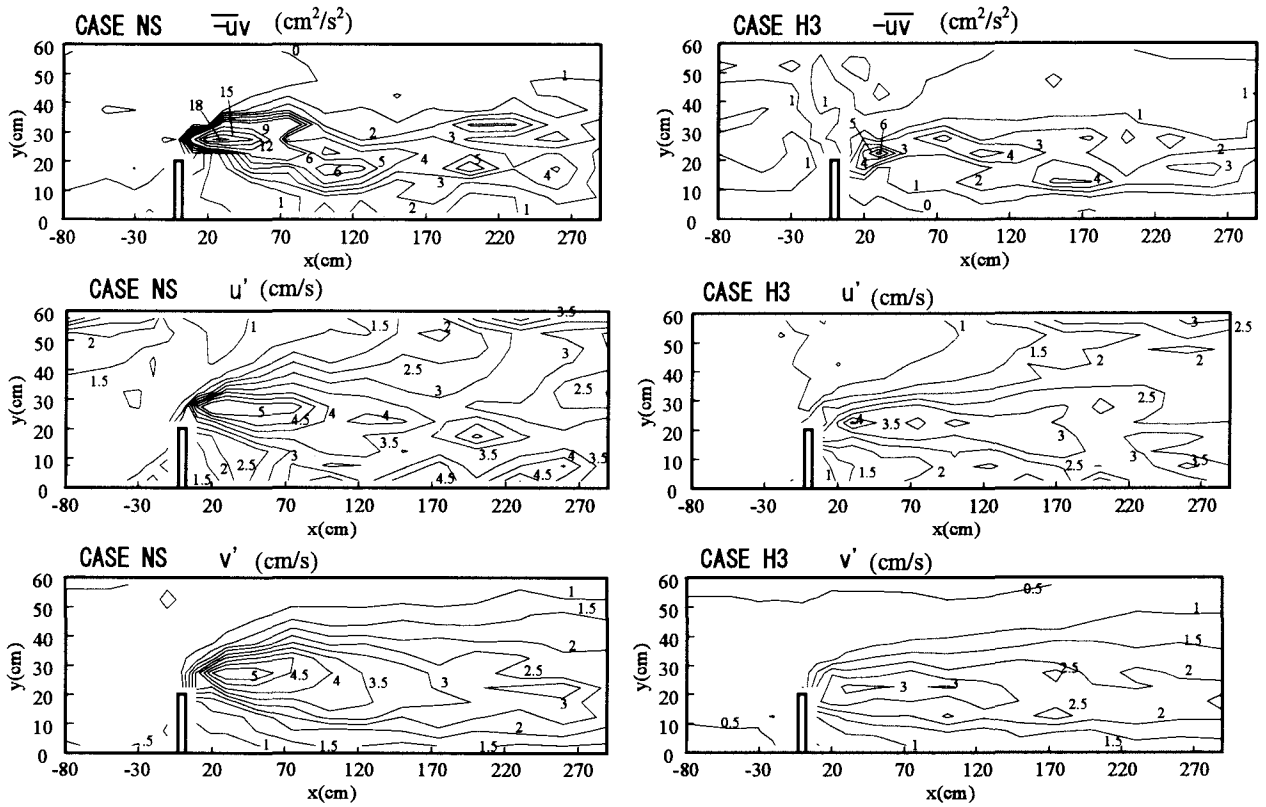


図-5 乱れ特性コンター

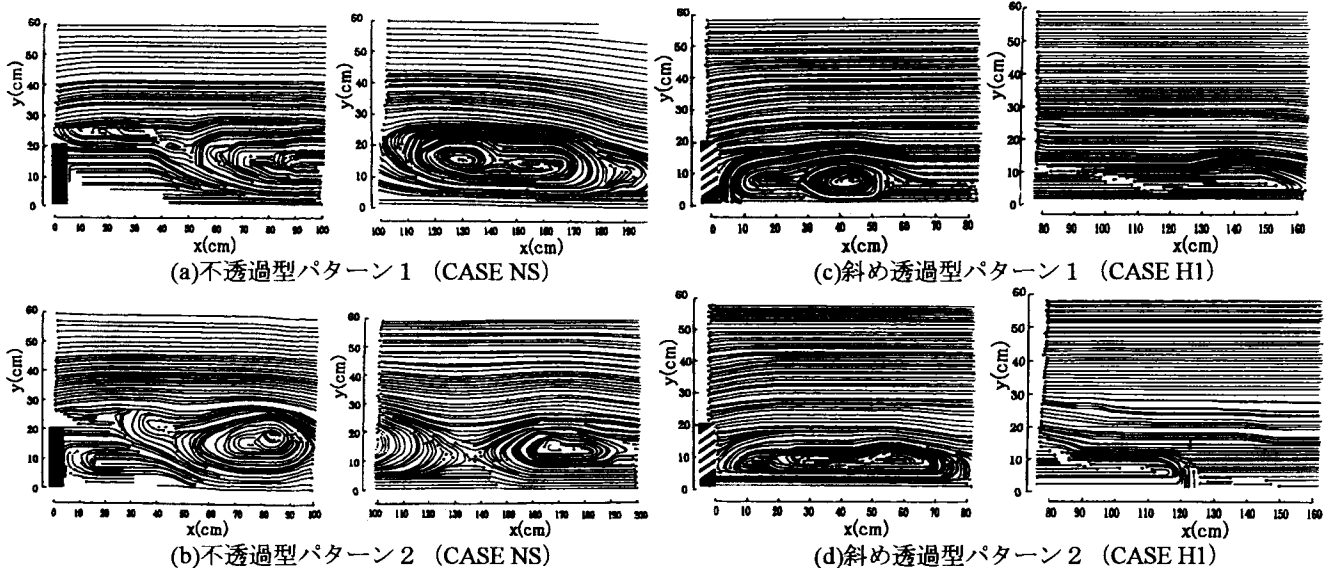


図-6 PIV法による表面流の流線群

4. 可視化計測および河床変動の結果

図-6はケースNSとH1のPIV法によって得られた瞬間平面流速ベクトルから求められた流線群の1例を示す。ビデオ画像エリアは流下方向に100cmが限界で再付着点までの渦構造を1画像で捉えることはできなかったため、3画面に分けて撮影した。したがって図は代表的パターンとして連続していると思われる2画像を並べて示したもので、同時刻の瞬間渦構造ではない。このような制限はあるが、両者の渦構造の相違は容易に理解できる。不透過型では(a),(b)に見られるように、水制よりかなり離れた

$x=50\text{cm}$ 付近の位置に水制長より幅の大きい渦構造が存在し、この渦の先端部は水制先端に細長く伸び、先端に接したり離れたりを繰り返している。水制背後にはこの大規模渦とは逆向きの渦構造が水制背面に接して存在する。また、最下流部の画像は示していないが、この渦の後端部は時間とともにその長さを変化させ、最低130cmから最高300cmにまで達する。渦がある程度伸張すると中間付近で2つの渦に分裂して流下し(b)の右の図)、その後再び伸張を始める。このような渦の分裂・伸張の周期は約6秒であった。斜め透過型では、(c),(d)に示すように、渦は水制背後に密着して安定しており幅は水制長よ

り小さく扁平な渦となっている。水制内部の透過流が安定した剥離渦を維持している。この渦の後端部は時間によって伸張し後端部が分裂して流される（(c)の右の図）。しかし、下流側の渦は規模も小さく短時間で消滅している。この場合も分裂・伸張の周期は約6秒であった。以上から、不透過型では水制先端部からの剥離がせん断不安定渦を引き起こし、これが水制から離れた位置の大規模な渦へと発達するのに対し、斜め透過型では透過流が主流域へ貫入し水制域の流れを連行することによって、水制に密着した安定な剥離渦を形成することがわかった。

図-7にケースNS, H3の2時間通水後の河床高コンターを示す。不透過型のNSでは水制頭部において6cm以上の洗掘が起きており、水制頭部後方から対岸にかけて洗掘と峰が交互にできている。斜め透過型のH3では最大洗掘深は8mmでかなり洗掘が小さくなるのがわかる。また、堆積域は不透過型より主流域側に寄っている。透過面積比の大きいH1および直進透過型ではほとんど洗掘がみられなかった。このように、水制内部に透過流を与えると水制頭部の洗掘を大幅に軽減できることがわかった。また、図-8に示す不透過型の河床変動後の流速ベクトルから、水制先端の洗掘と背後の堆積によって逆流域が大幅に縮小して、流速はすぐに水制側側岸に回り込み、横断方向流速差が減少することがわかる。これに対し、斜め透過型では河床変動が小さいため、流速場はほとんど変化せず、移動床においても固定床とほぼ同程度の剥離渦を維持していた。

5. 結論

不透過型、直進透過型、斜め透過型の水制を比較すると違いは以下のとおりである。不透過型水制は主流の剥離により水制下流部に大きな剥離渦を形成し、渦による逆流は強く、水制の破損・水制域の減少につながる水制頭部の大きな洗掘を起こし、流れに対する抵抗も大きい。直進透過型水制は水はね効果は小さいが、背後の乱れの減少により横断混合が抑制され、流速差はかなり長く維持される。洗掘は小さく河床変動に与える影響は少ない。ただし剥離渦はかなり縮小される。斜め透過型水制はスリットの位置や透過度の組合せによって不透過と同等以上の循環流域を確保でき、流れに対する抵抗を小さくする。斜めの透過流が水制頭部の洗掘を弱め、また水制背後の渦を安定に保つことができる。不透過型では河床変動により水制背後の流れ構造が固定床とは大きく異なるのに対し、斜め透過型では、固定床で見られる剥離渦が移動床でも維持されやすい。

参考文献

1) 山本晃一: 日本の水制, 山海堂, 1996.

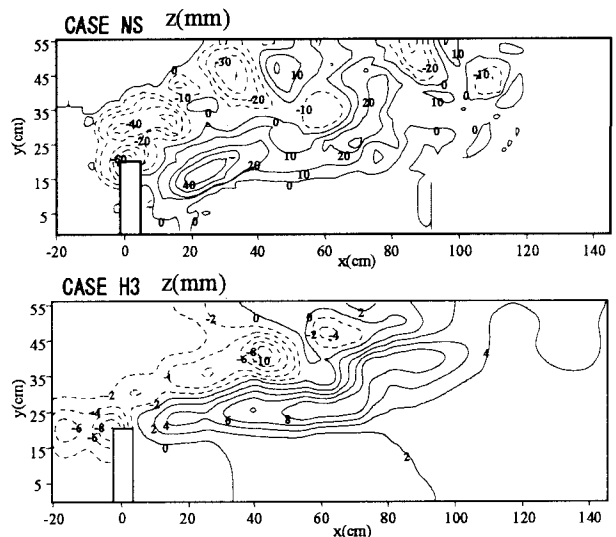


図-7 河床高コンター

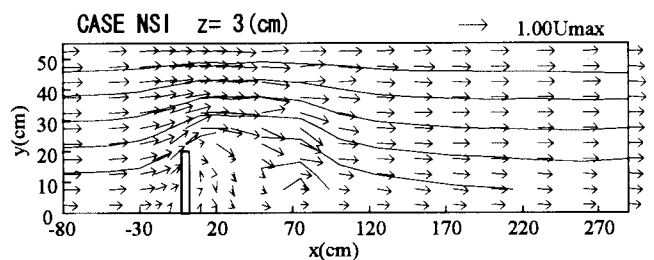


図-8 河床変動後の流速ベクトル (不透過型)

- 2) 福岡・渡辺, 西村: 水制工の配置法の研究, 土木学会論文集, No.443/II-18, pp.27-36, 1992.
- 3) Klingeman, P.C., Kehe, S.M. and Owusu, Y.A.: Stream-bank Erosion and Channel Scour Manipulation Using Rockfill Dikes and Gabions, WRRRI Report for Project No.373909, Oregon State Univ., pp. 1-169, 1984.
- 4) 池田・吉池・杉本: 不透過水制群を有する流れ構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 43, pp.281-286, 1999.
- 5) 福岡・岡信・川口・西村: 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.
- 6) 大本・平川・井出: 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.
- 7) 陳・池田: 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.
- 8) 福岡・渡辺・西村: 水制工の適切な配置決定のための三次元モデルの開発, 水工学論文集, 34, pp.337-342, 1990.
- 9) 崇田・清水: 水制を含む流れの準3次元数値計算モデルの開発, 土木学会論文集, No.497/II-28, pp.31-40, 1994.
- 10) 楊・石井: 水制に着目した景観デザインの可能性に関する研究, 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.111-116, 1998.
- 11) イヴァン・ニキティン (福留脩文・山脇正俊訳): 水制の理論と計算—近自然河川工法の発想を助けるために—, 大学図書, 1995.
- 12) 福岡・渡辺・大橋・姫野: 樹木群の水制的利用可能性の研究, 水工学論文集, 41, pp.1129-1132, 1997.
- 13) 福岡・樺澤・斎藤・布施・渡辺・大橋: 柳水制の試験施工とその機能の現地調査, 水工学論文集, 42, pp.445-450.

(1999. 9. 30受付)