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

A study on Morphological response and Flow characteristics during Rising and Falling stages around a Groin

平川隆一* • 渡邊訓甫** • 大本照憲*** • 副島佑介**** • 常盤俊輔***** Ryuichi Hirakawa, Kunitoshi Watanabe, Ohmoto Terunori, Yusuke Soezima and Syunsuke Tokiwa

* 博(工) 佐賀大学助教 理工学部都市工学科(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地)
** 工博 佐賀大学教授 理工学部都市工学科(〒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 熊本県熊本市黒髪二丁目 39番1号)
**** 学(工) 佐賀大学大学院博士前期課程 工学系研究科(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地)
***** 修(工) 日本工営株式会社(〒102-8539 東京都千代田区麹町五丁目4番地)

The groyne changes from the state of non-overflow to the state of overflow in the actual river according to the flow rate. In that case, it is thought that the riverbed around the groyne always changes. There are a lot of uncertain points of the bed level variation when the flow rate is consecutive and it changes. Then, it aims to clarify the time-changing characteristic of the bed form around a single groyne for a unsteady flowfield in the present study. The bed form in the flooded season has grown the scale of the scour and piling up as the flow rate increases as a result of the experiment. The back filling of the scour and a decrease in the piling up thickness were caused immediately after having entered the falling period.

Key Words: groin, unsteady flow, morphological response, flow characteristics

1. 序論

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、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。このような水制は、平水時には 水中に没しない非越流型、増水時には水位が水制高さを上 まわる越流型が多く使われている。

実河川において、水制は周辺の河床の洗掘や土砂の堆積 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.

これまでに水制に関する研究では、越流型水制群の流れ 構造に着目したもの^{1), 2), 3)}, 越流型水制群の河床変動に関 する研究についても、水制群の向きに着目したもの^{4), 5), 6)} がいくつかある.

このように水制の高さと流量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.しかしながら,水制が非 越流状態から越流状態へと遷移するような非定常流における水制周辺の河床変動や,流れ構造の変化に関しては不 明な点が多い.非定常流の室内実験は、複断面開水路を対象とした研究は幾つかなされている^{7,8,9}.しかしながら、河川構造物周辺の河床変動を対象とした研究はほとんど無い.

そこで本研究では、直線水路に設置された単一水制を対象として、水制の高さを一定にして水深を系統的に変化させることによって、増水期と減水期における河床変動と流れ場の特性を明らかにすることを目的とする.

2. 実験方法および条件

2.1 実験水路

実験水路の概略を図-1 に示す.水路幅 40cm,有効水路 長 18m の長方形可変勾配型開水路であり、上流端に流量 制御装置,下流端には転倒堰を備えている.水路側壁はほ ぼ滑面であり、河床には粒径 d=0.97mm の均一砂を 15cm の厚さで敷き均した.

水制はステンレス製であり,長さ L=10cm,高さは 20cm,厚さが約 2cmの直方体である.ただし,砂厚が 15cmのため,初期河床からの高さは H₀=5cm となっている.それを右岸側壁に 1 基,側壁に対して直角に設置した.

座標系は、流下方向を x 軸、水路横断方向を y 軸、鉛直 方向を z 軸とした.



2.2 実験条件

水制高 H₆=5cm に対して,表-1 の条件で通水を行った. 水路床勾配は,流量ピーク時にフルード数が約0.2 となる ように約 1/4500 を採用した.通水した流量ハイドログラ フを図-2 に示す.本研究では,流量ピーク時の水深が水 制高さの2倍となるように,上流端の流量制御装置で制御 している.また増水期と減水期の河床形状を明らかにする ために,約1時間ごとに9つのステージを設定している.

2.3 計測方法

各ステージにおいて,河床形状と水面形を計測した.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)を用い,約1cm間隔でデータを取得した.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),水制先端部(y/L=1.0),および水路中央 部(y/L=2.0)における3測線の縦断水面形を計測した.

流速の測定では砂を固定した平坦河床を対象とし,各ス テージの流量を通水した.そこでは I 型電磁流速計 (KENEK, VM-801H)を用いて,主流方向と横断方向の 流速成分 u, v を計測した.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.

3. 実験結果

3.1 水面形

各ステージの水面形を図-3 に示す.水制設置断面の水 深h'で無次元化している.また,増水期と減水期のほぼ同 じ流量のステージを同時にプロットしている.

水深がもっとも浅く,水制が非越流状態のステージ R-1 において,水制中央部の y/L=0.5 では,水制前面で水位上 昇,背後では下降が生じ,それらの絶対値は同程度である. 水制先端の y/L=1.0 では,水制前面では横断方向にもっと も高くなり,水制背後の水面の減少は最も小さくなってい る.しかし高低差は y/L=0.5 のラインと同程度である.水 制長 2 倍で水路中央でもある y/L=2.0 では, y/L=0.5 のライ ンと同様な形状になっているが,水制を挟んだ落差は減少 している.一方,減水期のステージ D-9 の y/L=0.5 では, 水制の上流側において増水期のステージ R-1 よりも水面 勾配が大きい.また水制前面から水制背後にかけての水面 勾配も,増水期のステージR-1 に比べて大きくなっている. y/L=1.0 では水制前面での極大値を取る位置が y/L=0.5 よ り水制側に近づいている.y/L=2.0 では極大値は水制設置

表-1 実験条件

実験ケース		ステージ名	勾配	流量 Q (ℓ/s)	Fr数
非越流	増水期	R-1	1/4500	1.0	0.17
		R-2		2.1	0.18
越流		R-3		3.1	0.18
		R-4		5.6	0.20
		R-5		8.9	0.21
	減水期	D-6		5.4	0.20
		D-7		3.4	0.19
十十十十十		D-8		2.2	0.18
非越沉		D-9		1.2	0.17
$ \begin{array}{c} 10\\ 8\\ 6\\ 0\\ 4\\ 2\\ 0\\ 0\\ 2\\ 4\\ 2\\ 0\\ 0\\ 2\\ 4\\ 2\\ 0\\ 0\\ 2\\ 4\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\$					
図─2 流量ハイドログラフ					

断面に生じた.また、全体的に減水期の方が増水期に比べて、水制背後の水深の回復が押さえられている.

越流状態において水深が最も浅い状態では、増水期のス テージR-3のy/L=0.5において、水制を挟んだ上昇量と下 降量はほぼ同程度である。y/L=1.0では、y/L=0.5と同様に 水制設置断面前後の水面の上昇と下降はほぼ同程度であ るが、水制背後での極大値を取る位置が y/L=0.5 よりも下 流側へと移動している。y/L=2.0では、水制前面の水位上 昇よりも水制背後の水位下降のほうが大きくなっている。 減水期のステージ D-7 では横断方向への変化はあまりな く、全ての計測線において水制前面の水位上昇より水制背 後での下降の方が大きくなっている。また全体をみると、 水制よりも上流の水位上昇は、減水期の方が抑えられてい るが、水制よりも下流での水位下降は、増水期と減水期で あまり変わらなかった。

流量ピーク時よりも1段階流量が少ないステージでは、 増水期のステージ R-4 において、y/L=0.5 では水制前面の x/L=-6程度で極大値を取っており、水制前面の上昇量より 水制背後の下降量が大きい.y/L=1.0では水制前面のx/L=-4 程度と極大値の位置が水制域内に比べて下流側へと移動 しているのが分かる.また水面勾配は y/L=0.5 よりも減少 している.y/L=2.0 では極大値を取る点がさらに水制設置 断面へと移動している.また水面勾配は y/L=0.5 と同程度 である.ステージ R-4 では、水制上流側で値が減少した後、 水制直前面で上昇しており、水路中央側へと向うほど、そ の減少値が大きくなり、水制前面での減少したときの極小 値の位置は上流側へと移動している.減水期のステージ D-6 はステージ R-4 と形状が全体的にほぼ等しくなり、増 水期と減水期の差は見られない.

流量ピーク時のステージR-5 では、ステージR-4 と同様





3.2 河床形状

初期河床からの変動量 Z_sの時間変化を図4 に示す.ス テージ R-1 ではほとんど変化はなかった.ステージ R-2 は 水制先端部で流下方向へと伸びる洗掘が生じ,その下流か ら主流部に向かって堆積が見られる.最大洗掘深は約 1cm であり,最大洗掘深の位置は水制前面の水制先端付近であ った.最大堆積は水制背後の水制先端部よりも主流側 (x/L=0.8, y/L=1.1)に発生し,その大きさは約 1cm である.

ステージR-3では、ステージR-2と洗掘と堆積の位置に 大きな変化はない.しかし洗掘の形状が水制先端を回りこ むような形状へと変化した.また最大洗掘深はほとんど変 化がなかったが、最大堆積は約1.2cmとなりわずかに増加 した.ステージR-4では、最大洗掘の位置は横断方向は流 量の増加前と比べて変化がなく水制先端付近であるが、流



下方向位置が水制前面から水制設置断面付近へと移動し、 その洗掘深は約2cm であり、ステージ R-3 と比較して最 大洗掘深は約2倍になった.洗掘範囲は水路中央側へと拡 大したが、右岸側への拡大はみられない.堆積範囲は水路 中央側へと大きく増加したが、洗掘範囲と同様に右岸側へ の拡大はみられなかった.堆積は主流部と水制域内の2箇 所に現れ、後者で最大堆積となったが、堆積厚には変化が なかった.

流量がピークとなるステージR-5 では、洗掘範囲、堆積 範囲、最大洗掘深、最大堆積厚の全てが、増水期で最も大 きくなった.洗掘範囲は流下方向よりも横断方向の拡大が 顕著である.また最大洗掘深は約3.7cm となり、ステージ R-4 の約1.8 倍となった.最大洗掘深の発生位置は、水制 前面へと移動している.堆積範囲も横断方向への拡大がみ られる.また最大堆積は水制域境界から右岸側へと移動し、 その大きさは約2.4cm となり、ステージR-4 の約2倍とな った.





図-4 河床形状の時間変化

減水期のステージ D-6 では、流量ピーク時と比べてさら に堆積が右岸側と流下方向に拡大している.また主流部へ の拡大はみられず、そのほかは大きな変化はみられない. 減水期のステージ D-7~D-9 の河床形状は、どれもステ ージ D-6 と比べて顕著な変化は見られなかった.

河床高の縦断分布の時間変化を図-5~7 に示す. 図-5の 水制のほぼ中央部のy/L=0.6 では、増水期には洗屈や堆積 が見られない. 流量ピーク時のステージ R-5 では水制前面 に約 3cm の洗掘が生じている. その後の減水期では洗掘 形状に変化は無く、埋め戻しも起きていない. また流量ピ ーク時に水制背後では約2.5cm の堆積が生じている. 減水 期のステージ D-6 では堆積厚に変化は見られなかったが、 堆積が下流側へ拡大している. その後の減水期では変化は 見られなかった.

図-6の水制先端部よりも少し水制域内に位置する v/L= 0.9 の水制前面の洗掘は、流量の増水期に洗掘が進行して いる. 流量ピーク時のステージR-5 で大きく洗掘され, 極 大洗掘深はステージR-4の約3倍となっている. 減水期に 入ると、流量ピーク時からステージD-6では洗掘が全く進 行していない. ステージ D-6 からステージ D-7 でも洗掘形 状に変化はないが,ステージD-7からステージD-8にかけ ては極大洗掘深が小さくなっており,約5mmの埋め戻し がみられる.水制背面での堆積は、増水期に大きくなって おり、ステージR-2、R-3 ではそれぞれ 0.7cm、1.2cm の堆 積が x/L=0.6 の位置に発生し、ステージ R-4 では堆積厚が 増しつつ, x/L=1.0 の位置に移動し堆積が下流に進行して いる. 流量ピーク時では堆積厚が約 2cm であってこの断 面では最も大きくなり、ステージR-4よりも下流側へと移 動している. 流量ピークからステージ D-6 の減水期にかけ ては、堆積の下流への移動は続いているが、堆積厚は5mm 程度小さくなっている. その後の減水期には、大きな変化 は見られなかった.

図-7 の水制先端部よりも少し水制域外に位置する y/L=1.1の河床形状は,洗掘が増水期のステージ R-2 から 水制設置断面付近において始まり, 流量増加と共に進行し ている. 極大洗掘深の位置は、 増水期では水制設置断面付 近であるが、流量ピーク時では水制前面へと移動している. 減水期に入ると洗掘形状は変化しておらず, 埋め戻しは生 じていない. 堆積は洗掘の背後に発生し, ステージR-2お よび R-3 は堆積厚が増加しているが、 ステージ R-4 ではス テージ R-3 と比較して約 5mm の減少がみられる. これは ステージ R-4 の堆積範囲が下流側へと大きく進行したた めだと思われる. 流量ピーク時のステージR-5 では堆積厚 と堆積範囲は大きく増加し、堆積厚はステージR-4の約2 倍となり、堆積範囲は下流側へ約1.5倍に広がった.減水 期に入った後のステージD-6とD-7では、堆積形状に大き な変化は見られないが、ステージD-8とD-9ではわずかに 堆積範囲が下流側にのびている.

河床高の横断分布の時間変化を図-8~10 に示す.図-8 の水制前面において、ステージR-1 では変動はほとんど起 きていない. 流量が増加し、ステージR-2 になると水制先 端より洗掘が始まり、約 1cm の洗掘が生じている. さら



に流量が増加したステージ R-3 では洗掘深に変化が無か かったが、ステージ R-4 では洗掘深がステージ R-2 および R-3 の2 倍に進行した.また極大値を取る位置はいずれも 水制先端の y/L=1.0 付近である.流量ピーク時では洗掘が 大きく進行し、約 3.5cm に達した.極大値は水制域内 (y/L=0.8)に移動している.減水期に入っても、ステージ D-6 では水制先端付近で洗掘が進行している.流量が減少 したステージの D-7 では、y/L=0.7~1.0 付近で約 5mm の 埋め戻しが見られ、ステージ D-8 では水制域内でさらに 5mm 程度の埋め戻しが起きている.その後のステージ D-9 では、D-8 と比べて大きな変化は見られなかった.

水制設置断面の図-9 では、ステージ R-1 では水制先端 部であっても洗掘や堆積は生じていない.その後の増水期 において、水制先端部の最大洗掘深は、ステージ R-2 およ び R-3 で約 1cm、ステージ R-4 では約 2cm、ピーク時のス テージ R-5 には約 4cm と深くなっている.減水期では、 流量ピーク時の形状から大きな変動はない.

水制背後の図-10 でも、増水期のステージ R-1 では初期 河床からの大きな変動は起きていない. ステージR-2 でも 洗掘はみられないが、 y/L=0.9 の水制先端付近で約 0.7cm の堆積が見られる.ステージR-3でも洗掘は見られないが, 水制先端付近の堆積が約 1cm に増加している.洗掘の傾 向が現れるのは次のステージR-4 であり、水制先端部の洗 掘の両端に堆積が見られる形状になった. その堆積は、ス テージ R-2 と R-3 で見られていた物が水制域内の y/L=0.6 ~1.0 の範囲へと移動し、堆積厚は減少している. 流量ピ ーク時のステージR-5では,洗掘がステージR-4の2倍程 度に成長している.洗掘の左側の堆積は変化がないが、右 側の堆積はさらに水制域内へと移動し、y/L=0.4~1.0の範 囲となった.また堆積も進行し、1.2cm程度になった.減 水期のステージD-6では、流量や水位が減水しているにも かかわらず洗掘が進行している. 極大洗掘深は約1.5cm と なり、また極大堆積厚がわずかに減少し、その位置は右岸 側へと移動している. さらに減水が進んだステージD-7 で も洗掘が進行しており、流量ピーク時の約2倍に達してい る. また水制域内の堆積厚は、減少している. 次のステー ジD-8では,主流部の極大洗掘位置で埋め戻しが生じてい る. 減水が進んだステージ D-9 でも埋め戻しが進み、ステ ージR-5と同程度の洗掘深となった.

最大洗掘深の時間変化を図-11 に示す. 増水期は、ステ ージR-1からステージR-5まで流量の増加と共に洗掘が進 んでいる. 最も流量の増加のあったステージR-4~ステー ジR-5では、最も最大洗掘深の増加が大きい. 減水期に入 っても、ステージD-6まで洗掘が進んでおり、流量ピーク 時から 5mm 程度洗掘が進行している. 次のステージD-7 では約 3mm の埋め戻しが起こり、次のステージD-8では ほぼ流量ピーク時の最大洗掘深と同じ値となった. ステー ジD-9 では最大洗掘深に変化は起きていない.

3.3 流速分布

非定常流場の各ステージにおける流速特性を把握する ために、平坦河床での定常流を対象とした流速測定を行っ





た. その結果を図-12~14 に示す. いずれも底面から 2cm の主流速の横断分布である.

図-12の水制直前面(x/L=-0.2)では、どのケースも主流部 から水制域内に向かって流速が低減している. 主流部と水 制域内共,ステージR-4およびD-6の流速は流量ピーク時 のステージ R-5 よりも大きいことが分かる. 図-13 の水制 設置断面(x/L=0)では、流量ピーク時のステージR-5と、そ の1段階前の流量であるステージR-4およびD-6は,水制 先端付近ではあまり流速に差は無いが、主流部の y/L=1.2 より左岸側ではR-4およびD-6のステージの流速が大きい ことがわかる.この断面は、図-9に示した流量ピーク時 のステージR-5から減水期のステージD-6にかけて極大洗 掘深の変化は起きておらず,またその後の減水期において も埋め戻しは起きていない箇所である. 図-14 水制背後 (x/L=0.5)の横断流速分布でも、主流部では流量ピーク時よ りもその1段階前のステージにおける流速の方が最も大 きい事が分かる. また y/L=1.6 より左岸側では, 流量ピー ク時と水制を越流する水深が浅い状態、および非越流状態 のステージR-2とD-8では流速がほぼ等しい結果と成った. 水制域内では、x/L=-0.2のケースと異なり逆流が起きてお り、流量最大時のみ順流である.

4. 考察

水制周辺の河床変動では、非越流状態時に水制先端部に 洗掘が生じ、その砂は水制先端部から水制長の約 0.5~1 倍付近に堆積していた.流量が増加し越流状態になっても、 ステージ R-3 では洗掘や堆積の位置は変わらなかった.こ のことから、越流水深が小さい場合の河床変動と流れ構造 は、非越流状態のそれらと同様の特性を持つことが考えら れる.増水期においてさらに流量が増加すると、最大堆積 厚は減少し、堆積の極大値は水制域内と主流部に存在した. これは、流量増加による越流水深の増加によって水制上部 を流れる流速が増大して、堆積物が流されたこと、また、 水制先端部の洗掘部の流速が増大し、洗掘範囲が下流へと



図-12 x/L=-0.2の定常速実験の主流速の横断分布







拡大し、そこにさらに流れが集中したことによって、堆積 領域が二つに分けられたと考えられる.即ち、水制設置断 面を通過した流れは、主流部へと向かう流れと、水制背後 に向かう流れに分かれていると思われる.減水期では、大 きな河床変動は生じなかった.このことから、河床形状は 流量ピーク時に形成され、その形状が水位が減少したとき の流れ場や水面形に影響を及ぼしていると考えられる.そ こで、図-3 に示した水面形を見ると、越流状態のステー ジR-4 と R-6 では波形がほとんど一致しており、ステージ R-3 と D-7 においても、多少のばらつきはある物の全体的 にはほぼ相似形を示した.しかしながら非越流状態のステ ージR-1 と D-9 を比較すると、水制背後において全く異な った分布形を示していた.

次に, 流況と河床変動の比較検討を行う. 水制直前面 (x/L=-0.2)の主流速の横断分布では、ステージD-6に対応す る流速の方が流量ピーク時の流速のステージ R-5 より大 きくなっていた.このことより、河床変動の際にステージ R-5の流量ピーク時から減水期のステージD-6に流況が変 化した後も最大洗掘深が増加したと思われる. またステー ジD-6と、ステージD-7およびD-8では流速差が大きい事 から,水制先端付近で巻き上げられていた砂がその箇所に 堆積し、埋め戻しが生じたと予測することができる.水制 背後(x/L=0.5)の河床の横断分布では、 ステージ D-7 から D-8 にかけて v/L=1.2~1.4 で埋め戻しがおきていた. これ は流量減少に伴って流速が小さくなり、またその位置は極 大洗掘が起きていた箇所でもあり、上流側から流れてきた 砂が入り込んだ後巻き上げられなくなったためと考えら れる. 河床の縦断形状において、減水期のステージD-6 で 堆積厚が減少し下流側に堆積範囲が伸びたのは, 流量ピー ク時であるステージR-5の流速より減水期のステージD-6 の流速が大きかったためと考えられる.

5. 結論

本研究では、単一水制周辺の河床変動と流れ場について、 流量を変化させた条件での水制の非越流状態と越流状態 に着目し、実験的検討を行った.これより得られた結果を 以下に示す.

- 1)水面形は、流量が増加するごとに水制設置断面前後の水面勾配が大きくなり、水制背後の極小値をとる位置は下流側へと移動した.減水期では増水期の同じ流量のケースと比較して、水制設置断面前後の水面勾配が小さくなり、極小値はさらに下流側へと移動した.水制前面で極大値をとる位置はやや上流側に移動した.また、水制域内から水路中央に向かうにつれ、水制前面で極大値をとる位置と水制背後で極小値をとる位置が下流側に移動し、水制設置断面の横断方向の水面勾配が減少した.流量が増加すると、増水期と減水期の水面形の形状の差は減少し、水制設置断面での落差や水制背後での極小値をとる位置が似る傾向にあった.
- 2) 河床の応答については、非越流状態での最大洗掘深は水 制先端付近に生じ、流量が増加し洗掘が進行すると、そ

の位置は水制先端から水制前面の水制域内へと移動した.減水期のステージでも洗掘は進行したが,減水が進むと水制前面の水制域内で埋め戻しがおき,極大洗掘の位置がまた水制先端側へと移動した.埋め戻しが見られたのは水制前面と,水制背後の水制先端に近い水制域内と主流域側であった.また埋め戻しは越流から非越流に減水する際に大きく出ていた.堆積は水制付近から生じ,増水期では堆積厚を増しながら右岸側に堆積が寄っていった.最大堆積厚は流量ピーク時であり,減水期では堆積厚が減少し,堆積範囲は増加したが,その後は変化がなかった.

3) 水制前面の主流速の横断分布では、ステージD-6 に対応 する流速が、流量ピーク時の流速のステージR-5 より大 きくなった. このことより、流量がピーク時から減水期 に変化した後も、最大洗掘深が増加したことが示唆され た. 減水期ではステージ D-6 と、ステージ D-7 および D-8 では流速差が大きい事から、水制先端付近で巻き上 げられていた砂がその箇所に堆積し、埋め戻しが起きた と予測された. 水制背後の流速の横断分布では、ステー ジD-7 から D-8 にかけて、y/L=1.2~1.4 の範囲で埋め戻 しがおきていた. 河床の縦断分布では、減水期のステー ジD-6 で堆積厚が減少し、下流側に堆積範囲が拡大して いた.

参考文献

- 1) 鬼塚幸樹・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及び水理特性に及ぼす 影響,水工学論文集,第49巻, pp.769-774, 2005.
- 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.144-155, 2000.
- 3) 冨永晃宏・田中典秀: 越流型連続水制群周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果,水工学論文集,第48巻, pp.805-810, 2004.
- 4) 大本照憲・平川隆一・井手賢正: 越流型水制群に対する2次流と流砂の応答,水工学論文集,第42巻, pp.1003-1008, 1998.
- 5) 木村一郎・細田尚・音田慎一郎・富永晃宏: 越流型水 制周辺の非定常3次元流れ構造に及ぼす水制設置角度 の影響,水工学論文集,第47巻, pp.841-846, 2003.
- 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.
- 7) 禰津家久・山上路生・坂根由紀子:水深変化する非定 常な複断面開水路流れの3次元乱流構造に関する研究, 土木学会論文集, No.726, pp.61-71, 2003.
- 8) 森下祐・渡辺明英・内田龍彦・河原能久: 複断面蛇行 水路河道における洪水流の非定常性に関する研究, 土 木学会第61回年次学術講演会, pp.301-302, 2006.
- 道上正規・鈴木幸一:混合砂礫河床における増水・減 水時の平衡流砂量,土木学会論文集,第399号,pp.95-104, 1988.

(2009年4月9日 受付)