

# 複断面曲線流路におけるベーン工の 洗掘軽減効果に関する研究

## STUDY ON THE EFFECTS OF VANE WORKS REDUCING SCOUR DEPTH IN A CURVILINEAR COMPOUND CHANNEL

田村浩敏<sup>1</sup>・福岡捷二<sup>2</sup>・渡邊明英<sup>3</sup>・柴田高<sup>4</sup>・山形勝巳<sup>5</sup>

Hirotochi TAMURA, Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE,  
Takashi SHIBATA and Katsumi YAMAGATA

<sup>1</sup>正会員 修(工) 広島大学大学院助手 工学研究科社会環境システム専攻  
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 (同上)

<sup>3</sup>正会員 工博 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻 (同上)

<sup>4</sup>学生会員 広島大学大学院 工学研究科 博士課程前期 社会環境システム専攻 (同上)

<sup>5</sup>正会員 国土交通省 中国地方整備局 中国技術事務所 (〒736-0082 広島市安芸区船越南2-8-1)

It is important to evaluate the effect of vane works not only in the simple uniform bend but also in the reach of various forms in river. In this study we investigate the effects of vane works reducing scour depth in the compound channel whose plan form changes longitudinally. In this paper, at first we describe the idea of the design of vane works based on the recent topics of the flow and bed topography characteristics in a compound meandering channel, and show vane works fulfill their functions through flood from vane's effects in simple and compound channel flows. Bed variation in a channel with vane works is reproduced by using 3D-flow model considering drag and lift forces exerting on vanes.

**Key Words :** vane works, compound channel, bed topography analysis, 3D flow model, plan form

### 1. 序論

河道の湾曲部では遠心力に起因する二次流により外岸側の河床洗掘及び河岸侵食が生じる。ベーン工は遠心力による二次流を制御することによって外岸側の局所洗掘を軽減し、河岸侵食を防止する対策工である<sup>1), 2)</sup>。

福岡, 渡邊<sup>2), 3)</sup>によるベーン工の設計法は流路が単断面で長い一様湾曲部を有する河道を想定した解析法である。しかしながら, 実河川では一般に平面形が縦断的に変化している上, 単断面河道, 複断面河道が存在する。局所洗掘が問題となる箇所は単断面の一様湾曲区間とは限らないことから, 平面形・横断形が変化する流路を対象としたベーン工の効果を検定する方法を提示することは重要である。既往の研究より, 複断面蛇行流路においては, 相対水深(高水敷水深/低水路水深), 蛇行度によって流れと河床変動の特性が異なることが明らかにされており<sup>4), 5)</sup>, この知見を踏まえた上で複断面流路におけるベーン工の効果について明らかにする必要がある。

複断面蛇行流路における河床変動については, 渡邊ら<sup>6)</sup>が静水圧を仮定しない三次元モデルを用いた解析により河床変動特性を説明している。しかしながら, 実河川への適用を考慮した場合, 計算負荷が大きい他, 周期境界条件を適用しスペクトル法を用いているために, 様々な平面形をもつ区間や河道内に構造物が存在する場合には不十分である。著者らは平面形が変化している大野川を対象として一様湾曲流解析<sup>7)</sup>及び平面二次元解析<sup>8)</sup>をもとにベーン工設置後の河床変動の再現を試みているが, 遠心力とベーン工による二次流や複断面形状に伴う流れの三次元構造が表現されていないことから河床変動の縦断変化を十分に再現できていない。このため, 流れの三次元性を表現し, かつ計算負荷を小さくした三次元モデルにベーン工による流体力を取り入れた解析モデルを構築し, 河床変動解析を行う必要がある。

本研究では, このような背景のもとに, わが国の一般的な河川の平面・横断形状である異なる平面形が連なる複断面流路におけるベーン工の局所洗掘対策工としての効果を明らかにすることを目的とし, 以下の課題を検討

している。①既往の複断面蛇行流路における流れと河床変動に関する知見より、複断面流路の局所洗掘対策とベーン工の設計の考え方について整理する。②異なる平面形が連なる複断面水路を用いた移動床実験と数値解析により単断面的流れと複断面的流れの場合におけるベーン工の効果を明らかにする。③単断面的流れの場合と複断面的流れの場合のベーン工の効果を踏まえて、洪水期間全体としてのベーン工の効果と役割について示す。

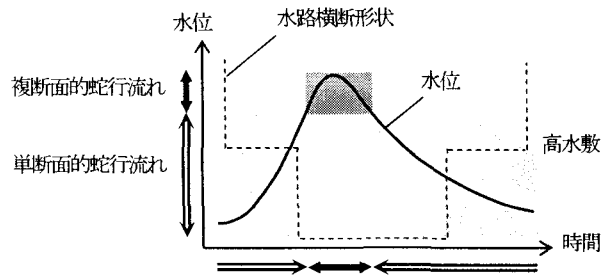


図-1 一洪水期間中の流れの分類

## 2. 複断面河道における局所洗掘対策

### (1) 複断面蛇行流路の局所洗掘対策の考え方

複断面蛇行流路では、高水敷上ある高さ以上に水位が上昇すると高水敷と低水路の流れの混合により、単断面流路とは異なった流れの構造と河床変動が生じる。岡田、福岡<sup>5)</sup>は水深の大きさと流路の平面形状に着目し、相対水深と低水路蛇行度を指標として単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れが生じる領域を分類している。低水路幅／蛇行帯幅 $<0.5$ 、蛇行度 $<1.10$ の場合、単断面的蛇行流れでは蛇行部外岸側が洗掘されるが、複断面的蛇行流れでは内岸側が洗掘される傾向を示している。さらに、洪水期間中の経時変化を考慮した非定常実験から、蛇行外岸部は洪水初期の単断面的蛇行流れの場合に洗掘され、洪水ピーク時の複断面的蛇行流れになると洗掘箇所が埋め戻される。その後、減衰期の単断面的蛇行流れになれば再び外岸部が洗掘されることを明らかにしている。

これらの知見に基づけば、複断面蛇行流路では低水路満杯を超える程度の出水時に洗掘深が最大となることがわかる。それゆえ、図-1に示す一洪水期間中の流れを考えれば、複断面蛇行流路の局所洗掘対策は、一般には洪水ピーク時の複断面的蛇行流れよりもむしろ、低水路満杯を若干超える単断面的蛇行流れにおける洗掘深の軽減が重要となる。

### (2) ベーン工の設計の考え方

ベーン工は洗掘の原因となる遠心力による二次流を制御する。低水路の蛇行度が1.10より小さい複断面蛇行流路では、洗掘を引き起こす遠心力による二次流は単断面的蛇行流れの場合に生じており、この流れを制御することが重要である。一方、複断面的流れになると高水敷と低水路との流れの混合により遠心力に起因する二次流と逆向きの二次流が生じ、洗掘箇所が埋め戻される傾向が現われる。これらのことから、複断面蛇行流路においてベーン工による局所洗掘対策を考えた場合、遠心力による二次流が存在し、洗掘深が最大となる低水路満杯程度の水量を対象として設計するのが良い。洪水の頻度や洪水波形から一洪水期間中に占める単断面的流れの発生時間は、複断面的流れのそれに比べて、一般に大きいことから、このような考え方でベーン工を設計すれば、

ベーン工はその機能を発揮することになる。

ベーン工は、一様で長い湾曲区間に生じる遠心力二次流の流れ場に対しては効率よく機能する。実河川では、一般に流路の平面形は縦断的に変化し、それに伴い流れの構造も変化している。流れ構造の縦断的な変化を詳細に把握し、それに対応したベーン工を設計することは容易ではない。ベーン工が効率よく機能するためには、局所洗掘を引き起こしている区間の流れを一様湾曲流れに近づけるように流れを誘導することが重要となる。そのために、ベーン設置区間に接近または設置区間を流下するにつれ、流れの構造を単断面一様湾曲に近づけるように、ベーン工の諸元や配置を決めるのが良い。このことは、局所洗掘対策としてのベーン工の効率を上げるため、上流からの流れを一様湾曲に近づけるため、当該箇所上流部にベーン工をガイドベーンとして設置することも考えられる。

平面形が縦断的に変化する区間でのベーン工の配置を適切に決めるには、流路の平面形、断面形を考慮に入れた流れと河床変動が解析でき、ベーン工の配置によって河床変動がどのように変化するかを評価できる解析モデルが必要である。

## 3. 検討方法

異なる平面形が連なる複断面流路におけるベーン工の洗掘軽減効果を明らかにするための移動床実験と解析方法の概要を示す。

### (1) 実験概要

用いた水路は図-2に示す平面形、横断形の複断面形状をもつ移動床水路である。水路延長65m、全水路幅3m、低水路は幅0.8m、低水路床と高水敷との高低差は0.05m、勾配1/1000であり、直線部、蛇行部、湾曲部が図のように連なっている。蛇行部の線形は水路中心線距離に対する低水路中心線距離の比で表した蛇行度が1.04のSine-generated curveである。低水路には粒径0.8mm、比重2.59の一様な砂を敷き詰めている。高水敷には粗度付けのために人工芝を貼り付けてある。

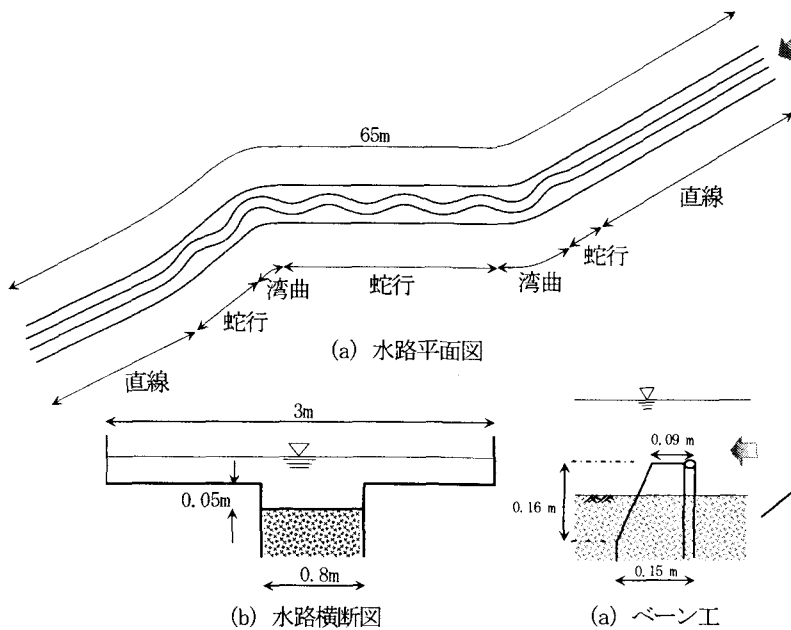


図-2 実験水路の概要

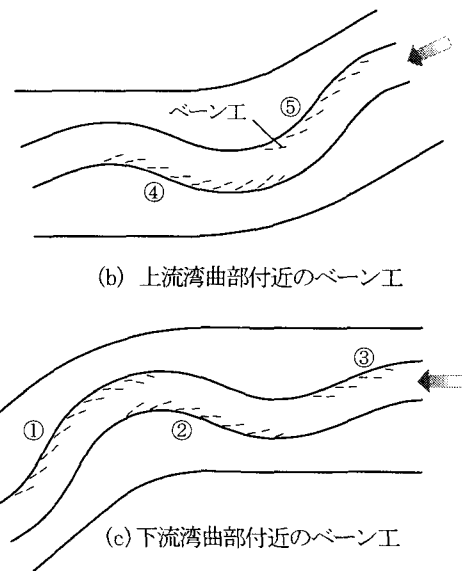


図-3 ベーン工の諸元と配置

表-1 実験条件

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
相対水深 $Dr$	0 (単断面的流れ)		0.4 (複断面的流れ)	
流量 ( $m^3/s$ )	0.0106		0.03	
初期河床	平坦	ケース1の最終河床	平坦	ケース3の最終河床
ベーン工	無	有	無	有
通水時間 (時間)	40	32	30	2

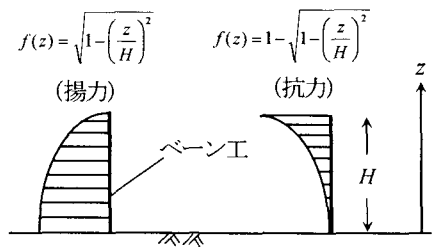


図-4 ベーン工の揚力、抗力の鉛直分布

実験は表-1に示した4ケースについて行っている。複断面蛇行流路における流れと河床変動は、相対水深と蛇行度によって単断面的蛇行流れと複断面的蛇行流れに分類されることから<sup>4), 5)</sup>、それぞれの流れを代表する相対水深 $Dr=0$ と $Dr=0.4$ に対してベーン工を設置していない場合と設置した場合における河床変動について検討を行っている。ベーン工を設置しないケース1と3は、初期河床を平坦河床として通水し、概ね平衡状態となるまで通水を行っている。ケース2, 4は、ベーン工を設置していないケース1, 3の通水によって形成された河床をそれぞれ初期河床として、これにベーン工を設置し、通水を行っている。なお、実験水路の上流直線区間は十分長いことから給砂区間と考え、付加的な給砂は行っていない。

## (2) ベーン工の配置と諸元

ベーン工を設置しない場合、局所的な洗掘深は単断面流れのケース1が大きい。ベーン工の機能を有効に発揮させるためにケース1の河床形状をもとにベーン工を配置した。図-3に示すようにベーン工は、洗掘深が大きい複断面湾曲部①, ④に設置するとともに、相対的に洗掘深の小さい湾曲部の上流の複断面蛇行部洗掘箇所②, ③,

⑤にも設置している。蛇行部のベーン工は、湾曲部に設置したベーン工が十分に機能することを考え、上流から湾曲部への流れが一樣湾曲流れに近づくように主流を誘導するガイドベーンの役割も兼ねている。このような観点から、図-3(b), (c)に示すようにベーン工を配置している。

ベーン工の諸元は、渡邊, 福岡<sup>2)</sup>による単断面一樣湾曲流路の設計法で決めている。これは、湾曲部の流れをできるだけ一樣湾曲の流れに近づけるようにベーン工を設置することがベーン工の効率を高めるからである。ベーン工を設置する区間の単断面流れの水理諸元は、平均水深 $0.063m$ 、流量 $0.0106m^3/s$ 、低水路幅 $0.8m$ 、水路勾配 $1/1000$ であり、マンシングの粗度係数は $0.0162$ となる。ベーン工の長さは水深の1~2倍とし $0.09m$ 、平均河床高からの突出高は水深の $1/3$ 程度となる $0.021m$ とした。ベーン工を設置する横断位置（低水路河岸から $0.1 \sim 0.2m$ ）の平均水深は $0.083m$ であり、ベーン工周りの局所洗掘をベーン工の円柱の直径の3倍と仮定するとベーン工の突出高さは $0.095m$ となり、ベーン工の河床からの露出面積は $0.011m^2$ となる。設置するベーン工の列数は（低水路幅/平均水深）の $0.1 \sim 0.2$ 倍を考え、2列とし、

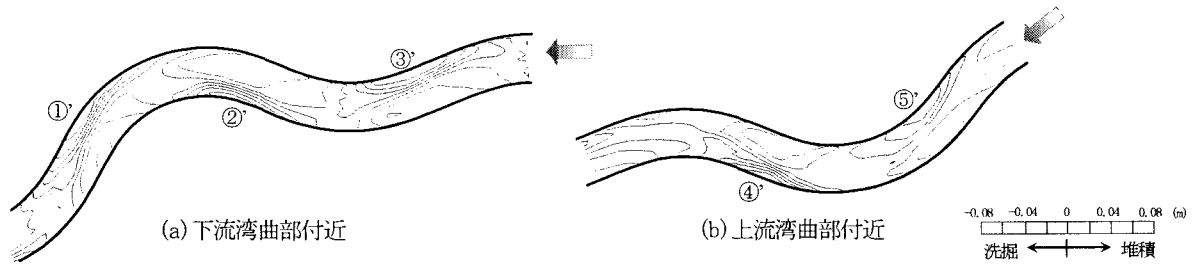


図-5 ベーン工がない場合の単断面流路の河床形状 (ケース1)

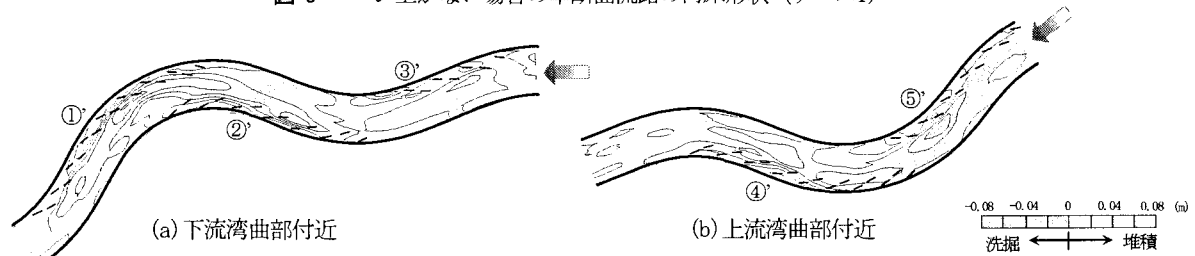


図-6 ベーン工設置後の単断面流路の河床変動高の実験結果 (ケース2)

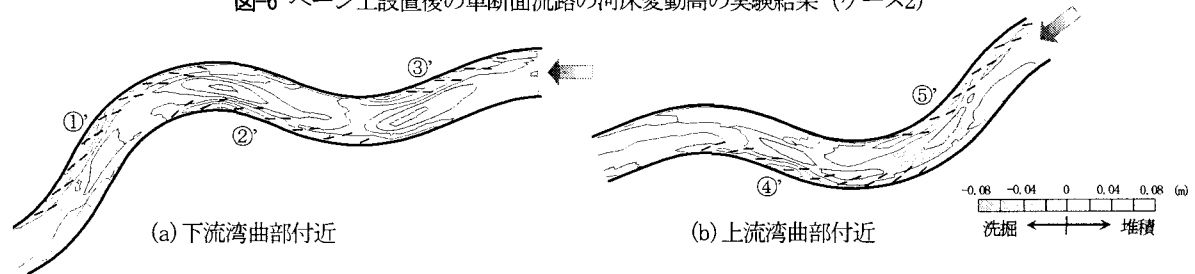


図-7 ベーン工設置後の単断面流路の河床変動高の解析結果 (ケース2)

千鳥状に配置している。ベーン工の迎え角  $\alpha$  は  $20^\circ$  ,  
ベーン工の縦断間隔  $\Delta S$  は二次流相殺率が  $0.4 \sim 0.5$  と  
なるように  $\Delta S = 0.5\text{m}$  としている。

### (3) 解析方法

流れの解析には、静水圧を仮定した一般座標系三次元  
運動方程式<sup>9)</sup> にベーン工による抗力と揚力を取り込み、  
鉛直方向には河床形状に応じた計算メッシュを形成でき  
る  $\sigma$  座標系を採用している。

ベーン工の全抗力及びベーン工にかかる単位高さあた  
り揚力の反力は、福岡、渡邊ら<sup>10)</sup> と同じ式形を用いる  
が、ベーン工の迎え角はメッシュ方向に依存せず、計算  
された流向から決まるものとしている。これらの流体力  
の鉛直分布は揚力線理論により、図-4に示すように楕円  
型の分布を与えている。ベーン工の幅は流路幅に対して  
小さいことから、ベーン工を包含するようにメッシュを  
作成し、ベーン工の形状は計算メッシュには反映せず、  
ベーン工による流体力がコントロールボリュームに働く  
ものとしている。

河床変動は掃流砂を対象としており、河床の縦横断勾  
配を考慮した流砂量ベクトル<sup>10)</sup> を用い、流砂の連続式  
により算出される。流砂量式は河床の勾配に伴う付加的  
掃流力と限界掃流力の変化を取り込んだ芦田・道上式を  
用いている<sup>10)</sup>

## 4. ベーン工による洗掘軽減効果

本研究では、特に、図-3に示す二つの複断面湾曲部  
(①と④) におけるベーン工の効果に着目している。

複断面湾曲部は、堤防と低水路の線形が概ね同位相に  
なっており、堤防と低水路の位相が異なる複断面蛇行部  
(②, ③) と流れ及び河床変動の機構は区別される。  
上流湾曲部は、その上流側の低水路線形が直線からゆる  
やかに蛇行し、洗掘深の大きい一様湾曲部に連なり、そ  
して一様な蛇行区間へと連なる箇所である。下流湾曲部  
は、その上流側に一様な蛇行区間を有し、下流側では蛇  
行部、そして直線部へと変化する箇所である。

一方、複断面蛇行流路では、相対水深によって流れと  
河床変動の特性が異なる単断面的蛇行流れと複断面的蛇  
行流れが存在する<sup>5)</sup>。ここでは、それぞれの流れについ  
て、ベーン工の局所洗掘軽減効果の検討を行う。

### (1) 単断面(的) 流れにおけるベーン工の効果

図-5は、ベーン工を設置しないケース1の河床変動の  
平面分布特性を表しており、初期平坦河床から平衡河床  
への河床変動高により示している。図中のコンター線は  
0.02mピッチであり、河床の洗掘領域と堆積領域を区別  
できるように洗掘領域は灰色で着色している。上流湾曲  
部、下流湾曲部ともに、湾曲区間の下流外岸①、④で大

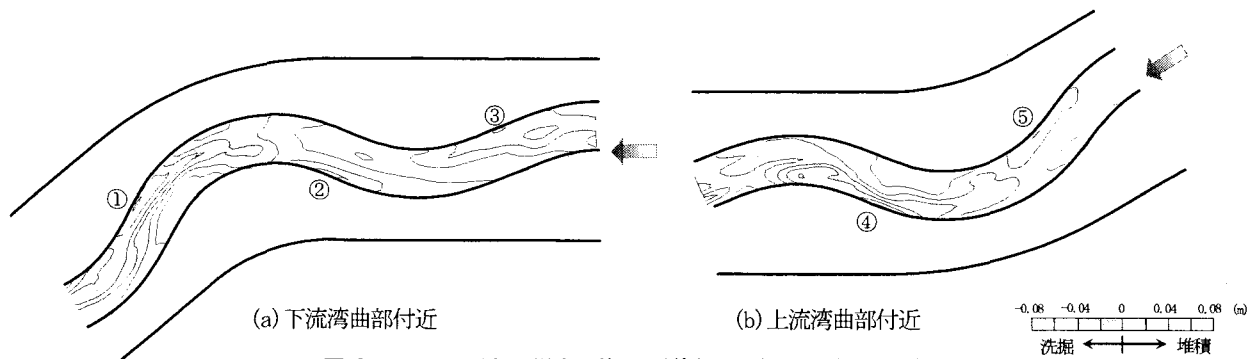


図-8 ベーン工がない場合の複断面流路の河床形状 (ケース3)

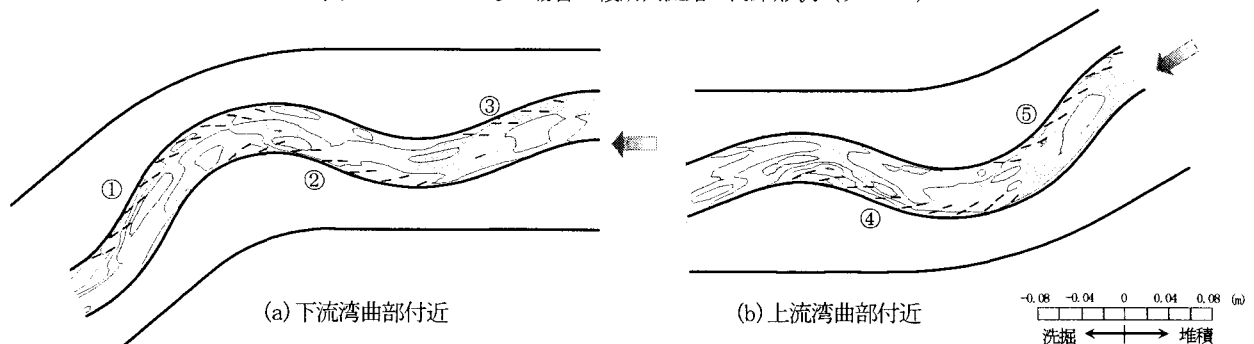


図-9 ベーン工設置後の複断面流路の河床変動高の実験結果 (ケース4)

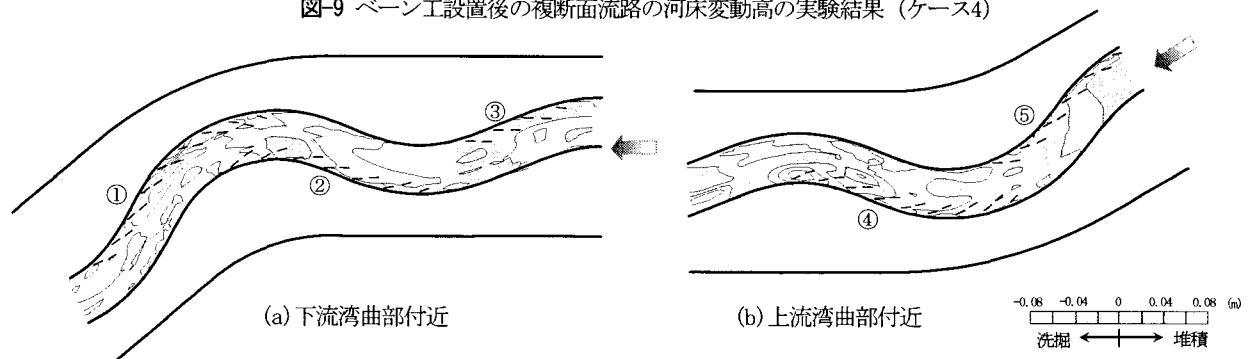


図-10 ベーン工設置後の複断面流路の河床変動の解析結果 (ケース4)

きな洗掘が生じているほか、蛇行区間の変曲部外岸側②'、③'、⑤'においても遠心力による二次流に起因する洗掘がみられる。実験結果から、上流湾曲部の④'と下流湾曲部の①'の洗掘深の大きさに大差は認められない。この二つの湾曲部は区間が長く遠心力による二次流が発達しているために同程度の洗掘深となっている。蛇行部については下流湾曲部の上流に位置する一様な蛇行部の②'、③'の洗掘深が上流の蛇行部の⑤'の洗掘深に比べて大きい。これは⑤'の上流区間の流路線形が直線であるために一様な蛇行部ほど洗掘力が作用しないためである。

図-6, 7は、ケース2のベーン工設置後の河床変動高の実験結果とその解析結果を表している。ベーン工により濡筋が内岸寄りに移動していることにより、ベーン工の外岸側の堆積と内岸側の洗掘が、実験結果と解析結果においてみられ、ベーン工がない場合の局所洗掘深(図-5①'~⑤')の軽減が認められる。これより、本解析手法は単断面曲線流れにおけるベーン工の効果を精度よく推定できることを示している。

## (2) 複断面的流れにおけるベーン工の効果

図-8は、ベーン工を設置していないケース3(Dr=0.4)における初期平坦河床からの河床変動高の分布を表している。湾曲部下流の①、④では同程度の洗掘が生じている。①と④はそれぞれの湾曲部上流の水路平面形と流れの構造が異なるが、洗掘深の大きい①、④の流れは堤防と低水路の線形が概ね同位相である湾曲部を流下するにつれて低水路線形の影響を受け、二次流が発達するため、上流の線形の影響は小さい。一方、蛇行変曲部外岸の②、③、⑤では、わずかな洗掘がみられる。これは複断面蛇行区間では高水敷と低水路の流れの混合によって遠心力と逆向きの二次流が生じるなど、低水路の流速が小さくなるためである<sup>5)・6)</sup>。

図-9, 10は、それぞれケース4におけるベーン工設置後の河床変動高の実験結果と解析結果を示している。図-9に示した実験結果によると、複断面的蛇行流れでは、湾曲部の下流外岸際①、④ではベーン工設置後に洗掘部の

埋め戻しが認められる。一方、それ以外のベーン工設置箇所②, ③, ⑤では二次流は逆向きのためベーン工は効果をあげないが、その河床変動高は小さい、ここでのベーン工は、複断面的流下時には蛇行部に設置されたベーン工は、主流を河岸際から内岸寄りへ誘導し、下流湾曲部へなめらかに流入させるガイドベーンの役割をもつとともに、4. (1) で述べたように単断面的蛇行流れの時間帯には効果的に洗掘を軽減する役割をもつ。複断面的流れの場合、図-10の解析結果では、湾曲部の①, ④において実験結果と同様に堆積域が認められ、ベーン工の洗掘軽減効果が表現されている。蛇行部②, ③, ⑤では、遠心力による二次流は働かないので、解析結果は実験結果と同様に河床変動高が小さい。

本実験水路の蛇行部の蛇行度は1.04であるが、これとは異なる蛇行度を有する実河川のベーン工の効果について述べる。わが国の大河川の中下流部の蛇行度は1.00～1.05に集中しており、大きくても1.10程度である<sup>4), 5)</sup>。蛇行度が本実験水路に比べて大きい1.10程度の場合においても、複断面的蛇行流れの特性は本実験水路の蛇行度の場合と同様であることから<sup>4), 5)</sup>、ベーン工を設置した場合に本実験結果と同様な結果が現れると考えられる。一方、本実験水路に比べて十分蛇行度が小さい場合には、局所洗掘の危険性は小さいと考えられる。したがって、わが国の中下流部の複断面蛇行区間には単断面蛇行区間と同様にベーン工が局所洗掘対策工として有効である。

### (3) 洪水期間全体としてのベーン工の効果

図-1に示すように、水位が経時的に変化する実際の洪水を考えた場合、単断面的流れとなる時間は一洪水中において大半を占め、このとき、ベーン工は湾曲部、蛇行部ともに局所洗掘を軽減させる。一方、相対水深が大きい洪水ピーク付近に相当する複断面的蛇行流れとなる場合は、蛇行部に設置されたベーン工はガイドベーンとして位置づけられる。以上より、単断面的流れと複断面的流れそれぞれにおけるベーン工設置後の河床変動の特性から、洪水期間全体としてベーン工は局所洗掘軽減対策工として有効に機能する。

## 5. 結論

本文における主な結論を整理すると以下のとおりである。

(1) 実河川を念頭に入れた異なる平面形が連なる水路を用い、複断面流路におけるベーン工による局所洗掘軽減効果を明らかにした。単断面的流れの場合、湾曲部、蛇行部ともにベーン工の設置により局所洗掘が軽減される。一方、複断面的流れの場合、ベーン工の設置により湾曲部下流の局所洗掘は軽減され、蛇行部では河床変動が小

さく局所洗掘の危険性はない。また、既往の複断面蛇行流れの特性と本検討条件の蛇行度から判断すれば、わが国の中下流部の複断面蛇行河道には局所洗掘対策工としてベーン工が有効であることを示した。

(2) ベーン工が設置された異なる平面形が連なる複断面水路において、ベーン工の抗力、揚力を考慮した静水圧三次元流況モデルを用いた河床変動解析を行った。局所洗掘対策が重要となる単断面的流れの状況では、ベーン工による洗掘軽減効果の推定に本解析手法が有効である。(3) 洪水中の大半を占める単断面的流れの場合、ベーン工は洗掘を軽減し、洪水ピーク付近の複断面的流れの場合には蛇行部のベーン工はガイドベーンとして流れを誘導する。以上より、複断面流路に設置されたベーン工は、洪水期間全体を通して局所洗掘軽減対策工として有効に働くことが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) Odgaard, A. J. and Kennedy, J. F. : River-Bend Bank Protection by Submerged Vanes, J. of Hyd. Div., Proc. of ASCE, Vol. 109, HY8, pp. 1161-1173, 1983.
- 2) 渡邊明英, 福岡捷二: 河岸侵食を防止するベーン工の設計法の研究, 土木学会論文集 No. 485/II-26, pp. 55-64, 1994. 2.
- 3) 福岡捷二, 渡邊明英: ベーン工の設置された湾曲部の流れと河床形状の解析, 土木学会論文集 No. 447/II-19, pp. 45-54, 1992. 5.
- 4) 福岡捷二, 小俣篤, 加村大輔, 平生昭二, 岡田将治: 複断面蛇行河道における洪水流と河床変動, 土木学会論文集 No. 621/II-47, pp. 11-22, 1999.
- 5) 岡田将治, 福岡捷二: 複断面河道における洪水流特性と流砂量・河床変動の研究, 土木学会論文集 (投稿中)
- 6) 渡邊明英, 福岡捷二: 複断面蛇行流路における流れと河床変動の3次元解析, 水工学論文集, 第43巻, pp. 665-670, 1999.
- 7) 福岡捷二, 渡邊明英, 山本喜光, 田村浩敏, 堀田哲夫: 大野川湾曲部の局所洗掘対策工としてのベーン工の効果, 水工学論文集, 第46巻, pp. 451-456, 2002.
- 8) 田村浩敏, 福岡捷二, 渡邊明英, 山本喜光: 平面形が縦断的に変化する河道湾曲区間の河床変動解析, ベーン工の効果の検討, 水工学論文集, 第47巻, pp. 937-942, 2003.
- 9) 福岡捷二, 渡邊明英, 山内芳郎, 大橋正嗣, 関浩太郎: 樹木群水制の配置と治水機能に関する水理学的評価, 河川技術に関する論文集, 第6号, pp. 321-326, 2000.
- 10) 福岡捷二, 渡邊明英, 萱場祐一, 曾田英揮: ベーン工が断続的に配置された河道湾曲部の流れと河床形状, 土木学会論文集 No. 479/II-25, pp. 61-70, 1993. 11.

(2003. 9. 30受付)