

非越流型水制群の向きが河床変動と流れ構造に及ぼす影響

Effects of Spur Dike Directions on River Bed Forms and Flow Structures

大本照憲*, 平川隆一**, 渡邊訓甫***

Terunori OHMOTO, Ryuichi HIRAKAWA and Kunitoshi WATANABE

*工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科

**博(工) 佐賀大学助手 理工学部都市工学科

***工博 佐賀大学教授 理工学部都市工学科

Recent studies have shown that group of non-submerged spur dikes can provide a valuable habitat for fishes and macro invertebrates in addition to the function to establish a more desirable river for a flood, navigation and bank erosion. In this study, we investigated experimentally the effects of non-submerged spur dikes on bed configurations, water surface oscillations and mean flow characteristics in the cases that spur dikes were positioned facing upstream, downstream and normal to the main flow. The results showed that the spur dikes facing downstream led to the maximum scour at the tip of the dikes, the maximum one in the main channel bed. In addition, it was found that in the case with a facing downstream, resistance is largest.

Key Words : non-submerged spur dikes, river bed form, flow structure, turbulence, PIV

1. はじめに

水制は、粗度効果による河岸近くの流速低減や、水はね効果による流向制御を目的として、古くから伝えられてきた技術である。

これまでの水制に関する研究は、単独非越流型水制や湾曲部に水制を設置した場合の流れ場と河床変動に関するもの^{1), 2)}、片岸に越流型水制を数個設置し、流体力や河床変動を研究したもの^{3), 4), 5)}、片岸に設置した越流型水制群の高さが水制域内の流れ構造に及ぼす影響に関するもの⁶⁾、片岸 2 基のアスペクト比を変化させたもの⁷⁾などがある。

筆者らは、水路両岸に水制を多数個設置した開水路を対象に研究を進めている。越流型水制群を伴う移動床流れにおいては、極大洗掘深が下向水制群で最も大きく、続いて直角、上向水制群の順であることを指摘し⁸⁾、水制域内における平均流場の三次元構造との関係を明らかにしている⁹⁾。また、非越流型水制群を設置することによって水制域内に顕著な水面振動が生じる場合があることを指摘し¹⁰⁾、水制設置間隔を変化させることによって水面振動が制御できることを明らかにした。また、水面振動が顕著な場合とそうでない場

合において水制域内の流れ場および主流部との相互干渉について明らかにしてきた^{11), 12)}。しかしながら、非越流型水制群の向きが河床変動や流れ場に与える影響については十分明らかにされておらず、流れに対する抵抗の効き方も不明である。

本研究では、主流部において掃流砂の存在する動的平衡河床を対象として、非越流型水制群の向きが、河床変動へ与える影響を検討する。次に固定床実験によって、水制群の向きの水面振動、主流速および乱れ特性への影響を明らかにし、水制群の向きの違いによる流れに対する抵抗と河床変動の相互作用について考察を行った。

2. 実験装置および方法

実験に用いた水路は、長さ 10m、幅 40cm のアクリル製可変勾配型直線水路である。移動床実験および固定床実験ともに、水制群は両岸に対称に設置しており、流下方向に 21 基で構成されている。水制の大きさは、長さ 10cm、高さ 7.5cm であり、流下方向に水制長の 2 倍の間隔で設置している。水制群の向きは主流に対して、直角($\theta = 0^\circ$)、上向き($\theta = 10^\circ$)および下向き

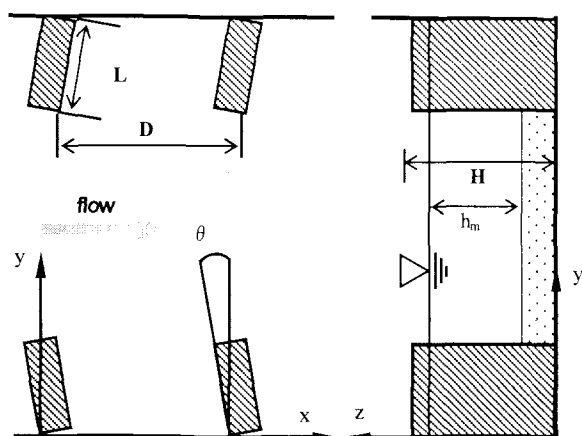


図-1 水制配置

表-1 移動床実験の水理条件

流量	$Q=3 \text{ } \ell/\text{s}$
基準水深	$H=4.5 \text{ cm}$
平均流速	$U_m=17 \text{ cm/sec}$
水路勾配	$I=1/1000$

表-2 固定床実験の水理条件

流量	$Q=2 \text{ } \ell/\text{s}$
基準水深	$H=4.5 \text{ cm}$
平均流速	$U_m=12.5 \text{ cm/s}$
水路勾配	$I=1/1000$

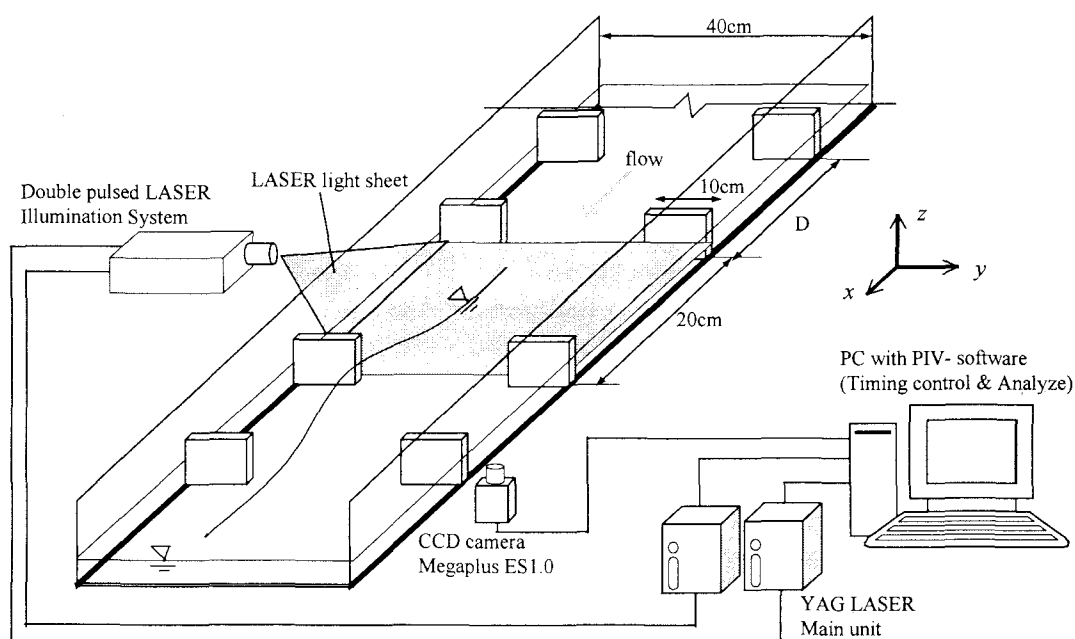


図-2 固定床実験の概要

($\theta = -10^\circ$)の3種である。また、実験水路には水制群の上流側に3mの助走区間を設け、流れを発達させて水制群設置領域に流入させ、水制群下流側にも最低3mの助走区間を設けた。

移動床実験では、河床材料として、中央粒径 $d_{50} = 0.94 \text{ mm}$ の均一に近い珪砂を用いた。河床材料は水路全域にわたって厚さ6cmで一様に敷き詰め、水制を図-1に示すように設置した。水深は、直角水制群の水制1基目設置断面中央で $h_m = 4.5 \text{ cm}$ となるように下流端の堰を操作し、上向および下向水制群ともにそこに固定した。実験は、動的洗掘河床を対象とし、上記の境界条件および表-1の水理条件で通水して、水制周辺の河床変動が安定していると観察された通水120分後に超音波測深器を用いて上流から15～17基間の河床形状を測定した。なお、水制群直上流域では動的平衡状態が保たれていることが観察されたため、上

流からの給砂は行っていない。

固定床実験では、フラットな河床を対象とし、水制群中央部に当たる11基～12基間の全体の流況を、図-2に示すようにツイン Nd:YAG パルスレーザ、およびCCDカメラ (MEGAPLUS ES1.0) により、パーソナルコンピュータのハードディスクに記録した。ハードディスクに記録した画像は計算機でデジタル化し、画像処理を施すことによって流速分布を求めた。流速分布は、流れにトレーサとして径 $30 \text{ } \mu\text{m}$ のナイロン粒子 (比重 1.02) を流し、PIV法によって算出した。計測断面は上流端から11～12基間、鉛直方向の中心断面 (x-y断面) とした。ここに、画像の1 pixelの最小サイズは、約 0.8 mm である。水理条件を表-2に示す。

座標系は移動床実験および固定床実験ともに右岸側の水制根付け部を原点とし、主流方向にx軸、横断方向にy軸、鉛直方向にz軸をとる。

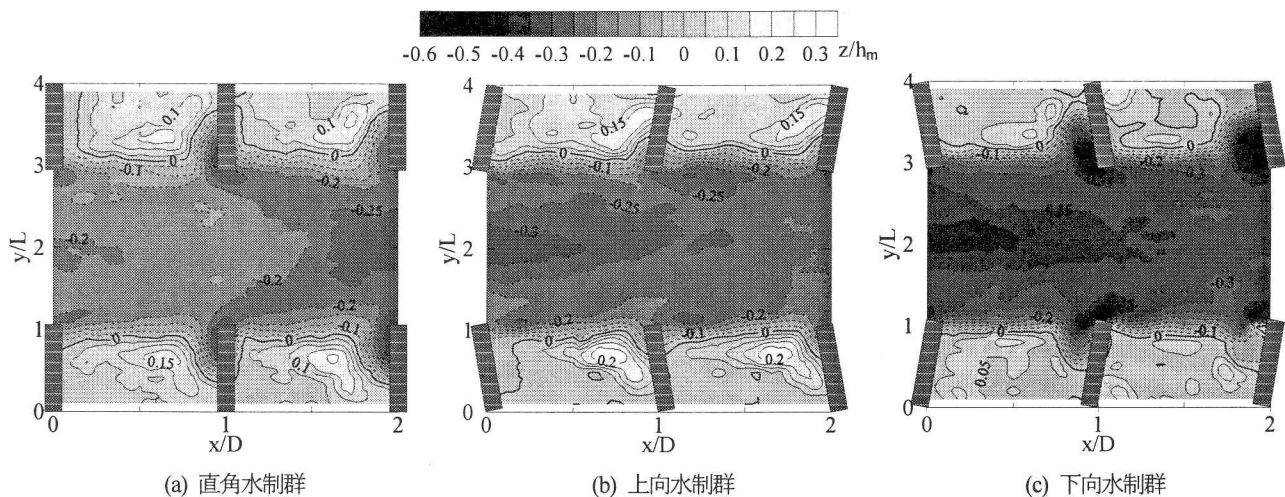


図-3 河床高の等値線

3. 実験結果

3.1 局所洗掘および堆積

水制群の向きが異なった各非越流型水制群の設置に伴って生じる河床変動の、初期河床に対する河床高の等値線を図-3に示す。図中の実線は堆積を、破線は洗掘を表し、堆積厚および洗掘深は基準水深 h_m で無次元化している。

また、図-4～6には河床高の横断分布を詳細に示す。ここでは水制間の河床高の横断形状が流下方向に変化する様子を便宜的に、水制直下流部 ($x/D = 0.0 \sim 0.2$)、水制間中央部 ($x/D = 0.3 \sim 0.7$) および水制直上流部 ($x/D = 0.8 \sim 1.0$) に分けている。

直角水制群では、図-3より水制域では水制前面の先端部に局所洗掘、水制背後では全体的に堆積傾向にあることがわかる。また図-4に示す河床高の横断分布図より、水制域内では水制間中央部の水制先端から水制長の約3%河岸寄りの $y/L = 0.7$ および3.3で極大堆積厚が生じており、その大きさは水深の約18%である。極大洗掘深は水制前面の水制先端付近に生じており水深の約36%であることがわかる。主流部では水制直下流部と直上流部で上に凸の形状を示し、水制間中央部では横断方向にはほぼ一様で洗掘深は水深の約18%である。

上向水制群では、図-3より主流部で全体にわたって洗掘が生じている。水制域では、洗掘および堆積の位置は直角水制群と類似しているが、水制先端部の洗掘は顕著ではないことに特徴がある。図-5の河床高の横断形状は、水制直下流部は主流部でM字型となっているが、水制間中央部と水制直上流部では水路幅全域に

わたってM字型であり、主流部のみを見るとU字型の形態をとっている。また、水制先端部に生じている極大洗掘深は、直角水制群、下向水制群に較べて最も小さく抑えられていることがわかる。

下向き水制に関しては、図-3より主流部では直角水制群および上向水制群と同様に洗掘傾向に在って、洗掘深は最も大きい。水制域内では直角水制群同様、水制前面の先端部に大きな洗掘が生じ、水制背後は堆積傾向に在ることがわかるが、堆積厚は直角水制群と上向水制群に較べて最も小さく抑えられている。図-6の河床高の横断形状は、水制直下流部と水制間中央部ではほぼ同様の形状になっており、水制直上流部の水制先端部において水深の約50%の局所洗掘がみられる。

以上のことから、極大洗掘深は下向水制群で最も大きく、続いて直角水制群、上向水制群も順となること、主流部の洗掘は下向水制群で最も大きくなること、水制域内の堆積厚は下向水制群で最も小さく抑えられることが認められた。これは、下向水制群を設置した場合に、流速は最も速いこと、すなわち流速低減効果は最も小さく、抵抗としての働きが弱いことが理由として考えられる。

3.2 水深変化と水面振動

図-7には、固定床実験で水制群の向きを変化させた時の、水路中央部の水深の流下方向変化を示す。どの向きも水深は流下するに従い低下する傾向に在ることが認められる。全体的に、上向水制群が最も高く、続いて直角水制群、下向水制群の順である。このことから、抵抗は上向水制群で最も大きく、下向水制群で最も小さくなることが予想され、移動床実験での極大洗掘深の大小関係と対応していることがわかる。

直角水制群を水路両岸に設置すると、水制域内に顕著な水面振動が生じることが指摘されている¹⁰⁾が、本

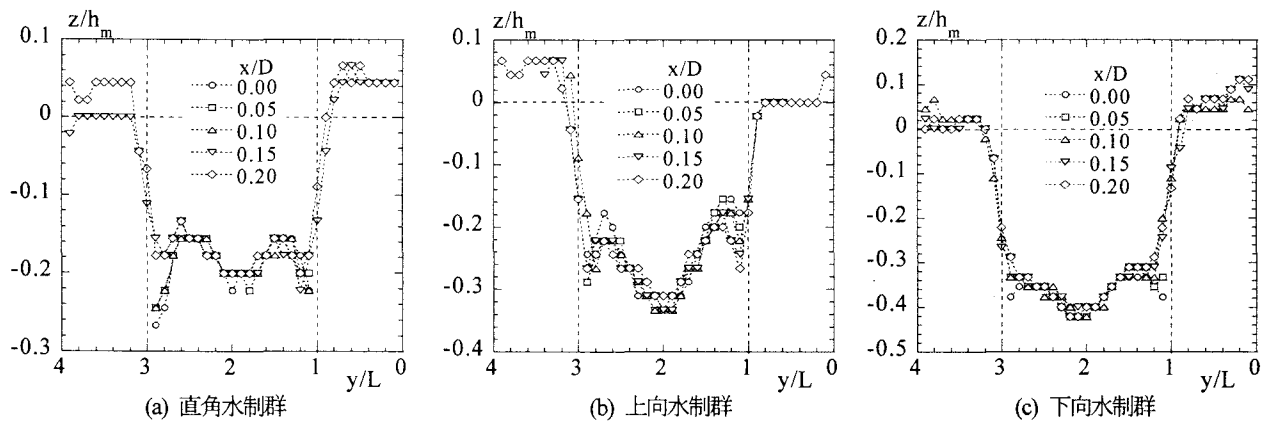


図4 水制直下流部($x/D=0.00-0.20$)における河床高の横断分布

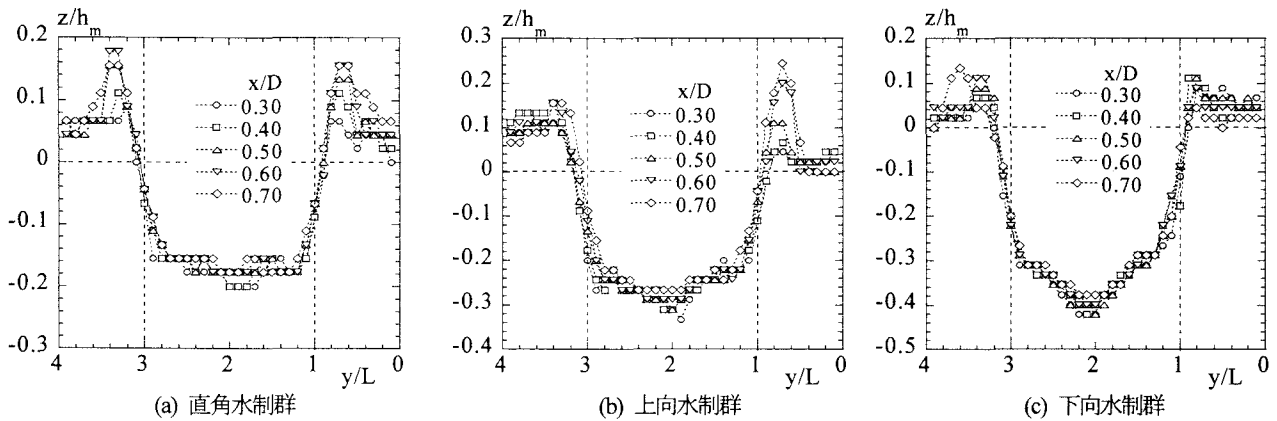


図5 水制間中央部($x/D=0.30-0.70$)における河床高の横断分布

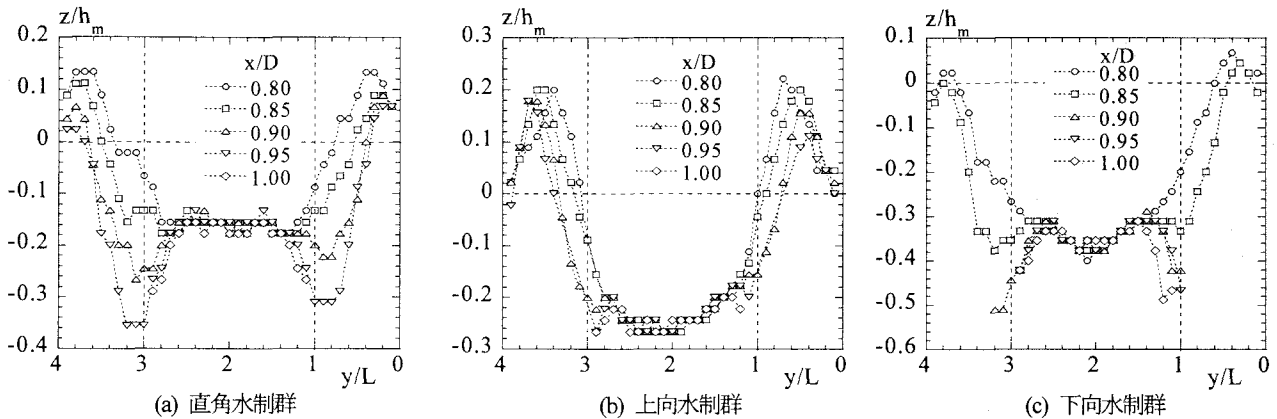


図6 水制直上流部($x/D=0.80-1.00$)における河床高の横断分布

研究においては水制群の向きを変えることによって水制域内の水面振動強度に変化が生じた。その結果を図-8に示す。計測線は水制間中央部である。この図より、水面振動は水路中央から測岸に向かってどの水制群の向きも増加傾向に在ることがわかる。しかしながら水制域内での大きさは上向水制群で最も大きく、下向水制群で最も小さい。下向水制群は上向水制群の約半分に抑えられることが認められた。

3.3 平均流特性

固定床実験において、各水制群の半水深における時

間平均化された速度ベクトルを図-9に示す。すべての水制群において、右岸水制域内全体に時計回りの大規模な鉛直渦が見られる。水制直背後の $x/D=0.2, y/L=0.5$ 付近に着目すると、流速の絶対値は直角水制群に較べて上向水制群と下向水制群の方が大きくなっている。

水制間中央部における主流速の横断分布を図-10に示す。水路中央で流速は最も速く河岸に向かって減少し、水制先端から水制長の約30%水制域内に入ったところから側壁までは逆流の流速が大きくなっていることが認められる。全体的に見ると、どの水制群の向き

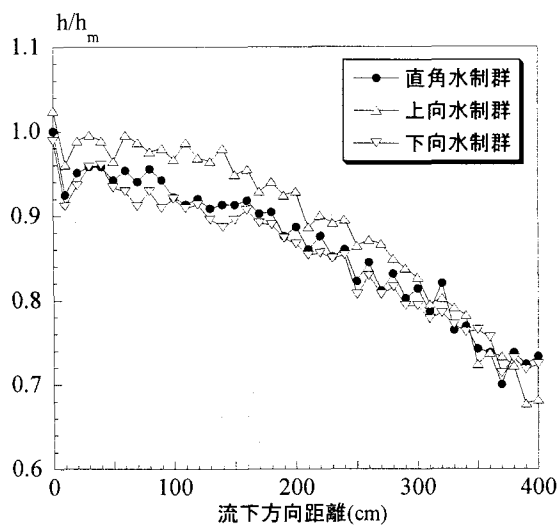


図-7 水深の流下方向変化 ($y/L=2.0$)

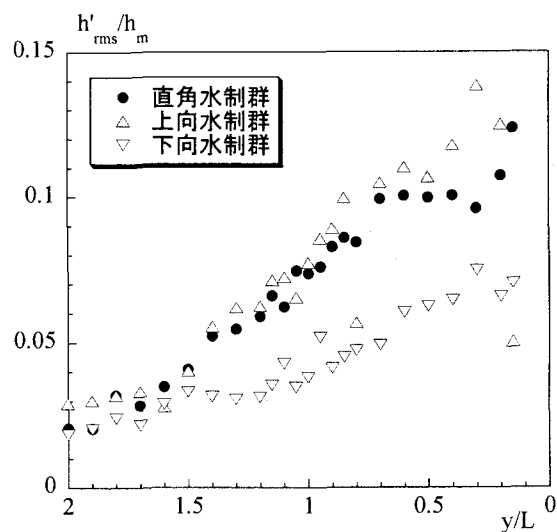


図-8 水面振動強度の横断分布 ($x/D=0.5$)

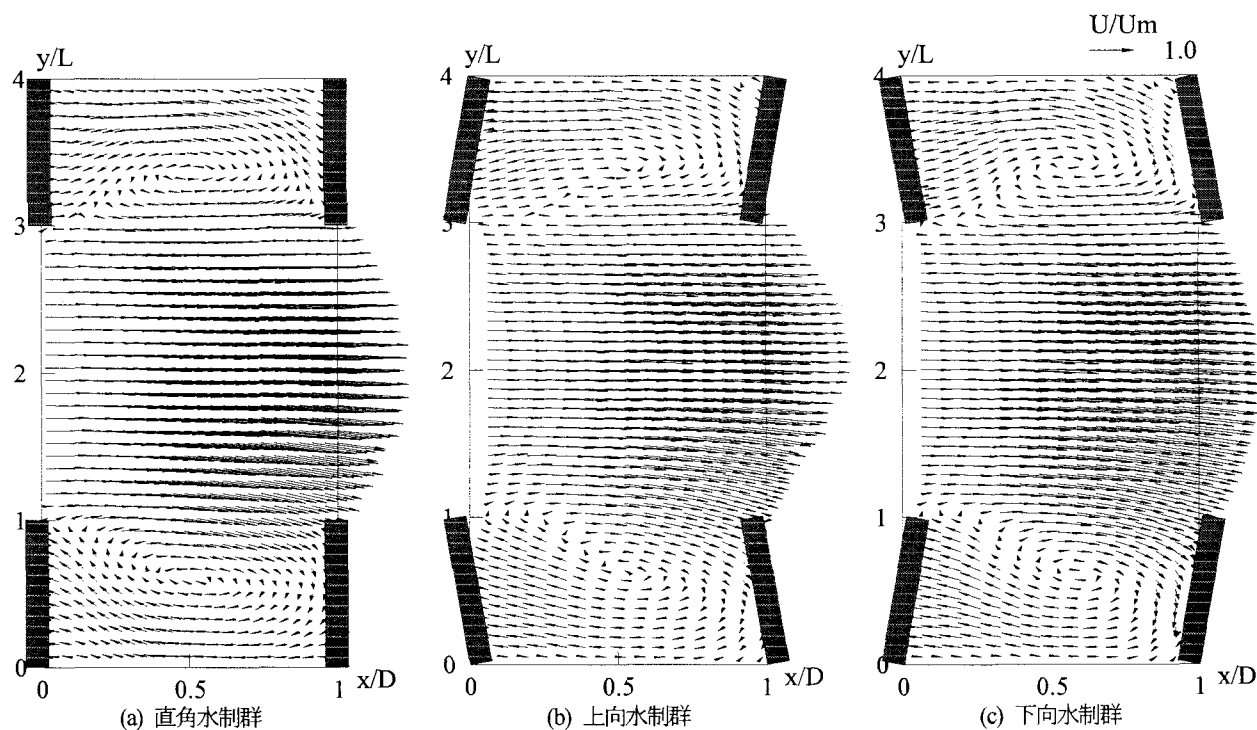


図-9 時間平均流速ベクトル ($z/h_m=0.5$)

も分布形は同様である，しかし主流部の $y/L=1.0 \sim 1.5$ 付近の流速を詳細に見ると，下向水制群が最も速く，上向水制群で最も遅い値を示している．これは移動床実験における極大洗掘深の大きい順と対応しており，流速測定の結果からも水制群の抵抗は下向水制群で最も小さく，上向水制群で最も大きくなることが考えられる．

3.4 乱れ特性

水制群の向きが水制域内外の乱れ強度の空間分布に与える影響を見るために，水制間中央部 ($x/D=0.5$) の主流方向と横断方向の乱れ強度の横断分布をそれぞれ図-11 および 12 に示す．主流方向の乱れ強度は，水

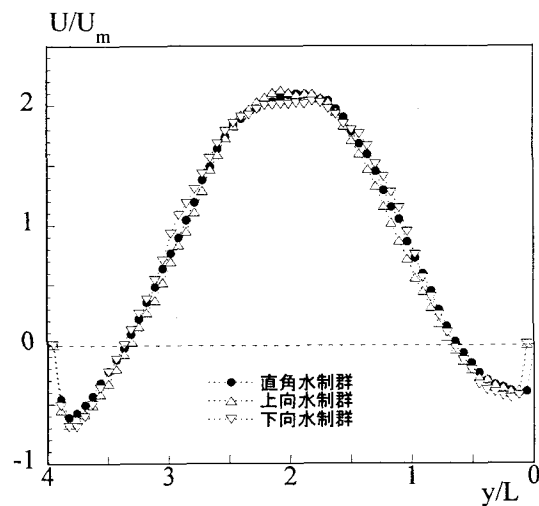


図-10 主流速の横断分布 ($x/D=0.5$)

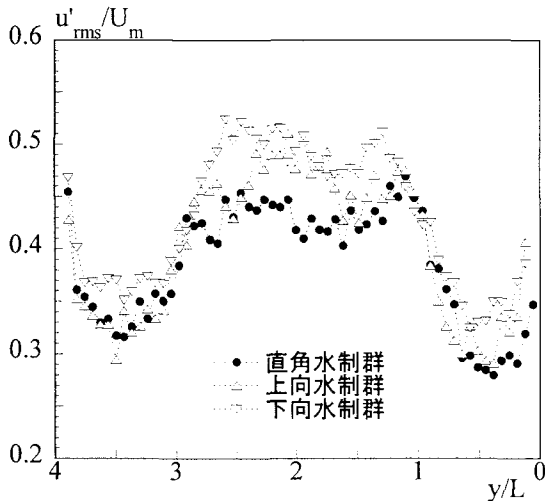


図-11 主流方向乱れ強度の横断分布 ($x/D=0.5$)

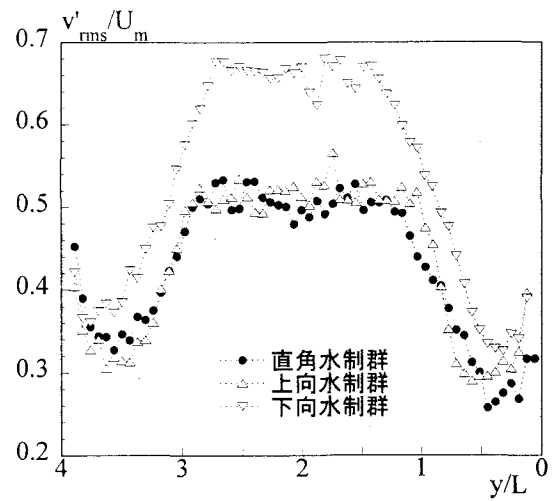


図-12 横断主流方向乱れ強度の横断分布 ($x/D=0.5$)

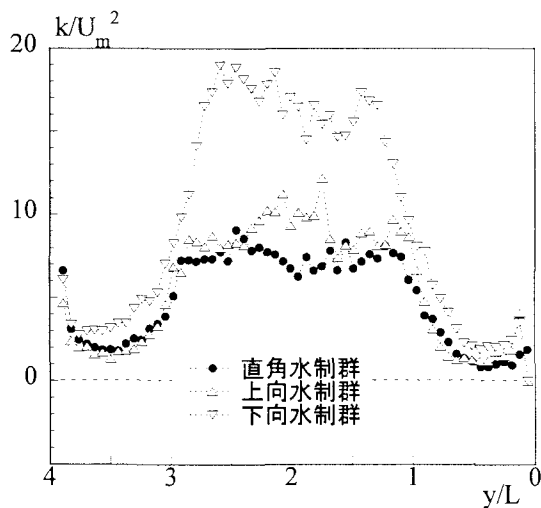


図-13 乱れエネルギー k の横断分布 ($x/D=0.5$)

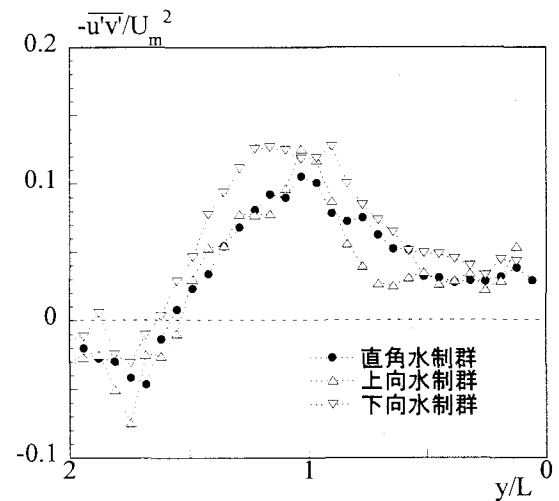


図-14 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断分布 ($x/D=0.5$)

路中央部と水制先端から水制長の半分程度水制域内に入ったところに ($y/L = 0.5$) 極小値が現れ、水制域境界 ($y/L = 1.0$) 付近で変曲点が生じていることがわかる。主流部での大きさは直角水制群が最も小さく、下向水制群と上向水制群は同程度である。水制域内の極小値は多少ばらつきがあるが下向水制群が最も大きく、上向水制群と直角水制群は同程度であることが認められる。

横断方向の乱れ強度は、主流方向の乱れ強度と同様に主流部で強く、水制域境界 ($y/L = 1.0$) から水制長の約 50% 水制域内に入ったところ ($y/L = 0.5$) まで減少し、側壁に向かって増加していることがわかる。その大きさは水路全幅にわたって下向水制群で最も大きく、上向水制群と直角水制群では同程度である。主流部においては下向水制群が直角水制群の約 1.4 倍の値を示している。

水制間中央部の乱れエネルギーの横断分布を図-13

に示す。ここでは鉛直方向の流速測定は行っていないため、 $v' \approx w'$ としている。横断分布形は乱れ強度と同じく主流部で大きく水制域内で減少している。その大きさは水制域および主流部ともに下向水制群で最も大きくなっており、特に主流部では直角水制群の約 2 倍程度にまで達していることがわかる。

乱れエネルギーの発生項であり、乱れによる運動量輸送を表すレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断分布を図-14 に示す。水路右半分 ($y/L = 0.0 \sim 2.0$) のみに着目すると、どの向きの水制群に対しても水制域境界付近で極値を示しており、横断方向の運動量輸送はこの位置に集中していることがわかる。レイノルズ応力の大きさは、乱れエネルギーの大小関係と一致し水制域および主流部ともに下向水制群で最も大きい。これは、水制間中央部 ($x/D = 0.5$) においては流部で高速化し水制域で低速となるのは下向水制群であって、主流速の全般的横断方向変化率が最も大きいためであると考え

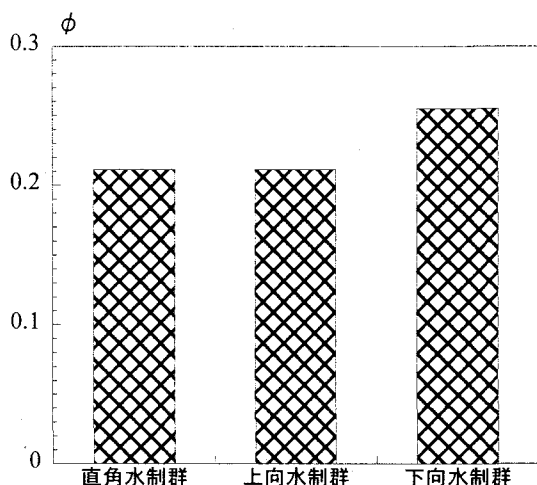


図-15 質量交換率 (x/L=1.0)

られる。

3.5 質量および運動量交換

レイノルズ応力の横断分布から明らかとなった運動量輸送の集中していた水制域と主流部の境界において、栄養塩や浮遊砂等の輸送に寄与していると考えられる質量および運動量輸送を検討する。池田・陳¹³⁾、木村ら¹⁴⁾を参考にし、主流部と水制域の一区間平均の交換率として、無次元質量交換率 ϕ および無次元運動量交換率 θ を次式で定義する。

$$\phi = \frac{1}{\rho U_m D} \int_0^D \rho |v| dx \quad (1)$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U_m^2 D} \int_0^D \rho uv dx \quad (2)$$

ここに、 D ：水制設置間隔である。運動量交換率は絶対値を付けずに評価しており、水制域から主流部へと向かう方向を正としている。

式(1)から得られた水制域境界における質量交換率を図-15に示す。下向水制群で最も大きく、直角水制群と上向水制群は同程度であることがわかる。これは図-8に示した水面振動を考えると、水面振動の小さい方が質量交換が活発なことを示しており、水制群の設置に伴って生じる水面振動は、この位置では質量交換に影響を及ぼしていないと思われる。

式(2)から得られた、水制域境界における運動量交換率を図-16に示す。直角水制群と上向水制群は負の値をとっており、これは主流部から水制域内へと運動量が輸送されることを示している。直角水制群は上向水制群の約1.2倍である。これに対して下向水制群では主流部への輸送が示されているが、その大きさは直角

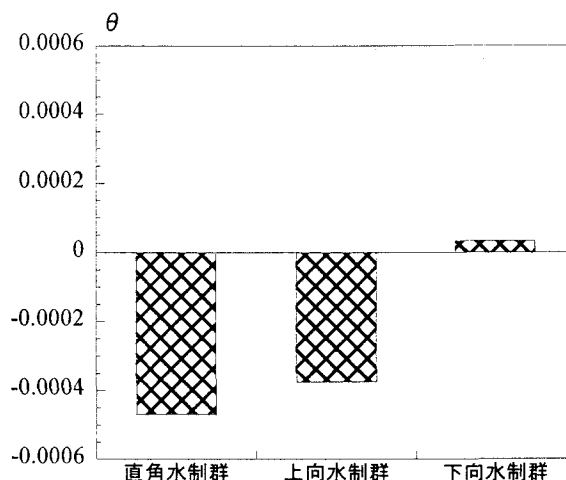


図-16 運動量交換率 (y/L=1.0)

水制群と上向水制群に較べて一桁小さく、この領域での横断方向の主流部と水制域間における運動量輸送はほとんど無いことがわかる。このことは、下向水制群は主流部の流れに対して抵抗としては一番効かないことを示しており、図-10の主流速の増加、図-7の水位低下および図-3～6の極大洗掘深の増大に寄与していると考えられる。また、値が小さく輸送の向きは水制域内から主流方向であるから、主流部の土砂が水制域内に運び込まれないために、水制域内の堆積が直角水制群や上向水制群ほどには進まなかったと考えられる。

4. 結論

本研究では、非越流型水制群の向きが河床変動および局所洗掘に及ぼす影響を実験的に検討し、併せて水制群の向きが主流速および乱れ特性に与える影響について検討し、水制群の向きと抵抗の関係について検討した。得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 動的平衡状態にある河床において非越流型水制群は、極大洗掘深が下向水制群で最も大きく、続いて直角、上向水制の順となる。下向水制群と直角水制群では、水制先端近傍で顕著な洗掘が生じ、上向水制群では滞筋部に洗掘が生じる。水制域内の堆積厚は下向水制群が最も小さく抑えられる。
- (2) 水路中央部の水深は、上向水制群で最も大きく、続いて直角、下向水制群の順である。
- (3) 水制域内に生じる水面振動は下向水制群で最も抑えられており、直角、上向水制群の順で大きくなった。振幅の大きさは、上向水制群は下向水制群の約2倍であった。

- (4) 主流部における水深平均流速は、下向水制群が最も速く、続いて直角、上向水制群の順となる。従って、流速低減効果は下向き、直角、上向水制群の順で大きくなる。
- (5) 水制域境界付近における横断方向の運動量輸送は、直角および上向水制群に較べて下向水制群は非常に小さくなった。このことが下向水制群の流れに対する抵抗を小さくし、主流部の流速を増大させること、また水制域内の土砂の堆積を促進しないことが説明された。

参考文献

- 1) 道上正規, 檜谷 治: 水制周辺の平面二次元河床変動計算に関する研究, 水工学論文集, 第 36 巻, pp.61-66, 1992.
- 2) 福岡捷二, 渡辺明英, 西村達也: 水制工の配置法の研究, 土木学会論文集, pp.27-36, 1992.
- 3) 川口広司, 岡信昌利, 福岡捷二: 越流型水制群に作用する流体力の特性, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.1065-1070, 2000.
- 4) 福岡捷二, 西村達也, 岡信昌利, 川口広司: 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.
- 5) 富永晃宏, 中野義郎, 藤田亨良: 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.
- 6) 富永晃宏, 中野義郎, 伊嶋康二, 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) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 鈴木鉄兵: 越流型連続水制のアスペクト比の変化が河床形状および水理特性に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.769-774, 2005.
- 8) 大本照憲, 平川隆一, 井手賢正: 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.
- 9) 大本照憲, 平川隆一: 越流型水制群を有する開水路流れの三次元構造, 応用力学論文集, Vol.2, pp.665~672, 1999.
- 10) 大本照憲, 平川隆一, 非越流型水制群を伴う開水路流れの水面振動と乱れ特性, 応用力学論文集, Vol.4, pp.533~540, 2001.
- 11) 大本照憲, 平川隆一, 非越流型水制群を有する開水路流れの乱流特性と水面振動, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.469~474, 2002.
- 12) 大本照憲, 平川隆一, 非越流型水制群を伴う開水路流れの水面振動に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.943-949, 2003.
- 13) 陳 飛勇, 池田俊介: 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.
- 14) 木村一郎, 細田 尚, 村本喜雄, 安永 良: 開水路流れにおける死水域内の流体振動に関する水理パラメータの効果, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.779-784, 1995.

(2005 年 4 月 15 日 受付)