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

Influence of Relative Water Depth on Riverbed Evolution and Flow Structure
around Groynes in Open-channel Flows

平川隆一*・渡邊訓甫**・大本照憲***・松本祥平****

Ryuichi HIRAKAWA, Kunitoshi WATANABE, Terunori OHMOTO
and Shohei MATSUMOTO

*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)

*** 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)

****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)

The groin changes from non-overflow condition to overflow condition in the actual river according to the flow discharge. In that case, it is thought that the riverbed and flow structure around the groin always changes. The flow characteristics and morphological responses around single groin has been clarified. In the present study, it aims to clarify the characteristic of the bed form and flow characteristics around six groines for changing relative water depth by the laboratory experiment under the condition to assume the Froude number to be 0.2. The bed form in the larger relative water depth has large scale of the scour. Accretion point in main flow region moved to groin region and downstream. The flow velocity of the main flow region become slower in the downstream.

Key Words: groines, relative water depth, morphological response, flow characteristics

1. 序論

水制は減勢と水刎ねの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⁴⁾と考えられ、水制が河川に及ぼす影響を解明することで、さらなる治水技術の可能性が拡大すると考えられる。

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。越流する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。例えば武藤ら⁵⁾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⁶⁾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⁷⁾、水制の設置角度に着目した研究⁸⁾¹⁰⁾、また数値計算によって流れ場を解明しようとする研究など^{11), 12)}も行われている。

このように水制の越流状態と非越流状態についてそれぞれ様々な点に着目した研究は数多く存在するが、一方で水深 h と水制高 H の比である相対水深 h/H が異なる流れ場について検討した研究は少ない。

著者らはこれまで、単一水制周辺の河床変動や流れ場について相対水深を連続的に変化させた条件下での実験的研究を行い^{13), 14)}、河床変動の時間変化や流速分布特性を明らかにしてきた。しかし実河川に水制を用いる場合、単一では無く、群としての機能を期待する連続水制として利用されている。

そこで本研究では、水制の高さを一定にし、水深を系統的に変化させることで、相対水深の変化が連続水制設置領域内やその周辺の河床形状や流速特性に与える影響を明

表-1 実験ケースおよび水理条件

越流 状態	ケース名	設定水深 h_0 (cm)	相対水深 h_0/H	流量 Q (ℓ/s)	断面平均流速 U_m (cm/s)	勾配	Fr数	無次元掃流力 Ψ
非越流	NS-9	4.5	0.9	2.39	13.28	1/4000	0.2	0.007
越流	S-11	5.5	1.1	3.23	14.68	1/4200	0.2	0.008
	S-15	7.5	1.5	5.14	17.15	1/4700	0.2	0.010
	S-20	10.0	2.0	7.92	19.80	1/5100	0.2	0.012

図-1 水路概略図

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に示すような有効長18m、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、水路上流から約5~13mの水路中間部の約8mに亘って粒径が $d=0.97\text{mm}$ の均一砂を10cmの厚さで敷き均した。

水制はステンレス製であり、長さ $L=10\text{cm}$ 、高さ10cm、厚さ約2cmの直方体である。これを砂に埋めて、初期河床からの高さが $H=5\text{cm}$ となるよう設置した。設置位置は移動床区間の中間付近の水路右岸であり、水制長の2倍の間隔($20\text{cm}=2L$)で6基設置した。設置角度は側壁に対して90度である。座標軸は上流から1基目の水制右岸根付け部の初期河床面上を原点とし、流下方向にx軸、横断方向にy軸、鉛直方向にz軸とした。

水制が無い状態で初期水深 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、各ケースのFr数と初期水深 h_0 を設定した上で疑似等流となるように調整した。実験ケースは表-1に示すとおりであり、水制の非越流状態から越流状態へと系統的に変化させて実験および考察を行った。なお、上流からの給砂は行っていない。

各ケースにおいて、河床形状と水面形、および流速を測定した。河床形状の測定には精密連続計測式水底形状測定器(正豊工学, EPI-2)を用い、約1cm間隔でデータを取得し

図-2 最大洗掘深の時間変化(単一水制)¹³⁾

た。水面形の測定には容量式波高計(KENEK, CH401)を用い、水制長の半分($y/L=0.5$)、水制先端近傍($y/L=1.1$)、および水路中央($y/L=2.0$)における3測線の縦断水面形を測定した。流速の測定では変動後の河床をのりで固めた後再び通水し、I型電磁流速計(KENEK, VM-801H)を用いて、主流方向と横断方向の流速成分 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1基目の2cm上流から6基目設置断面である。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。

3. 実験結果

3.1 河床形状

水制先端部の洗掘深の時間変化は、単一水制の場合¹³⁾図-2のようになる。最大洗掘深の約6~9割に掛けては急速に洗掘が進んでいるが、その後の変化は緩やかである。そこで連続水制である本研究では、単一水制の最大洗掘深の約8割となる時間で通水した。すなわち、ケースNS-9では2時間、ケースS-11では5時間、ケースS-15では5時間、ケースS-20では48時間である。

通水後の河床形状を図-3に示す。非越流状態のケースNS-9では、河床変動が生じているのは水制1基目先端周

図-3 各ケースの河床形状

辺だけである。水制前面から水制先端にかけて洗掘が生じており、洗掘の範囲は流下方向に約 8cm、横断方向に約 4cm である。最大洗掘深は水制先端の $x/L=0.1$, $y/L=1.1$ 付近にあり、その大きさは約 2cm、すなわち等流水深の 4 割程度である。また、洗掘の下流側には堆積が生じており、堆積形状は洗掘範囲の下流側を包み込むような、堆積厚の極値を 1 つ持つ形状である。堆積範囲は流下方向に約 15cm、横断方向に約 8cm である。最大堆積厚は $x/L=1.0$, $y/L=1.1$ 付近にあり、その大きさは約 1.5cm、すなわち等流水深の 3 割程度である。

越流する水深が最も小さいケース S-11 では、河床変動が生じているのは水制 1 基目先端周辺だけである。非越流状態と同様に水制前面から水制先端にかけて洗掘が生じており、洗掘の範囲は流下方向に約 8cm、横断方向に約 6cm である。最大洗掘深は $x/L=0$, $y/L=1.1$ 付近にあり、その大きさは約 2cm、すなわち等流水深の 4 割程度である。また、洗掘の下流側には堆積が生じている。その形状は洗掘範囲の下流側に沿っており、堆積厚の極値を 1 つ有している。堆積範囲は流下方向に 12cm 程度、横断方向に 8cm 程度である。最大堆積厚は非越流時とほぼ同一地点の $x/L=0.9$, $y/L=1.1$ 付近にあり、その大きさは約 1.2cm、すなわち等流水深の 2 割程度である。

水深が水制高の約 1.5 倍であるケース S-15 では、水制 1 ～2 基間に大きな河床変動が生じている。水制 1 基目周辺では水制前面から水制先端にかけて洗掘が生じており、洗掘の範囲は流下方向に約 8cm、横断方向に約 8cm である。最大洗掘深は $x/L=0$, $y/L=1.1$ 付近にあり、その大きさは約 2.7cm、すなわち等流水深の 4 割程度である。また、洗掘の下流側には堆積が生じており、その形状は洗掘範囲の下流側に沿っている。堆積厚の極大値は水制域内と主流部と

の 2 箇所である。堆積範囲は流下方向に約 12cm、横断方向に約 9cm である。最大堆積厚は水制域内の $x/L=0.8$, $y/L=0.9$ 付近にあり、その大きさは約 1.2cm、すなわち等流水深の 2 割程度である。

水深が水制高の約 2 倍であるケース S-20 では、河床変動は連続水制全域に互って生じている。水制 1 基目周辺では水制前面から水制先端にかけて洗掘が生じている。最大洗掘深は水制先端付近にあり、その大きさは 4cm 程度、すなわち等流水深の 4 割程度である。また、洗掘の下流側には堆積が生じており、水制域内と主流部とに極大値を 2 つ持つ形状である。水制域内では水制 1 基目背後から水制 2 基目前面にかけて顕著な堆積が生じている。水制 2 基目より下流では、1 基目と傾向が異なり水制先端部に顕著な洗掘が見られず、水制域内と主流部に堆積が生じている。最大堆積厚は 1 ～2 基間の水制域内にあり、その大きさは等流水深の 2 割程度である。水制 3 基目周辺では水制前面から水制先端にかけて洗掘が、またその下流側には 2 箇所に極大値を持つ堆積が生じており、1 基目と同様な傾向を示している。最大洗掘深は等流水深の 2 割程度であり、最大堆積厚は等流水深の 1 割にも満たない。水制 4 基目周辺では 1 基目および 3 基目周辺と同様な傾向を示し、水制前面から水制先端にかけて洗掘が生じ、その下流側に水制域内と主流部に堆積が生じている。最大洗掘深は等流水深の 2 割程度であり、最大堆積厚は等流水深の 1 割にも満たない大きさである。水制 5 基目周辺では水制前面から水制先端にかけて等流水深の 2 割程度の洗掘が生じているが、その背後には顕著な堆積は確認できない。水制最下流端の 6 基目周辺には水制前面から水制先端にかけて洗掘が生じており、最大洗掘深は等流水深の 2 割程度である。その下流側の水制域内には堆積が生じている。

図-4 水面形の縦断分布

3.2 水面形

各ケースの河床変動後における縦断水面形を図-4 に示す。計測位置は半水制長($x/L=0.5$)、水制先端付近($x/L=1.1$)、水路中央($x/L=2.0$)である。図中の点線は、縦線は水制設置箇所であり、横線は等流水深を示している。非越流状態と越流する水深が小さい場合では、水制設置位置は計測できないため、水深は欠測である。

非越流状態のケース NS-9 では、何れの計測線でも水制 1 基目前面で顕著な堰上げが生じている。水制域内と水制先端部では、水位は水制 1 基目背後から 3 基目近傍まで緩やかな上昇傾向にあり、水制 3 基目背後から 6 基目にかけて緩やかに低下している。水路中央では、水位は水制 1 基目前面から 2 基目前面まで急激に減少し、そこから 6 基目にかけては緩やかに減少している。横断方向に見ると、1 基目前面では側岸から水路中央へと水位は減少し、1 基目背後では水路中央が高い。2 基目よりも下流側では水制設置領域の方が再び高くなっている。

越流する水深が最も小さいケース S-11 では、水制 1 基目の前面から背後にかけて顕著な水位差が生じている。それよりも下流側では、3 基目にかけて水位は緩やかに上昇し、そこから下流側では徐々に減少している。横断方向への変化は、1 基目よりも上流では側壁に近いほど高い。1 基目背後では水路中央が最も高いが、それよりも下流側では水制域内の方が高い。連続水制の最下流端である 6 基目

背後では、水制先端を結ぶ線が最も高く、水制域内と水路中央は同程度である。

水深が水制高の 1.5 倍であるケース S-15 では、水制 1 基目前面から直背後にかけて水位差が顕著に生じている。水制域内と水制先端部では、水制 2～3 基目にかけて水位は上昇し、それよりも下流では減少しているが、水制先端では連続水制最下流端よりも水制長の約 1.5 倍下流側まで水位低下が続いている。水路中央では、1 基目背後から 4 基目まではほぼ一定で、そこから連続水制の最下流端よりも水制長の約 1.5 倍まで緩やかに低下している。

水深が水制高の 2 倍であるケース S-20 では、水制 1 基目前面で堰上げが生じている。水制域内と水制先端付近では、他のケースと同様に水制 1 基目から 3 基目にかけて水位は上昇し、それよりも下流側では徐々に減少している。水路中央は、水制 1 基目から 2 基目にかけて水位は上昇しており、そこから下流側へと低下している。横断方向への変化は、2 基目近傍では水制域境界が最も低く、3 基目前後では水制域内が最も高い。

3.3 流速分布

河床変動後の流速特性を把握するために、連続水制全域に亘って流速測定を行った。主流速 U の計測結果を図-5 ～8 に示す。計測位置は、横断分布は半水深、鉛直分布は水制長の半分と水路中央である。

図-5 ケース NS-9 における主流速の分布

図-6 ケース S-11 における主流速の分布

図-7 ケース S-15 における主流速の分布

図-5 の非越流状態のケース NS-9 では、水制 1 基目直前面から 2 基目にかけて、水制域および水制域境界近傍では小さくなり、主流部では大きくなっている。2 基目から 6 基目にかけては、水制域および主流部において、横断分布形状に大きな違いは見られない。水制域内における鉛直分布では、1 基目直前面においては順流であり、その背後では逆流となっている。流下に従い逆流速は小さくなっているが、連続水制の中間部($x/L=5.0$)ではほぼゼロになった後は逆流速が増加している。鉛直方向へは、 $x/L=3.0$ を除きほ

ぼ一様である。水路中央における鉛直分布では、水面近傍が底面近傍よりも速い分布形状は、水制長の 1 倍下流側($x/L=1$)では鉛直方向にほぼ一様となり、かつ本研究の計測範囲では最大流速を示している。2 基目設置断面よりも下流側では、流速は減少していき、また表面付近よりも半水深近傍の方が流速は大きくなっている。

図-6 の越流する水深が最も小さいケース S-11 では、水制域内では連続水制直前面で順流をとり、1 基目背後よりも下流では逆流が生じている。側岸ほど大きいですが、流下に

図-8 ケース S-20 における主流速の分布

従いその大きさは減少している。主流部では、特に水路中央から左岸側において横断方向にほぼ一様の分布形状であるが、流下するにつれて流速は増している。水制域内の鉛直分布では、水制1基目周辺の底面付近の流速と水面付近の流速に差が生じており、連続水制区間では底面付近の流速と水面付近の流速に大きな差は見られない。水制1基目周辺では、底面付近に最大で8cm/s程度の逆流を生じ、水面付近では最大で8cm/s程度の順流が生じている。2基目よりも下流では、約2cm/sの逆流が生じている。水路中央の鉛直分布では、半水深付近で最も速く、底面近傍で最も遅い傾向にある。流下方向へは、半水深では1〜2基間よりも下流ではほぼ一様であるのに対して、水表面付近と底面近傍では連続水制の下流側で減速している。

図-7は、水深が水制高の1.5倍のケース S-15 である。横断分布形状は、水制域内では1基目直背後で逆流は最も速く、1〜2基間中央ではほぼゼロであり、それよりも下流域では順流となっている。各横断面での最大流速は主流部にあるが、流下するにつれてその位置は水制先端付近から水路中央、そして左岸よりへと移動しており、その値も大きくなっている。水制域内の鉛直分布では、連続水制直前面を除いて水面に近づくほど順流は速く、底面近傍ほど逆流速が大きい。水制高よりも上層では、水制1基目およびその直下流断面で最も流速は大きく、流下するにつれて減速している。水制高よりも下層でも、逆流速の大きさは流下につれて減少している。水路中央の鉛直分布では、半水深付近で最も速く、どの断面においても相似形である。流下方向へは水制4基目($x/L=6.0$)付近で最大となりそれよりも下流では減速している。

図-8は、水深が水制高の2倍のケース S-20 である。水制域内では1〜2基間のみ流速は抑えられており、2基目よりも下流では同程度となっている。主流部では流下するにつれて速くなっており、下流側は上流端の約1.2倍に達している。水制域内の鉛直分布では、底面近傍で逆流となり上層ほど速い順流である。鉛直方向の速度勾配は1基目直背後が最も大きく、流下に従い小さくなっている。水制

図-9 レイノルズ応力の横断分布

2〜3基間の $x/L=3.0$ よりも下流では、分布はほぼ相似形である。水路中央では、1基目を除くと全体的に水面に比べてその直下層で流速は減少するが、そこから半水深、すなわち水制高さに向かって流速は増大している。水制高よりも下層では、底面近傍に近づくほど減速している。流下方向へは、下流側ほど速い流速である。

3.4 レイノルズ応力分布

河床変動後の水制1〜2基間におけるレイノルズ応力の横断分布を図-9に示す。計測位置は半水深である。何れのケースも水制域境界を挟んで水制長の0.5〜1倍程度主流部側で正の最大値、水制域内で負の最大値を示しており、ケース S-20 のみ水制域内に正の極大値を示している。そ

図-10 水制域境界の縦断河床形状

の大きさを比較すると、非越流状態のケース NS-9 と越流する水深が最も小さいケース S-11 は主流部の方が大きく、相対水深の大きいケース S-15 と S-20 は水制域内の方が大きい。水路中央から左岸にかけて値は小さく、横断方向への変化はほとんど生じていない。

4. 考察

連続水制周辺の河床変動は、水制域境界付近に顕著に生じていた。そこで水制域境界での縦断河床形状を図-10に示す。横軸の $x/L=0, 2, 4$ が水制設置箇所である。また縦軸は各ケースの最大堆積厚 z_{dmax} で無次元化している。1 基目前面では、相対水深が大きくなるにつれて最大堆積厚に対する割合は大きくなっており、また範囲も広がっている。これは、相対水深が増すほど水制前面での下降流と、底面近傍での水制域から主流部への向かう流れが強くなったためと考えられる。非越流状態のケース NS-9 と越流する水深が最も小さいケース S-11 では、洗掘範囲はほとんど変化していない。これは相対水深が増加して断面平均流速が大きくなって水制を乗り越える流れが生じることによって、水制前面での下降流と水刳ねの大きさに変化が無かったためと考えられる。1～2 基間では、非越流状態では水制直背後に最大洗掘深が生じ、そのすぐ下流側に堆積が、さらに下流側では初期河床に近くなっている。越流する水深が最も小さいケース S-11 になると、洗掘深は小さくなり、堆積形状も上流側へと移動している。これは、二次元流れが支配的であると考えられるケース NS-9 に比べて、流体塊が水制を乗り越えて水制背後に下降することで水制域内に三次元流れが生じ、水制域内と主流部との流れの相互作用が増大することで水制域境界底面付近の流体力が減少し、水制前面で洗掘された河床材料はあまり下流側へと運ばれなかったためと思われる。相対水深が増加したケース S-15 では、堆積域が下流側へと伸びている。すなわち 1 基目前面で洗掘された河床材料が、ケース S-11 と比べてより下流側へと輸送されていることが考えられる。2 基目前面では洗掘が見られ、このことから下降流と

図-11 最大洗掘と堆積ピークの発生場所

水刳ねが生じていることが示唆される。さらに相対水深が増加したケース S-20 では堆積範囲が下流へと拡大しているが、単一水制の場合¹⁴⁾とは異なり、堆積厚は減少している。すなわち堆積の頂部の砂が掃流されながら下流へと移動し、長時間経つと洗掘が進む領域であることが考えられる。2 基目前面では水刳ねと下降流によるものと思われる洗掘が生じていることが分かる。2～3 基間では堆積傾向にある。ただし十分に越流したケース S-20 では水制間中央から水制前面にかけて洗掘が進行して最大堆積厚の大きさほどまでに達し、最大洗掘は2 基目前面よりも大きくなっている。このことから、相対水深が2 倍程度の流れ場では、3 基目前面の下降流や水刳ねは2 基目よりも影響が大きくなることが考えられる。

大洗掘と堆積のピークが生じる位置を図-11に示す。最大洗掘深は相対水深の大きさによらず、いずれも水制1 基目先端付近に位置している。堆積のピークはケース NS-9 とケース S-11 が主流部に1 箇所、ケース S-15 とケース S-20 は主流部と水制域に1 箇所ずつ生じており、水制域の堆積厚の方が大きい。相対水深が大きくなるとケース S-15 で生じ始めた2 つの堆積の間隔が広がり、どちらも下流側へ移動する。このことから、相対水深が小さいと底面付近の流れは1 つの堆積域を避けるように主流部と水制域内へと向かい、相対水深が大きくなると水制域境界よりも少し主流部側の流速が増加すると考えられる。またこれらことから、水制先端部に生じた洗掘は下流側へと範囲を拡大し、その河床材料が水制域内へと流入していくことが予想され、堆積厚が増していくと思われる。

図-12には、相対水深の変化による最大洗掘深と最大堆積厚を示す。最大洗掘深はケース NS-9 とケース S-11 が同程度で、さらに相対水深が大きくなるに従い深くなる傾向にある。両岸に設置された場合⁴⁾と同様に、水制前面を下降し、主流部へと流出する流れの三次元構造が強く現れて

図-12 最大洗掘深と最大堆積厚の相対水深による変化

図-13 堰上げ高さの相対水深による変化

図-14 相対水深の違いによる
最大流速の変化

(a) 移流による運動量輸送

(b) 乱れによる運動量輸送

図-15 水制域境界における運動量輸送

いることが考えられる。最大堆積厚は非越流状態のケース NS-9 から越流状態のケース S-11 にかけては少し減少し、ケース S-15 は同程度であり、ケース S-20 が一番大きい。水制域内への堆積が促進されたことで、最大堆積厚の位置が水制域内へ移動し、さらに堆積厚が増加したことが考えられる。

次に水面形に関する検討を行う。図-13 は水制 1 基目設置断面周辺での堰上げによる最大水深と、それよりも下流側に生じた最小水深との落差 Δh を表している。水制域内 ($y/L=0.5$) では相対水深が大きくなるにつれ、次第に $\Delta h/h_0$ は減少している。越流後も $\Delta h/h_0$ は減少していき、 $h_0/H=1.5$ から 2.0 にかけては勾配が緩やかになっている。横断方向の変化は、水制域内 ($y/L=0.5$) から水制先端 ($y/L=1.1$) にかけて、どのケースでも落差が減少している。しかし、水制先端 ($y/L=1.1$) から水路中央 ($y/L=2.0$) の変化では、相対水深が高いほど、落差の減少が見られず、ほぼ分布形状が一致している。これらのことから、連続水制内において水面形に与える水制の影響は、相対水深が大きいほど小さいことが

分かる。すなわち流れに対する抵抗が減少していくことが考えられる。

次に流速に対する検討を行う。半水深断面における主流速 U と横断方向流速 V の最大値に与える相対水深の影響を図-14 に示す。何れも各ケースの断面平均流速 U_m で無次元化している。主流速は、相対水深が大きくなると減少しており、断面平均流速の 1.8 倍から 1.5 倍程度にまで小さくなっている。これは、相対水深の増加により、横断面内に占める水制の割合が小さくなったためであることが考えられる。横断方向流速も、相対水深が大きくなるにつれて減少しており、非越流状態では断面平均流速程度であった大きさは、その半分程度にまで減少している。このことから、非越流状態では水制によって流体塊はすべて主流部へと刎ねられるが、その機能の占める割合は相対水深の増加とともに低下していることが考えられる。

最後に水制域境界における運動量輸送について検討を行う。図-15 は各ケースの 1 基目上流～2 基目間 ($x/L=0.2 \sim 2$) の半水深における移流による運動量輸送 UV と乱れに

よる運動量輸送 $-\overline{u'v'}$ の縦断方向変化である。移流による運動量輸送では、水制1基目ではどのケースも主流部へと向きをとる。その大きさは非越流状態と越流する水深が最も小さい方が、十分に越流した2ケースよりも大きい。非越流状態では2基目($x/L=2$)で水制域内に向きをとり、越流する水深が小さい場合は水制背後($x/L=0.5\sim 1.5$)でほとんど無く、2基目で水制域内への向きである。越流する水深が大きくなると、2基目前面($x/L=1.5$)で最小値をとるが2基目では主流部へと向きを変えており、非越流状態と少し越流した状態とは異なった輸送形態となっている。乱れによる運動量輸送では、非越流状態とケース S-15 では分布形は似通っていない。相対水深が大きいケース S-15 では水制区間下流側で大きく、さらに相対水深が増加すると下流側で大きくなっている。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と、支配的であると考えられる。これらのことから、水制区間下流側の水制域内への運動量輸送によって底面付近の流れの河床材料が水制域内へと運び込まれ、最大堆積位置が水制域内へと移動し、その大きさが増していると考えられる。

5. 結論

本研究では、連続水制の越流状態に着目し、その周辺の河床変動と流れ場について、相対水深を系統的に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。

- 河床変動は水制1～2基間に顕著に生じ、相対水深が異なると違った河床形状になることが明らかとなった。最大洗掘は水制1基目先端付近に生じた。水深が水制の2倍になると、水制3, 4, 5, 6基目先端付近において洗掘が生じ、特に水制3, 4, 6基目では洗掘の下流側には堆積が生じることが分かった。また、相対水深が大きくなると洗掘範囲は広がった。堆積は、水制1基目先端付近に生じた洗掘の下流側に生じた。相対水深が小さい場合は堆積厚のピークを1つ持つ形状であり、相対水深が大きくなると堆積厚のピークを水制域内と主流部との2箇所に持つ形状になった。また、最大堆積厚の生じる位置は相対水深が大きくなると主流部から水制域へ移動した。
- 連続水制を設置することによる水面の堰上げは、非越流状態が最も高く、相対水深が大きくなるほど小さくなった。水制域内の水面形は、1基目背後から3基目にかけて上昇し、そこから最下流端の6基目にかけて低下した。水路中央では、1基目背後から3基目付近まではほぼ横ばいで、そこから下流方向へ水制設置断面を通過するに従い徐々に低下していき、最下流端では水制が無い状態の等流水深よりも低下した。
- 各相対水深において、主流部の流速は流下に従い大きくなっていった。鉛直分布では、相対水深が大きいほど上層と下層の速度勾配が大きくなるが、その影響は上流部の方により現れていた。また水路中央部では、半水深での流速が鉛直方向に最大を示した。半水深での最大流速は、主流方向と横断方向ともに相対水深が小さいほど速く、非越流状態で主流速は断面平均流速の約1.8倍、横断方向流速は約1倍に達していた。水深が水制高の2倍では、主流速は断面平均流速の約1.5倍、横断方向流速は約0.5倍であった。
- 水制域境界の運動量輸送は、連続水制上流部の水制間においては、相対水深の影響は小さい。1基目での輸送は主流方向へと向きをとるが、非越流状態と越流する水深が最も小さい方が、十分に越流した状態よりも約1.5倍大きくなった。2基目付近では、非越流状態と越流する水深が小さい場合は水制域内へと向きをとったが、十分に越流した状態では主流部へと流出した。運動量輸送は乱れによるものよりも移流によるものが支配的であった。

参考文献

- 山本晃一：日本の水制，山海堂，1996。
- 富永晃宏・中野義郎・井嶋康二・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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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.

- 11)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.
- 12)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.
- 13)常盤俊輔・渡辺訓甫・平川隆一・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.

- 14)平川隆一・渡辺訓甫・大本照憲・副島祐介・常盤俊輔：非定常流場における単一水制周辺の河床応答と流れ特性に関する研究, 応用力学論文集, vol.12, pp.859-866, 2009.

(2011年3月8日 受付)