

# 大野川弯曲部の局所洗掘対策工としての ベーン工の効果

## EFFECTS OF VANE WORKS REDUCING SCOUR DEPTH AT THE CURVED REACH IN THE OONO RIVER

福岡捷二<sup>1</sup>・渡邊明英<sup>2</sup>・山本喜光<sup>3</sup>・田村浩敏<sup>4</sup>・堀田哲夫<sup>5</sup>  
Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Yoshimitsu YAMAMOTO,  
Hirotooshi TAMURA, and Tetsuo HOTTA

<sup>1</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  
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

<sup>2</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

<sup>3</sup>正会員 国土交通省 大分工事事務所地域連携課長 (〒870-0816 大分市大字勢家河原82-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 広島大学大学院助手 工学研究科社会環境システム専攻

<sup>5</sup>正会員 (株)建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町4-9-11)

Vanes are a new technology of river hydraulic structure to reduce excessive scouring induced by secondary currents in bends. Since there are a few examples of their use in real rivers, the investigation of the effect of them is important. For the design of these hydraulic structures to other rivers, we should solve problems obtained from the examples of execution of works.

Based on Watanabe and Fukuoka's theory it was found that the vanes installed in the Oono River reduce the scour depth near the outer bank bend and that their calculation method is able to reproduce the lateral bed deformation in the vane-installed region in the Oono River. The problems to apply vane work to real rivers are described based on the Oono River's investigation.

**Key Words :** vane, curved river, secondary flow, scour protection, bank erosion, design method

### 1. はじめに

河岸侵食を防ぐ主な工法としては法覆工や根固め工などの護岸工があるが、河床洗掘が進行し河床高が護岸の根入れ部分より低くなれば護岸は崩壊の危険にさらされる。弯曲部外岸付近の河床洗掘を引き起こす遠心力による二次流を積極的に抑制し、河床洗掘と河岸侵食を軽減する工法としてベーン工法<sup>1)</sup>がある。これは、弯曲部の河床に翼板状の構造物を流れに対して角度をもたせて設置することによって遠心力による二次流とは逆向きの二次流を発生させ、ベーン工の内岸側の堆積土砂をベーン工の外岸側へ輸送して外岸付近の河床洗掘を軽減し、内岸側の土砂堆積を軽減する局所洗掘対策工である。

わが国におけるベーン工に関するこれまでの主な研究<sup>2)~11)</sup>は実験水路を中心に行なわれてきた。ベーン工法は新しい工法であり、熊本県黒川において日本で初めて現地施工が行なわれて以来、実河川に施工されてきた

が施工例はそれほど多くない。福岡、渡邊はベーン工が設置された弯曲部における流れと河床変動の解析方法<sup>8)</sup>を示しており、この解析法が黒川のベーン工の設計に適用され、現地河川において工法の有効性と解析法の妥当性が示された<sup>11)</sup>。黒川において現地施工の有効性と解析法の妥当性を示すことができたのは、ベーン工の施工区間が設計理論に適した単断面の一樣弯曲であるためである。ベーン工を河床変動対策工として確たる技術とするためには、異なる河道特性をもつ実河川について施工されたベーン工の局所洗掘対策の効果についてさらに検討し、そこから得られる技術的課題をベーン工の設計に活かしていくことが重要である。

本文では、国土交通省大分工事事務所が施工した大野川ベーン工の河床変動対策工の効果の追跡調査にもとづき、弯曲部河床の局所洗掘軽減効果を考察し、ベーン工による河床変動計算法の有効性を明らかにする。さらに大野川ベーン工の設計施工例を通して、ベーン工を実河川へ適用するにあたっての課題を抽出する。

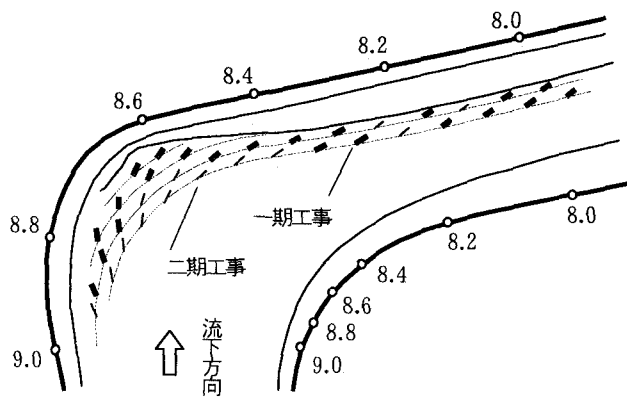


図-1 ベーン工の施工状況 (大野川8.0K~9.0K)

## 2. 大野川におけるベーン工の設計と施工

大野川は水源を宮崎県西臼杵群祖母山に発し竹田盆地を貫き、途中緒方川、奥岳川などの数多くの支川を集め、別府湾に注ぐ一級河川である。本文で対象とするベーン工施工区間は乙津川への分派点(9.6K)のすぐ下流の弯曲部に位置する。この区間の計画河床勾配は1/1,400、計画高水流量は8,000m<sup>3</sup>/s、河床材料の平均粒径は $D_m=12\text{mm}$ (平成元年調査)である。河道の平面形状は大野川で最も大きな弯曲形状を示しており、ほぼ直角に近い状況にある。このため必然的に水衝部になり易い箇所であり、以前より水衝部対策には悩まされてきた箇所である。河岸の防護対策として護岸、根固め等により水衝部を補強し堤防の安全度向上を行なってきたが、河床の局所洗掘が著しく護岸の信頼性を低下させていることから、水衝部の局所洗掘対策としてベーン工が採用され、平成4年度および5年度に施工された。なお、黒川のベーン工設置区間は、計画河床勾配1/700、河床材料 $d_{60}=0.9\text{mm}$ であり、大野川は黒川に比べて勾配は緩いが、河床材料の粒径は大きい。

図-1 にベーン工の施工状況を示す。大野川ベーン工は弯曲流れに起因した水衝部となる8.4K~8.6K左岸の大きな河床洗掘を軽減することを目的に8.0K~9.0Kの約1kmにわたって左岸側に千鳥状に設置されている。8.6Kから上流のベーン工は水衝部区間のベーン工が有効に機能するように主流線を誘導するガイドベーンの役割を持たせ、8.4Kから下流のベーン工はベーン工設置によって新たな水衝部が生じるのを防ぐ目的で施工されている。平成5年3月に一期工事として22基、平成6年3月に二期工事として13基、計35基が施工された。図中には一期工事と二期工事のベーン工が区別できるように二期工事で施工されたものは細線で示してある。下流側の8.1K,8.2K付近における3つのベーン工は高圧線下の工事となるために二期工事に施工されている。

ベーン工の構造は図-2 に示すように異形鋼矢板を用いて長方形に作られたものであり、ベーン工を有効に働

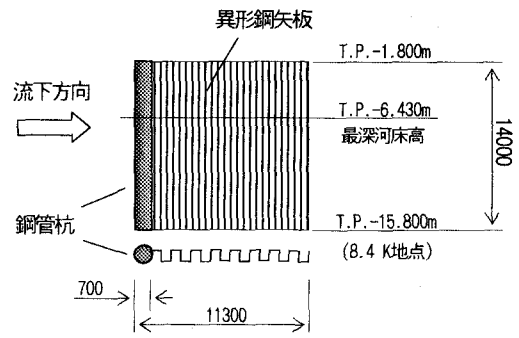


図-2 大野川ベーン工の構造

かせる目的からベーン前面に鋼管杭を有している。このベーン工の設計諸元は、黒川ベーン工と同様に渡邊、福岡により提案された設計法<sup>1)</sup>に基づいている。8.4K地点を対象とした河道条件は、河床幅は低水路の形状を考慮して与え $B=70\text{m}$ 、弯曲部の曲率半径 $r$ は8.4K~9.0Kを一様弯曲とみなして $r=300\text{m}$ とし、平均河床高は最深河床高と計画河床高の平均値をとり $h_0=T.P.-3.6\text{m}$ としている。設計対象水位 $H_0$ は、出水頻度が比較的高い低水路満杯程度の流量規模1,800m<sup>3</sup>/sを想定したT.P.+3.8mであり、これは高水敷高(T.P.+3.7m)を若干上回る。断面平均水深は設計対象水位と平均河床高の差で表わして $h_a=7.4\text{m}$ となる。マンギングの粗度係数は当該区間の計画粗度係数を採用して $n_m=0.035$ とし、これと断面平均水深 $h_a$ を用いて流速係数は $\phi=h_a^{1/6}/(n_m g^{1/2})=12.74$ である。ベーン工の迎え角は、揚力が最大となるように主流線に対して外岸方向への角度 $\alpha=20^\circ$ としている。ベーン工の長さ $L_0$ はベーン工による渦流が効率的に二次流に変換されるように断面平均水深の1.5倍をとり $L_0=11\text{m}$ としている。ベーン工の平均河床からの高さ $H_i$ は断面平均水深の約1/4として $H_i=1.8\text{m}$ とするとベーン工頭部の標高は $H_b=T.P.-1.8\text{m}$ となり平水時に水面(T.P.0m程度)から出ないようにしている。列数 $N_v$ は $B/h_a$ の0.1~0.2倍とすると1列あるいは2列配置となるが安全側をとり3列としている。ベーン工の横断間隔 $\Delta B$ は水深の2倍程度以上を考え20mとしている。ベーン工の縦断間隔 $\Delta S$ は、ベーン工の機能が効率的に働く条件として二次流相殺率 $\gamma$ <sup>4)</sup>が0.4~0.5となるように $\Delta S=60\text{m}$ とした。二次流相殺率 $\gamma$ はベーン工による二次流と遠心力による二次流の生成力の比で次のように表される。この $\gamma$ については文献4)に記述されているので参照されたい。

$$\gamma = f \frac{(\phi - 2/\kappa)^2}{(\phi - 0.5/\kappa)} \frac{\kappa r}{6B} \left( \frac{\beta_a \pi L_0 \sin \alpha}{\Delta S} \right) \times \text{列数} \quad (1)$$

ここで、 $f$ は二次流の縦断変化を考慮した補正係数(=1.0)、 $\kappa$ はカルマン定数(=0.5)で、 $\beta_a$ は平均揚力補正係数で揚力線理論よりベーン工の平均アスペクト比を用いて $\beta_a=0.3$ である。

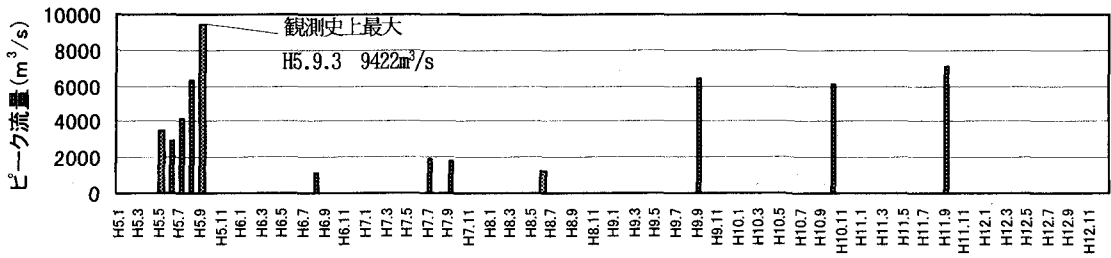


図-3 大野川の主な出水状況(白滝橋 14.8K地点 H5年~12年)

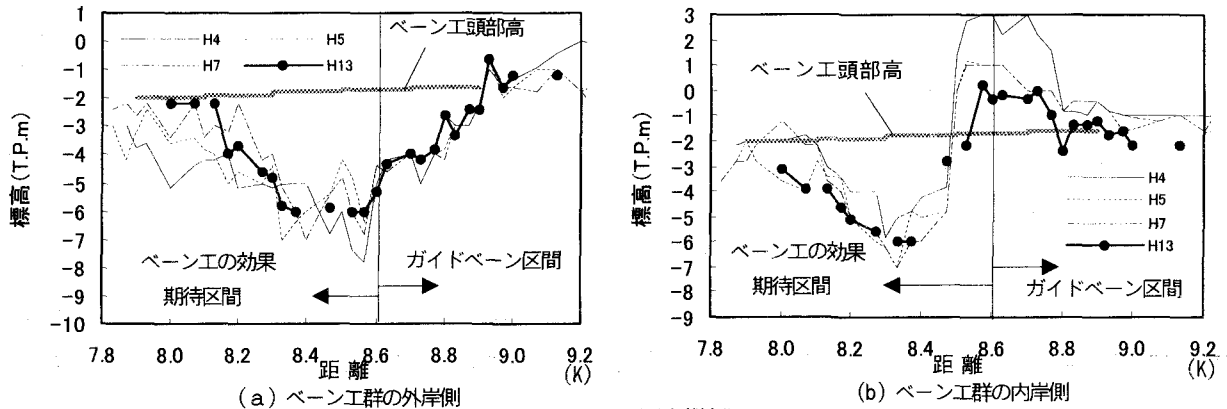


図-4 最深河床縦断面

ベーン工の配置は黒川<sup>(12)・(13)</sup>のように十分に一樣弯曲とみなせる場合には区間全体にわたり円弧状に同列数とすることができる。大野川の弯曲部では8.4K~9.0Kを一樣弯曲とみなし円弧状に配置しているが、8.6K付近では実際のみお筋の曲率は一樣弯曲の曲率よりも大きいために、設計上、二次流相殺率 $\gamma$ が実際より大きく評価されることから8.6K~8.7Kはベーン工の列数を外岸側に増加して4列の配置としている。8.4Kから上流の弯曲部におけるベーン工の効果が早期に顕れやすいように一期工事ベーン工はみお筋に沿って、二期工事ベーン工は内岸側に施工されている。

### 3. ベーン工による局所洗掘の軽減効果

大野川ベーン工の施工区間における河床形状の測量は、施工前後を含めて平成4年11月(ベーン工施工前)、平成5年11月(一期工事施工半年後)、平成7年11月(二期工事施工1年半後)、そして平成13年3月に実施されている。これらの測量成果を基にベーン工による弯曲部外岸付近の河床洗掘軽減効果について考察を行なう。ベーン工対策の対象範囲は水衝部から下流であり、河床洗掘軽減効果については8.0K~8.6Kを中心に述べる。ベーン工施工後の主な出水状況は、乙津川への分派点上流の白滝橋において図-3のとおりであり、平成6年~8年は大きな出水は生起していない。平成5年9月洪水は観測史上最大の洪水であり、そのピーク流量は計画規模相当にまで及んでいる。

ベーン工は、ベーン工自身の内岸側を洗掘し、この

洗掘土砂をベーン工のつくり出す遠心力による二次流と反対向きの二次流によってベーン工外岸側に堆積させ外岸側の洗掘深を小さくする機能を持っている。

図-4にはベーン工群をはさんで外岸側および内岸側における最深河床縦断面図を示す。ベーン工対策の対象範囲である8.6Kから下流に着目し、ベーン工施工前の平成4年河床と施工後で最近の平成13年河床を比較する。ベーン工の外岸側の最深河床をみると、弯曲部下流の7.9K~8.3Kでは堆積が進行している。一方、ベーン工の内岸側の最深河床は洗掘されている。

これらのことから全体的にみるとベーン工の内岸寄りでは河床が洗掘され、ベーン工の外岸寄りでは土砂堆積が起こっていることが分かる。ベーン工の効果を外岸付近の最深河床の埋め戻しと主流線の河道中心への移行という観点からみれば弯曲部下流においてベーン工の効果が大きいことが認められる。

ベーン工の効果を確認するには最深河床高の変化のみでなく、ベーン工の設置による河床高の平面的な変動状況からも確認する必要がある。図-5にはベーン工対策の対象範囲に相当する8.0K~8.6Kの6断面について河床横断形状の経年変化を示した。横断面は流下方向に合わせて図の左側が左岸側、右側が右岸側とし、ベーン工位置も合わせて示した。ベーン工は一期工事のものと二期工事のものが区別できるように二期工事ベーン工は灰色で表してある。各断面の横断河床形状の経年変化をみると、8.08K、8.2Kおよび8.56K断面ではベーン工の外岸側の堆積と内岸側の洗掘がみられ、8.36Kと8.48K断面ではベーン工の内岸側に洗掘がみられる。このことからベーン工の二次流制御の効果が認められる。

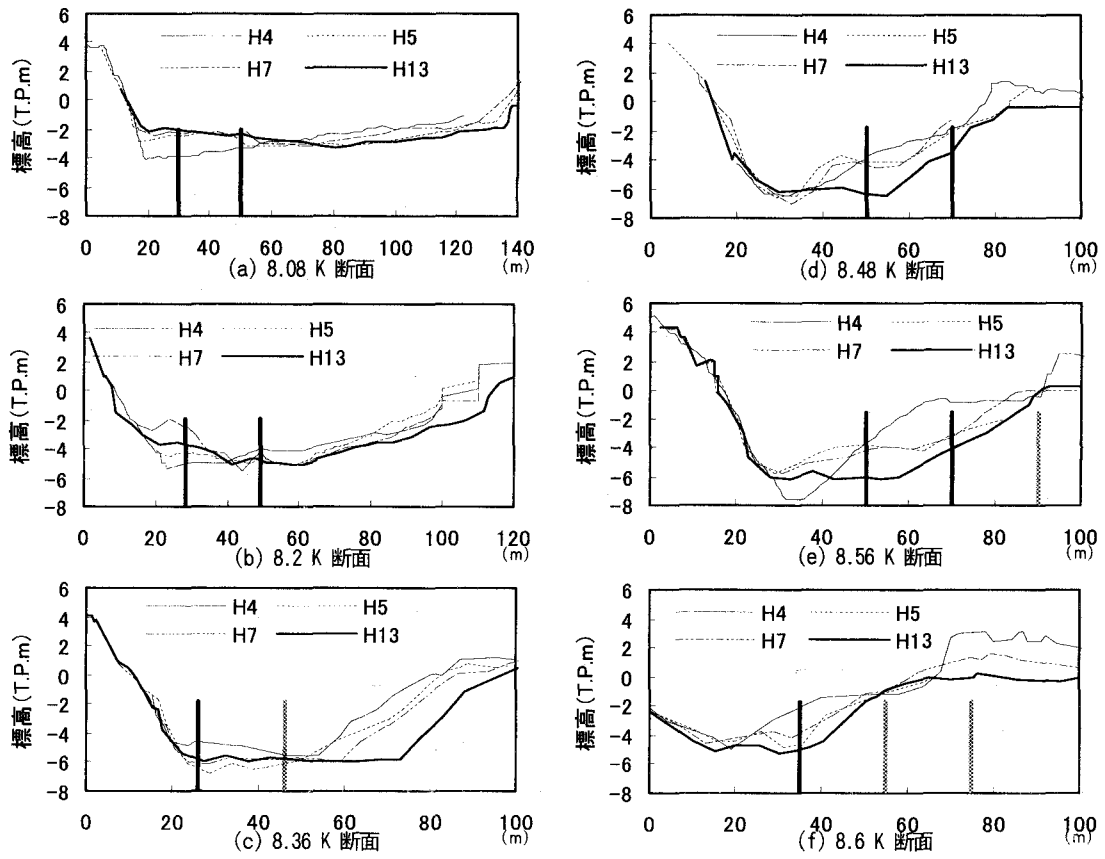


図-5 横断河床形状の経年変化

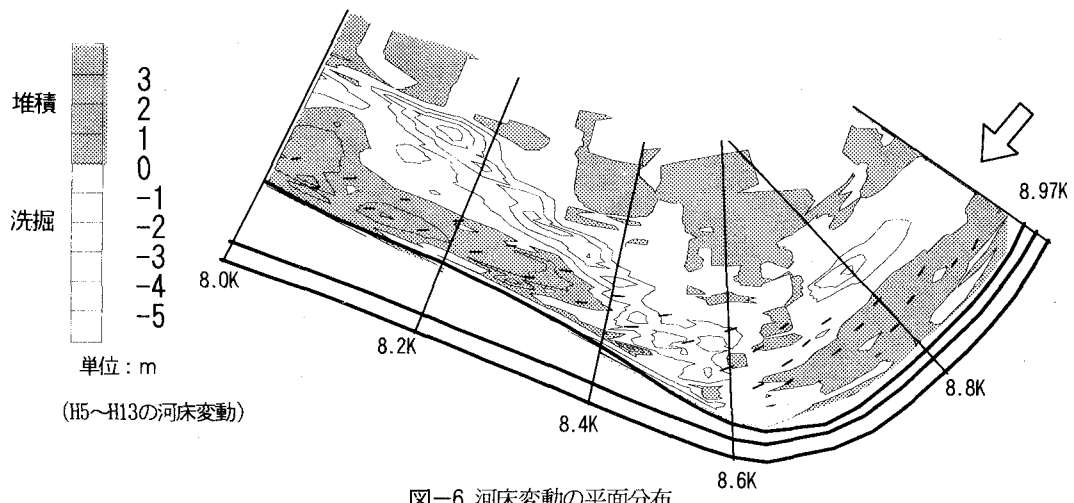


図-6 河床変動の平面分布

図-6 はべーン工施工後の平成5年から平成13年の河床変動について洗掘域と堆積域を示した平面分布である。全体として外岸付近の堆積傾向とべーン工の内岸側での洗掘傾向が認められる。河床変動量の概略を平成5年～13年で述べると、水衝部にあたる8.4K～8.6Kの外岸付近に1m程度の洗掘、弯曲部下流の8.0K～8.4Kの外岸付近に1.5m程度の堆積が生じ、べーン工が施工された区間全体にわたってべーン工の内岸側に1～2m程度の洗掘が生じている。

8.6Kから下流は複断面河道であり、8.4K～8.5Kは外岸側低水路法線の変曲点付近に相当する。このような河道条件で、計画規模に相当するH5.9の大出水時には流れが

高水敷に乗り上げる複雑な流況を呈したものと予想される箇所となり、設計上考えていた単断面流れとは流れの構造が異なったものと推定される。このことが平成5年11月をベースに求めた平成13年の河床高が8.4K～8.6Kの外岸側で河床洗掘となって現れたものと考えられる。

8.6Kより上流では曲率が変化する弯曲部において円弧状にべーン工を配置しているためにべーン工がみお筋より内岸寄りに位置し、州に近接あるいは埋没した状態でべーン工が施工された。このためその機能を発揮できていない。8.6Kより下流に対しては、上流側のべーン工が有効に働き下流のべーン工と協働で流れを制御し、二次流をコントロールしているため、外岸付近の洗掘軽減効

果が大きく顕れている。

ベーン工の効果は施工後の出水の規模や頻度に依存する。図-3によると一期工事施工後の平成5年には出水が集中している。その後数年間は大きな出水はなかったが、平成9年から毎年大きな出水が生起していることからベーン工の機能が発揮され、局所洗掘軽減効果が顕れたと考えられる。河床横断形状の経年変化からベーン工の機能はさらに発揮されると予想され、現在、内岸寄りの州に埋没したベーン工は、外岸側のベーン工の効果によってベーン工付近が洗掘され、内岸側のベーン工の機能も同様に発揮されるものと期待される。

#### 4. ベーン工施工後の河床形状の推定

ベーン工を施工した後の河床変動を予測することは、弯曲部の局所洗掘軽減効果やみお筋の変化を把握できることから河川管理の上で重要となる。大野川ではベーン工の施工前後における河床形状が経年的に測量されていることから、一期工事施工前後の河床形状をもとに河床変動の再現計算を行ない計算法の適用性について確認するとともにベーン工施工後の将来河床形状を推定する。

ベーン工を設置した場合の横断河床形状の推定方法は福岡・渡邊<sup>8)</sup>により提案されている。この理論はベーン工施工区間の縦断面形がほとんど変化しない様弯曲であると考え、ベーン工を考慮した流速分布を算出し、断面内の横断方向の河床変動計算により横断河床形状を推定する方法である。

##### (1) 河床変動の再現

河床の再現計算は、水衝部付近の局所洗掘対策箇所を対象としてベーン工施工前に最も深掘れが大きかった8.56Kの河床横断形状について、1出水期について計算を行なった。平成4年11月の河床をもとに河床変動計算を実施し、平成5年11月の河床により再現性を検討する。なお、この期間には計画規模相当の洪水(H5年9月洪水)が生起している。計算に用いた水理条件は表-1のとおりである。有効ベーン工数は、一期工事において2列施工されているが内岸側のベーン工は中州に近接しておりこの段階では、ベーン工の効果が期待できないことから再現計算時には除外した。

図-7に河床変動の再現計算結果を示す。河道中央付近では計算値と実績値に若干の差がみられるが、河床変動の傾向は概ね再現されている。ベーン工の効果として重要である外岸側のベーン工付近では計算値と実績値は概ね一致し、ベーン工をはさんで外岸側の堆積と内岸側の洗掘が精度よく再現されていることがわかる。単断面の一樣弯曲とみなすことができ、遠心力による二次流が十分発達した8.56K付近や黒川ベーン工の設置区間においては福岡、渡邊の計算手法の有効性が確認できる。

表-1 河床変動の再現計算条件

川幅	300 m	粗度係数	0.035
曲率半径	300 m	流速係数 $\phi$	13.4
流量	8,000 m <sup>3</sup> /s	水中安息角	35°
水深	10 m	無次元限界掃流力	0.05
勾配	1/1,400	有効ベーン工数	1 列
粒径D <sub>90</sub>	5.0 cm	計算時間	10 時間

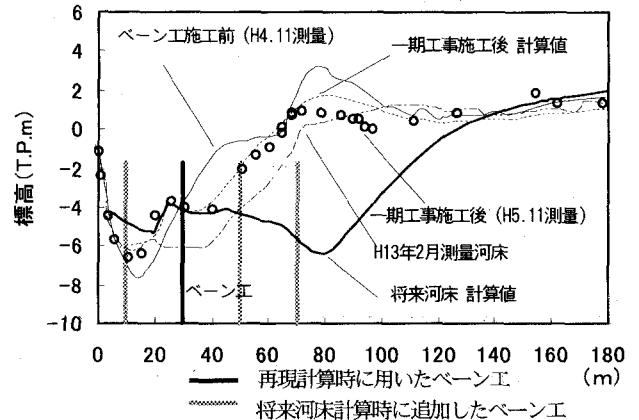


図-7 河床変動の計算結果 (8.56K断面)

一方、水衝部から下流では低水路法線の曲率が変化するとともに複断面河道となり、流れの構造が縦断的に変化するため、横断面内のみでの計算ではなく縦断的な流れの変化を考慮した新しい解析手法が必要となる。

##### (2) 将来の河床形状の推定

対象としているベーン工施工区間の河床形状はベーン工施工後も変化しつつある。将来の河床形状はベーン工の効果が十分発揮された平衡河床形状になると考えられる。将来の河床形状は、ベーン工施工後の出水状況を過去の出水規模や頻度から流量規模と計算時間を設定し推定することにする。すなわち、ベーン工の機能を十分に発揮した横断河床形状を求めることとして再現計算時と同一の計画規模相当の流量を用い、二期工事を踏まえて8.56K断面では有効ベーン工数を4列とし、平衡に至るまでの計算時間を200時間としている。この200時間はH5.9洪水規模の出水が20回程度生起すれば概ね平衡となると仮定したものに相当している。

図-7に示した将来の平衡河床形状はベーン工施工前に存在した外岸側の局所洗掘が軽減され、河床の横断方向変化は小さくなっている。また、ベーン工の内岸側の河床が洗掘され、みお筋はベーン工の内岸側に移動している。このことから、施工したベーン工の機能が十分に発揮されれば外岸側の局所洗掘を軽減し、みお筋をベーン工の内岸側へ移動させることができ、弯曲部外岸の局所洗掘対策として有効であると考えられる。

## 5. ベーン工設計上の課題

大野川ベーン工における調査結果を踏まえて実河川でベーン工を設計施工する上での課題を述べる。

実河川において彎曲部にベーン工を施工するときの河床は外岸側の大きく深掘れした土砂が内岸側に堆積している状態であり、深掘れの大きさも縦断的に異なる。したがって、平均的な河床高をもとにベーン工頭部の高さが決められると、図-5 にみられるようにベーン工の河床からの突出した部分の高さが施工箇所により異なることとなる。そのためにベーン工が州に埋没するところや河床からの突出高さが小さいところではベーン工群として機能を十分発揮できず外岸側の洗掘域の改善が期待したほど生じない場合が起こり得る。

彎曲部を一樣彎曲と仮定して円弧状にベーン工を配置するが、一樣彎曲の曲率が実際のみお筋の曲率より小さいところでは遠心力が実際よりも小さく算出され、式(1)の二次流相殺率は過大に評価されることになる。そのために曲率の大きい箇所ではベーン工が設計どおりに効果を発揮しにくくなる。外岸側局所洗掘部の埋め戻し効果を発揮させるためには、みお筋の線形に合わせてベーン工を配置し、中州や深掘れ位置を考慮してベーン工高さを決めることが重要である。

複断面河道では出水規模(相対水深)や低水路の蛇行度等により流況及び河床形状が変化することが最近の研究で明らかにされている<sup>14)</sup>。低水路満杯程度以下の出水は低水路内を単断面とみなせばよいが、水位が高水敷高さを上回ると低水路と高水敷の間を交換する流れが現れる。この場合、複断面蛇行流れの二次流は単断面の蛇行流れの二次流と異なる向きをもつようになる。したがって、複断面河道では出水規模や低水路の線形によりベーン工の効果が単断面と異なることが予想され、この点について今後の検討が必要である。

## 6. おわりに

本研究より得られた主な結論と今後の課題をまとめると以下の通りである。

(1) 大野川の彎曲部にベーン工を設置することにより外岸付近の局所洗掘深が軽減され、ベーン工法が実河川の河岸侵食対策として有効であることが確認できた。

(2) 大野川の水衝部で局所洗掘対策箇所である8.56Kにおいて、福岡、渡邊による河床変動計算法を適用した結果、実際の河床形状をよく説明できることが分かった。したがって、この方法により将来河床形状を推定することが可能と考えられる。一方、流れの構造が縦断的に変化する水衝部から下流では新たな解析手法が必要である。

(3) 大野川のベーン工の設計施工、その後の河床高調

査から現地のベーン工の設計法の改善すべき点が明らかとなった。すなわち、実河川においてベーン工の機能を早期に発揮させるためには深掘れや州を考慮してベーン工高さを決め、みお筋に沿ってベーン工を設置し、洗掘軽減効果を発揮させることが有効となる。複断面河道の場合、出水規模により流れの構造が異なるため、ベーン工の効果は出水規模の違いに左右される可能性がある。ベーン工に関する既往の研究は単断面河道をもとに行なわれてきたが、今後は複断面河道においても有効となる設計法を検討することが求められる。

## 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) 橋本宏, 浅野富夫, 坂野章: アイオワ式ベーン工の仰角と長さに関する実験的検討, 第29回水理講演会論文集, pp.603-608, 1985.
- 3) 福岡捷二, 渡邊明英: 横断方向流砂を制御するベーン工の設計法, 第32回水理講演会論文集, pp.467-472, 1988.2
- 4) 建設省土木研究所: ベーン工の洗掘削減効果と設計法に関する研究, 土木研究所資料第2644号, 1988.4
- 5) 福岡捷二, 渡邊明英, 萱場祐一: ベーン工による河道彎曲部の局所洗掘箇所の埋め戻し課程, 水工学論文集第34巻, pp.325-330, 1990.2
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英: 土研式ベーン工とアイオワ式ベーン工の設計論の比較, 水工学論文集第34巻, pp.331-336, 1990.2
- 7) 福岡捷二, 渡邊明英, 萱場祐一, 曾田英揮: ベーン工を用いた多様な川底の創造と魚への配慮, 水工学論文集第36巻, pp.685-688, 1992.2
- 8) 福岡捷二, 渡邊明英: ベーン工の設置された彎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
- 9) 渡邊明英: ベーン工を設置した河道における流れ, 河床変動の予測と河岸侵食防止のためのベーン工設計法, 東京工業大学, 1993.
- 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彎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
- 11) 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
- 12) 福岡捷二: ベーン工の設計と施工-河岸侵食と多自然型川づくりへの適用-, 河川 No.520, pp.55-64, 1989
- 13) 福岡捷二, 渡邊明英, 浜田精一: ベーン工の現地施工と調査結果の解析, 第45回年次学術講演会講演概要集第2部, pp.24-25, 1990.
- 14) 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

(2001.10.1受付)