

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

Effects of Relative Groine Height in Bed Configurations and Flow Structure
in an Open Channel Flow

常盤俊輔*・平川隆一**・渡邊訓甫***・大本照憲****

Syunsuke Tokiwa, Ryuichi Hirakawa, Kunitoshi Watanabe and Terunori Ohmoto

* 佐賀大学大学院博士前期課程 工学系研究科 (〒840-8502 佐賀市本庄町本庄1番地)

** 博(工) 佐賀大学助教 理工学部都市工学科 (同上)

*** 工博 佐賀大学教授 理工学部都市工学科 (同上)

**** 工博 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

A lot of non-overflow groynes that do not sink under the water at the ordinary water flow are used, and it is known to it does working that keeps away the water current from the river bank. On the other hand, when the water level is surpassing of the height of the groyne, it becomes to sink. In this study, the height of the groyne was made constant, depth was changed systematically, and it aimed to clarify the characteristic of the bed level variation and the flow velocity profile of the flowfield with a single groyne by the laboratory experiment under the condition to assume the Froude number to be 0.2. As a result, the maximum depth of scour has become small as the relative groyne higher. The groyne height when relative height grows, the ratio of the main flow velocity to the mean flow velocity has grown.

Key Words: *groyne, relative groyne height, bed configurations, flow structure*

1. はじめに

我が国の河川流域は極めて災害を受けやすく、また近年の異常気象が原因と思われる洪水でも、堤防越流や堤防決壊等の災害がたびたび発生している。そのような水害を防止するための最も重要な構造物として堤防が作られてきたが¹⁾、その堤防に対する流水の衝突を防ぐために、古来より水制が用いられてきた²⁾。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と考えられる。

実河川では、平水時に水中に没しない非越流型水制が多く用いられており、水制の先端部で水跳ねが生じることが知られている。一方で増水時には水位が水制高さを上まわり越流型の水制となる。越流型水制を伴う流れは水制先端部の水跳ねに加えて水制を乗り越える流れが水制周辺の流れに大きな影響を与えるため、非越流型水制と比べて、流れ構造や乱れ構造、河床形状は大きく異なる。

これまで越流型水制群に注目した研究がいくつか行

われている^{3), 4), 5)}。越流型水制群の河床変動に関する研究も、大本ら⁶⁾の水制群の向きに着目したものがある。

このように水制の高さと水深を一定にした場合については多くの知見が得られているが、一方で水深 h_0 と水制高 H の比である相対水制高 H/h_0 が異なる流れ場について比較した研究は少なく、不明な点が多い。フラットな固定床直線水路では水制 2 基に挟まれた水制域内での定性的な越流水深の渦構造が明らかにされている^{7), 8)}。このような複雑な渦構造は河床の洗掘と堆積を引き起こすと考えられる。したがって越流水深の違いによる河床変動と流れ特性を明らかにしなければならない。

本研究では、水制高さを一定にし、水深を系統的に変化させて、単独水制を伴う流れ場における河床変動と流速分布の特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験条件及び方法

実験水路には幅 0.4m、有効長 18m の長方形可変勾配開水路を用いた。高さ $H=5\text{cm}$ 、長さ $L=10\text{cm}$ の水制を水路側壁に垂直に 1 基設置した。本研究ではフルード数を一定 ($Fr=0.2$) に保って、相対水制高を表-1 のように変化させた。

水制無し状態で初期水深 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 Fr 数と初期水深 h_0 を設定したうえで擬似等流となるよう調節した。初期水深が大きいものからケース名を S-3, S-5, S-9, NS-11, NS-16 とした計 5 ケースについて実験、考察を行った。ケース S-3, 5, 9 は越流型で、ケース NS-11, 16 は非越流型である。

座標軸は図-1, 2 に示すように、水制設置位置の根付部底面を原点として下流方向に x 軸、幅方向に y 軸、鉛直方向に z 軸をとった。

移動床実験では水路上流部から 6m 下流に長さ 6m にわたって 10cm の厚さで砂を敷き均し、固定床との接続部は安息角とした。水制は移動床上流部から 3m の位置に設置した。河床砂は粒径 0.97mm の均一砂を用いた。通水中は水制先端部に超音波砂面測定器を設置し、水制先端部の河床形状の時間変化を追った。水制周辺の洗掘が静的平衡に達したところで通水を止め、水制の上流 1m から下流 1m までの間の河床形状を超音波砂面測定器で測定した。通水停止後の河床をのりで固めた後再び通水し、2 成分電磁流速計を用いて主流速 u と横断方向流速 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。流速は図-2 に示すように水制の 2cm ($x/L=0.2$) 上流から 20cm ($x/D=2.0$) 下流までの 5 側線上で測定した。また本研究では $y/L=1.0$ を境界として右岸側を水制域、左岸側を主流域と呼ぶことにする。

表-1 実験条件

実験ケース		初期水深 h_0 (cm)	相対 水制高 H/h_0	Fr 数	断面平均 流速 U_m (cm/s)
越流	S-3	15	0.33	0.2	23.0
	S-5	10	0.5		18.7
	S-9	5.5	0.9		13.8
非越流	NS-11	4.5	1.1		13.4
	NS-16	3.0	1.6		10.2

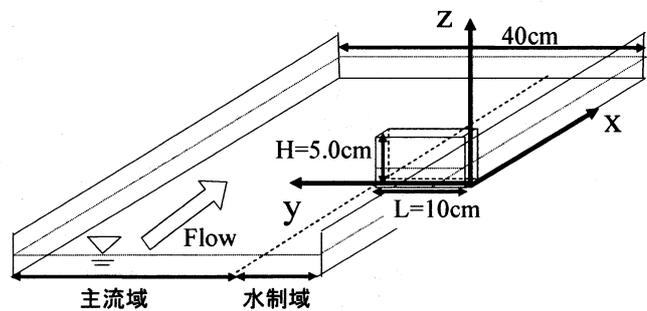


図-1 水路外略図

3. 実験結果及び考察

3.1 河床形状

3.1.1 通水後の河床形状

図-3 は通水後の河床形状を示している。

ケース S-3 では水制前面全体と水制先端部に 6cm 程度の洗掘が見られる。また $x/L=4.0$ の右岸側壁に 4cm の堆積と、 $x/L=2.0, y/L=1.5$ の位置に 3cm の堆積が生じた。ケース S-5 では水制先端部を中心に水制前面にかけて洗掘が見られ、その深さは最大で約 3.5cm となった。また $x/L=2.0, y/L=0.5$ の位置に 1.5cm の堆積が生じている。ケース S-9 では水制先端部のみに洗掘が見られ、それは約 2cm となった。 $x/L=1.0, y/L=1.2$ の位置には 1.5cm の堆積がみられる。ケース NS-11 では水制先端部に 1.5cm の洗掘が生じ、その下流で洗掘と堆積が連続する形状が見られる。ケース NS-16 では水制先端部に約 1cm の洗掘が見られ、 $x/L=1.0, y/L=1.2$ の位置にわずかな堆積が生じている。

以上のように相対水制高が最も小さいケース S-3 で水制先端部から水制前面全体に大きな洗掘を生じたが、相対水制高が大きくなるにつれて洗掘の規模は徐々に小さくなる傾向がみられる。また最大堆積位置は、ケース S-3 では

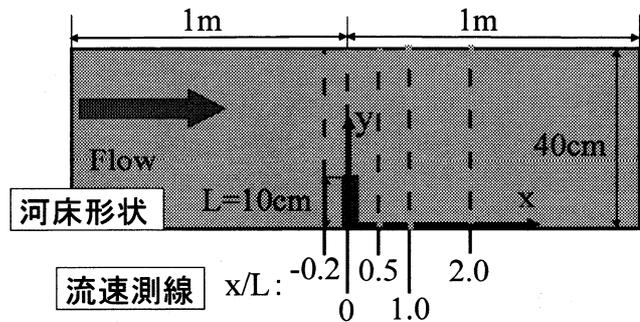
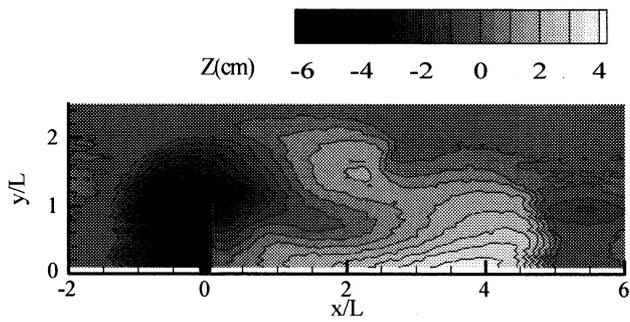
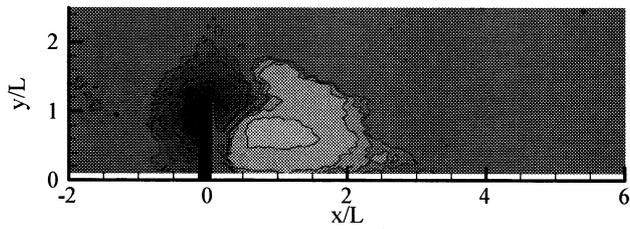


図-2 河床形状、流速の側点位置

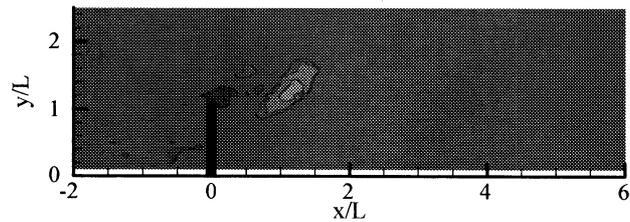
右岸側壁であったが、相対水制高が大きくなるにつれて中央よりに移動している。ここで越流型のケース S-9 と非越流型の 2 ケースではその堆積位置に大きな違いがないことがわかる。このようにケース S-9 と非越流型の河床変動に似た傾向が見られることから、相対水制高が 0.9 の越流型水制周辺の流れは非越流型水制周辺の流れに近い構造であると思われる。



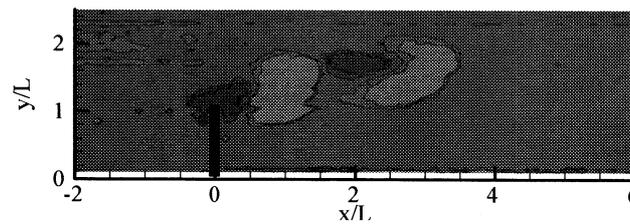
(a) ケース S-3



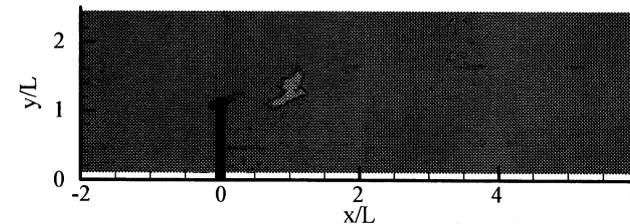
(b) ケース S-5



(c) ケース S-9



(d) ケース NS-11



(e) ケース NS-16

図-3 通水後の河床形状

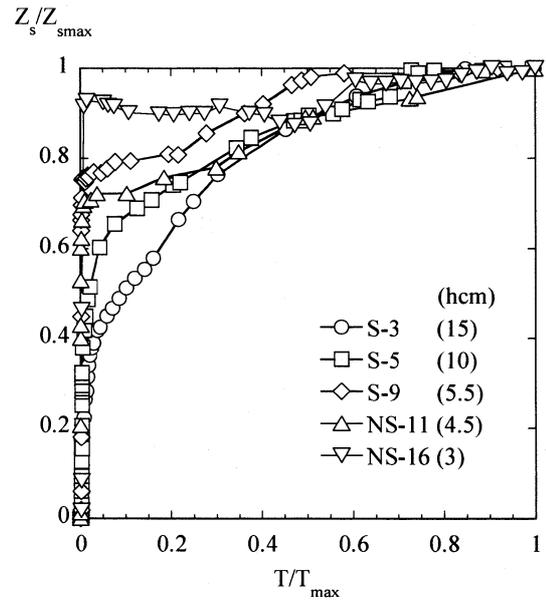


図-4 最大洗掘深の時間変化

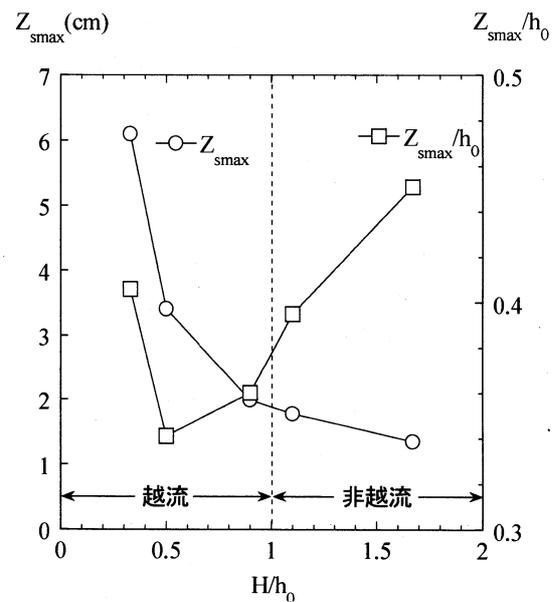


図-5 最大洗掘深と相対水制高の関係

3.1.2 最大洗掘深

図-4 は最大洗掘深の時間変化を示す。縦軸は洗掘深 Z_s を最大洗掘深 Z_{smax} で、横軸は通水開始からの経過時間 T を、水制先端部の河床変動が安定した時の T_{max} で無次元化している。図-3 から分かるように、最大洗掘はいずれのケースにおいても水制先端部に生じた。ただしケース S-3 では水制先端部から水制前面にかけて同程度の洗掘が生じている。

相対水制高が最も小さいケース S-3 では、通水開始から短時間で最大洗掘深の約 4 割まで洗掘が生じ、

相対水制高が大きいケースになるにつれて、その割合は5割、7割、9割と大きくなる。いずれのケースもその後は緩やかに洗掘が進んでいる。

これより、相対水制高が大きいほど、通水開始から短時間での最大洗掘深に対する洗掘の割合は大きくなる傾向にあるといえる。

図-5は最大洗掘深 Z_{smax} と相対最大洗掘深 Z_{smax}/h_0 の相対水制高 H/h_0 による変化を示した。

最大洗掘深は、越流型では相対水制高が大きくなると、急激に小さくなる。しかし非越流型ではその変化は比較的緩やかとなった。その変化の仕方は相対水制高が0.9を境界として違いが見られる。このことから相対水制高が1に近い越流型水制周辺の流れは、非越流型水制周辺の流れ構造の特性を持ち合わせていると考えられ、相対水制高が0.9付近は両者の遷移領域になっていると思われる。相対最大洗掘深は相対水制高が大きくなるにつれて小さくなるが、しかしそれは相対水制高が0.5までとなっており、それより相対水制高が大きくなると一転して相対最大洗掘深も大きくなっている。このグラフからは先ほど述べた相対水制高が0.9付近に越流型と非越流型の遷移領域があるということは困難であるため、これを明確にするためには更なる実験ケースの追加が必要である。

3.2 河床変動後の水面形

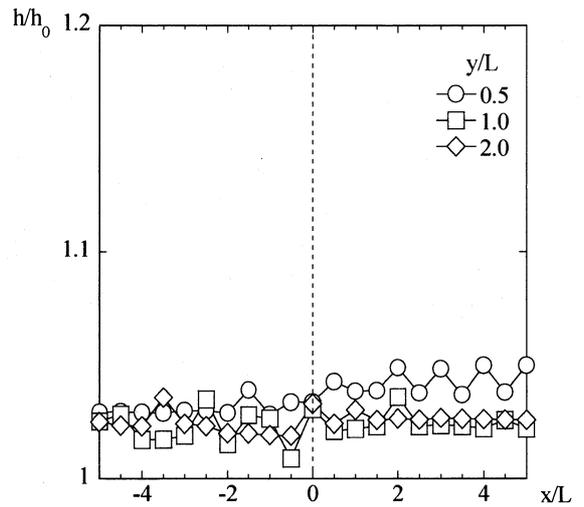
図-6は河床変動後の水制中央($y/L=0.5$)、水制域境界($y/L=1.0$)、水路中央($y/L=2.0$)の水面形を示している。ここでは水深が水制高の2倍のケースのS-5、越流水深が最も小さいケースS-9、及び非越流型水制のケースNS-11の3ケースについて示す。

ケースS-5では、水制より上流側では3側線においてほぼ一定である。水制より下流側では水制中央の側線で他の2側線よりも大きな値をとった。ケースS-9では右岸側壁に近いものほど水位が高くなっていることがわかる。またいずれのラインも水制設置断面で流下方向に水位が低下しており、その水面勾配は右岸側壁に近いほど大きい。非越流型水制のケースNS-11では、ケースS-9と同様、右岸側壁に近いほど水制前後の水位が高い。また水制中央と水制域境界のラインでは水制直前で水位が急になり、水制背後にかけて急激に低下している。またその変化は右岸側壁に近いほど大きく、設定水深の約1割に達している。

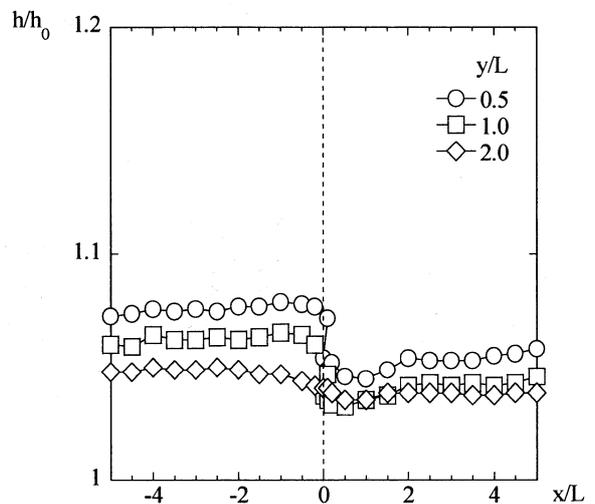
以上のように、相対水制高が大きくなるほど初期水深に対して水制前後の水面勾配の変化が大きくなっていることがわかる。これは水深が小さくなるほど流れに対して水制の抵抗となる割合が増加するためである。

3.3 流況特性

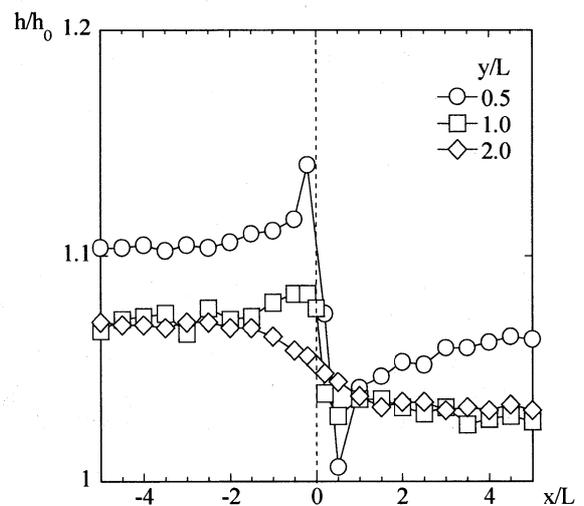
水制の影響が顕著に見られた $z/H=0.6$ 平面における流速ベクトル図を図-7に示す。



(a) ケース S-5

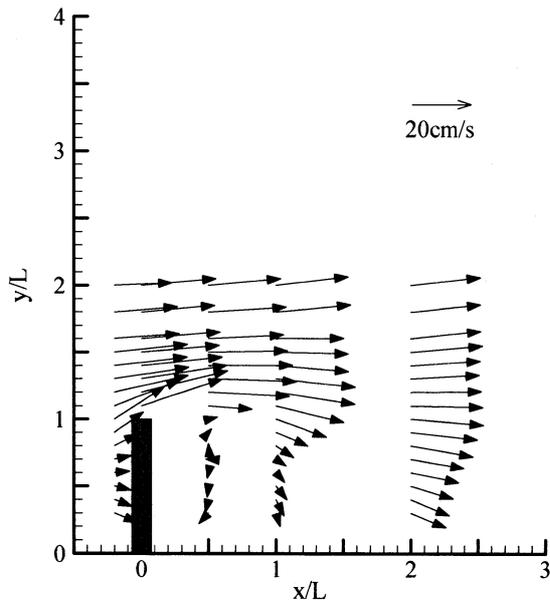


(b) ケース S-9

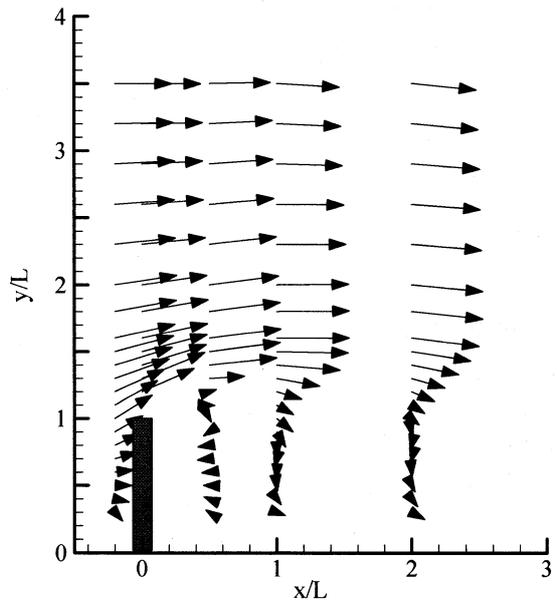


(c) ケース NS-11

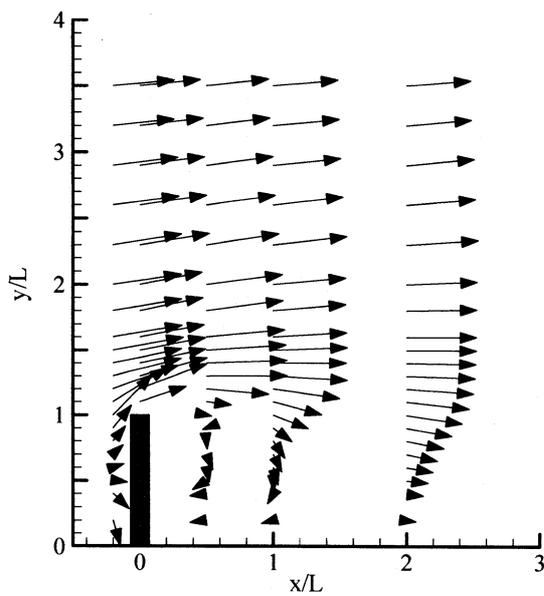
図-6 水面形の縦断分布



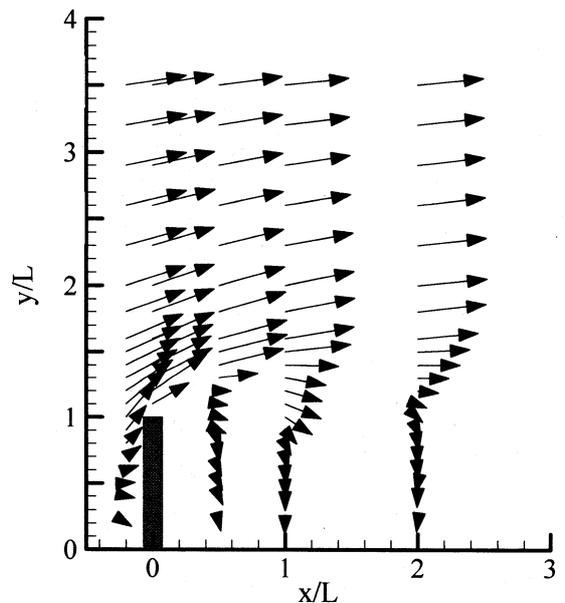
(a) ケース S-3 ($H/h_0=0.3$)



(c) ケース S-9 ($H/h_0=0.9$)



(b) ケース S-5 ($H/h_0=0.5$)



(d) ケース NS-11 ($H/h_0=1.1$)

図-7 平面流況 ($z/h_0=0.6$)

ケース S-3 では、水制先端部では水はねが生じ、水制背後の $x/L=0.5$ で逆流が見られるが、水制長の1倍にあたる $x/L=1.0$ ではすでに順流となっている。ケース S-5 では水制長の1倍まで、ケース S-9、NS-11 では水制長の2倍下流にあたる $x/L=2.0$ まで水制域内で逆流が生じている。またケース S-9 では、 $x/L=2.0$ の水制域境界付近で右岸側壁に向かう流れが生じ、右岸側壁側に近づくにしたがって、その流れは下流方向に向きを変えている。ケース NS-11

では $x/L=2.0$ の水制域内全体で右岸側壁に向かう流れとなっており、主流域では、ほぼ全域にわたって左岸側壁に向かった流れが生じている。既存の研究⁹⁾より非越流型の場合、逆流域は水制長の約5~6倍という結果が得られている。本研究の非越流型のケース NS-11 の流速ベクトル図からも同程度の逆流域が存在することがうかがえる。以上のことから相対水制高が小さくなるにつれて水制による逆流域の範囲は小さくなるといえる。これは相対水制高が小さ

いほど水制を越流する流れが大きくなり、その流れと水制先端からの平面的な剥離渦との相互作用によるものだと考えられる。

水制先端部の主流側に向かう流速に着目すると、それは相対水制高が大きいほど大きい。このことは図-3 に示した砂の堆積位置が相対水制高が大きいほど中央に移動することと関連していると考えられる。

3.4 流速分布特性

流速ベクトル図と同様、流速分布も $z/H=0.6$ 平面で考察した。

水制が主流速に及ぼす影響を検討するため、図-8 に水制設置断面の主流域の横断分布を示す。

非越流型のケース NS-11 では水制先端部から水制長の1.5倍にあたる $y/L=1.5$ にかけて流速は急激に大きくなる。そこから左岸側壁側では断面平均流速の1.6倍の流速でほぼ一定となっている。越流型のケース S-5, S-3 は似た流速分布であり、水制先端部で断面平均流速の約1.3倍の流速が生じ、その流速は水路中央にかけて徐々に減速されている。そして水路中央付近で断面平均流速の約1.3倍の流速に達し、そこから左岸側壁にかけて流速は小さくなる。しかし越流型のケース S-9 は、他の越流型のケースと分布傾向が異なり、非越流型のケース NS-11 に近い分布となった。

以上のことから、相対水制高が大きいほど主流部の断面平均流速に対する流速は増加する傾向にある。越流型のケース S-9 は、非越流型の流速分布に近いことから相対水制高が1に近い越流型は非越流型の平均流特性を持つことが示唆される。

次に水制が水制域に与える影響を見るため、図-9 で水制中央背後($x/L=0.5, y/L=0.5$)における主流速の鉛直分布を示す。

ケース S-3 では水制高の8割の水深で逆流が生じている。そこから水面に向かうにつれて主流速が急激に大きくなり、水制高の1.5倍で最大流速が生じ、断面平均流速の1.5倍程度に達している。ケース S-5 は水制高より水面に近い部分ではケース S-3 と似た分布となっているが、水制高である $z/H=1.0$ 付近で主流速は0となる。そこから底面に近づくにつれて次第に逆流速が大きくなっている。また、ケース S-9 では底面付近で断面平均流速の3割ほどの逆流が見られ、水面に近づくにつれて次第に流速は大きくなり、水制高の6割のところではほぼ0で水面近くでは断面平均流速の約6割の主流速となった。ケース NS-11 では底面から水面まで大きな流速の変化はなくほぼ0で一様となっている。

図-10 は水制中央の $z/H=0.6$ の高さにおける主流速の縦断分布を示している。

越流型の3ケースは、水制前面で断面平均流速の3割程度の流速である。水制背後の $x/L=0.5$ で逆流が生じ、それ

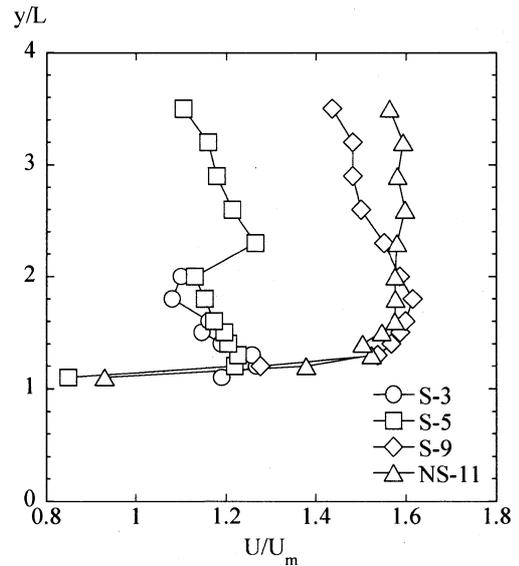


図-8 主流速の横断分布図 ($x/L=0, z/H=0.6$)

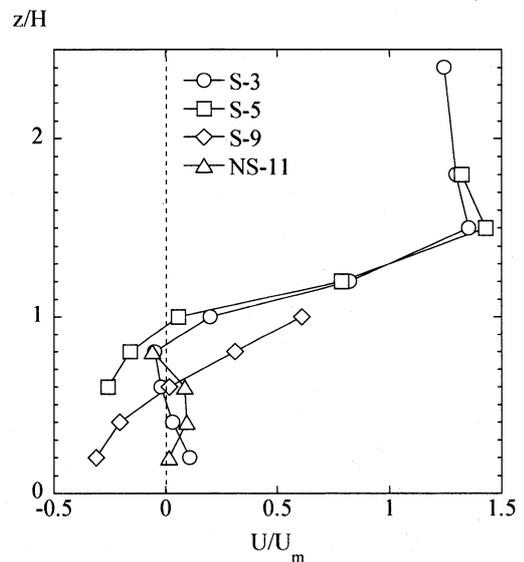


図-9 主流速の鉛直分布図 ($x/L=0.5, y/L=0.5$)

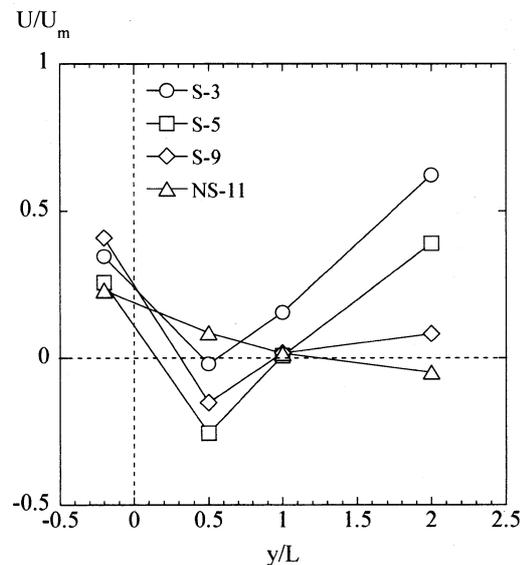


図-10 主流速の縦断分布図 ($y/L=0.5, z/H=0.6$)

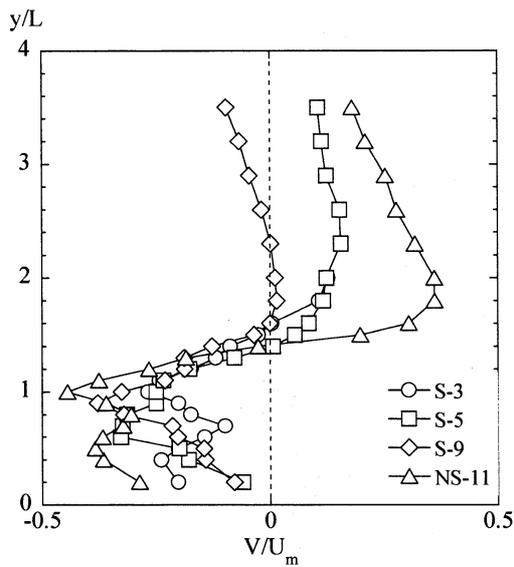


図-11 横断方向流速Vの横断分布 (x/L=1.0, z/H=0.6)

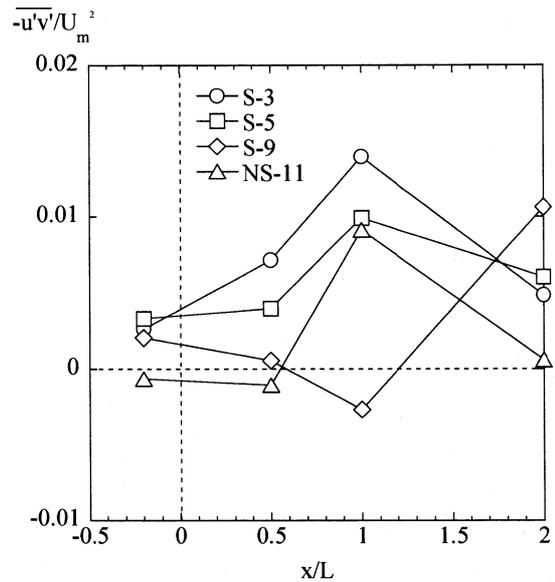


図-13 レイノルズ応力 $\overline{-u'v'}$ の縦断分布 (y/L=1.0, z/H=0.6)

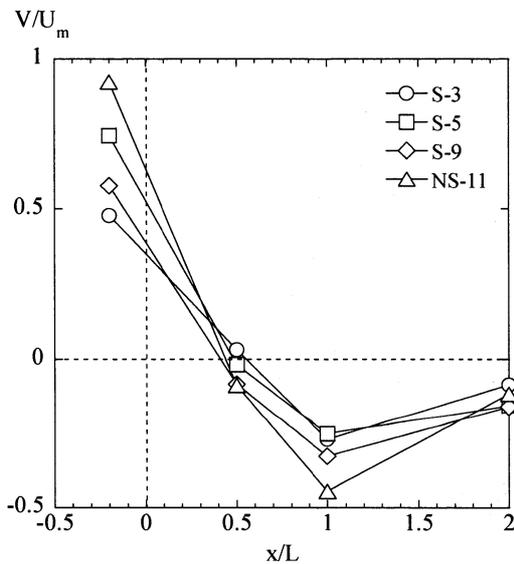


図-12 横断方向流速Vの縦断分布 (y/L=1.0, z/H=0.6)

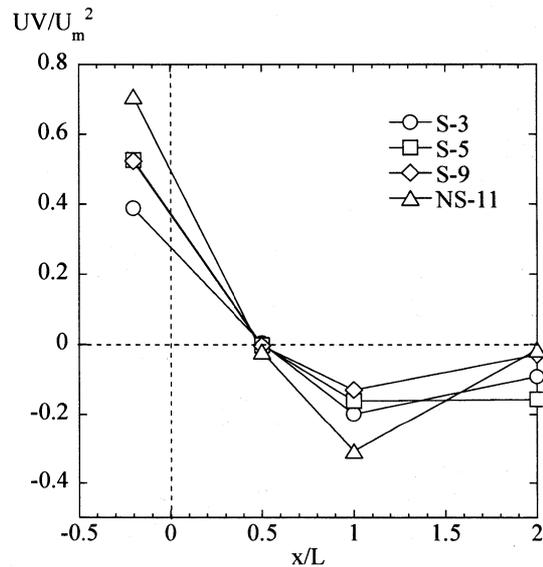


図-14 移流による運動量輸送UVの縦断分布 (y/L=1.0, z/H=0.6)

より下流側では徐々に流速は大きくなっている。その速度勾配は相対水制高が小さいほど大きく、相対水制高が大きいものほどより下流まで水制の影響があるといえる。非越流型のケース NS-11 では下流方向に流速が低下している。よって越流のように順流となるのはさらに下流だと考えられる。

よって図-7 の考察でも述べたように、ここからも相対水制高が大きいほど、より下流側まで水制の影響があると考えられる。

3.5 乱れ特性と運動量輸送

図-11 に水制域境界で主流域から水制域内に入ってくる

流れが最も顕著に見られた $x/L=1.0$ における横断方向流速 V の横断分布を示す。

いずれのケースも水制域内では主流域から水制域内に向かう流れが生じている。主流域はケース NS-11 で断面平均流速に対する横断方向流速が最大となり約 0.4 倍の流速が生じている。またいずれのケースも水路中央付近で最大流速が生じている。

図-12 に横断方向流速 V の水制域境界における縦断分布を示す。これはいずれのケースともに似た分布となった。水制前面では、水制域内から主流域に向かう流れが生じている。水制背後で横断方向流速はほぼ 0 となり、 $x/L=1.0$ で水制域内に向かう流速が最大となる。さらに下流の

$x/L=2.0$ においては若干の水制域内に向かう流れが見られる。

以上のことから、横断方向流速は相対水制高の違いによらず水制長の1倍下流で水制域内に向かう流れが最大と思われる。

図-13は水制域境界のレイノルズ応力の分布を示す。越流型、非越流型のケースともに、水制域境界の水制前面と水制背後でレイノルズ応力に大きな変化はなく、水制長の1倍下流で最大値となっている。

これより、レイノルズ応力の縦断分布は相対水制高の違いにそれほど影響を受けず、水制長の1倍下流で最大の値をとるといえる。よってこの点で主流速の最も急激な変化があると考えられる。

しかしケースS-9では他のケースと異なる分布となった。この違いがでた理由についてはまだはっきりと分かっていないため、今後検討が必要である。

図-14は水制域境界における移流による運動量輸送を示している。

水制前面では、水制域内から主流域への運動量輸送は、平均流の運動量の約4割から7割の大きさに達し、水制背後ではほぼ0となる。その後、 $x/L=1.0$ で主流部から水制域内に入ってくる運動量が最大となる。また図-13から乱れによる運動量輸送を考えると、移流の運動量輸送と同様に、 $x/L=1.0$ で主流部から水制域内に最も運動量が輸送されている。また図-13、14より移流による運動量輸送は乱れによるものより1オーダー大きく、単独水制周辺の運動量輸送は移流によるものが支配的であると考えられる。

4. 結論

単独水制周辺の河床と流れに対する水深と水制高の比である相対水制高が及ぼす影響について実験的に検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 河床変動については、相対水制高が大きいほど洗掘範囲は狭くなり、水制先端部で生じた最大洗掘深も小さい。その最大洗掘深は、越流型では相対水制高が大きくなるにつれて急激に小さくなる。しかし非越流型においては緩やかに減少する。ケースS-9の最大洗掘深は比越流型のケースと比較しても大きな違いがない。最大堆積位置は、相対水制高が大きくなるほど、右岸側壁から水路中央に移動する傾向にあるが、非越流型と相対水制高が最も大きい越流型のケースではほぼ同様の位置に堆積している。
- 2) 水面形は相対水制高が大きくなるほど初期水位に対して水制前後の水位は高くなっており、水制設置断面での流下方向の水面勾配も大きくなる。水制設置断面に近

いほど初期水位からの水位差が大きい。

- 3) 水制周辺の流速分布から、水制域内では相対水制高が大きくなるとともに、水制背後の逆流域は大きくなった。また水制設置断面の主流域では、相対水制高が大きくなると、半水深における断面平均流速に対する主流速は大きくなる傾向にあるが、非越流型と相対水制高が0.9のケースの横断分布は同様の傾向となった。主流速の縦断分布では、越流型では水制背後で下流に進むにしたがって逆流から順流になるが、非越流型では順流から逆流となった。
- 4) 水制域境界での乱れ特性は、相対水制高の変化によって大きな影響を受けないと考えられ、移流による運動量輸送はどのケースも水制背後でほぼ0となった。乱れと移流による運動量輸送はどのケースも水制長の1倍下流で水制域内に入ってくる傾向にある。またその運動量輸送は移流によるものが支配的であった。

参考文献

- 1) 室田明 編著：河川工学，技報堂出版，1986。
- 2) 山本晃一：日本の水制，山海堂，1996。
- 3) 福岡捷二，岡信昌利，川口広司，西村達也：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。
- 4) 大本照憲，平川隆一，井出賢正：越流型水制に対する二次流と流沙の応答，水工学論文集，第42巻，pp.1003-1008，1998。
- 5) 大本照憲，平川隆一：越流型水制群を伴う開水路流れの三次元構造，応用力学論文集，Vol2，pp.665-672，1999。
- 6) 大本照憲，平川隆一，渡邊訓甫：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，応用力学論文集，Vol.8，pp.875-882，2005。
- 7) 長坂剛，今野威一郎，加藤敦，富永晃宏：越流型水制群周辺の流れに及ぼす越流水深の影響，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp.202-203，1999。
- 8) 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。
- 9) 陣飛勇，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40巻，pp.787-792，1996。

(2008年4月14日 受付)