単一水制および連続水制の剥離域下流における流れ構造に関する研究

A Study on Downstream Flow Characteristics from Separated Flow Region Section behind Single Groin or Groins

平川隆一*・渡邊訓甫**・松本祥平***・大本照憲****

Ryuichi HIRAKAWA, Kunitoshi WATANABE, Shohei MATSUMOTO
and Terunori OHMOTO

*博(工) 佐賀大学助教 大学院工学系研究科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1 番地)

** 工博 佐賀大学名誉教授 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1 番地)

***学(工) 佐賀大学 大学院工学系研究科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1 番地)

****工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪二丁目 39 番 1 号)

There is a lot of knowledge about head of the groin and between the groins. The influence of a groin reaches to the distant downstream. However there are many unknown things that flow condition and downstream of the groin is influenced by layout of the groin. Purpose of this study analyze flow characteristic of downstream on the single groin and the groins by experiment of different layout. As a result, the form of the separation vortex under the groin has affected structure. For example, since a single groin has the strong flow which goes to the center of a channel, its separated flow region is larger than groins. Therefore, since the momentum transport on boundary of groin region is small, the position which returns to steady flow becomes distant downstream.

Key Words: groin, relative groin height, separated flow, flow characteristics

1. 序論

水制は減勢と水はねの 2 つの機能を有し、古来より多く用いられてきた河川構造物である。その工法は被災を通して改良されてきたが、設計や配置の困難さ、コンクリート異型ブロックなどを用いた護岸、根固め工法の進歩により、施工の簡潔さからあまり見られなくなってきた¹⁾。

しかしながら近年では、河川景観や河道内の生態系の保全の面から水制の見直しが行われつつあり²⁾、試験的に設置が行われている。実河川においてこのような構造物は、周辺の土砂の洗掘や堆積など流れ場にさまざまな影響を及ぼしており、治水効果だけではなく、豊かな河川環境の形成³⁾の面においても注目されている。そのため水制周辺の流れ構造や、深掘れや土砂堆積といった河床変動を把握することは重要である³⁾と考えられる。

実河川では、平水時には水中に没しない非越流型水制、増水時には水位が水制高さを上まわる越流型の水制が使われている。越流水深が変化すると流れ構造が変化し、より複雑な流れとなる。これまで水制に関する研究は越流型水制群、非越流型水制群のそれぞれに注目した研究は数多く行われている。例えば、我々⁴⁾、⁵⁾は相対水制高を系統的

に変化させ、単一水制や連続水制の設置領域周辺における流況や河床変動を明らかにしてきた。武藤ら⁶⁾は、実河川における平水時と洪水時の流れや河床変動について、越流時における水制を有する複断面水路内の河床変動を明らかにしている。富永ら⁷⁾は非越流時の水制の透過を変化させた研究で、不透水水制と透過水制の特性の違いを明らかにした。その他にも越流型水制のアスペクト比に関する研究⁸⁾、水制の設置角度に着目した研究⁹⁾、¹⁰⁾、¹¹⁾、数値計算によって流れ場を解明しようとする研究¹²⁾、¹³⁾、¹⁴⁾なども行われている。

このように越流状態および非越流状態それぞれに着目した研究は数多く存在するが、この多くは水制の影響が大きい水制周辺に限定されている。一方で村岡ら¹³⁾によれば、水制より下流域での流れ場の変化によって河床波の発生など河床形状の変化が水制下流域一帯に広がっていくとされている。このように水制の影響は下流側へ水制長の何十倍も及ぶにもかかわらず、下流域に着目された研究は少ないのが現状である。

そこで本研究では、片岸に設置した単一水制および連続水制を有する開水路流れの越流および非越流状態において、流速特性や乱れ特性について実験的検討を行い、特に剥離流れを含む水制下流域の流れ構造を明らかにするこ

とを目的とする。

2. 実験条件および方法

実験には、図-1 に示すような水路幅 40cm の可変勾配型長方形直線開水路を用いた。上流端には流量制御装置、下流端には転倒堰を備えている。水路側壁はほぼ滑面である。河床には、粒径が $d=0.97\text{mm}$ の均一砂を貼り付け、粗面平坦固定床とした。

水制はステンレス製の不透過型水制であり、水制長 $L=10\text{cm}$ 、水制高 5cm、厚さ約 2cm の直方体である。設置位置は水路右岸であり、連続水制の場合は水制長の 2 倍の間隔($D=2L$)で片岸に 6 基設置した。設置角度はすべて側壁に対し垂直である。座標軸は上流から 6 基目の水制右岸根付け部を原点とし、流下方向に x 軸、横断方向に y 軸、鉛直方向に z 軸とした。

水制を設置していない状態で初期水深 h_0 を設定し、水制設置後の水深を h とした。河床勾配と下流端堰は、各条件のフルード数($Fr \approx 0.2$)と初期水深 h_0 を設定した上で疑似等流となるように調整した。水利条件は表-1 に示すとおりであり、単一水制および連続水制で越流・非越流状態において実験および考察を行った。

各条件において初期水深の半分で流速を測定した。流速の測定では I 型電磁流速計(KENEK, VM-801H)を用いて、主流方向と横断方向の瞬間流速成分 u , v を測定した。電磁流速計からの出力は周波数 100Hz で 4096 個サンプリングし、A/D 変換器を通して取得した。流速の計測範囲は、水制下流端から一様流に回復するまでである。なお本研究では、 $y/L=1.0$ を境界として右岸側を水制域、左岸側を主流部と呼ぶことにする。また、水制下流端から剥離した流れが再付着する点を測定した。再付着点の決定方法は、電磁流速計を用いて、主流方向の瞬間流速成分 u の平均値がともにほぼゼロになる点とした。また、この位置でタコ糸の動きによっても確認した。

3. 実験結果

3.1 平均流速ベクトル

流れ場の全体的な構造を把握するため、平均流速ベクトルを図-2 に示す。連続水制の場合は水制 5 基目から下流側を示している。

単一水制の非越流状態(図-2(a))では、流れは水制先端部から主流部側に大きくはねられ、下流で再び水制域内へ流入している。そのため、水制背後に水制長よりも広い幅の剥離渦を形成している。越流状態(図-2(b))では、同様にはねられているが、非越流状態に比べ剥離渦は縮小している。これは非越流状態の方が水制の遮断面積が大きいため、水

図-1 水路概略図

表-1 実験条件

水制配置		単一水制		連続水制	
越流状態		非越流状態	越流状態	非越流状態	越流状態
水路勾配	i	1/4500			
流量	$Q(\ell/s)$	2.4	7.9	2.4	7.9
水路幅	$B(\text{cm})$	40			
初期水深	$h_0(\text{cm})$	4.5	10	4.6	10
水制長	$L(\text{cm})$	10			
水制高	$H(\text{cm})$	5			
水制設置間隔	$D(\text{cm})$	20			
断面平均流速	$U_m(\text{cm/s})$	13.3	19.8	13.0	19.8
フルード数	Fr	0.2	0.2	0.2	0.2
レイノルズ数	Re	24000	79000	24000	79000

(a) 非越流状態の単一水制

(b) 越流状態の単一水制

(c) 非越流状態の連続水制

(d) 越流状態の連続水制

図-2 半水深における平均流速ベクトル

制頭部からの水はね角度、水はねの影響範囲が大きくなるためである。

連続水制の非越流状態(図-2(c))では、水制6基目は単一水制に比べ、顕著な水はねが見られない。そのため、剥離渦の横断方向の幅は水制長よりも短くなっている。越流状態(図-2(d))では、半水深が水制高に相当するため剥離渦は見られなくなった。

以上より、水制群下流端背後の剥離渦は単一水制の場合よりも小さくなる。これは水制1基目で水はねが顕著に生じるが、連続水制の場合は水制区間を流下すると主流部で高速流となること、および連続水制6基目での水はねは水制1基目に比べて小さいことが水制群背後の剥離渦を狭くした要因だと考えられる。

3.2 水制背後の再付着点

再付着点を伴う局所流は、一般に流れの断面形状が急変する所で発生する現象であり、再付着点までには剥離域や逆流域が形成される。水制下流端から再付着点までの流下距離 x_r を図-3に示す。

非越流状態の単一水制では、水制長の約12倍であり、半水深における平均流速ベクトルと一致した。これは、非越流状態の半水深が再付着点の計測位置に近い、剥離渦の下流端と再付着点が一致した。ここで、単一非越流不透過水制に関してレイノルズ数が大きいとき($>10^4$)、水制先端から剥離した流れは流速に依存せず水制長さの約14倍の距離に再付着すること¹⁰⁾が指摘されている。本実験では、レイノルズ数は約 2.4×10^4 で、上述の結果より若干短くなっているが、近い値を示した。連続水制では、水制長の約6倍であり、単一水制と比べて半分となっている。また、水制間隔が水制長の2倍であるとき、再付着点距離は水制長の約5倍であること¹⁷⁾が指摘されている。本実験では、水制群下流端からの再付着点距離であるため長くなっているが、こちらも近い値を示した。

越流状態の単一水制では水制長の約2.4倍であり、連続水制では約1.3倍と非越流状態と同様に半分となっている。しかし非越流状態に比べて全体的に短くなっている。これは水制頂部で生じた横断軸を持つ剥離渦が、それよりも下層の水制先端から生じた鉛直軸を持つ剥離渦と干渉し、その発達を抑えていることが考えられる。また、越流状態にかかわらず、連続水制の方が単一水制より短くなっている。これは、単一水制では水制で主流部へはねられるため下流側に長く、連続水制の場合では上流側の水制区間を流下するため流下方向の流れが支配的であることと、水制6基目は水制1基目に比べ水はねが小さいことにより短くなったと考えられる。

3.3 主流速の横断分布

越流・非越流状態における水制下流域の流れが、一樣流に回復する状況を、主流速 U の横断分布の水制長の10倍毎の流下方向変化によってみたものを図-4に示す。こ

図-3 水制下流端から再付着点までの流下距離

図-4 主流速 U の横断分布の流下方向変化

で、水制なしの断面は水制を設置していない状態で同じ流量を通水したときの流速分布を表し、電磁流速計の誤差範囲が $\pm 1 \text{ cm/s}$ であることを考慮して90%程度一致した断面から下流は一樣流に回復したものとしている。

単一水制の非越流状態(図-4(a))では、水制設置断面($x/L=0.0$)は水制先端部に局所的な高速流を生じ、水路中央から左岸側では横断方向に一樣となっている。この高速流は流下すると左岸側に移動している。水制長の1倍下流からは流下するに従い、主流部では減速、水制域内では加速しているため流速差が小さくなっており、水制長の約50倍下流から一樣流に回復した。越流状態(図-4(b))でも、水制設置断面は水制先端部に高速流を生じているが、水路中央より左岸側では遅くなっている。各断面の極大値は流下すると水路中央付近に移動し、等流の流れに近づく。流下するに従い流速差は小さくなっており、水制長の約60倍下流で一樣流に回復した。

連続水制の非越流状態(図-4(c))では、水制設置断面($x/L=0.0$)は連続水制6基目に相当しているため、水制区間を通過した流れは左岸側に高速流を生じている。水制群下流端より下流は流下するに従い、主流部では減速、水制域内では加速しているため水制長の約120倍下流で一樣流

に回復した。これは単一水制に比べ、2倍以上の流下距離を必要とした。越流状態(図-4(d))では、水制長の約50倍下流で一樣流に回復した。これは、単一水制とは異なり、短くなっている。また、単一水制の非越流状態と同程度であった。

以上より、単一水制の非越流状態と連続水制の越流状態が同程度の流下距離で一樣流に回復し、連続水制の非越流状態は回復するのに長い流下距離を必要とするのが分かる。

単一水制の非越流状態で見られるような順流と逆流の境($x/L=10.0$, $y/L=0.5\sim0.6$)は、運動量の交換が活発になるため、それぞれ流下方向にプロットして剥離線を求めた。図-5に本実験の剥離線を示す。

非越流状態の単一水制は横断方向に水制長よりも長く、流下方向にも水制長の約12倍と長く生じている。連続水制は横断方向には水制長と同程度で、流下方向は水制長の約3倍まで確認できた。

以上より、非越流状態では単一水制および連続水制は水制下流端背後に大きな剥離渦を形成する。単一水制は水はねによって水制長よりも長く、流下方向にも長い、大きな剥離渦である。これに対し、連続水制は水制区間を流下した際に、局所的に一樣流になったことと、連続水制6基目が単一水制のように顕著な水はねが起きないことにより急拡流のような流れとなっており、剥離渦の形態が異なっている。ここで、急拡流では芦田の式より再付着点距離は急拡部の約6倍下流、一樣流に回復するのは水路幅と急各部の関係より約90倍下流とされている。本実験では一樣流に回復するのは水制長の約120倍であり、水制間隔が水制長の2倍は急拡流に近い流れをしていることが分かる。また、越流状態はどちらも水制直背後でのみ確認できた。これは水制を越流した流れが水制域内に流れ込むため、水制域内の流速が加速され、順流になったためといえる。

3.4 乱れ強度とレイノルズ応力の横断分布

互いに垂直な速度変動によるレイノルズ応力は乱れによるせん断応力であり、運動量の拡散・混合を意味するため、後述する運動量輸送で重要になってくる。そのため、流下方向乱れ強度 u'_{rms} (図-6)、横断方向乱れ強度 v'_{rms} (図-7) およびレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ (図-8) の横断分布の流下方向変化を示す。

単一水制の非越流状態(図-6(a))では、水制設置断面は主流部では横断方向に一樣だが、水制先端に極大値を示す。水制設置断面から $x/L=4.0$ にかけて各断面の極大値の位置は水制先端付近($y/L=1.3\sim1.5$)であり、流下すると大きな値をとる範囲は横断方向に広がり、水制域では大きくなっている。 $x/L=6.0$ から $x/L=8.0$ は流下してもほぼ同程度であるが、極大値の位置が水制域内へと移動した。越流状態(図-6(b))では、水制設置断面は横断方向にほぼ一樣で、微小である。水制先端付近と水制域内は流下すると水制長

図-5 本実験の剥離線

図-6 流下方向乱れ強度 u'_{rms} の横断分布の流下方向変化

の1.5倍下流まで大きくなり、さらに流下すると小さくなる。水路中央より左岸側(左)ほとんど生じていないため、流下方向の変化は微小である。

連続水制の非越流状態(図-6(c))では、水制設置断面から $x/L=4.0$ の主流部では流下方向に一樣だが、水制域では流下に従い大きくなる。 $x/L=6.0$ から下流は流下方向への顕著な違いは見られない。しかし、各断面の極大値の位置は水制先端付近から水制域内へと移動している。越流状態(図-6(d))では、水制域から水路中央付近まで大きな値を示す。特に、水制域内は大きく $u'_{rms}=2.0\sim4.0(\text{cm/s})$ である。主流部は流下方向に変化は見られないが、水制域内は徐々に減少していく。

以上より、非越流状態における水制背後の u'_{rms} の極大値の位置は流下するに従い、単一水制では主流部側から水制域内へと移動するが、連続水制では水制先端から水制域内へと移動している。どちらも再付着点断面付近の水制域内側壁近傍に極大値があらわれた。ここで、階段状開水路では流

下方向乱れ強度の極大値は主流速の変曲点位置と一致する¹⁸⁾ことが指摘されている。本研究でも同様の結果が得られたため、階段状開水路のステップ高を水制長とみなすと同様のメカニズムが生じていると思われる。また、ステップ長はステップ高の100倍であり、単一水制よりも水制間隔が水制長の2倍程度の連続水制の方がより近い結果が得られた。

単一水制の非越流状態(図-7(a))では、水制設置断面の主流部は横断方向に一樣で、微小である。水制設置断面から $x/L=4.0$ にかけて流下すると各断面の極大値は大きくなり、 u'_{rms} と同様に水制先端付近($y/L=1.3\sim 1.5$)で生じ、大きな値の範囲は横断方向に広がっている。 $x/L=6.0$ から $x/L=10.0$ にかけて流下すると水制域から水路中央では減少し、水路中央より左岸側は維持される。越流状態(図-7(b))では、水制設置断面は横断方向に一樣で、微小である。水制設置断面から流下すると水制長の1.5倍下流まで大きくなり、これより下流は徐々に減少する。水路中央より左岸側は分布形状がよく似ており、流下方向に維持される。

連続水制の非越流状態(図-7(c))では、水制背後から $x/L=2.0$ にかけて流下すると大きくなるが、分布形状はよく似ている。 $x/L=4.0$ と $x/L=6.0$ は水制先端から水路中央で急激に大きくなっている。これは、 $x/L=8.0$ から $x/L=10.0$ にかけて横断方向にほぼ一樣で、流下方向にも変化していない。越流状態(図-7(d))では、水制域内に大きな値を示す。水制先端より左岸側では流下方向の変化は小さい。水制域内は水制長の1.0倍下流まで大きくなり、これより下流は減少する。

以上より、非越流状態における横断方向乱れ強度 v'_{rms} の極大値は連続水制では $x/L=4.0$ と $x/L=6.0$ で、単一水制では $x/L=4.0$ でとる。また、階段状開水路では鉛直方向乱れ強度の極大値は再付着点付近で最大となる¹⁸⁾ことが指摘されているが、本実験では連続水制から同様の結果が得られた。しかし単一水制では異なった。単一水制よりも連続水制が階段状開水路に近い結果となるのは u'_{rms} と同様である。

レイノルズ応力は横断方向の運動量の輸送を意味するので、主流部から水制域内への輸送を正としている。また、主流部側ではほとんど生じていないため、右岸($y/L=0.0$)から水路中央($y/L=2.0$)までを示している。

単一水制の非越流状態(図-8(a))では、水はねにより主流部側で正の大きな値を生じている。水制設置断面は微小で、横断方向に一樣となっている。水制直背後から $x/L=1.5$ にかけて流下すると主流部は大きくなり、各断面の極大値は水制先端より左岸側に移動している。これより下流では、主流部での値は小さくなり、 $x/L=8.0$ から水制域内に極大値が生じている。越流状態(図-8(b))では、水制設置断面は同様に微小だが、水制直背後から下流は非越流状態と異なり、水制域境界から水制域内に大きな値が生じている。水制直背後から $x/L=2.0$ までは流下すると負

図-7 流下方向乱れ強度 v'_{rms} の横断分布の流下方向変化

図-8 レイノルズ応力 $-u'v'$ の横断分布の流下方向変化

の値が大きくなり、 $x/L=4.0$ からは正の値で極大値をとると流下するにしたがって徐々に小さくなる。

連続水制の非越流状態(図-8(c))では、水制前面は水制先端より主流部側で正の値を、水制域側は負の値をとつ

ている。また、水制先端に極大値をとる。水制直背後($x/L=0.5$)は水制長の約 1.5 倍主流部側に大きな正の値をとる。 $x/L=1.0$ から $x/L=2.0$ にかけて流下してもほぼ同程度である。 $x/L=4.0$ と $x/L=6.0$ では流下方向にほぼ同様であるが、極大値の位置が水制先端から水制域内へ移動している。 $x/L=8.0$ と $x/L=10.0$ は流下しても主流部では横断方向、流下方向に変化していないが、水制域は小さくなる。越流状態(図-8(d))では、水制先端から水制域内にかけて大きな値を示す。水制設置断面は正の値を、水制直背後($x/L=0.5\sim 1.0$)は半水制長で負の値をとる。これより下流は正の値を示す。

以上より、非越流状態では、極大値の位置は図-4 に示した主流速の横断分布の変曲点とも一致しており、レイノルズ応力の大きい箇所が主流速の空間分布に影響していることが示唆される。また、越流状態では横断方向の運動量の輸送だけでなく、水制を越流した鉛直方向の流れが抵抗として働き、そのことが水制域内の運動量輸送が大きくなっている要因だと考えられる。

3.5 運動量輸送

レイノルズ応力は主流部と水制域の境である水制域境界で比較的大きな値を生じている。ここで、水制先端($y/L=1.1$)における運動量輸送を図-9 に示す。水制域内から主流部への運動量の輸送を正としている。

移流による運動量輸送(図-9(a))では、単一水制の非越流状態は水制前面から水制直背後にかけて主流部方向へと向きをとり、水制直前面で正の極大値($UV/U_m^2=0.9$)となる。水制背後では流下に従い、全体的に水制域内への輸送が大きくなっている。越流状態では、同様に水制設置断面は主流部へ、水制背後($x/L=1.5$)より下流は水制域内へ輸送している。水制長の 2 倍下流で負の極大値($UV/U_m^2=-0.15$)を示し、これより下流は徐々に小さくなっている。連続水制の非越流状態では、水制 6 基目前面は主流部方向へと向きをとり、水制直前面では同様に極大($UV/U_m^2=0.5$)となるが、単一水制の半分程度である。水制下流端背後では水制背後($x/L=0.5$)で水制域内への向きをとり、流下に従い大きくなる。これより下流は主流部へと向きをとり、流下に従い大きくなる。 $x/L=4.0$ から下流側では再び水制域内へと向きをとり、 $x/L=6.0$ で負の極大値($UV/U_m^2=-0.1$)となったのち、さらに流下すると緩やかに減少していく。越流状態では、水制設置断面で主流部へ、水制直背後は水制域内への輸送が生じている。水制長の 2 倍下流で負の極大値($UV/U_m^2=-0.15$)をとった後、流下すると徐々に小さくなるため、越流状態の水制直背後から下流は単一水制と同程度の値を示している。これは水制域境界において非越流状態の単一水制では水制直背後から水制長の 5 倍下流まで剥離渦の内部のため、微小であるが、再付着点付近は剥離線に沿うように速度勾配が大きくなったためであり、他のケースも剥離渦が水制域境界まで大きく

図-9 水制域境界における運動量輸送の縦断面図

ないが同様のことがいえる。

乱れによる運動量輸送(図-9(b))では、単一水制の非越流状態は水制設置断面から水制域内への向きをとり、水制背後は流下に従い大きくなり、 $x/L=6.0$ で極大値となる。これより下流は一度減少するが、 $x/L=10.0$ と $x/L=11.0$ で再び大きな運動量輸送を生じている。越流状態では、水制直背後($x/L=1.0$)に極大値を示し、流下すると水制長の 2 倍下流を除き、徐々に減少している。全体的に非越流状態よりも大きな負の値を生じている。連続水制の非越流状態は水制 6 基目前面から水制域内への向きをとり、水制背後($x/L=0.5$)では極大値をとり、 $x/L=1.0$ で急激に水制域へ大きくなる。 $x/L=1.5$ で最大となったのち、 $x/L=2.0$ から $x/L=4.0$ は緩やかに減少するが、 $x/L=6.0$ で微小になる。さらに流下すると流下方向に一定となった。越流状態は水制直背後($x/L=0.5$)に負の極大値を示し、流下するに従って小さくなっている。非越流状態と比べて負の値が大きいが、分布形状は似ている。

以上より、非越流状態において単一水制は移流成分、乱れ成分のどちらも再付着点断面で最運動量輸送は最大となり、連続水制では移流成分は再付着点断面で最大となっているが、乱れ成分は異なり、再付着点の上流側で大きくなっている。また、運動量輸送の移流成分と乱れ成分を比較すると、移流による運動量輸送が大きいため、移流成分が支配的であるといえる。さらに、水制域内への輸送により、水制域内の流速は図-4 で見られたように流下方向へと加速しているといえる。また、移流成分と乱れ成分の和を全運動量輸送とすると、移流成分が支配的であり、分布形状も相似形である。そのため、全運動量輸送は概ね、水制設置断面では主流部へ、水制背後は水制域内への運動量の輸送が支配的であるといえる。

4. 考察

水制の下流域における流れ構造は、水制背後に形成される剥離渦の影響を大きく受けていた。そこで、4つのケースで比較検討を行う。

図-10 に再付着点距離と一樣流に回復した流下距離の関係を示す。非越流状態の単一水制を除くと、再付着点距離が大きいほど、一樣流に回復するのは下流側になっている。これは水制先端から生じた剥離渦が水制頂部から生じた剥離渦との相互作用で小さなるほど、流下方向にみた主流部と水制域内の流速差が小さくなっていることが示唆される。しかし、非越流状態の単一水制は水はね作用が強く、今回のように水制長が水路幅の25%と大きいと、反射波の影響が考えられる。そのため正の相関を示さなかったことが考えられる。

水制背後の流れをみるため、水制域境界における横断方向流速 V の縦断分布を図-11 に示す。ここで、水制域内から主流部への流れを正としている。水制設置断面では各断面の極大値が生じており、連続水制より単一水制、越流状態より非越流状態の方が水はねを生じている。水制背後では非越流状態の単一水制は水制長の2倍下流まで正の値で、これより下流では負の値が大きくなる。 $x/L=8.0$ で負の極大値をとったのち、流下するに従い減速している。他のケースも水制背後は負の水制域内への流れが支配的であり、負の極大値まで大きくなり、これより下流では徐々に減速していく。非越流状態の単一水制では、剥離渦が水制長よりも大きいため、負の極大値が下流側に生じているが、他は剥離渦が水制長よりも短いため、負の極大値は上流側に生じている。また剥離渦が小さいため剥離線は水制域内に存在する。このため、水制域境界における速度勾配は小さくなり、水制域境界におけるレイノルズ応力の極大値を生じる位置は水制に近づくことが考えられる。

次に、水制直背後($x/L=0.5$)から本実験で最も長い再付着点距離($x/L=12.0$)を含む水制長の60倍下流までの、水制域境界における運動量輸送の積分量を図-12 に示す。主流部から水制域内への輸送を負としている。乱れ成分の輸送については移流成分に比べて小さかったため、傾向を分かりやすくするために大きさを10倍にしている。

移流成分は、単一水制では非越流状態の方が越流状態より若干大きく、連続水制では逆に越流状態の方が非越流状態より約4.6倍大きくなる。乱れ成分も、移流成分と同様の大小関係を示した。従って全運動量輸送量は、単一水制では非越流状態で、連続水制では越流状態で主流部から水制域内への輸送が大きくなる。これは、非越流状態では水はねが顕著であるため、移流成分を構成する平均横断方向流速 V の絶対値は単一水制の方が大きいからである。越流状態では水はねよりも水制頂部を越流した流れの影響が強いため、非越流状態とは異なる結果になったといえる。

この全運動量輸送量と上述した一樣流に回復した流下距離の関係を図-13 に示す。全運動量輸送が最大の越流状態の連続水制が流下距離は短くなっている。これは、剥離渦が小さいと、水制背後の主流部の流体塊の水制域内への流れ込みが大きくなる。即ち、水制域境界での移流による運動量輸送、特に横断方向流速 V が大きくなることによって水制域内の流速が加速されて、主流部との流速差が小

図-10 再付着点距離と一樣流に回復する距離の関係

図-11 水制域境界における横断方向流速 V の縦断図

図-12 水制域境界における運動量輸送 ($x/L=0.5 \sim 60.0$)

さくなる。このため、全運動量輸送が大きいほど、一樣流に回復しやすくなっていると考えられる。他も、全運動量輸送が大きいほど、一樣流に回復しやすくなっている。

5. 結論

本研究では、単一水制および連続水制の剥離流れを含む水制下流域に着目し、水制背後の流速特性や水制直背後の乱れ特性について、越流・非越流状態それぞれ変化させた条件で実験的検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

1. 単一水制の場合は、水はね作用により大きな剥離渦が形成される。連続水制の場合は、急拡流に近い剥離渦を形成するが、単一水制より小さい。
2. 水制域境界における運動量輸送は移流成分が支配的であるが、剥離渦が大きいと、主流部から水制域内へ向かう速度ベクトルが小さくなるので、運動量輸送は小さくなる。このため、水制下流域において一樣流に回復する距離は長くなっている。
3. 十分に越流すると、越流による運動量輸送により非越流状態と比べて剥離渦は小さくなった。このため、主流部から水制域内への運動量輸送は大きくなり、一樣流に回復する距離は短くなっている。

参考文献

- 1) 山本晃一：日本の水制，山海堂，1996。
- 2) 白井勝二・福岡捷二：利根川河道の形成に果たした水制の役割-治水環境機能の評価，河川技術論文集，第9巻，pp.185-190，2003。
- 3) 高橋裕：河川工学，東京大学出版会，pp.216-220，2008。
- 4) 常盤俊輔・平川隆一・渡邊訓甫・大本照憲：単一水制周辺の河床変動と流れに及ぼす相対水制高の影響，応用力学論文集，Vol.11，pp.719-726，2008。
- 5) 平川隆一・渡邊訓甫・大本照憲・松本祥平：連続水制周辺の河床変動と流れ構造に及ぼす相対水深の影響，土木学会論文集 A2 分冊(応用力学)，Vol.14，pp.I_635-I_644，2011。
- 6) 武藤裕則・北村耕一・中川一：水制周辺部の河床変形に関する実験的研究，河川技術論文集，第9巻，pp.197-200，2003。
- 7) 富永晃宏・長尾正志・長坂剛：水制背後の流れ構造に及ぼす透過流の影響，水工学論文集，第44巻，pp.1035-1040，2000。
- 8) 鬼束幸樹・秋山壽一郎・鈴木鉄平：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。
- 9) 大本照憲・平川隆一：越流型水制群を伴う開水路流れの三次元構造，応用力学論文集，Vol.2，pp.665-672，1999。

図-13 全運動量輸送量と一樣流に回復した流下距離の関係

- 10) 川口広司・渡辺明英・福岡捷二：異なる角度の越流型水制周辺流れの2次解析，水工学論文集，第45巻，pp.385-390，2001。
- 11) 川口広司・福岡捷二・渡辺昭英：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，第48巻，pp.811-816，2004。
- 12) 戸嶋光映・清水康行・荒井信行・三谷紀一：水制工を含む水路の流れと河床変動に関する数値計算，河川技術論文集，第1巻，pp.19-22，1993。
- 13) 福岡捷二・西村達也・川口昭人：越流型水制工を有する流れの解析，河川技術論文集，第2巻，pp.211-216，1995。
- 14) 青木政一・吉村亮・玉井信行・河原能久・石川浩・安田実：越流型水制の周りにおける流速分布～現地観測と数値シミュレーション～，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.291-296，2000。
- 15) 村岡一志・森本稔・門田章宏・鈴木幸一：石かご水制下流域の河床形状変化に関する研究，水工学論文集，第52巻，pp.631-636，2008。
- 16) 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。
- 17) 池田駿介・吉池智明・杉本高：不透水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。
- 18) 大本照憲・成合功光・矢北孝一：階段状開水路における剥離せん断層の乱流構造，応用力学論文集，Vol.4，pp.541-548，2001。

(2012年3月8日 受付)