

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

EFFECT OF ASPECT RATIO ON BED TOPOGRAPHY AND HYDRAULIC CHARACTERISTICS AROUND SPUR DIKES

鬼束幸樹¹・秋山壽一郎²・鈴木鉄兵³

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA and Teppei SUZUKI

¹正会員 博(工) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²正会員 Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科

³学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

A lot of spur dikes were built in the Yodo and Kiso Rivers by De Rijke in the end of nineteenth century. Recently, the spur dikes has gathered great public attentions from a point of view not only in river engineering but also in water environment, because the spur dikes offers a comfortable environment to aquatic lives and plants as well as human beings in eco-systems. At present, some artificiality side-cavity has been constructed in the rivers for the purpose of the maintenance of the river environment. However, there is little information of form effects of the spur dikes on the bed shape and hydraulic characteristics. In this study, the bed topography and velocity in and around spur dikes in an equilibrium condition were measured with changing the aspect ratio (=streamwise distance of each spur dike / spanwise length of spur dike). It was found that the maximum depth of the scour hole increases with an increase of the aspect ratio and also that crest is located near the junction between the main-channel and side-cavity. The latter result is corresponding to the phenomenon of the Kiso River.

Key Words : spur dike, aspect ratio, bed topography, scour, open-channel flow

1. はじめに

明治時代にデレーケによって木曽川や淀川に連続水制が設置された。連続水制はその後何度も洪水に見舞われ、幾たびかの改修を経て現在の姿を形成している。木曽川の連続水制に着目すると、水制間で土砂が堆積あるいは河床が洗掘されており、水深および流速に関して大小様々な組み合わせが発生しており、各種水生生物に選好環境を提供している。また、土砂堆積によって一度陸化した場所には草本類が繁茂し、陸化後数十年経過すると木本類も繁茂し、各種陸上生物に選好環境を提供している。このように水制の設置をきっかけに形成される水域は「ワンド」と呼ばれ、「多自然型川づくり」あるいは「河川再生事業」を計画する上で積極的に採用されつつある。人工ワンドを設計する上で、ワンド設置後の河床形状および水理特性等を予測する必要がある、近年精力的にワンドの水理に関して研究が行われている。

まず、現象を単純に捉えた滑面のワンドの水理特性に

関して研究が行われた。Muto *et al.*¹⁾はアスペクト比（水制間隔/水制の横断方向長さ）が1および3の非越流型2連直角水制において、電磁流速計を用いた流速計測および紙トレーサーを用いた可視化計測を行い、アスペクト比が1の場合は、水制間で発生する渦の形状は時間的にほとんど変化しないが、アスペクト比が3の場合は渦の形状は時間的に変化することを指摘した。楠津ら^{2,3)}はアスペクト比が3, 5および10の非越流型2連直角水制においてPIVおよびLDAを用いた乱流計測を行い、アスペクト比が10の場合ではその他のケースと異なり、再付着現象が生じていることを明らかにした。また、池田ら⁴⁾は非越流型連続直角水制のアスペクト比を系統的に変化させて、電磁流速計を用いた流速測定を行うと共に、容量式波高計を用いた水面変動計測を行った。その結果、アスペクト比が3以上の場合では渦が流下に伴い合体することを解明した。富永ら⁵⁾は越流型2連直角水制における流れの3次元流況を図示し、非越流型の流況と全く異なることを指摘した。さらに富永ら⁶⁾、富永・井嶋⁷⁾、富

表-1 実験条件

L/B_w	Fr	$Re \times 10^4$	h (cm)	I
1	0.59	4.1	3.5	1/750
2	0.59	4.2	3.5	
3	0.61	4.0	3.4	
5	0.58	4.2	3.6	
8	0.59	4.1	3.5	

永・田本⁷⁾は越流型水制について、上向き、直角および下向きの状態でPIV計測を行い、下向き水制の場合は水はね効果が大いことを指摘した。以上の実験は全て滑面上で行われたものであるが、近年、粗面あるいは移動床実験も行われるようになった。

瀬津ら⁸⁾はアスペクト比が2の非越流型連続直角水制において珪砂を水路床に固定した実験および移動床実験を行い、移動床の場合は水制先端付近の洗掘領域から若干下流に形成される河床波が流れの境界条件となるため、移動床流れの方が流れが定常的になることを示した。福岡ら⁹⁾は越流型連続直角水制において、アスペクト比を1.5および2.0に設定した移動床実験をそれぞれ行い、アスペクト比が2.0の方が最大洗掘深が深くなり、洗掘領域も広くなることを示した。また、福岡ら⁹⁾は越流型連続水制について、上向きおよび直角の状態での移動床実験を行い、上向き水制の場合は水制間の堆積量が直角水制のものよりも少なく、最大洗掘深が浅いことを指摘した。大本・平川¹⁰⁾、木村ら^{11,12)}も同様な結論を得ている。さらに、福岡ら¹³⁾は透過型および不透過型の越流型連続水制の移動床実験を行い、透過水制の方が最大洗掘深が小さくなることを解明した。以上のように、水制周辺の河床形状を検討する実験が多くなされてきたが、アスペクト比が1.5～2.0程度のものがほとんどであり、アスペクト比を広範囲に変化させた実験はほとんどない。唯一アスペクト比を2.6～41.6に変化させた福岡ら¹⁴⁾の実験が存在するが、複断面河道の低水路に水制を設置したもので複雑である。こうした背景には実河川における水制のアスペクト比が2～3のものが約半数を占めることが挙げられる。しかし、既存の水制のアスペクト比は必ずしも何らかの指針に基づいて決められたものではなく、いわば経験的に導き出されたものといえる。人工ワンドを設計する上で、任意のアスペクト比における河床形状および流況を予測することは不可欠であるが、こうした知見は現在のところほとんど得られていないのが現状である。

本研究は、アスペクト比を系統的に変化させた越流型連続水制において移動床実験を行い、動的平衡状態の河床形状を計測すると共に電磁流速計を用いた流速計測を行い、アスペクト比の変化が河床形状および流況に及ぼす影響を解明するものである。

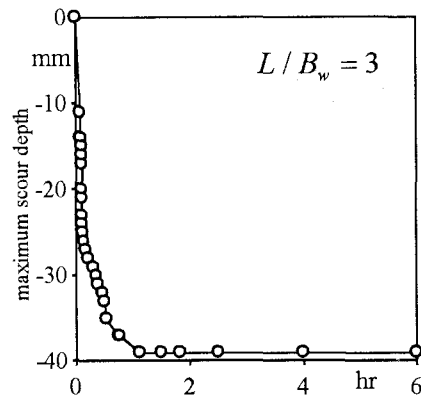


図-1 最大洗掘深の時間変化

2. 実験装置および実験条件

越流型連続水制の洗掘深および洗掘穴の範囲を決定するパラメータとして、①砂の比重、②レイノルズ数、③無次元掃流力、④水深と粒径の比、⑤水制高と水深の比、⑥水制の横断方向長さ和水深の比、⑦水制の流下方向幅と水深の比、⑧水制の設置角度および⑨水制間隔と水制長の比が挙げられる¹⁵⁾。このうち、①は事実上変化しないし、②の影響はほとんどない。従って、パラメータは③～⑨の7つとなるが、これら全てのパラメータを系統的に変化させること極めて困難である。そこで本研究では③～⑧をほぼ一定として、⑨に相当するアスペクト比のみを変化させることとした。

実験に用いた水路は長さ10m、幅0.4m、高さ0.4mの可変勾配型循環式直線水路である。水制の規格として、高さを0.06m、流下方向厚さを0.01m、水制の横断方向長さ B_w を0.1mとした。河床材料は平均粒径 $d_{50}=0.8\text{mm}$ の珪砂とした。水路下流端には0.3mmメッシュの網が設置されており、水路から流れ落ちる珪砂をトラップすることができる。

実験条件として表-1に示すようにアスペクト比 L/B_w を5ケース変化させた。ここに、 $Re \equiv 4RU_m/\nu$ はレイノルズ数、 L は水制間隔、 $Fr \equiv U_m/\sqrt{gh}$ はフルード数、 R は径深、 U_m は断面平均流速、 h は平均水深、 I は水路床勾配、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数である。水路の上流端から下流端まで水制が片岸に配置するように水制の本数を設定した。初期状態として平坦河床の厚さ0.05m、水制高さ0.01mとし、通水開始後徐々に流量を増加させた。また、流砂量によって時間間隔が異なるが、1～10分おきに水路下流側でトラップされた珪砂を水路上流端付近に散布した。動的平衡状態に達したかどうかは目視によって行った。なお、動的平衡状態に達する時間はアスペクト比によって多少異なるが、6時間～8時間程度であった。

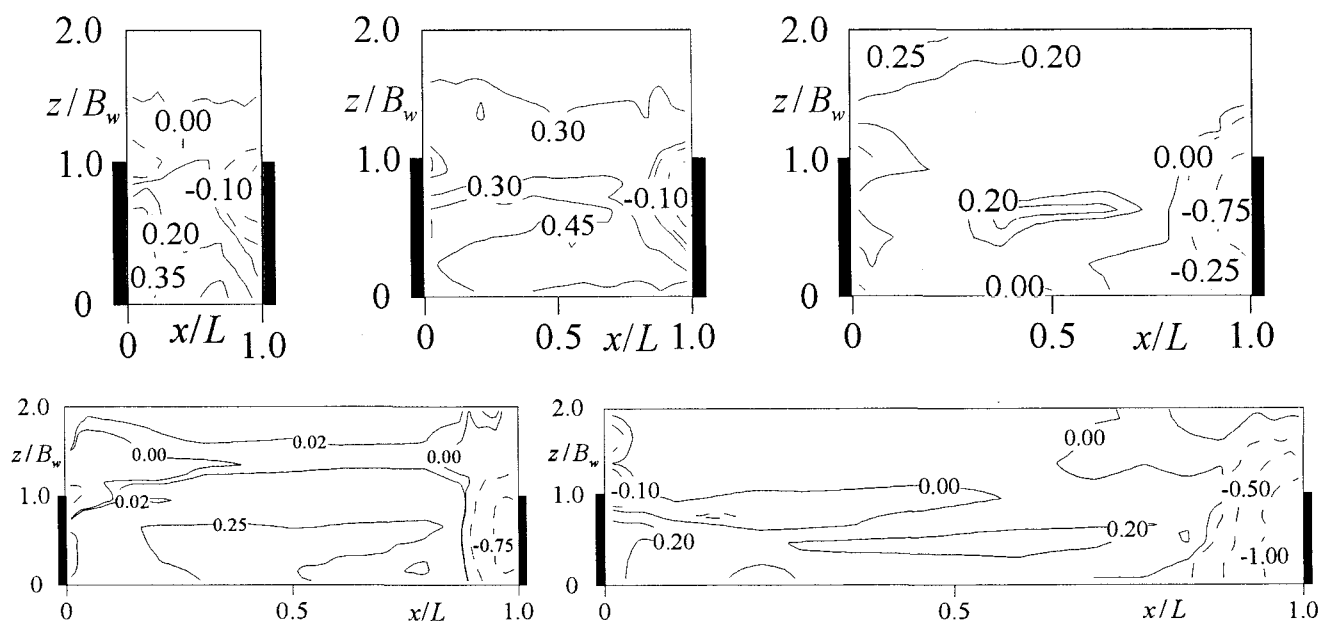


図-2 動的平衡状態における初期河床高からの変化量(cm) (上段左から $L/B_w=1, 2, 3$, 下段左から $L/B_w=5, 8$)

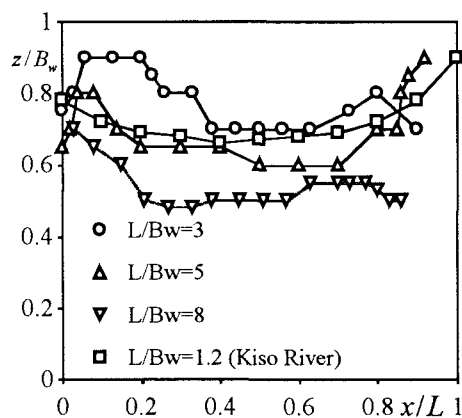


図-3 sand ridgeのクレスト形状

座標系として流下方向に x 軸, 鉛直上向きに y 軸, 水路横断方向に z 軸をとった。通水開始から動的平衡状態に達するまでの間, 水路上流端から8m程度下流側の水制において水路上部に取り付けられたデジタルカメラによって水制先端付近の洗掘状況が撮影された。水制には目盛りが記されており, 最大洗掘深の時間変化を算出することができる。動的平衡状態に達した後, 同様の場所において, 河床高計測および流速計測を行った。河床高計測にはポイントゲージを用いたが, 通常の針では流れが攪乱され河床形状が変化するため, 針に直径約1mmで長さが0.05mの針金を縛り付けて, 各ケース流下方向に40点, 横断方向に30点の合計120点の河床高の計測を行った。ただし, 後述するように, 凹部にsand ridgeが発生した場合はクレストの高さと, その x, z 座標を計測した。流速計測には2成分電磁流速計を用い, 水制天端と水面との midpoint の $x-z$ 平面において, 流下方向に6点, 横断方向に9点の合計54点で x 方向の瞬間流速 $\tilde{u} \equiv U + u$ および z 方向の瞬間流速 $\tilde{w} \equiv W + w$ を計測した。ここに,

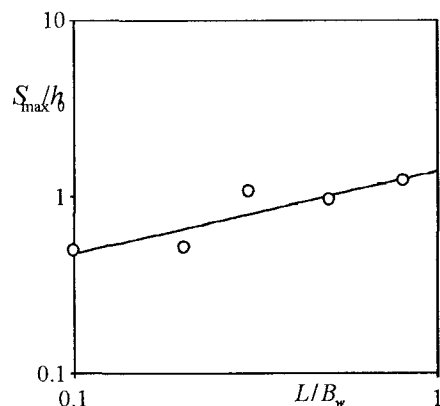


図-4 最大洗掘深とアスペクト比の関係

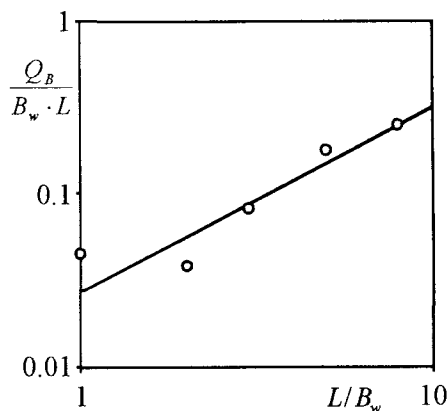


図-5 凹部内総堆積量とアスペクト比の関係

大文字は時間平均流速, 小文字は変動成分である。計測時間は51.2sで計測間隔は0.05sとした。

3. 実験結果および考察

- (1) 動的平衡状態に達するまでの最大洗掘深の変化
図-1にアスペクト比 L/B_w が3における動的平衡状態

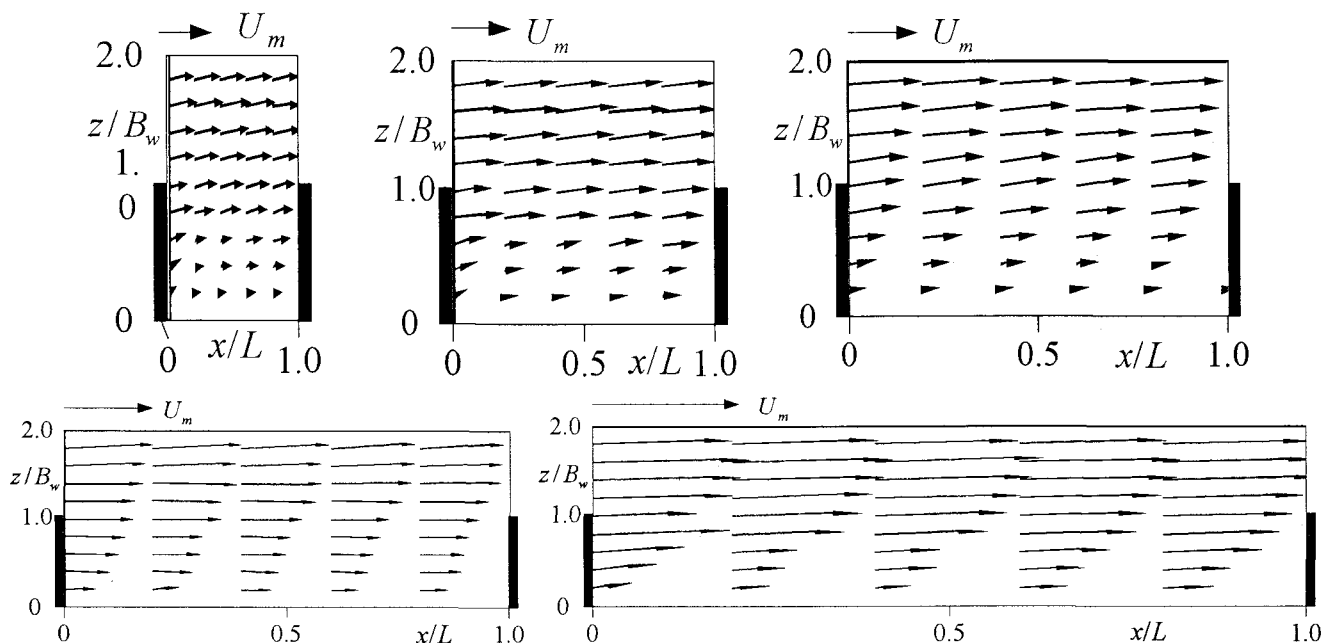


図-6 動的平衡状態における平面流速ベクトル（上段左から $L/B_w=1, 2, 3$ ，下段左から $L/B_w=5, 8$ ）

に達するまでの最大洗掘深 $S_{\max}^+ \equiv S_{\max}/h_0$ の時間 $t^+ \equiv U_m t/h_0$ に対する変化を示す。最大洗掘は水制の背後に発生していた。通水直後に急激に洗掘が進行し、その後洗掘が緩やかになっている様子が観察される。なお、以上の傾向は全てのケースにおいて観察された。したがって、6～8時間以上経過した状態は動的平衡状態であると判断される。

(2) 河床形状

図-2に動的平衡状態における初期河床高からの変化量を示す。アスペクト比 L/B_w が1の場合に着目すると、水制直下流の付け根付近で堆積が観察され、水制直上流の水制先端付近で洗掘が観察される。こうした状況は既往の研究^{8),9),13)}と一致する。アスペクト比 L/B_w が増加しても水制直下流における堆積および水制直上流における洗掘が観察されるが、また、全てのケースにおいて水制先端 ($z/B_w=1$) を結ぶ境界線よりも若干凹部の内部で堆積が観察される。図-2のコンターラインでは明瞭に表現されていないが、アスペクト比 L/B_w が3以上の場合、水制先端近傍での洗掘深が深いため、洗掘領域の外縁で安息角が生じ、明瞭な sand ridge が観測された。こうした sand ridge の発生は、木曽川のワンド¹⁰⁾でも観察される。図-3に sand ridge のクレストを結んだ線の位置を示す。ただし、木曽川のは上空写真から判断するため、sand ridge のクレストの位置を抽出することが困難である。そこで、木曽川については水際線で代用した。同図より、水制先端 ($z/B_w=1$) を結ぶ境界線よりも若干凹部の内部で堆積が観察され、その形状が円弧状であることが確認される。なお、木曽川のは若干主流側にずれているのは、水際線を代用したために生じた差異と考えられる。

図-4に動的平衡状態に達したときの最大洗掘深 $S_{\max}$ を初期状態の水深 h_0 で除したものとアスペクト比 L/B_w の関係を示す。アスペクト比 L/B_w の増加に伴い最大洗掘深 $S_{\max}$ が増加している様子が観察される。こうした傾向は、福岡ら¹⁴⁾の行った複断面直線水路に設置された不透水制群の実験でも得られている。これは水制間隔が増加するに伴い、水制に衝突する接近流速が増加するためと考えられる。

木村ら^{11),12)}は越流型水制において、水制の向きを上向き、直角および下向きに変化させ、下向き水制が最も凹部内の洗掘量が多いことを示した。しかし、アスペクト比 L/B_w と洗掘あるいは堆積量との関係は現在のところ解明されていない。凹部内における洗掘・堆積総量 Q_B は次式で求められる。

$$Q_B = \int_0^{B_w} \int_0^L (S - S_0) dx dz \quad (1)$$

ここに、 $S = f(x, z)$ は任意点の河床高で、 S_0 は初期河床高である。図-5に単位面積あたりの洗掘・堆積の総量 $Q_B/(B_w \cdot L)$ とアスペクト比 L/B_w の関係を示す。全てのアスペクト比 L/B_w おいて、 $Q_B/(B_w \cdot L)$ は正となっている。これは河道全体を考えたときに、主流路側ではほとんど抵抗が変わらないにもかかわらず、凹部付近での抵抗が増すために生じたものである。また、アスペクト比の増加に伴い $Q_B/(B_w \cdot L)$ が増加する様子が示される。アスペクト比が大きい場合、水制間隔が広くなるため、そこに流砂が堆積するからである。逆に、アスペクト比が小さいと、水制先端付近での洗掘領域の面積が相対的に大きくなるために、凹部内の総堆積量は減少するといえる。

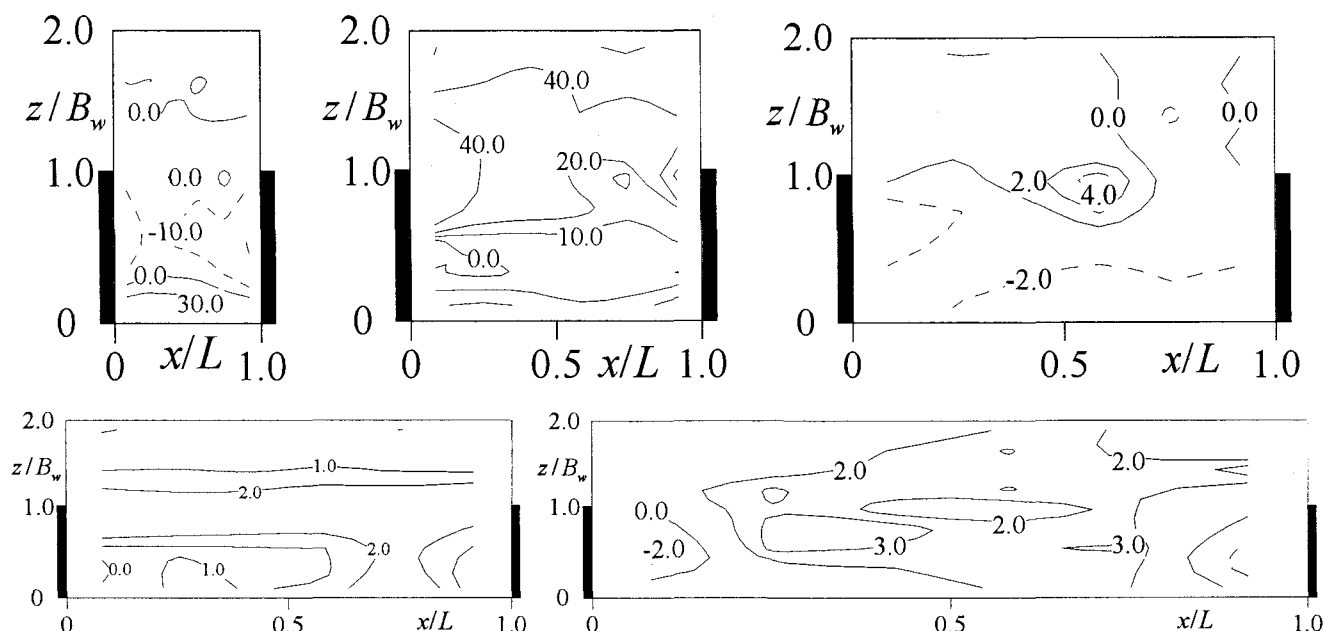


図-7 動的平衡状態における横断方向レイノルズ応力(上段左から $L/B_w=1, 2, 3$, 下段左から $L/B_w=5, 8$)

(3) 流況特性

図-6に断面平均流速 U_m で無次元化された流速ベクトル(U, W)を示す。全てのケースにおいて主流に近づくにつれて流速が増加し、凹部内ほど流速が減速する様子が観察される。これは凹部内での掃流力が主流部のものより小さくなることを示しており、図-2の傾向と一致する。一方、流下方向変化に着目すると、アスペクト比 L/B_w が1および2のケースでは、凹部内($0 \leq z/B_w \leq 1$)の水制上($x/L=0$)における流速 U が次の測定断面($x/L=0.2$)で急激に減少している様子が観察される。これは、 z 方向に軸をもつ渦の影響で流速が減速したものと推測される。ところが、アスペクト比 L/B_w が3以上のケースではそれほど顕著な流速の減衰は観察されない。同一の x/L でもアスペクト比 L/B_w の増加に伴い、水制高に対する距離が増加するので、より平面的な挙動になったものと考えられる。一方で、水制先端($z/B_w=1$)を結ぶ境界線における流速に着目すると、横断方向流速 W がかなり小さいことが観察される。この傾向はアスペクト比 L/B_w の増加に伴い顕著となる。仮に鉛直方向に流れが変化しているのであれば、連続の式を考慮すると有限な横断方向流速を有する可能性が高くなる。したがって、アスペクト比 L/B_w の増加に伴い、水制近傍を除けば流れは平面的にとらえて差し支えない。

図-7に動的平衡状態における横断方向レイノルズ応力分布を示す。アスペクト比 L/B_w が小さい方がレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}/U_m^2$ の絶対値が大きくなっている。これは、水制間隔が狭いために単位面積あたりの水制によるかく乱作用が増加したことによると考えられる。

(4) 運動量交換率および質量交換率

木村ら^{17),18)}は凹部と主流部との間の質量交換率 M および運動量交換率 θ を式(2)および(3)で定義した。

$$M = \frac{1}{\rho U_m L} \int_0^L \rho |\overline{w}| dx \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U_m^2 L} \int_0^L \overline{\rho u w} dx \quad (3)$$

ここに、 ρ は水の密度である。図-8に質量交換率 M を、図-9に運動量交換率 θ を示す。両図には、滑面で非越流型連続直角水制の池田ら⁴⁾の結果、滑面で非越流型2連直角水制の棚津ら^{2),3)}の結果、移動床および砂を水路床に固定した非越流型2連直角水制の棚津ら⁸⁾の結果およびLESで計算された滑面で非越流型連続直角水制の池田ら¹⁹⁾の結果も併示している。質量交換率 M に関しては、本実験結果は既往の実験結果よりも小さな値となっている。非越流型の場合は水制先端から発生する水平渦によって横断方向流速の変動が大きくなるが、本研究が対象とした越流型水制の場合では z 方向に軸をもつ流れが流況を3次元化させることで水平渦が抑制されたことが原因と考えられる^{5),7)}。一方、運動量交換率 θ に関しては、アスペクト比が大きな場合は非越流型のものと同オーダーであるが、アスペクト比が小さい場合は運動量交換率 θ の絶対値が大きな結果となっている。これは、アスペクト比が小さい場合は、水制背後で流れが3次的になるために、鉛直方向のシアで発生した乱れが再配分されて生じたものと考えられる。

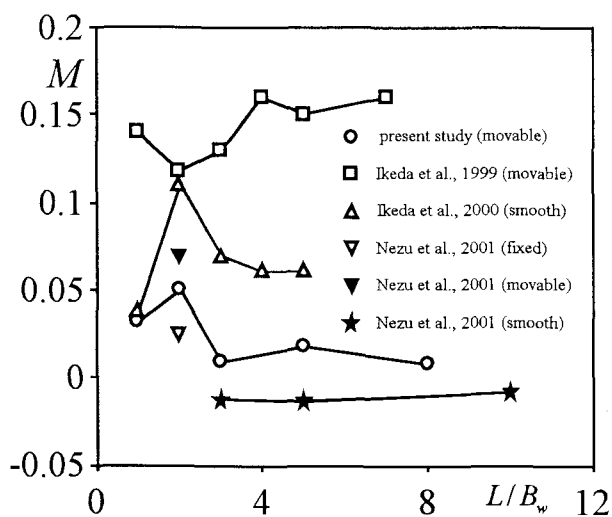


図-8 質量交換率

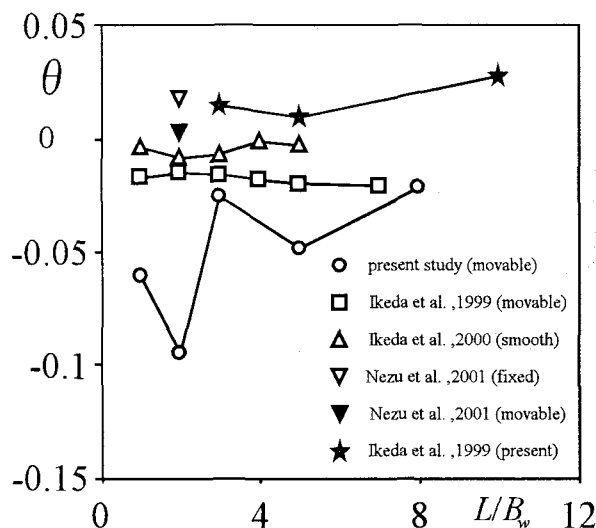


図-9 運動量交換率

4. おわりに

本研究は、アスペクト比のみを系統的に変化させた越流型連続水制において移動床実験を行い、動的平衡状態の河床形状を計測すると共に流速計測を行い、アスペクト比の変化が河床形状および流況に及ぼす影響を解明したものである。得られた知見を以下に示す。

- (1) 水制先端付近では全アスペクト比で河床が洗掘されるが、アスペクト比が増加すると水制間隔が広がるので水制への接近流速が増加し、最大洗掘深は深くなる。
- (2) アスペクト比の増加に伴い水制先端の洗掘領域の面積が相対的に減少するため、総堆積量は増加する。
- (3) 越流型水制の場合は、非越流型水制よりも水平渦の発達が抑制されるために、凹部内と主流との間の質量交換率が小さくなる。一方、アスペクト比が小さい場合は、水制背後の鉛直シアで発生した乱れが再配分されるために、運動量交換率は大きな値をもつ。
- (4) 本実験はアスペクト比のみを変化させたものであり、2. に示したその他の6つのパラメータをほぼ一定としている。従って、本実験結果は限定的な条件で得られたものであり、現時点では実河川に適用可能とは考えにくい。今後、アスペクト比以外のパラメータを系統的に変化させた実験を行い、総合的に水制周辺の水理を解明する必要がある。

謝辞：本研究を行うに当たり、多大な協力をいただいた九州工業大学学部生の尾関弘明氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) Muto, Y., Imamoto, H. and Ishigaki, T., *Proc. of 12th Congress of APD-IAHR*, pp.353-362, 2000.
- 2) 柳津家久, 鬼束幸樹, 池谷和哉, 土木学会論文集, No.Ⅱ-55, pp.53-61, 2001.

- 3) 柳津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 土木学会論文集, No.684/Ⅱ-56, pp.11-20, 2001.
- 4) 池田駿介, 吉池智明, 杉本高, 水工学論文集, 第43巻, pp.281-286, 1999.
- 5) 富永晃宏, 中野義郎, 藤田亨良, 水工学論文集, 第44巻, pp.1041-1046, 2000.
- 6) 富永晃宏, 井嶋康二, 水工学論文集, 第46巻, pp.475-480, 2002.
- 7) 富永晃宏, 田本典秀, 水工学論文集, 第48巻, pp.805-810, 2004.
- 8) 柳津家久, 鬼束幸樹, 矢野勝士, 水工学論文集, 第46巻, pp.559-564, 2002.
- 9) 福岡捷二, 西村達也, 岡信昌利, 川口広司, 水工学論文集, 第42巻, pp.997-1002, 1998.
- 10) 大本照憲, 平川隆一, 応用力学論文集, Vol.2, pp.665-672, 1999.
- 11) 木村一郎, 北村忠紀, 鷺見哲也, 庄建治朗, 武田誠, 鬼束幸樹：ワンドの水理と河川環境, 平成11年度～平成13年度河川懇談会共同研究報告書, 2001.
- 12) 木村一郎, 北村忠紀, 鷺見哲也, 武田誠, 鬼束幸樹, 庄建治朗, 大塚康司, 河川技術論文集, 第8巻, pp.365-370, 2002.
- 13) 福岡捷二, 渡邊明英, 川口広司, 安竹悠：水工学論文集, 第44巻, pp.1047-1052, 2000.
- 14) 福岡捷二, 川口広司, 安竹悠, 春名聡志, 水工学論文集, 第46巻, pp.481-486, 2002.
- 15) 山本晃一：日本の水制, 1996
- 16) 建設省木曾川下流工事事務所：木曾三川下流部空中写真, 1995.
- 17) 木村一郎, 細田尚, 友近文志, 土木学会論文集, No.509/Ⅱ-30, pp.99-109, 1995.
- 18) 木村一郎, 細田尚, 安永良, 村本嘉雄, 水工学論文集, 第41巻, pp.711-716, 1997.
- 19) 池田駿介, 杉本高, 吉池智明, 土木学会論文集, No.656/Ⅱ-52, pp.145-155, 2000.

(2004. 9. 30 受付)