

越流型水制群を有する開水路流れの三次元構造

Three-dimensional Structures in an Open Channel Flow with a Series of Submerged Groynes

大本照憲*・平川隆一**

Terunori OHMOTO and Ryuichi HIRAKAWA

*正会員 工博 熊本大学助教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

**学生員 熊本大学大学院生 自然科学研究科前期博士課程 (同上)

Recent studies have shown that a group of submerged groynes 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 submerged groynes on bank erosion, secondary currents and bed configuration in the cases that groynes were positioned facing upstream, downstream and normal to the main flow. The results showed that the groynes facing upstream caused minimum scour along the bank, the maximum scour depth in the main channel bed, and the groynes facing downstream led to the maximum scour along the bank, the minimum one in the main channel bed. In addition, it was found that these bed topography was determined by the momentum transport between the main flow region and submerged groynes region which was characterized by secondary currents.

Key Words : submerged groynes, secondary currents, sediments, bed topography, flood control

1. はじめに

水制は、古代より実施されてきた河岸処理工法で、特に武田信玄や加藤清正に代表される戦国大名によって創意工夫が施され、地方竹馬集や地方凡例録等の地方書に見られる様に近世においてその体系化が図られ、現代に至ったものである^{1), 2), 3)}。

水制は、基本的には河岸近傍の流れに対する粗度としての流速低減効果および水はね作用としての流向制御効果の2つの働きが有ることが知られている。その発展過程は、河川に対する認識や技術水準を鋭敏に反映することが指摘されており³⁾、従来、両者の機能に着目し、河岸浸食および護岸破損の防衛、低水路法線の修正、航路確保等の治水・利水を主目的に利用されてきた。さらに、近年では水制周辺の流れが変化に富むために河岸植生や水棲生物にとって良好な環境を創造することから、河道直線区間においても生態系の保全・修復を目的にした水制の設置が試みられている。

既往の研究成果により、単独非越流型水制や湾曲部に水制群を設置した場合の流れや河床変動に対して計算可能な段階に近づきつつあるが^{4), 5)}、越流型水制周辺における流れの三次元構造については不明

な点が多く残されている^{6), 7), 8)}。直線河道の越流型水制群においては水制周辺の局所洗掘や流れに対して系統立った研究は成されておらず、水制の向きが二次流および流砂に与える影響については明らかにされていない。

著者等⁹⁾は、主流部で顕著な流砂の存在しない越流型水制群を伴う移動床流れにおいては、単独非越流型水制とは異なり、静的平衡状態の極大洗掘深が下向水制で最も大きく、続いて直角、上向水制の順となることを指摘した。また、越流型下向水制群においては、水制域外の高速流体塊が水制上を乗り越えて水制域内に流入し側岸に沿って下降し、水制直上流の前面に沿って水制域外に流出する運動形態を取り、このことが水制前面の局所洗掘を大きくしていることを明らかにした。しかしながら、水制群が越流型の形態を取る場合には、主流部の河床において流砂は存在するのが一般的であり、静的平衡状態には無く、動的状態に在ることが考えられる。

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、越流型水制の向きが河岸の浸食、水制域および主流部における河床変動への影響ならびに水制に起因する二次流の主流速および乱れへの影響について検討し、水制域およ

び主流部の流れの三次元構造および両者の相互作用系について考察が加えられた。

2. 実験装置および方法

実験に用いた水路は、長さ 10m、幅 40cm のアクリル樹脂製可変勾配水路である。固定床実験では、水路床に、幅 18mm、高さ 18mm、長さ 7.5cm および 10cm の直方体の木片で作られた水制を滑面水路床の兩岸に水制長の 2 倍の間隔で設置した。水制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 ($\theta=-10^\circ$) の 3 種である。なお、固定床実験および移動床実験ともに水制群は、兩岸に対称に設置されており、流下方向に 21 基で構成されている。流速測定には、二成分電磁流速計を使用し、流速の主流方向成分と横断方向成分、および横断方向成分と鉛直方向成分の同時計測が同一地点で行われた。計測結果は、サンプリング周波数 100 Hz で AD 変換した後、1 測点 4096 個のデータに関して統計処理が施された。なお、座標系は右岸側の上流から 11 基目の水制根付部の河床位置を原点とし、主流方向に x 軸、横断方向に y 軸、鉛直上方に z 軸を取る。固定床実験の条件を表-1 に示す。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互って厚さ 6 cm で一様に敷均し、幅 18mm、高さ 30mm、長さ 10cm の直方体の木片で作られた水制を、図-1 に示すように 初期河床から高さ $\Delta=9\text{mm}$ 、その間隔が水制長の 2 倍となるように設置した。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-2 の水理条件

で通水し、水制周辺の河床変動が安定していることが観察された通水 120 分経過後に超音波測深器により河床形状を測定した。なお、水制群の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。

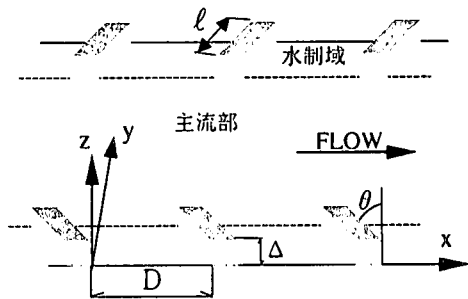


図-1 越流型水制群の配置と座標系

3. 主流速および二次流

兩岸に設置された直角、上向および下向の 3 種の水制群において先頭より 11 基目と 12 基目の水制間における横断面内の主流速の等値線および二次流ベクトルをそれぞれ図-2～4 に示す。

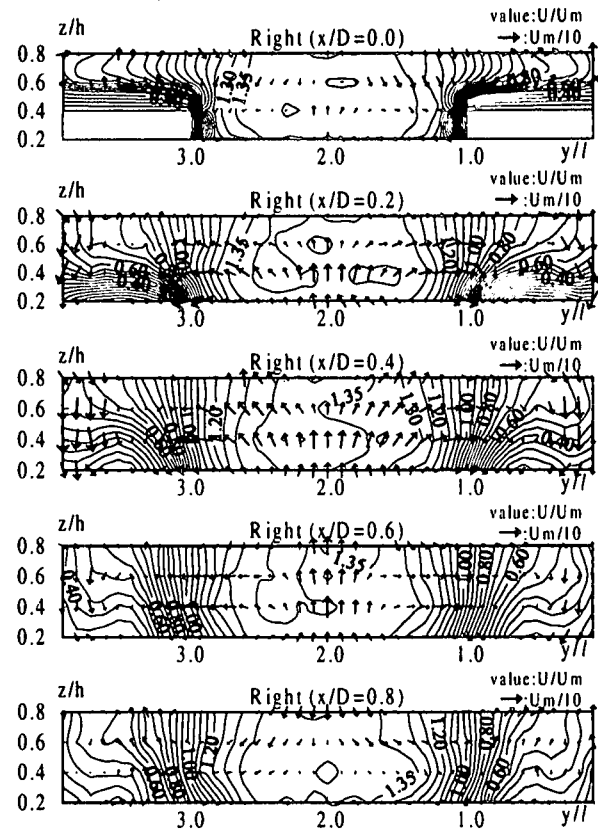


図-2 主流速の等値線と二次流ベクトル(直角水制)

表-1 固定床実験の条件

流量	$Q=5.82(\ell/\text{sec})$
基準水深	$H=4.5\text{cm}$
平均流速	$U_m=32.3\text{cm/sec}$
水路勾配	$I_o=1/1000$
レイノルズ数	$Re=14550$
フルート数	$Fr=0.49$

表-2 移動床実験の条件

流量	$Q=5.82(\ell/\text{sec})$
基準水深	$H=4.5\text{cm}$
平均流速	$U_m=32.3\text{cm/sec}$
水路勾配	$I_o=1/1000$
レイノルズ数	$Re=14550$
フルート数	$Fr=0.49$

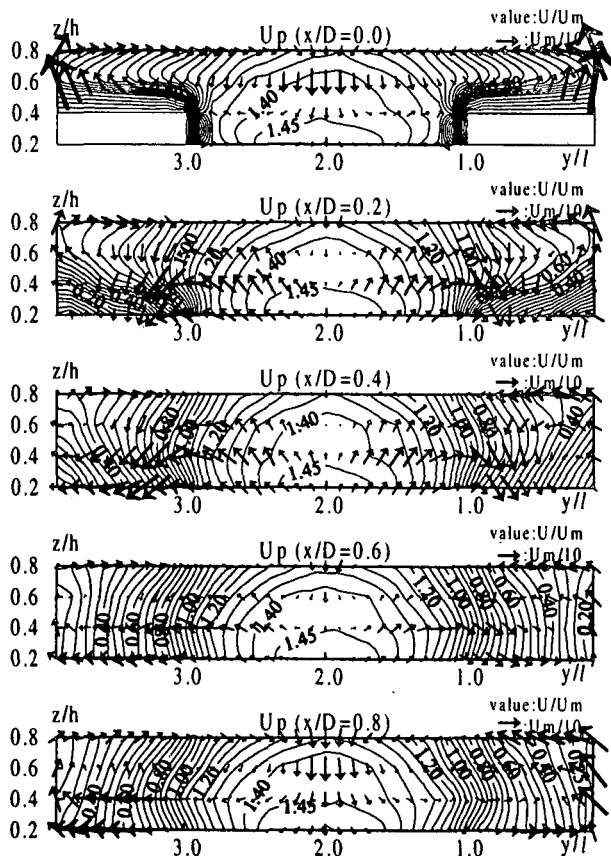


図-3 主流速の等値線と二次流ベクトル(上向水制)

図-2から直角水制における主流速は、主流部の $y/l=1.0\sim3.0$ では鉛直および横断方向に顕著な変化は無く一様化し、 $y/l=1.0\sim1.5$ および $y/l=2.5\sim3.0$ の水制先端から水深スケール主流部側に入った領域では鉛直方向に一様で、横断方向の変化が卓越している。また、水制域において主流速の等値線は、流下とともに河岸隅角部に突出し、水制域の中央に当たる $y/l=0.5$ および 3.5 において鉛直上方に突出する傾向の在ることが見受けられる。二次流は、主流部から水制域の方向に向きを取り、河岸で下降流の存在することが認められる。水制域において主流速の等値線が上記の傾向を示したのは、二次流により運動量が河岸向きに、さらには河岸付近の底部に輸送されたことが原因と考えられ、この関係は後述の下向き水制でより明瞭に現れる。

図-3より上向水制の主流速は、主流部の $y/l=1.0\sim3.0$ では流下方向に顕著な変化は無く、水路中央の河床付近が高速域に当たり、鉛直上方に低減していることに特徴がある。また、水制域において主流速は、直角水制に較べて鉛直方向の流速変化は小さく、横断方向に変化の卓越していることが注目される。さらに、直角水制、下向水制に較べて上向水制の河岸近傍における流速低減効果が最も高い反面、主流部において高速化し、特に河床付近においてその効果の大きいことが認められる。また、二次流ベクトルから、主流部の流れは $x/D=0.6\sim1.0$ の水

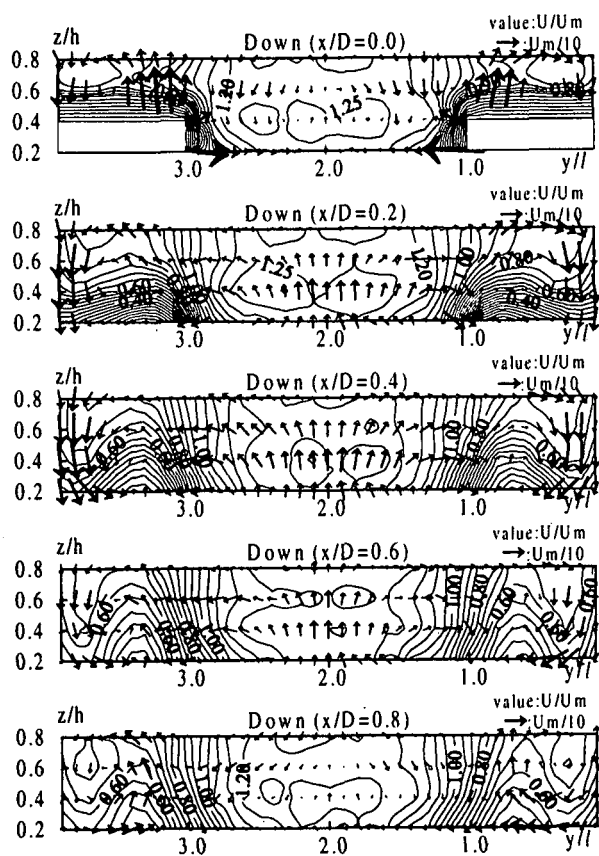


図-4 主流速の等値線と二次流ベクトル(下向水制)

路中央において下降流が現れ、水面付近が収束域、河床が発散域に当たることが読み取れる。このことが主流部の河床付近で高速流となり、主流部の高速流体は全般的には下層から水制域内に流入するためには水制域で主流速が鉛直方向に一様化したことが考えられる。また、水制域において二次流ベクトルは、河床付近で河岸向き、水面付近では水路中央に向きを示し、水制直上流の $x/D=0.8$ の河岸沿では明瞭な上昇流、水制先端付近で下降流が観察される。水制長の水路幅に対する比が25%と比較的大きい場合の上向越流水制群では、主流部および水制域を合わせた全般的流れは、水路中央で下降流、河岸で上昇流、水面付近で収束域、河床付近で河岸向きとなる扁平な一對の二次流セルに規定されることが認められる。

下向水制の主流速は、図-4より直角水制および上向水制に較べて、主流部では最も小さくその空間変化は直角水制に類似していること、および水制域内においては河岸付近で最も大きくなることが分かる。また、水制域内において主流速の等値線は、河岸に沿って下向きに凸、さらに水制中央より若干水制先端寄りの $y/l=0.6, 3.4$ 付近において上向きに凸の形状を示していることが分かる。二次流は、 $x/D=0.2\sim0.6$ の主流部では全般的に上昇流、水制域では河岸沿いに強い下降流、水制中央付近において上昇流の形態を取ることが認められる。水制域の中央における上昇流は、主流部から下向水制を乗り越

えて水制域内に流入した高速流体塊が河岸を下降した後、河床に沿って主流部へ流出する流れと主流部から水制域に流入する流れがこの位置で収束するために発生したことが考えられる。

なお、辻本等¹⁰⁾により螺旋流の制御として検討されている斜め栈粗度との比較では、上向水制群はV型斜め栈粗度に対して二次流セルの形態は類似しているが、水制域内の水制先端付近で下降流が生ずる点で異なる。また、下向水制群はΛ型斜め栈粗度とは、水制域中央で上昇流が現れる点で異なる。全般的に、越流型水制群を伴う流れは、斜め栈粗度を有する流れに較べて、より複雑な運動形態を示す。その理由として斜め栈粗度は水路全幅を横断する構造物の形態を取り、粗度の流れに与える影響が比較的横断方向に均質であるのに対して、越流型水制群を伴う流れでは粗度効果が水制域に集中し、主流部と水制域で特性の異なる流れの相互干渉によって全体の流れが構成されていることによると考えられる。

4. 乱れ特性

水制域内外における乱れエネルギーの空間分布が水制の向きにより如何なる影響を受けるかを見るため、一例として水制間のほぼ中央位置 ($x/D=0.6$) における乱れエネルギーの横断分布を図-5~7に示す。なお、無次元化に用いた平均流エネルギーには、断面平均流速が取られている。乱れエネルギーの極大は、直角水制と下向水制では、水制先端より若干水制域側に入った $y/l=0.8$ および 3.2 において、上向水制では河岸および水制先端で現れることが分かる。水制の向きによる乱れエネルギーの違いについては水制域および主流部ともにその大きさが下向水制で最も大きく、続いて直角水制、上向水制の順になっている。

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ズル応力 $-\overline{u'v'}$ および $-\overline{u'w'}$ の横

断分布を、それぞれ図-8~10および図-11~13に示す。レイノズル応力 $-\overline{u'v'}$ は、直角水制と下向水制では水制先端付近で極値を示し、横断方向の運動量輸送はこの位置に集中しているのに対して、上向水制では水制先端および河岸付近で極値を示し水制域全体に分布していることが見受けられる。また、レイノズル応力 $-\overline{u'w'}$ は、直角水制および下向水制ではその極大値が水制先端から水制長の30~40%程水制域内に入った位置で現れ、レイノズル応力 $-\overline{u'v'}$ と同程度の大きさであることが分かる。一方、上向水制では直角・下向水制に較べてレイノズル応力 $-\overline{u'w'}$ は複雑な横断分布形状を示し、河床付近では水制先端付近で極大値を示し、半水深付近では河岸付近で極大、水面付近では水制先端付近の主流部側で負の極値となることがわかる。レイノズル応力 $-\overline{u'v'}$ および $-\overline{u'w'}$ 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で最も大きく、続いて直角水制、上向水制の順になっている。乱れエネルギーおよびレイノズル応力が水制の向きによってこのような違いが現れたのは、水制域および主流部における平均流場の三次元的構造と密接な関係がある。上向水制と下向水制について比較すれば、主流部で高速化し水制域で低速となるのは上向水制であり、主流速の全般的横断変化率は下向水制に較べて大きいために、レイノズル応力 $-\overline{u'v'}$ の大小関係と一見した所では矛盾するように考えられる。しかし、この矛盾は水制域および主流部において上向水制と下向水制では二次流構造およびその影響を受けて主流速および乱れの強さの空間分布が大きく異なる点に着目すれば説明可能となる。図-14~16は、レイノズル応力 $-\overline{u'v'}$ の収支式において発生項の中の支配因子である $\overline{v' \cdot dU/dy}$ の横断分布を示す。レイノズル応力 $-\overline{u'v'}$ の発生項は、何れの水制群も主流部では小さく、水制域境界の $y/l=1.0$ および 3.0 付近において極大値を示し、上向水制群のみ河岸近傍に極大値のあることが分かる。

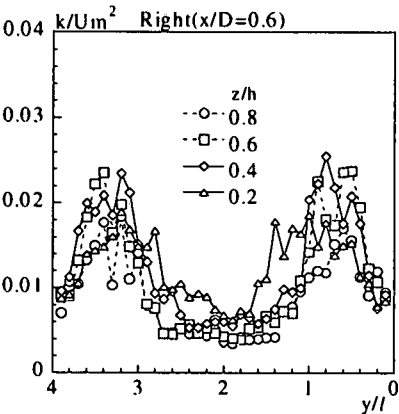


図-5 乱れエネルギーの横断分布 (直角水制)

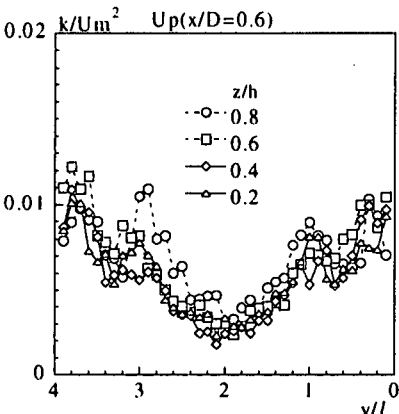


図-6 乱れエネルギーの横断分布 (上向水制)

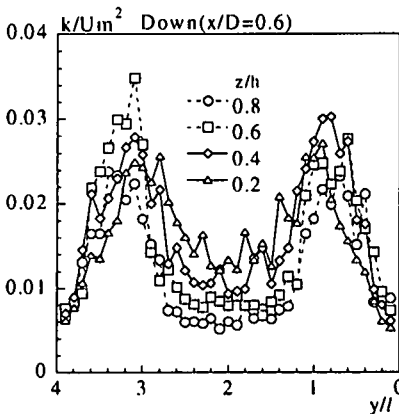


図-7 乱れエネルギーの横断分布 (下向水制)

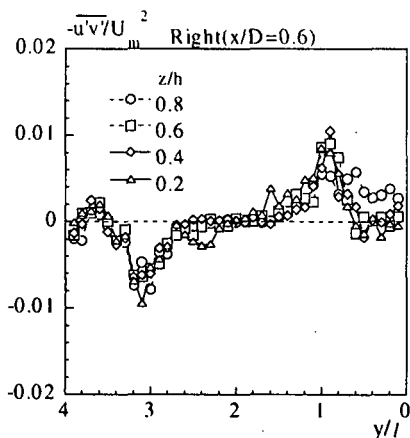


図-8 $-\overline{u'v'}/U_m^2$ の横断分布
(直角水制)

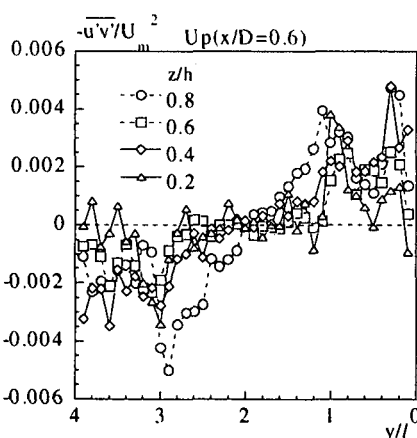


図-9 $-\overline{u'v'}/U_m^2$ の横断分布
(上向水制)

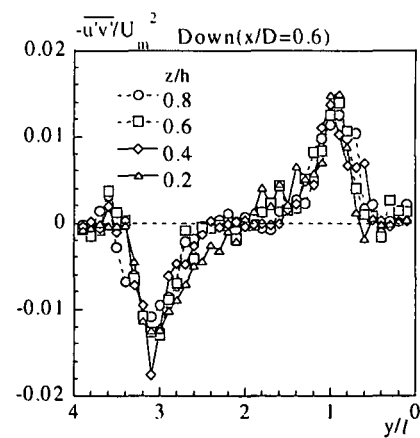


図-10 $-\overline{u'v'}/U_m^2$ の横断分布
(下向水制)

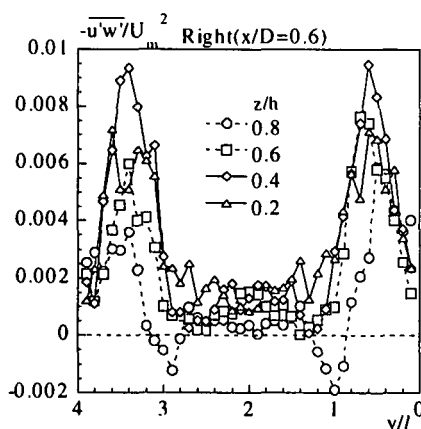


図-11 $-\overline{u'w'}/U_m^2$ の横断分布
(直角水制)

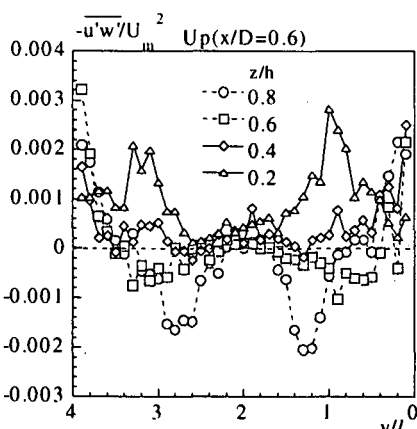


図-12 $-\overline{u'w'}/U_m^2$ の横断分布
(上向水制)

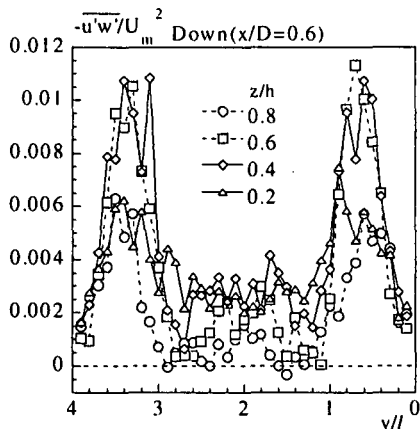


図-13 $-\overline{u'w'}/U_m^2$ の横断分布
(下向水制)

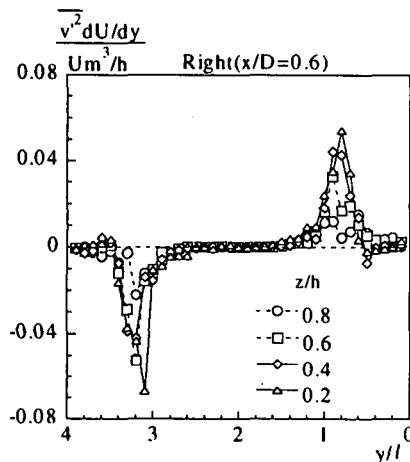


図-14 $\overline{v'^2} dU/dy$ の横断分布
(直角水制)

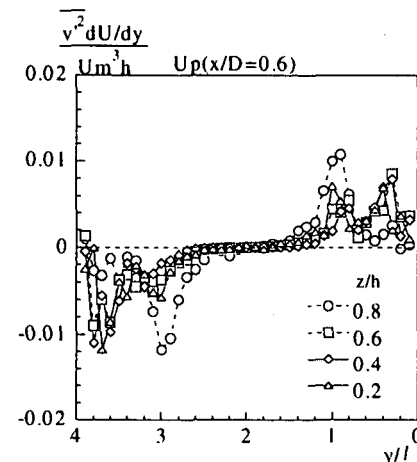


図-15 $\overline{v'^2} dU/dy$ の横断分布
(上向水制)

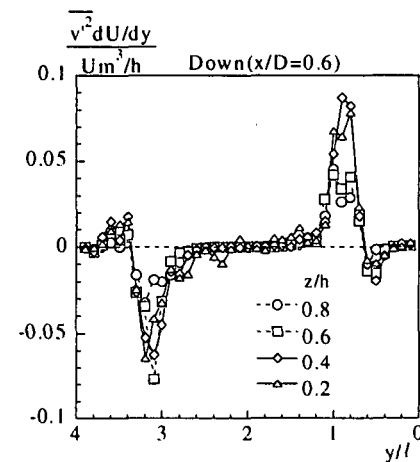


図-16 $\overline{v'^2} dU/dy$ の横断分布
(下向水制)

また、発生項の大きさはレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の大きさに対応しており、下向き水制で最も大きく、直角水制、上向水制の順になっている。

上向水制群の水制域では下層において主流部からの高速流体塊の水制域への流入、上層では河岸に沿って上昇した低速流体塊の主流部への流出が見られ、このために水制域では主流速は鉛直方向に一様化、横断方向には河岸方向に低減する。このことから、

上向水制ではレイノルズ応力および乱れエネルギーは小さくなる傾向にあることが考えられる。

一方、下向水制では、主流部から下向水制を乗り越えて上層から水制域内に流入した高速流体塊が河岸に沿って下降した後、河床に沿って主流部に向けて流出する流れと主流部から下層に沿って水制域に流入する流れが水制中央より若干水制先端よりで収

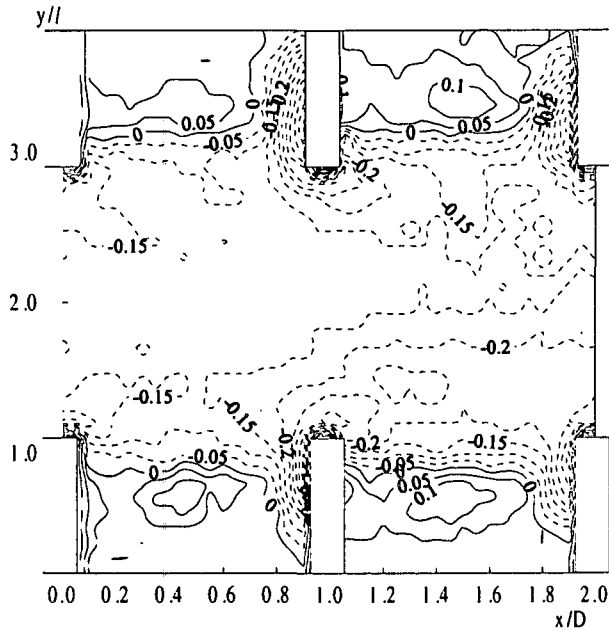


図-17 河床高の等値線（直角水制）

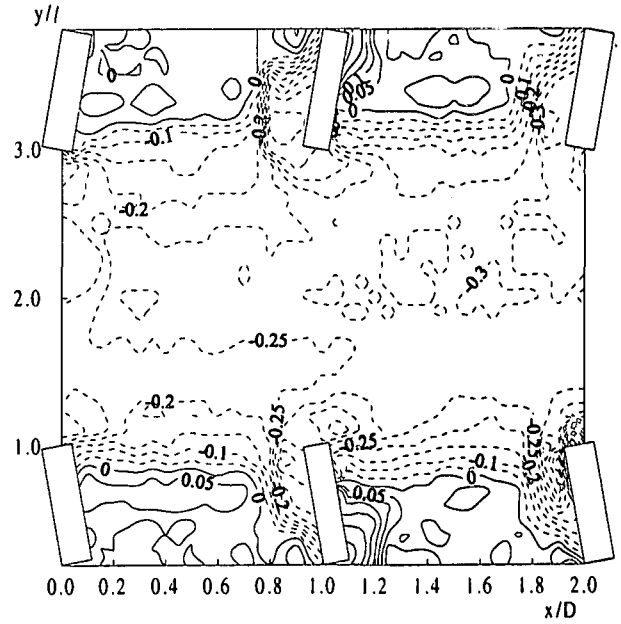


図-18 河床高の等値線（上向水制）

束し、この位置で上昇流が発生する。このために、上向水制に較べて下向水制では主流部と水制域の主流速差が相対的に小さいにもかかわらず、主流速は局所的に水制先端付近で横断変化が大きく、鉛直変化も同様に上昇流発生位置の近傍で大きくなり、レイノルズ応力および乱れエネルギーも強められることになる。

5. 局所洗掘および堆積

各越流型水制群の設置に伴って生じる河床変動の平面形状に対する河床高等値線を図-17～19に示す。図中の実線は堆積、破線は洗掘を表し、洗掘深および堆積厚は初期水深で無次元化されている。等高線図は、いずれも水制上流端から15基目～17基目の間の河床高を示す。なお、水制高さは、当初、固定床流れの実験条件に一致させて18mmとしたが、水制周辺の局所洗掘深が大きくなり、水制の転倒等の不都合が生じたために9mmとした。そのため、水制高の水深に対する比が0.2は一般的に施工例が0.2～0.4であるのに対応している⁶⁾。

また、河床高の横断分布を詳細に示したものが図-20～22である。水制間において河床高の横断形状が流下方向に変化する様子は、水制直下流部 ($x/D=0\sim0.2$)、水制間中央部 ($x/D=0.3\sim0.7$) および水制直上流部 ($x/D=0.8\sim1.0$) に便宜的に仕分けしている。

直角水制においては、図-17より全般的に主流部では洗掘傾向にあり、水制域では水制前面のとりわけ水制先端において洗掘深は大きく、水制背後で

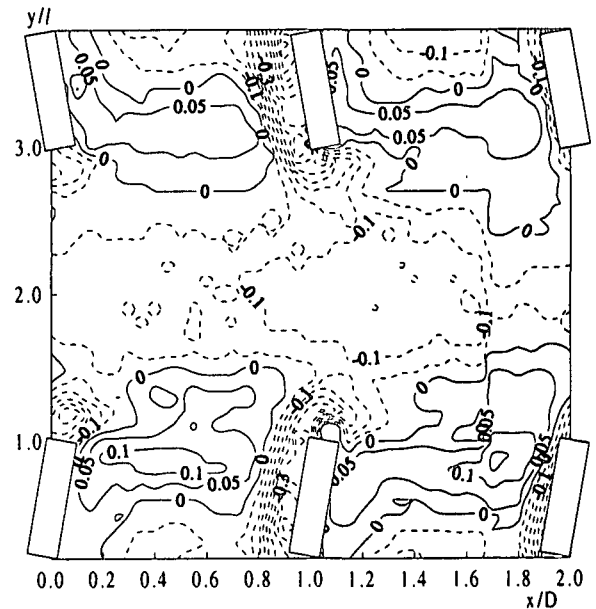


図-19 河床高の等値線（下向水制）

は全般的に堆積傾向にあることがわかる。また、河床高の横断分布は、図-20より主流部では水制直下流部および直上流部で上に凸の形状を示し水制先端付近で洗掘深は大きく、水制間中央部では一様で洗掘深は水深の約14%である。水制域では、水制直下流部および水制間中央部において水制先端から水制長の約30%河岸側寄りの $y/l=0.7$ および3.3で極大堆積厚が水深の10%程度、極大洗掘深は水制前面において水深の約55%であることが分かる。

上向水制に関しては、図-18より主流部で前面に亘って顕著な洗掘があり直角水制および下向水制

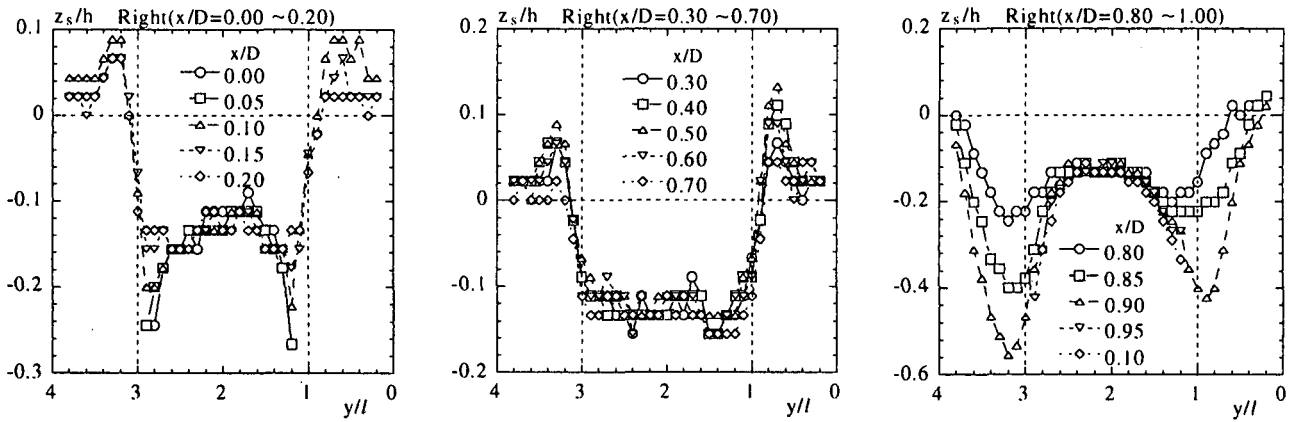


図-20 河床高の横断分布（直角水制）

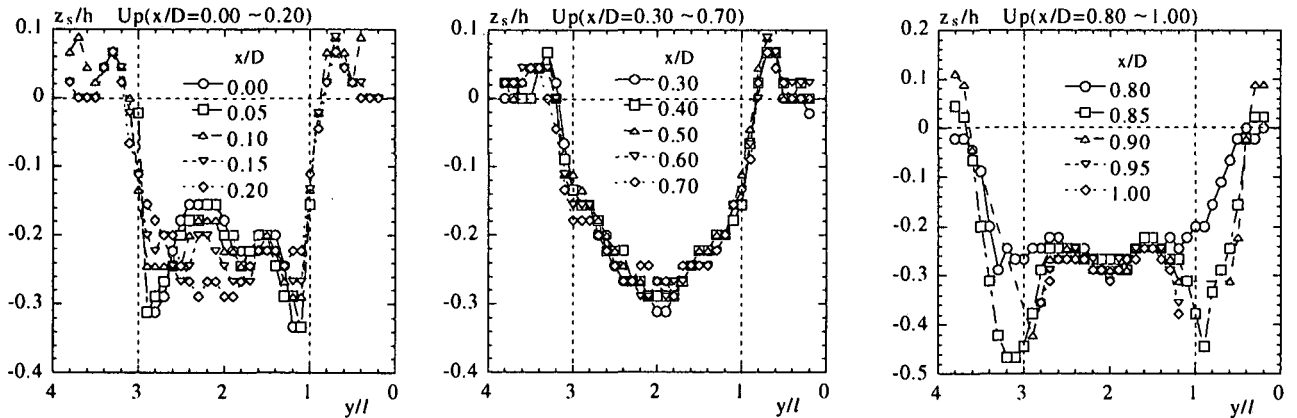


図-21 河床高の横断分布（上向水制）

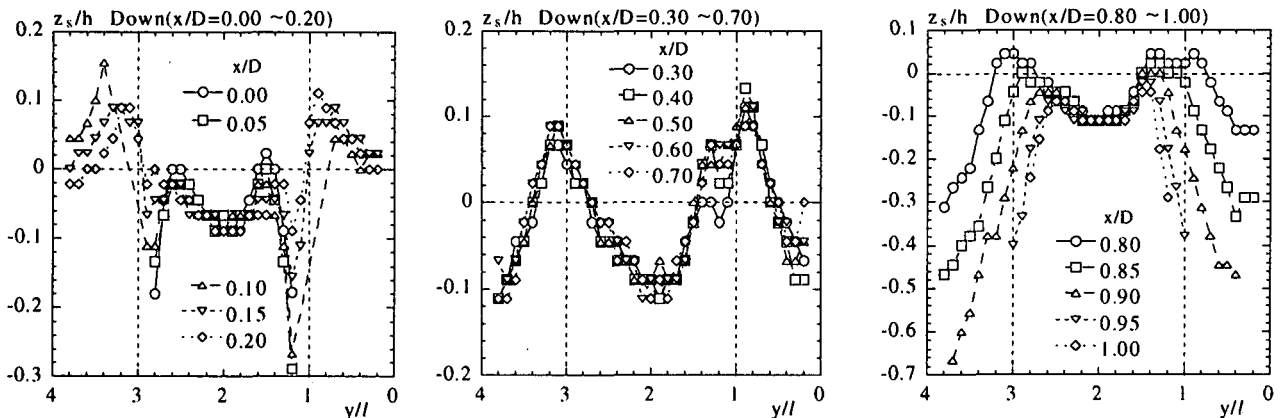


図-22 河床高の横断分布（下向水制）

に較べて最も洗掘深が大きい。また、水制域においては、洗掘および堆積の位置はほぼ直角水制の場合に類似しているが、水制根付けで堆積傾向であることに特徴がある。河床高の横断形状は、図-21より水制直下流部および水制直上流部においては水制先端付近で極大洗掘深が現れ、その大きさは水制直上流で $z_s/h = -0.48$ で直角水制の場合に較べて小さい。また、水制間中央部では、河床高の横断形状は流下方向に相似形を示し、横断方向に関する河床高の高低差は、直角水制、下向水制に較べて大きい。上向水制は、主流速および二次流の空間分布から河岸近傍における流速低減効果が他の水制に較べて大

きく、その反面主流部で高速化することが認められた。このことが、掃流力の横断方向変化を水制間中央部で大きくし、河床高の高低差が大きくなった主因であると考えられる。

下向水制に関しては、図-19より主流部では直角水制および上向水制と同様に洗掘傾向に在るが、洗掘深は最も小さい。水制域では河床は水制前面および河岸に沿って洗掘され、それ以外では堆積傾向にあることが分かる。図-22より河床高の横断形状は、水制直下流部においては直角水制、上向水制に較べて主流部の河床洗掘深は全般的に小さく、水制域内の堆積厚は大きい。水制間中央においては、河

床高の横断形状は、流下方向に相似形を示し、主流部の極大洗掘深と水制域内の河岸に沿って発達した洗掘の深さは同程度であり、水制域と主流部の境界近傍に形成された堆積厚さは極大洗掘深と同規模であることが分かる。水制直上流部における河床高の横断形状は、直角水制および上向水制では W 字形に近い形状であるのに対して、下向水制では M 字形に近く上向水制とは対称的な形状である。また、下向水制では河岸に沿った極大洗掘深は、水制前面に近づくに従って増大する傾向にあることが認められる。越流型下向水制群においては、水制域外的高速流体塊が水制上を乗り越えて水制域内に流入し河岸に沿って下降し、水制直上流の前面に沿って水制域外に流出する運動形態を取り、このことが水制前面の局所洗掘を大きくしていることは前報と同様であるが、本研究では特に水制前面の根付部付近で極大洗掘深が現れることが新たに見出され、この根付け部付近では河岸沿いを下降した流れの集中することが認められた。

6. まとめ

本研究では、主流部において掃流砂の存在する動的平衡に近い状態で、越流型水制群に起因する二次流が主流速および乱れ特性に与える影響について検討し、併せて越流型水制の向きが河岸の浸食、水制域および主流部における河床変動への影響、局所洗掘と平均流場の関係について考察した。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

(1) 動的平衡状態にある河床において越流型水制群は、単独非越流型水制とは異なり、極大洗掘深が下向水制で最も大きく、続いて直角、上向水制の順となる。下向水制では水制前面、根付部および河岸沿いに顕著な洗掘、水制間中央部における主流部と水制域の境界近傍に堆積が、上向水制では主流部に滯筋、水制先端近傍に洗掘、河岸で堆積が生じる。

(2) 越流型水制群においては水制の向きによらず水制間中央部で河床洗掘の横断形状は流下方向に相似形を示す。

(3) 上向水制の場合、主流部の中心で収束した流れは下降流となり、この高速流体塊は水制間の下層

に沿って水制域に流入し、河岸に沿って上昇した後、一部は水制域上層から主流部に、その他は水制を乗り越えて主流部に流出する。

(4) 下向水制の場合、主流部的高速流体塊は水制上を乗り越えて、または水制間の上層から水制域内に流入し、河岸に沿って下降した後、水制直上流の前面に沿って水制域外に流出する運動形態を取り、このことが河岸および水制前面さらには水制根付部の局所洗掘を大きくしている

(5) 水制域において流速変動に伴う運動量輸送および乱れエネルギーの発生は、下向水制で最も大きく、続いて直角、上向水制の順となる。この乱れ特性が水制域内における平均流場の三次元構造との関連によって説明された。

参考文献

- 1) 中野嘉太郎編：加藤清正伝、隆文館発行、1909。(青潮社復刊 1979)
- 2) 真田秀吉：日本水制工論、岩波書店、1932。
- 3) 山本晃一：日本の水制、山海堂、1996。
- 4) 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、第 36 巻水工学論文集、pp. 61-66、1992。
- 5) 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。
- 6) 秋草勲、吉川秀夫、坂上義二郎、芦田和男、土屋昭彦：水制に関する研究、土木研究所報告第 107 号、1960。
- 7) 河原能久、彭 静、藤井和之：越流型水制工を有する流れの 3 次元数値解析、第 3 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. 17-22、1997。
- 8) 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、第 42 巻水工学論文集、pp. 997-1003、1998。
- 9) 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、第 42 巻水工学論文集、pp. 1003-1008、1998。
- 10) 辻本哲郎、宮垣圭吾、森田優子：栈粗度の斜め配置による開水路流れの制御、第 36 巻水工学論文集、pp. 259-264、1992。

(1999 年 4 月 23 日受付)