

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

Effects of Water Surface oscillation on Flow Characteristics in Open-channel Flow with Spur Dikes

大本照憲*, 平川隆一**

Terunori Ohmoto, Ryuichi Hirakawa

*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丁目39-1)

**工修, 熊本大学大学院生, 自然科学研究科 (同上)

Spur dikes have been used as structures to suppress bank erosion by flood flow, waves generated by ship and to maintain flow depth for a navigation channel. Recently, it's noticed that they have functions to produce diversified attractive environments in river. In this study, experiments were executed to clarify water and momentum exchange between main flow and non-submerged spur-dikes region. The results showed that prominent water surface variations happened in an arrangement of spur-dikes and the variations obviously correlated with velocity fluctuations, but did not have influence on Reynolds stress.

Key Words : spur dikes, water surface oscillation, turbulence, momentum transport

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あり, 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よう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)~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つの働きがあ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御, 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生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.

連続越流型水制群に関しては, 越流型水制群の向きが水制域および主流域の河床変動や流れの三次元構造に与える影響についての研究^{4)~5)}がある. 非越流型水制群に関しては, 固定床直線水路に単一水制を設置して水制周りの流れを調べたものや水路片岸に複数の水制を設置したもの⁶⁾, 水制群の設置間隔を変化させたもの⁷⁾などがある. しかしながら, 水制を設置することによって水制域に水面振動が発生した場合には不明な点が多く, 水面振動の流れ場に与える影響について検討した研究や, 流速と水面振動の同時計測に基づいた検討はほとんど行わ

れていない.

本研究では水制群先端部の1基目と2基目の水制間隔を系統的に変化させることによって水面振動が大きく異なることに着目し, 水制中央部において水面振動が平均流特性や乱れ特性, ならびに水制域と主流域の境界面における運動量輸送に与える影響について検討を行った.

2. 実験装置および実験方法

本実験で使用した水路は全長10m, 幅40cmの亚克力樹脂製の可変勾配型循環式水路で, 路床勾配 $i_b=1/1000$

とした. 水路には水制として直方体のステンレス片を両岸に設置した. 水制の大きさは長さ $L=10\text{cm}$, 高さ $H=7.5\text{cm}$, 幅 $B=2\text{cm}$ である. 水制は, 水制長の2倍の水制間隔 $D=20\text{cm}$ で, 両岸に対して直角に其々21基ずつ設置されている. 実験条件を表-1に示す. 実験ケース名は先頭の文字をR, 2番目の数字は水制の上流から1~2基間の水制間隔を表す. 流量 $Q=2.0\text{l/s}$ の定常流量を通水し, 11基目の水制設置断面水路中央の水深を4cmとした.

流速の計測システムは, 光源に空冷式ダブルパルスYAGレーザ(出力25mJ)を用い, シート光の厚さを2mm, 幅を8cm, パルス間隔を600 μs に設定し, 水路側方から壁面に垂直に照射した. レーザ光とCCDカメラ(ピクセル分解能1008 $\times$ 1018)を同期させて読み込まれた可視化画像は, 30fps (frame per second), 960 $\times$ 1018 (pixel)のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録され, PIV法によって処理された. ここ

表-1 実験条件

ケース	R-20	R-30
水路勾配 i	1/1000	
流量 $Q(l/s)$	2.0	
水路幅 (cm)	40	
水深 h_m (cm)	4	
水制長 L (cm)	10	
水制高 H (cm)	7.5	
水制設置間隔 D (cm)	(1~2 基間) 20	30
	(2 基目以降)	20
代表流速 U_m (cm/s)	25.0	
フルード数 Fr	0.36	

に、画像の 1pixel サイズは、0.093mm である。流速のサンプリング周波数は 15Hz、1 計測面での画像データは 1000 枚、計測時間は、33.3sec であった。なお、トレーサとして粒径 30 μ m、比重 1.02 のナイロン粒子を使用した。

水面変動と流速変動の同時計測には、高精度超音波変位計 (KEYENCE 製 UD-500) と電磁流速計 (KENEK 製 VM-802M) を使用した。その際、超音波変位計をそのまま使用すると空間分解能は 2cm 程度だったため、センサをアルミ製の円筒に装着し、空間分解能を 8mm まで向上させている。計測結果は、サンプリング周波数 100Hz 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、計測位置は、PIV、電磁流速計共に水制群上流から 11 基~12 基間であり、何れも底面から 2cm である。座標系は図-1 に示す様に、水制群の右岸根付け部を原点とし、流下方向を x 軸、横断方向を y 軸としている。

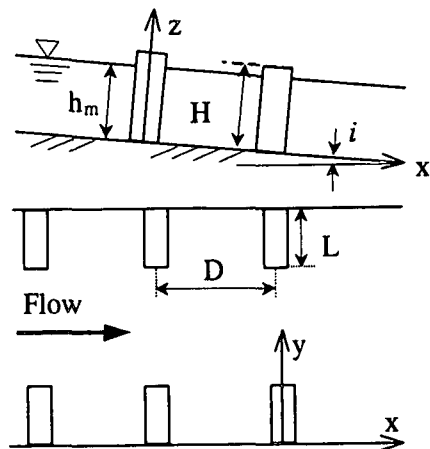


図-1 水制配置図

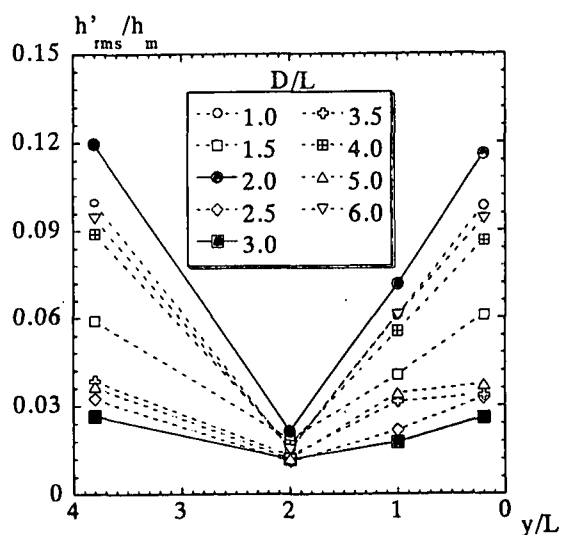


図-2 水制設置間隔の違いによる水面振動

3. 水面振動特性

直角水制群において、水制先端部の 1 基目と 2 基目の水制間隔を水制長の 6 倍の範囲内で系統的に変化させた。このときの水制 11~12 基間における水制間中央部の水面振動強さ h'_{rms}/h_m (ここに、 h'_{rms} :水面振動の平均二乗根 h_m :11 基目の平均水深) の横断分布を図-2 に示す。何れのケースも水制 2 基目以降の水制間隔は水制長の 2 倍である。この図より、側岸部で水面振動は大きく、水路中央部で小さくなること分かる。また、水制間隔の大きさと水面変動の強さに正の相関は無く、 $D/L=1$ のケースを除けば、水制間隔が水制長の偶数倍で大きく、奇数倍で小さくなる傾向が有る。側岸部での水面振動は、その強さが最も大きくなるのは、 $D/L=2$ のケースであり、最も小さくなるのは $D/L=3$ のケースである。その水面振動の強さの差は、平均水深の約 10% にまで達する。

図-3 は、水面振動の強さに顕著な差が生じた R-20 と R-30 における水面振動の強さの横断分布を詳細に調べた結果である。水面振動の強さは、水制間隔が水制長の

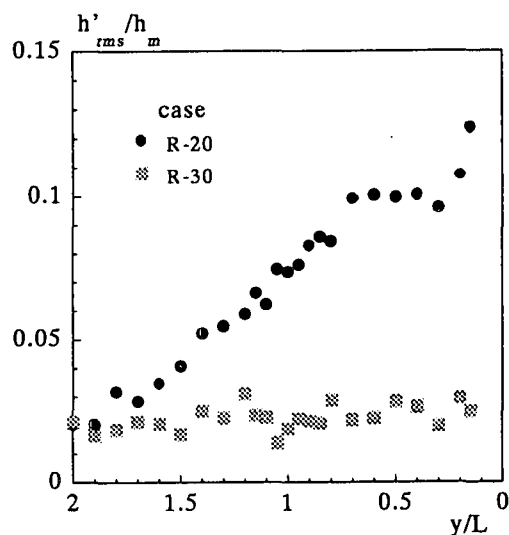


図-3 水面振動の横断分布

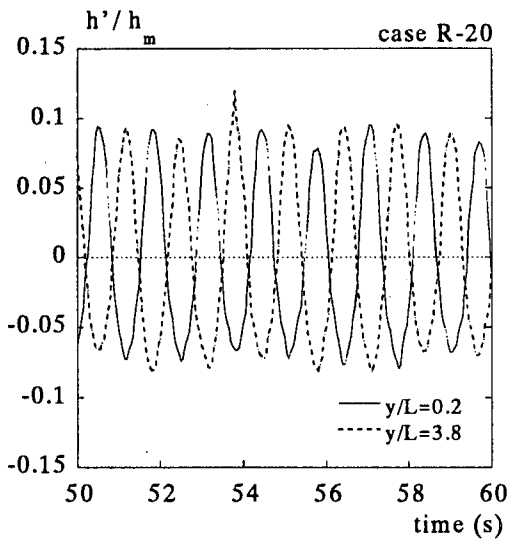


図4 水制域内の水面振動 (ケース R-20)

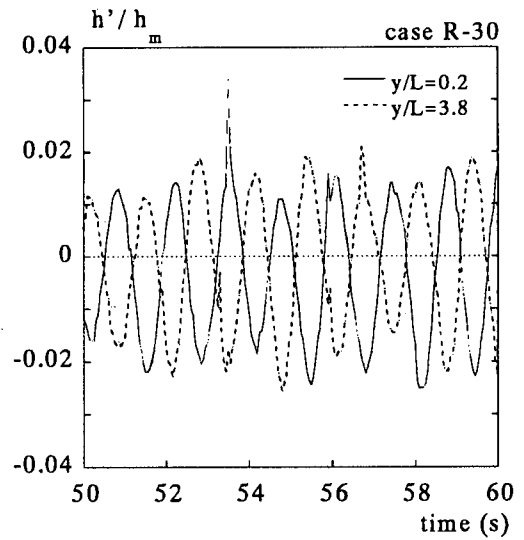


図5 水制域内の水面振動 (ケース R-30)

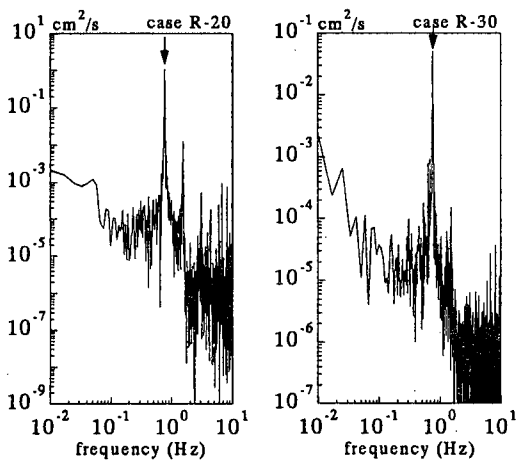


図6 水面振動のスペクトル分布

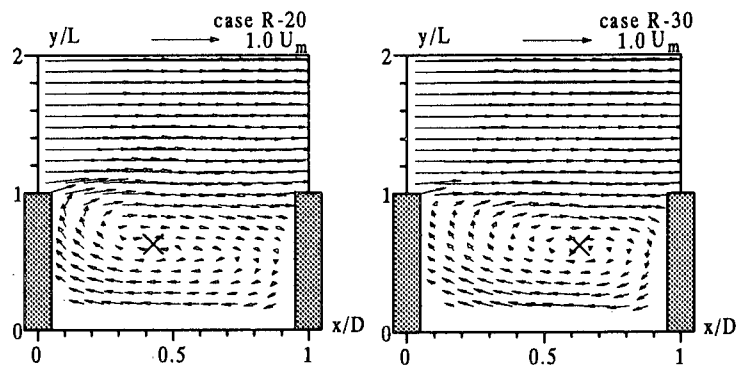


図7 時間平均流速ベクトル

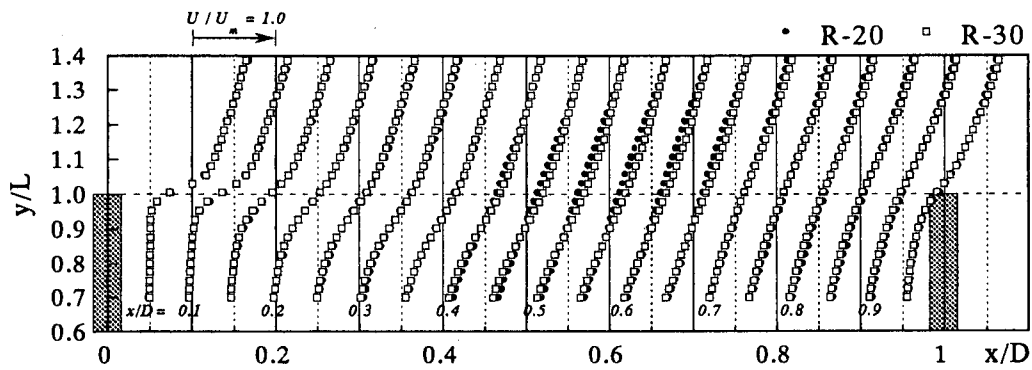


図8 主流速の分布

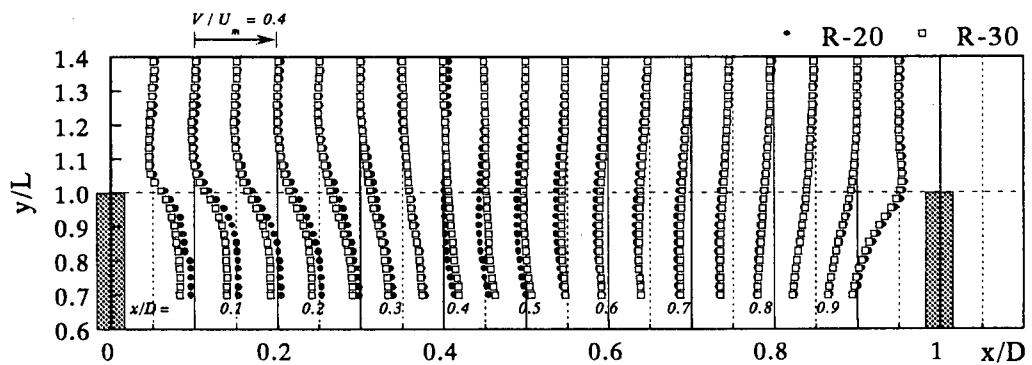


図9 横断方向流速の分布

2倍のR-20のケースでは側岸方向に直線的に増大するのに対して、水制間隔が水制長の3倍のR-30のケースでは横断方向に顕著な変化を生じないことが分かる。

いずれのケースにおいても水面振動は、水路両岸において逆位相の関係で周期的に振動している様子が観察された。このときの水面振動の時系列を図4、5に示す。この図より、水面振動は周期的で規則正しいことが分かる。ケースR-20とR-30の $x/D=0.5$ 、 $y/L=0.2$ の地点における水面振動をスペクトル解析した結果を図6に示す。R-20とR-30のケースでは側岸部での水面振動の周期がそれぞれ、1.31秒、1.32秒である。木村ら^{8,9)}は、フルード数が0.73と0.83のワンド流れにおいて、セイシュに起因する水面振動の発生を指摘している。閉鎖性水域の水面振動の固有振動数 T は一般に次式で表される¹⁰⁾。

$$T = \frac{2L}{m\sqrt{gh}} \quad (m=1,2,\dots) \quad (1)$$

ここに、 L ：閉鎖性水域の長さ、 h ：水深、 g ：重力加速度である。本実験に於いては水路中央に一つの節を持つ左右逆位相の振動が観察されたので、 L に水路幅、 $m=1$ を用いると、上式より計算される固有振動周期は1.28秒であり実測された周期1.3秒とほぼ一致する。池田ら¹¹⁾の実験では、水制を片岸に5基設置して水面振動を測定しており、その結果は固有振動数とは一致していない。水制を水路両岸に其々21基設置した本実験の水面振動は主流に対して直角方向に発生した、セイシュに起因するものと考えられる。

4. 時間平均流速

水面振動が平均流場に与える影響を検討するためにR-20とR-30のケースにおける時間平均流速ベクトルを図7に示す。

いずれのケースにおいても水制域内では時計回りの循環流が生じている。また、上流側の水制先端背後の水制境界付近において、水はねによる剥離流が確認できる。水面振動が小さいR-30ではR-20に比べて水制域内の循環渦の中心位置は下流側に現れており、ケースR-20では $x/D=0.4$ 付近、ケースR-30においては $x/D=0.65$ 付近である。

図8と9に、PIV計測によって得られた主流速 U および横断方向流速 V の横断分布を示す。それぞれ代表流速 U_m を用いて無次元化した。 U の横断分布は、水面振動が大きいケースR-20と水面振動が小さいケースR-30では、ほぼ類似しており、 $y/L=0.7\sim 1.4$ の領域における流速低減効果に顕著な差は確認できない。

次に、横断方向流速 V は、水制直下流部($x/D=0.1\sim 0.3$)の水制域内では、循環流に沿って水制域から主流域の方向に向きを取り、R-30に比べR-20のケースで大きな値を示す。水制間中央部 $x/D=0.6$ より下流側においては両

ケースとも水制域内では水平循環流の存在によって主流域から水制域内へと向きをとり、水制直上流で流速 V は最大となる。しかしながら両ケースで顕著な差はほとんど確認されない。

5. 乱れ特性

レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断分布が流下方向に変化する様子を図10に示す。R-20とR-30の両ケースとも $-\overline{u'v'}$ は、横断方向には全般的に水制域と主流域の境界付近で極大値を取り、その極大値は水制直下流部の $x/D=0.2$ で最も大きく、流下方向に減少する傾向を持つ。極大値の発生位置を詳細に見れば、水制直下流部より下流の $x/D<0.5$ の間では、両ケースとも境界線より若干主流域側に現れ、それより下流ではR-20では主流域側に、R-30では僅かに水制域側にある。また、 $-\overline{u'v'}$ の極大値は、R-30に比べて水面振動が大きいR-20の方で大きな値をとる。水制間中央部の $x/D=0.4\sim 0.6$ においては、主流域において両ケース間に差が生じており、 $-\overline{u'v'}$ はR-30に比べR-20の方で大きな値を取る。また、水制直前面においては水制域境界において両ケースとも負の値を取り、運動量が水制域から主流域に運び出されている。負の極大値の大きさは、ケースR-20はケースR-30の約1.5倍である。

図11には、式(2)から算出した乱れエネルギー k の横断分布を示す。

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (2)$$

ここに、乱れ強度の鉛直方向成分は測定していないため、 $v' \approx w'$ と仮定している^{12), 13)}。

同図より、水制直下流と水制直上流においてR-20とR-30は、ほぼ類似の分布形状を示すことが分かる。極大値は水制直下流に現れており、その位置は水制境界よりも若干主流域側にずれていることが観察される。水制間中央部の $x/D=0.4\sim 0.6$ においては、ケースR-30の極大値は水制域境界付近に発生しているが、水面振動が大きいR-20では主流域側で極大値をとる。

図12には、R-20とR-30で顕著な差を示す $x/D=0.5$ における乱れエネルギー k の横断分布を示す。全体的に乱れエネルギー k は、R-30に比べてR-20で大きな値をとることが認められる。ケースR-30は水制域境界付近でピークを取り、側岸および水路中央に向かって減少する分布形をとる。これに対して、R-20では水制域内から水制域境界にかけて乱れエネルギーは増加し、さらに水路中央に向かって増加する傾向を持つ。R-30に比べてR-20では乱れエネルギーは、水制域境界において約1.2倍であり、 $y/L=1.4$ においては約3倍に達する。

図13は、乱れエネルギーの生成項の中で支配項と考えられる $-\overline{u'v'}dU/dy$ の横断分布を示す。乱れエネルギーの生成項の極大値は、ケースR-20では水制域境界から若

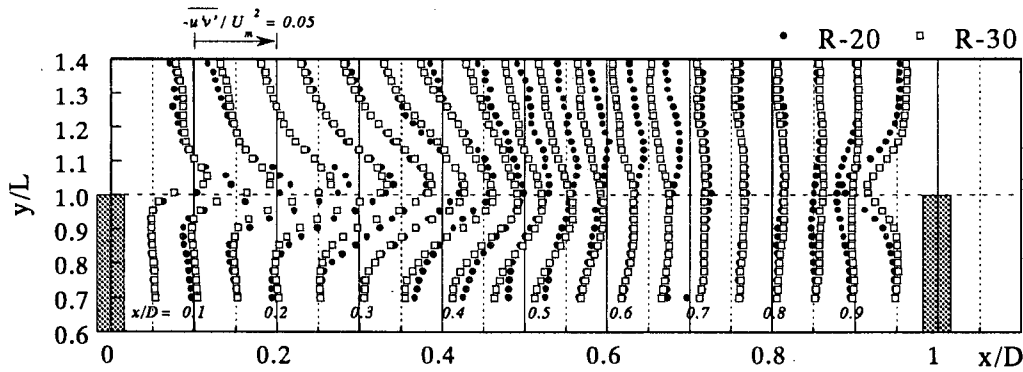


図-10 横断方向レイノルズ応力の分布

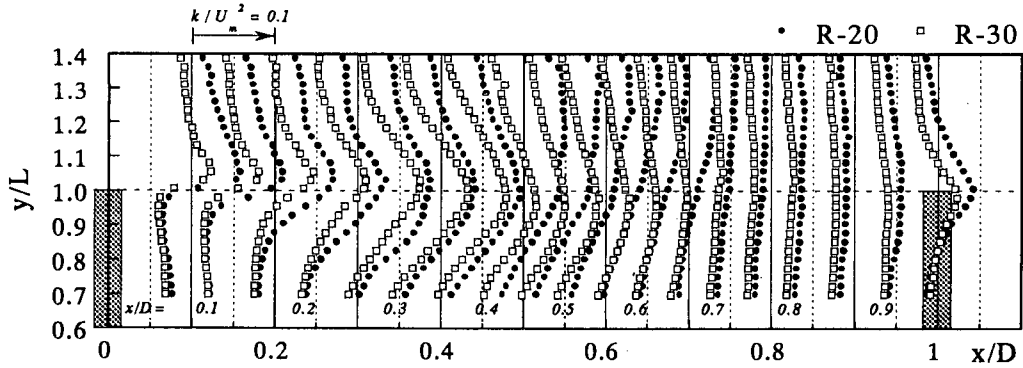


図-11 乱れエネルギーの分布

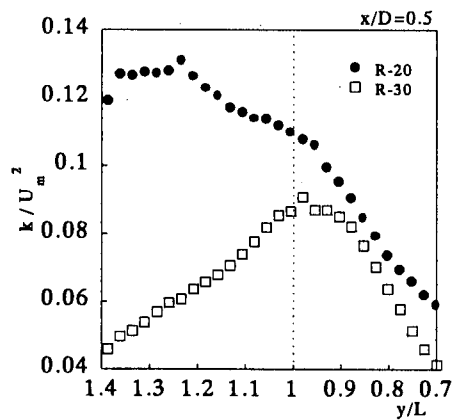


図-12 乱れエネルギーの横断分布

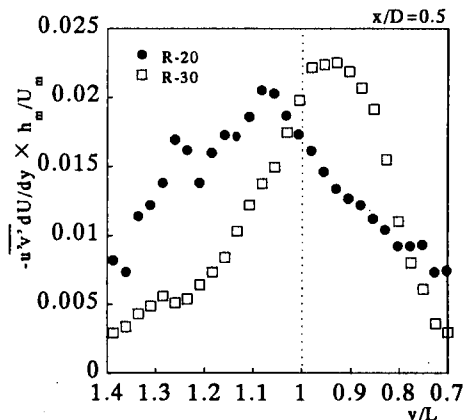


図-13 $-\overline{u'v'} dU/dy$ の横断分布

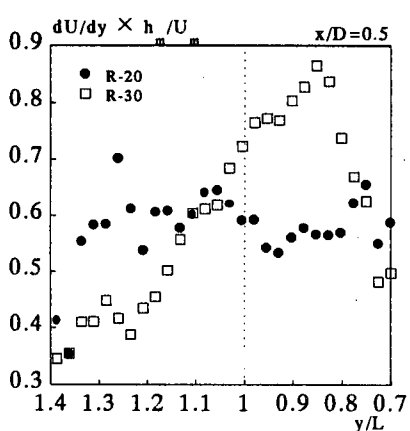


図-14 dU/dy の横断分布

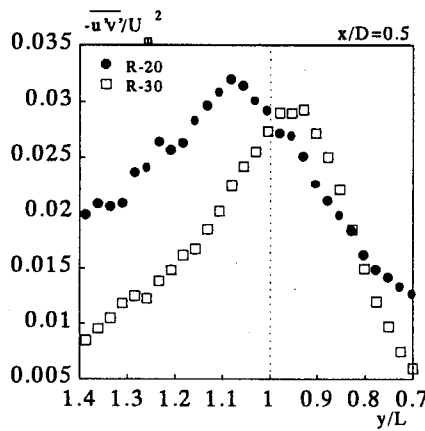


図-15 $-\overline{u'v'}$ の横断分布

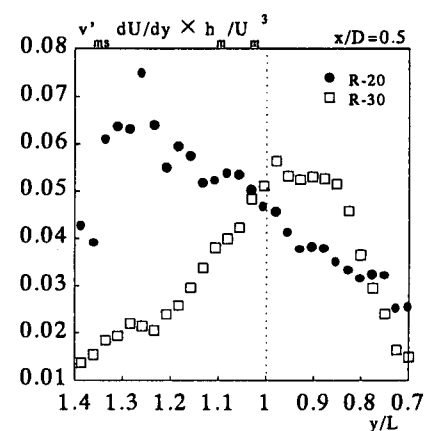


図-16 $\overline{v'^2} dU/dy$ の横断分布

干主流域側に出たところに現れているのに対して、ケース R-30 では水制域内で生じている。また、その極大値の大きさはケース R-20 に較べて R-30 の方が大きくなり、乱れエネルギー k の大小関係は対応していない。乱れエネルギーの生成項は、水制境界から水制長の 10% 程度水制域内に入って所では R-30 では R-20 に較べて約 2 倍であるのに対して、水制長の 20~30% 主流域側に出たところでは、逆にケース R-20 の方が R-30 の 2~3 倍の値をとる。

図-14 には、主流速の横断勾配 dU/dy の $x/D=0.5$ における横断分布を示す。 dU/dy は、水面振動が大きい R-20 では横断方向に一樣に近いのに対して、R-30 では $y/L=0.85$ で極大値を取り、側岸および水路中央に近づくに従って減少し、横断方向に大きく変化する。R-20 と R-30 との比較では、 dU/dy は水制域内では R-20 に較べ R-30 で大きな値を示し、主流域ではケース R-20 が R-30 よりも約 1.5 倍大きい。

図-15 は、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の $x/D=0.5$ における横断分布を示す。乱れエネルギーの生成項 $-\overline{u'v'} dU/dy$ の分布と傾向が一致している。水面振動が強い場合と弱いでは極大値の発生位置が異なっており、水面振動が大きいケース R-20 では主流域で、水面振動が小さいケース R-30 では水制域内でそれぞれ極大値が存在する。主流域では $-\overline{u'v'}$ は、ケース R-20 では R-30 に較べて約 2 倍の大きさである。

図-16 には、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の発生項である $\overline{v'^2} dU/dy$ の横断分布を示す。 $\overline{v'^2} dU/dy$ は、 $-\overline{u'v'}$ と類似した横断分布であり、水制域の y/L が 0.8~1.0 の間では R-20 に較べ R-30 で大きな値を取り、それ以外では逆に R-20 で大きくなり、乱れエネルギー k の分布形と似通っている。

6. 主流域・水制域間における運動量交換

非越流型水制群における水制域内での滞留時間 T_m および水制域境界面における運動量交換率 θ はそれぞれ (3)、(4) で表される。

$$T_m = \frac{A \times h}{Q_{in}} = \frac{D \times L \times h}{D \times h \times \int_0^D \overline{|v_{in}|} dx} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U_m^2 D} \int_0^D \overline{\rho u'v'} dx = \frac{1}{\rho U_m^2 D} \int_0^D \rho (UV + \overline{u'v'}) dx \quad (4)$$

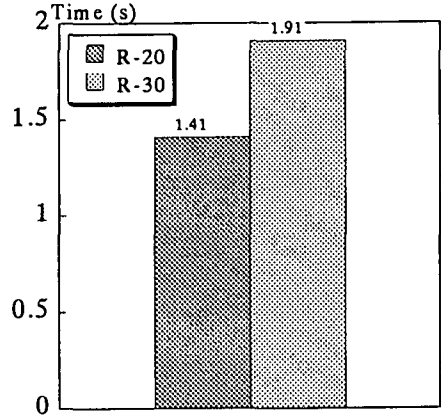


図-17 水制域内の滞留時間

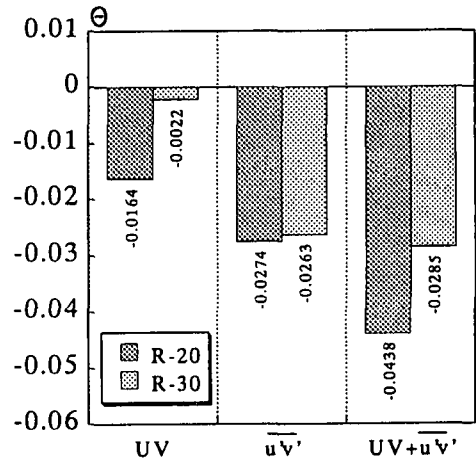


図-18 水制域境界における運動量輸送

式 (3) より得られた水制域内の滞留時間を図-17 に示す。この図より、水面振動が強いケース R-20 の方が水面振動の弱いケース R-30 に比べて小さい値を示しており、水面振動が強い流れ場においては水面振動が弱い流れ場より流体塊が水制域内に滞留する時間が短いことを示す。式 (4) より得られた水制域境界における運動量交換率を図-18 に示す。ここでは、移流による運動量輸送 UV と乱れによる運動量輸送 $\overline{u'v'}$ および両者を合わせた全体の運動量輸送 $(UV + \overline{u'v'})$ に分けて表示し、水制域から主流部への輸送を正としている。

移流による運動量輸送 UV においては水面振動が強いケース R-20 は水面振動が弱いケース R-30 よりも大きい、乱れによる運動量輸送 $\overline{u'v'}$ は両ケースにおいてほぼ同程度である。

UV と $\overline{u'v'}$ を比較すると、水面振動が強いケースと弱いケース共に乱れによる運動量輸送 $\overline{u'v'}$ が卓越しているのが分かる。移流による運動量輸送と乱れによる運動量輸送を合わせた $(UV + \overline{u'v'})$ ではケース R-30 はケース R-20 の約 65 % であり、水面振動が強い場合の方が水面振動が弱い場合よりも水制域内に運び込まれる運動量が大きいことが分かる。

図-19, 20 に水制域境界面 ($y/L=1.0$) における運動量輸送 UV 、 $\overline{u'v'}$ の流下方向への変化を示す。移流により

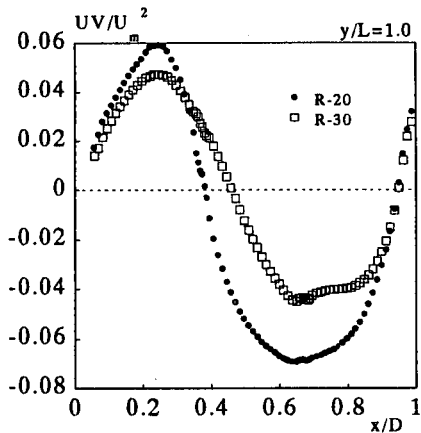


図-19 移流による運動量輸送

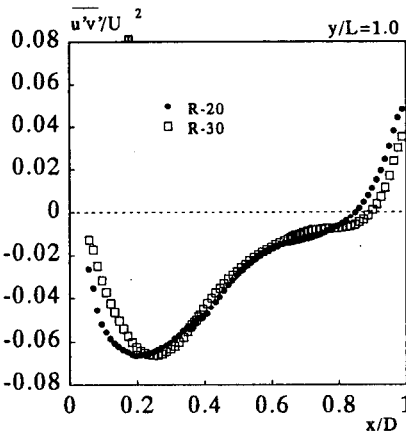


図-20 乱れによる運動量輸送

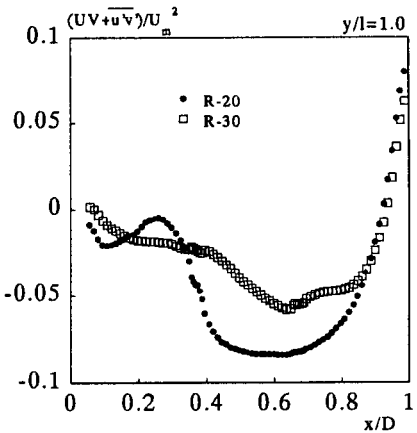


図-21 運動量輸送の流下方向変化

運動量は、水制間の上流側では水制外に流出、その下流では水制内に流入し、水制域内の循環流と整合性が取れている。運動量の流出・流入の極値は共に R-20 が R-30 に較べて大きな値を示す。一方、乱れに運動量輸送は、両ケースとも分布傾向は類似しており、水制背後の $x/D=0.2$ で流入する運動量は最大となり、流下するに従って減少し、水制直前面で水制域外へと流出する形態をとる。水制群を片岸に設置した場合、乱れにより運動量は水制区間内で一様に主流域から水制域内への輸送が見られ⁷⁾、片岸と両岸では大きく異なった輸送形態をとることが分かる。

図-21 には、運動量輸送の移流成分と乱れ成分とを合わせた $(UV + u'v')$ を示す。水制直上流を除いて運動量は主流部から水制域内へと運び込まれている。水制域前方では移流成分と乱れ成分の運動量輸送の向きが逆のためにその効果が小さくなるが、 $x/D=0.4 \sim 0.8$ の間で大きな運動量輸送が生じていることが分かる。

図-22 には、水制域境界における流速変動成分 u' 、 v' の相互相関係数より得られた位相差の流下方向変化を示す。図より、 u' と v' は水制直下流では π に近いことから逆位相を示し、流下方向に従って位相差は $\pi/2$ に近づく。水制直上流部で 2π から同位相となる。このことより各流速変動の相関は、水制直下流部で負の極大値をとり、流下方向に減少し、水制直前面で正となる。このことは図-20 の運動量輸送の乱れ成分に対応している。従って、運動量輸送の乱れ成分は流速変動 u' と v' の位相差によって規定されていると推測される。

7. 結論

水制群上流の 1 基目と 2 基目の水制間隔を変化させることで水面変動に顕著な差が現れた。本研究では、水面変動の流れ場への影響について検討し、以下の知見が得られた。

1) 非越流型直角水制群を水路両岸に対称に設置した場合、水制間隔の大きさと水面変動の強さに正の相関

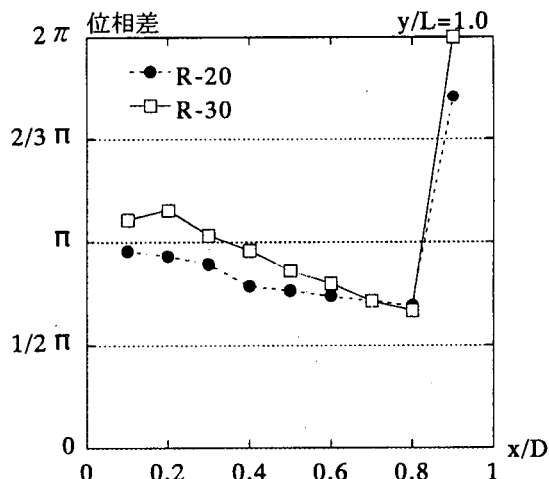


図-22 流速変動成分 u' と v' の位相差

は無く、水制長に対する水制間隔の比 $D/L=1$ のケースを除けば、水制間隔が水制長の偶数倍で大きく、奇数倍で小さくなる傾向が有る。側岸部での水面振動は、その強さが最も大きくなるのは、 $D/L=2$ のケースであり、最も小さくなるのは $D/L=3$ のケースである。その水面振動の強さの差は、平均水深の約 10% にまで達する。

- 2) 水制間隔が水制長の 2 倍のケースでは、水面振動の強さは側岸方向に直線的に増大するのに対して、水制間隔が水制長の 3 倍ケースでは横断方向に顕著な変化を生じない。
- 3) 水面振動はセシユの周期とほぼ一致する。
- 4) 水面振動が強い場合と弱い場合において、主流方向流速に顕著な違いは無いが、横断方向流速成分は水制直下流で水面振動が大きいケースが水面振動が小さなケースよりも大きくなる。
- 5) 乱れエネルギーは、水制背後においては水面振動が強い場合と弱い場合で共に主流域と水制域の境界付近で極大値をとり、水面振動が強いケースの方が大きな値を取る。水制間中央部においては水面振動が強い場合、乱れエネルギーの極大値の発生位置は水制境界付近から主流域へとシフトする。
- 6) 水制域境界を通して行われる運動量輸送について、水

制域内に運び込まれる運動量は、水面振動が強いケースでは、水面振動が弱いケースの1.5倍である。水面振動が弱いケースにおいては、乱れ成分によって水制域内に運び込まれる運動量輸送が9割を占めているのに対して、水面振動が強いケースの輸送においては乱れによる輸送は6割である。

- 7) 水制域境界における流速振動成分 u' , v' の相互相関係数より得られた位相差の流下方向変化から、乱れによる運動量輸送は流速変動 u' と v' の位相差によって規定されている。

参考文献

- 1) 中野義太郎編：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) 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
- 5) 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。
- 6) 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。

- 7) 池田駿介，杉本高，吉池智明：不透過水制群を有する流れの水理特性に関する研究，土木学会論文集，No.656，pp.145-155，2000。
- 8) 木村一郎，細田尚，村本義雄，安永良：開水路流れにおける死水域内の流体振動に及ぼす水理パラメータの効果，水工学論文集，第39巻，pp.779-784，1995。
- 9) 木村一郎，細田尚，村本義雄，安永良：開水路流れ死水域周辺の水面振動・流体混合特性，水工学論文集，第41巻，pp.711-716，1997。
- 10) 木村一郎，細田尚：側岸に止水域を伴う開水路流れの非定常解析，日本流体学会誌「なかれ」，vol.12，pp.399-408，1993。
- 11) 池田駿介，吉池智明，杉本高：不透過水制群を有する流れの構造に関する実験的研究，水工学論文集，第43巻，pp.281-286，1999。
- 12) 瀬津家久，鬼束幸樹，池谷和哉，高橋俊介：わんど形状が河川に及ぼす影響に関する水理学的研究，応用力学論文集，Vol.3，pp.813-820，2000。
- 13) 藤田一郎，丸山達弥：トレンチを有する開水路落ち流れの特性，応用力学論文集，Vol.3，pp.813-820，2000。

(2001年4月20日 受付)