

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

BED TOPOGRAPHY ANALYSIS AND EFFECTS OF VANE WORKS IN A CURVED REACH CHANGING IN PLAN FORM LONGITUDINALLY

田村浩敏¹・福岡捷二²・渡邊明英³・山本喜光⁴
Hirotooshi TAMURA, Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE,
Yoshimitsu YAMAMOTO

¹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
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²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

³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

⁴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)

The vane work is one of the bank protection methods suitable for the curved river. In the present vane design the effects of vanes are predicted by the bed topography analysis in the lateral direction. Vanes are installed not only in a uniformed curved reach, but in a reach changing from curve to straight or vice versa. For the calculation of bed variation in the latter reach we have to consider bed load movement in the longitudinal and lateral directions.

In this paper 2D bed variation is simulated by the use of 2D flow model considering secondary flow generated by centrifugal force and vanes in the Oono River, and the applicability and problems of this calculation method are described based on this simulation.

Key Words : vane, curved reach, plan form, longitudinal change, bed topography analysis,
2D flow model, secondary flow

1. はじめに

河道の湾曲部では主に遠心力に起因する二次流によって外岸側の河床が洗掘され, その結果として外岸が侵食される。湾曲部における河岸侵食対策の一つにベーン工法がある。これは湾曲部外岸側の河床に翼板状のベーンを設置し遠心力による二次流とは逆向きの二次流を生成し, 遠心力による二次流を弱め外岸の河床洗掘および河岸侵食を防ごうとするものである。

我が国におけるベーン工の現地施工は, 1988年に白川水系黒川¹⁾が最初であるが, 施工例はまだそれほど多くない。そのため, 施工後におけるベーン工効果の検証やそれに基づく設計法の改善が十分でなく, 今後の課題である。これまでのベーン工設計の考え方¹⁾は, 遠心力が

十分に発達した一様湾曲流れを仮定できる区間を想定し, 横断面内の流れと河床変動の解析に基づいてベーン工の効果予測している²⁾。この方法は, 流れや流砂量の縦断的な変化が小さく一様湾曲流れとみなせる区間においては概ね河床変動の予測が可能である。しかし, ベーン工の設置により局所洗掘の縦断的な位置が経年的に変化する場合や, 変曲断面のため流れや流砂量が縦断的に変化する区間にベーン工が設置される場合には縦横断方向の流砂量を考慮した河床変動解析が必要である。

本文では大野川における湾曲から直線へと縦断的に法線形が変化しさらに高水敷が存在する区間を対象とし, 平面二次元解析をもとに遠心力とベーン工による二次流を考慮した形で河床変動計算を実施し, 解析法の適用性について検討している。

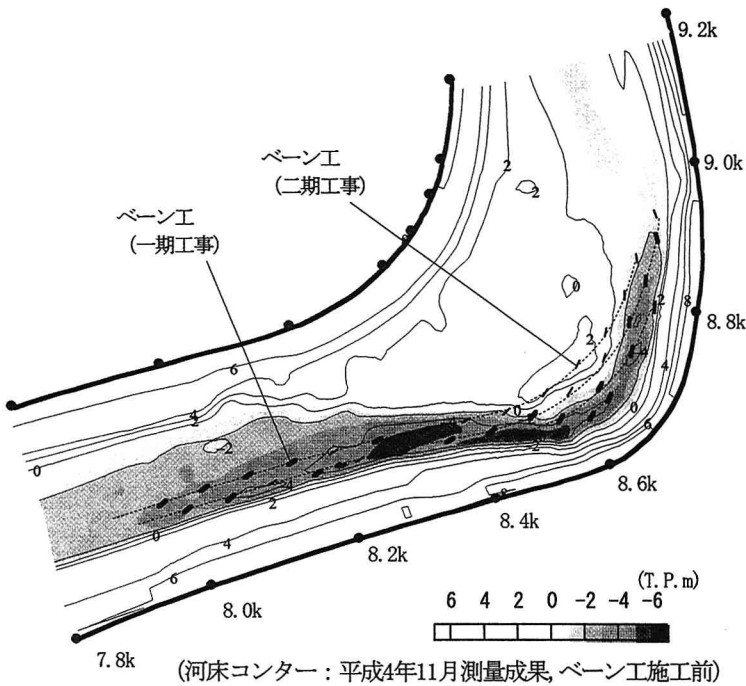


図-1 対象区間 (大野川7.8k~9.2k)

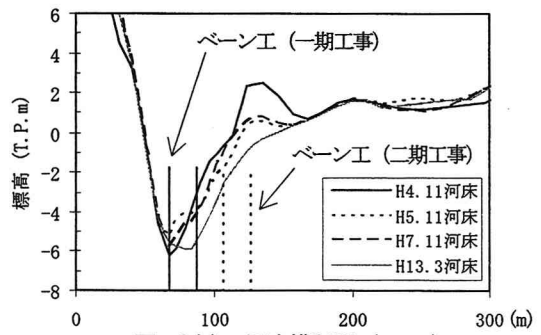


図-2(a) 河床横断面図 (8.56k)

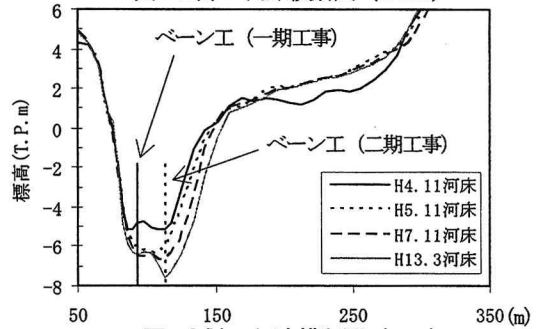


図-2(b) 河床横断面図 (8.4k)

2. 大野川ベーン工

本研究の対象区間はベーン工設置箇所を含む大野川7.8kから9.2kとしており、湾曲から直線へと法線形が変化する区間である。この区間の計画河床勾配は1/1,400、計画高水流量は8,000m³/s、湾曲部である8.6k地点の河床材料の平均粒径 d_m は1.9mm(平成4年調査)である。大野川ベーン工は、8kから9kの区間に平成5年3月に一期工事(22基)、平成6年3月に二期工事(13基)として計35基が図-1の破線のように2~4列で施工されている。ベーン工施工後の出水状況は、一期工事後の平成5年9月に観測史上最大となる計画規模相当の大出水が生じ、その後平成6年~8年には大きな出水はなく、平成9年、10年、11年にそれぞれ6,000 m³/s以上(白滝橋 14.8k地点)の出水が生起している³⁾。

ベーン工周辺の河床高調査は平成4年11月、平成5年11月、平成7年11月、平成13年3月に実施されている。図-2は湾曲部で局所洗掘の大きい8.56kと湾曲から直線への遷移区間にあたる8.4kの河床横断面図を示している。平成4年から5年にかけて、ベーン工施工前に局所洗掘の大きかった8.56k左岸際で洗掘深が軽減され、ベーン工が生成する二次流によりその後ベーン工の内岸側で洗掘が進行している。一方、8.4k付近の左岸側深掘れ部におけるベーン工施工後の河床は経年的に低下している。この地点は湾曲から直線への遷移区間であり、流れや流砂量が縦断的に変化していると考えられる。このような区間を含むベーン工施工後の河床変動予測では、これまでの横断方向のみの土砂移動による河床変動計算²⁾では不十分であり縦横断方向の流砂量を考慮した平面的な河床変動解析が必要となる。本研究では平面二次元解析をも

とにした河床変動計算を実施し、ベーン工周辺の河床変動について検討している。

3. 解析方法

(1) 流れの解析

湾曲部の流れやベーン工によって生じる流れは三次元構造をなすことから三次元解析が望まれるが、実河川に適用しようとすれば計算量が膨大となる。そのため三次元的に流れを解かなくてもある程度の精度が得られる解析手法が求められる。本文における大野川の対象区間が水深に比べて川幅が大きいことから平面二次元として流れを解析する。基礎方程式は次に示すとおり一般座標系を用いた二次元非定常の浅水流方程式⁴⁾にベーン工による抗力と揚力の反力の項を追加したものである。

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} h + \tilde{U} h \left\{ \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \xi} - \tilde{J} (\tilde{V} - \tilde{U} \cos \theta^{n\zeta}) \frac{\partial \theta^\zeta}{\partial \xi} \right\} \\
 & + \tilde{V} h \left\{ \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \eta} - \tilde{J} (\tilde{V} - \tilde{U} \cos \theta^{n\zeta}) \frac{\partial \theta^\zeta}{\partial \eta} \right\} \\
 & = -gh \left\{ \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \cos \theta^{n\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right\} - \tau_{z\xi} \\
 & + \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Jh}{d\xi} \tilde{\tau}_{z\xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Jh}{d\eta} \tilde{\tau}_{z\eta} \right) \right] \\
 & - \tilde{J} h (-\tilde{\tau}_{z\xi} \cos \theta^{n\zeta} + \tilde{\tau}_{z\eta}) \frac{\partial \theta^\zeta}{\partial \xi} \\
 & - \tilde{J} h (-\tilde{\tau}_{z\eta} \cos \theta^{n\zeta} + \tilde{\tau}_{z\xi}) \frac{\partial \theta^\zeta}{\partial \eta} \\
 & - \frac{F'_\xi}{\rho} \delta(\xi - \xi_i) \delta(\eta - \eta_j)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} h + \tilde{U} h \left\{ \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \xi} + \tilde{J} (\tilde{U} - \tilde{V} \cos \theta^{\eta\xi}) \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \xi} \right\} \\
& + \tilde{V} h \left\{ \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \eta} + \tilde{J} (\tilde{U} - \tilde{V} \cos \theta^{\eta\xi}) \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \eta} \right\} \\
& = -gh \left\{ \cos \theta^{\eta\xi} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right\} - \tau_{z\eta} \\
& + \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Jh}{d\xi} \tilde{\tau}_{\eta\xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Jh}{d\eta} \tilde{\tau}_{\eta\eta} \right) \right] \\
& - \tilde{J} (-\tilde{\tau}_{\xi\xi} + \tilde{\tau}_{\xi\eta} \cos \theta^{\eta\xi}) \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \xi} \\
& - \tilde{J} (-\tilde{\tau}_{\xi\eta} + \tilde{\tau}_{\eta\eta} \cos \theta^{\eta\xi}) \frac{\partial \theta^{\eta}}{\partial \eta} \\
& - \frac{F'_\eta}{\rho} \delta(\xi - \xi_i) \delta(\eta - \eta_j) \quad (2)
\end{aligned}$$

ここで、

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{\xi}} = \frac{\partial}{(d\xi) \partial \xi}, \quad \frac{\partial}{\partial \tilde{\eta}} = \frac{\partial}{(d\eta) \partial \eta}$$

であり、 \tilde{U} 、 \tilde{V} はそれぞれ ξ 、 η 方向の反変物理流速成分、 h 、 ζ は水深と水位、 τ は底面せん断力、 $\tilde{\tau}$ は水平応力を表わし、 J 、 \tilde{J} 、 $\theta^{\eta\xi}$ はそれぞれ格子面積、歪み、交差角、 $(\theta^{\xi}, \theta^{\eta})$ は反変座標系の角度である。 F'_ξ 、 F'_η はベーン工の抗力、揚力の反力であり、 δ 関数を用いて表わされる⁵⁾。

連続式は次のとおりである。

$$J \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{J\tilde{U}h}{d\xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{J\tilde{V}h}{d\eta} \right) = 0 \quad (3)$$

(2) 河床変動モデル

河床変動は掃流砂を対象とした流砂の連続式により計算している。

$$J \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial \tilde{q}_{B\xi}}{\partial \tilde{\xi}} + \frac{\partial \tilde{q}_{B\eta}}{\partial \tilde{\eta}} \right) = 0 \quad (4)$$

ここで、 z_b は河床高、 λ は間隙率(=0.45)、 $\tilde{q}_{B\xi}$ 、 $\tilde{q}_{B\eta}$ は反変流砂量ベクトルであり、対象区間は局所洗掘箇所や砂州が存在していることから流砂量ベクトルには河床の縦横断勾配を考慮している⁶⁾。流砂量式には芦田・道上の式を用い、河床の勾配に伴う付加的掃流力と限界掃流力の変化を考慮している⁵⁾。

(3) 二次流モデル

底面せん断力を評価するために河床付近の流速をslip velocityの考えから算出するが⁷⁾、流れの解析は平面二次元モデルであり、湾曲部の遠心力に起因する二次流を表現し得ていない。本解析では、遠心力による二次流はEngelund⁸⁾の理論を用いることとして横断方向の河床付

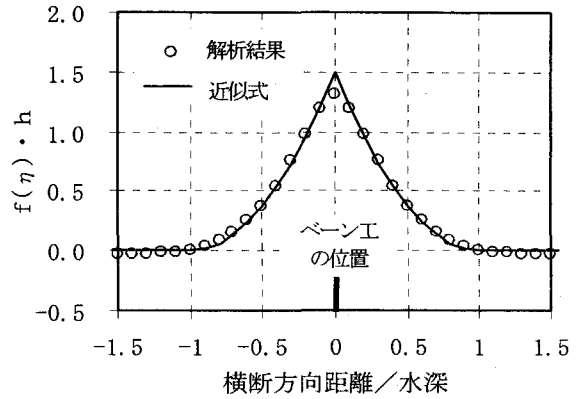


図-3 ベーン工による河床付近横断流速の分布

近流速を算出している。なお、算出に用いる曲率半径は低水路線形から設定した。

ベーン工により生み出される二次流は福岡、渡邊が示した二次流相殺率 γ ²⁾の式中に示されるベーン工による二次流生成項の形で表わし、河床付近の横断方向流速を次のように与えた。

$$v_{bv} = \frac{\beta \pi l_0 \sin \alpha}{\Delta s} \tilde{U}_b \left| \tilde{U}_b \right| \frac{3h}{\kappa u_* \pi^2} \cdot f(\eta) \quad (5)$$

ここに、 α はベーン工の迎え角(=20°)、 Δs はベーン工の縦断間隔、 κ はカルマン定数(=0.4)、 l_0 は河床付近のベーン工長さ(=11.3m)であり、 β は揚力補正係数であり河床より上のベーン工の翼面積 A_v とベーン工の河床からの高さ H で $\beta = 1 / (1 + A_v / H^2)$ として表わされる。 $f(\eta)$ はベーン工によって生成される二次流の横断分布を表わす関数である。

ベーン工によって生成される河床付近の横断方向流速の分布は、横断面内の渦度方程式を鉛直方向に積分した次式²⁾による解析をもとに求めた。

$$\begin{aligned}
& \int_r^1 (u_s^2 - u_b^2) d\xi d\eta - f \frac{F'_b}{\rho \Delta s} \int \delta(\eta - \eta_j) d\eta \\
& = -2\varepsilon \int \left\{ \left(\frac{\pi}{h} \right)^2 v_b - 2 \frac{\partial^2 v_b}{\partial \eta^2} + \left(\frac{h}{\pi} \right)^2 \frac{\partial^4 v_b}{\partial \eta^4} \right\} d\eta \quad (6)
\end{aligned}$$

ここで、 u_s 、 u_b は表面近傍と河床付近の主流速、 v_b は河床付近の横断方向流速、 F'_b は河床付近におけるベーン工にかかる単位高さあたりの揚力の反力、 r は曲率半径、 ρ は水の密度、 ε は鉛直方向に平均化された拡散係数、二次流とベーン工の相互干渉や流下方向に平均化したことによる影響等を含む補正係数(≈1)である。

図-3には平坦河床をもつ直線水路においてベーン工を水深の3割の高さまで河床から突出させた場合の横断方向底面流速分布の解析結果をプロットで示している。この分布をみるとベーン工によって生成される二次流の横断方向範囲は水深の約2倍の範囲であり、既往の報告⁵⁾とはほぼ一致している。この分布はベーン工の位置を中心として左右それぞれ、横断方向に水深の大きさまでの

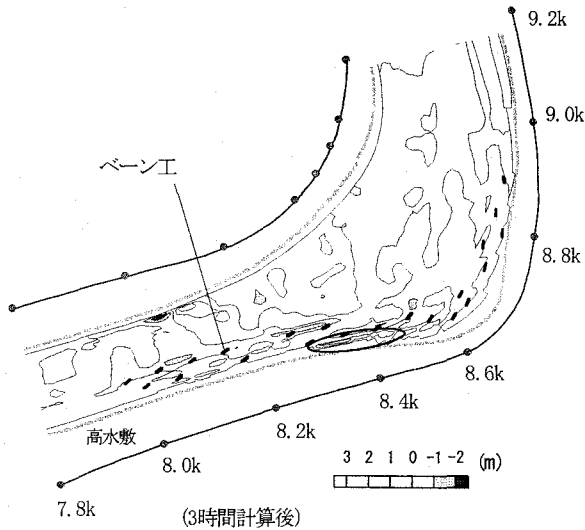


図-4 河床変動量コンター (計算結果)

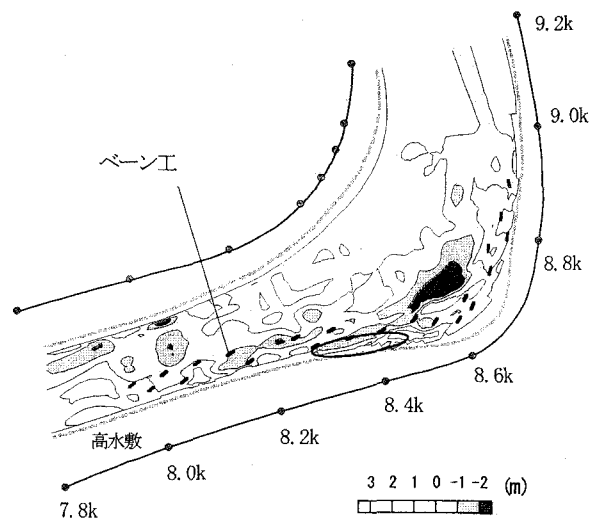


図-5 河床変動量コンター (実績 H4.11~H5.11)

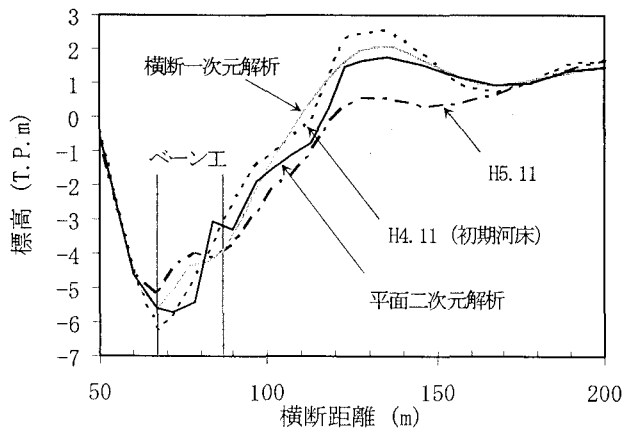


図-6(a) 河床横断面図 (8.56k)

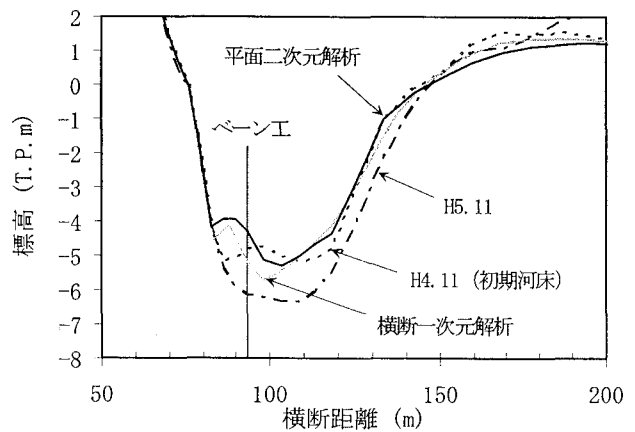


図-6(b) 河床横断面図 (8.4k)

範囲を概ね二次式で表わすことができる。また、湾曲水路における解析では直線水路の場合に比べて横断方向範囲は若干大きくなるものの、概ね二次式で表わしている。そこで $f(\eta)$ は、ベーン工によって生成される横断方向底面流速を水深の2倍の範囲において分布の積分値が1になるように次の近似式で表わすこととした。

$$\begin{cases} f(\eta) = a(\eta - \eta_j + h)^2 & (\eta_j - h < \eta < \eta_j) \\ f(\eta) = a(\eta - \eta_j - h)^2 & (\eta_j < \eta < \eta_j + h) \\ f(\eta) = 0 & (\eta < \eta_j - h, \eta_j + h < \eta) \\ a = \frac{3}{2h^3} \end{cases} \quad (7)$$

このベーン工による二次流はベーン工の縦断間隔内で平均化した二次流を流下方向の各計算点で与えることとしている。

本解析における河床変動計算に用いる河床付近の横断方向流速 v_b は、平面二次元流れの解析結果を slip velocity として求めた河床付近の横断方向流速 v'_b に遠心力による二次流 v_{bc} とベーン工による二次流 v_{bv} を加

えた形で評価している。

$$v_b = v'_b + v_{bc} + v_{bv} \quad (8)$$

4. ベーン工周辺の河床変動

(1) 計算条件

本文の解析対象区間はベーン工設置区間を含む大野川 7.8k~9.2k であり、境界を安定させるために上流側に 700m、下流側に 1000m の仮想の計算区間を設けている。計算対象洪水は痕跡水位データの得られている平成 5 年 9 月洪水（観測史上最大規模）とした。計算流量は 8,000m³/s、下流端境界条件として 7.8k 地点の水位を左右岸平均の痕跡水位 T.P. +9.51m としている。河床変動計算はこの洪水前の測量データである平成 4 年 11 月測量河床を初期河床として計算している。この洪水時に施工済みであるベーン工は一期工事分のみであり、計算結果の図-4、5 に示した 22 基である。解析に用いた粗度係数は、低水路粗度係数を $n=0.020$ 、高水敷粗度係数を $n=0.035$ としており、上記の境界条件のもとでの計算水

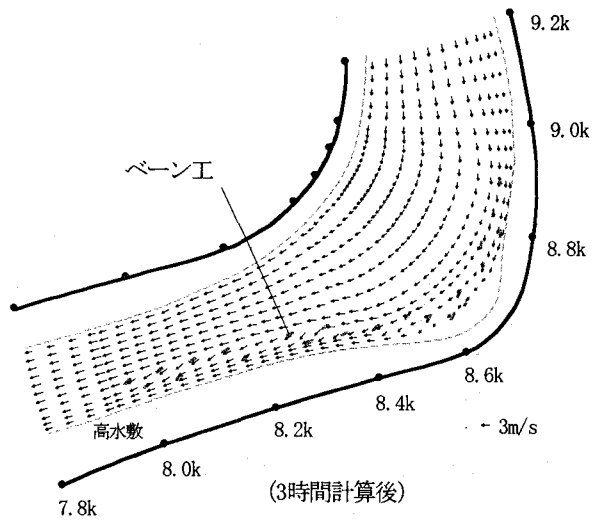


図-7 河床の流速ベクトル (ベーン工がある場合)

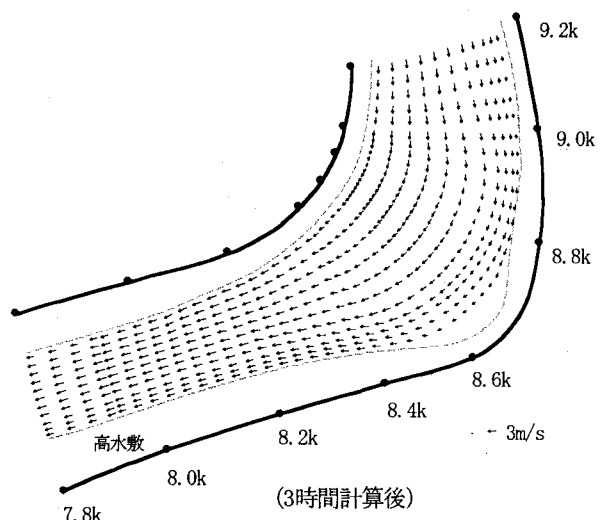


図-8 河床の流速ベクトル (ベーン工がない場合)

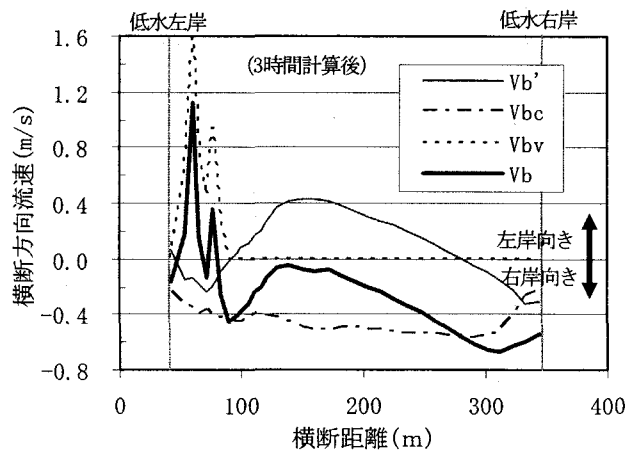


図-9(a) 河床付近の横断方向流速 (8.56k)

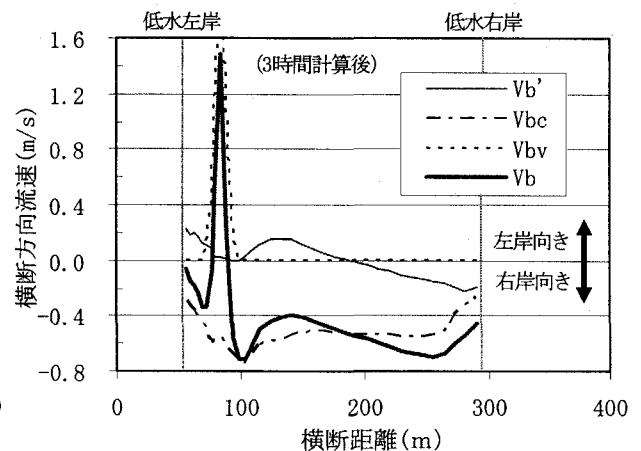


図-9(b) 河床付近の横断方向流速 (8.4k)

位は左右岸の痕跡水位の間にあり痕跡水位は概ね再現できている。河床変動計算に用いた河床材料の粒径は平均粒径 d_m の 1.9mm を用い、無次元限界掃流力 τ_c は岩垣式から 0.041 とした。

(2) 河床変動

ベーン工施工前の平成4年11月河床 (図-1) を初期河床として一期工事分のベーン工を設置した条件で3時間計算した後の低水路内の河床変動量コンターを図-4に示す。図-5には測量成果に基づく平成4年11月から平成5年11月までの実績の河床変動量コンターを示している。図-4、5から河床変動の計算結果と実績を比較する。本解析の計算結果では、河床変動量の傾向が実績に比べて小さいと思われるが、河床材料の粒径が採取箇所や調査年度によってばらつきが大きいことから本文では量的な視点よりもむしろ河床変動の洗掘傾向、堆積傾向を中心に述べる。湾曲部である8.5k付近では、低水路左岸際において計算結果と実績は同様な堆積傾向を示し、そのすぐ内岸側での洗掘傾向が認められ、本解析方法が概ね

適用できると考えられる。湾曲から直線への遷移区間にあたる8.4k付近の低水路左岸際では、本解析方法による計算結果は8.5k付近と同様に左岸際で堆積傾向が見られるが、実績では大きな洗掘傾向を示している。図中に○で示した8.5k付近から8.3kにかけての低水路左岸付近の河床変動の特徴は、実績の河床変動量コンターでは堆積から洗掘へと縦断的に変化が見られるが、計算結果では河床変動の特徴は変化していない。

図-6には平面二次元河床変動解析結果とともに、これまでベーン工設計に用いられている一様湾曲を仮定した横断方向の一次元河床変動計算²⁾の解析結果を河床横断面図で示している。8.56k、8.4kともに平面二次元解析と横断一次元解析による河床変動計算に誤差はあるものの洗掘、堆積傾向は同様な結果となっている。8.4kの河床低下傾向はどちらの解析方法においても表現できていない。8.4k付近では流量規模が大きい場合に低水路から高水敷への流れが生じ、流れの構造が複雑になり二次元解析をベースとした本解析法では十分に表現できないことが考えられる。また、本解析では定常流として

ピーク流量を対象に行なっているが、流量規模の違いによる河床変動特性の違いについても検討する必要がある。

(3) 二次流の横断分布

図-7, 8はそれぞれベーン工がある場合とない場合における河床付近の流速ベクトルの計算結果を示している。ベーン工がない場合には遠心力による二次流の影響からベクトルは流下方向あるいは若干内岸よりを向いているものが多い。ベーン工がある場合にはベーン工の列に沿った箇所のベクトルはベーン工によって生成された二次流により外岸寄りに向いているが、ベーン工の近傍以外ではベーン工がない場合とほとんど変わらない。

図-9は8.56kと8.4kの低水路内における河床付近の横断方向流速の計算横断分布を表わしている。ここでは右岸から左岸に向かう流速を正とし、図中の v_b , v'_b , v_{bc} , v_{bv} は式(8)の各項を表わしている。平均的な横断方向流速 v'_b は、8.56kにおいて低水路中央部で正、左岸際で負、さらに右岸際で負となり左岸近傍での流れの集中と右岸側での発散が表れており、8.4kにおいても分布形は8.56kと類似しているが流速の変動が小さく横断勾配が小さいために流れの集中と発散の傾向が小さくなっている。左岸寄りのベーン工近傍ではベーン工による二次流が卓越しているものの、ベーン工近傍を除いては遠心力による二次流が支配していることがわかる。8.4kでは低水路の中心から右岸側では平面二次元解析に基づく v'_b は水路中央で正、右岸際で負となり流れの発散が生じているが、最終的な流速 v_b は遠心力による二次流による内岸向きの流速が卓越する結果となっている。このことは平均的な流れと河床付近の流れの違いを表現している。図-9における河床付近の横断方向流速は8.56k, 8.4kともにベーン工近傍で左岸向き、ベーン工から離れたところで右岸向きとなっているが、図-6(b)における8.4kの実績横断河床形状ではベーン工近傍の横断方向流速の変化に起因する河床変動は表れていない。このことから、8.4kでは本解析法による二次流が実績の河床変動を引き起こす流況を表現できていないことが考えられる。

本解析における二次流の計算方法は、一様単断面湾曲流路で二次流が十分発達した区間を想定した評価手法を適用し、これに遠心力に起因する二次流とベーン工による二次流を足し合わせたものとしているが、この計算法の妥当性については確認できていない。そのため、今後さらに室内実験によって流速場や洗掘状況の詳細を調べ、本計算法の適用性を検討するとともに解析法の改善を図り、より精度の高い二次流の評価方法を確立することが今後の課題である。

5. おわりに

本文における主な結論と今後の課題について整理すると以下のとおりである。

ベーン工施工後の河床変動予測を行なうにあたり、流れや土砂移動が縦断方向に変化するような区間における河床変動の解析方法として平面二次元解析による流れの計算と二次流の影響を考慮した二次元河床変動計算による方法を大野川8k~9kの湾曲区間に適用した結果、以下の結果を得た。湾曲部の8.56kでは、既往の横断方向一次元河床変動解析と同様な河床変動傾向を示し、本解析法が適用できると考えられる。一方、湾曲から直線に遷移する8.4k付近における河床洗掘は十分には表現できなかった。

本文の対象区間には湾曲部内岸側に大きな砂州が存在し、流量規模の違いによる流れや河床変動の状況が異なることが考えられる。この点について今後、洪水波形を与えた非定常な流況について、みお筋や二次流分布の変化を検討するとともに、遷移区間における流れと河床変動の特性を踏まえたベーン工設計に活用できる解析手法を開発する必要がある。そのために実験と解析によって流速場と洗掘状況の詳細を調べ、遷移区間における流況と河床変動を適切に表現する方法について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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. 2
- 4) 渡邊明英, 福岡捷二, Alex George Mutasingwa, 太田勝: 複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常2次元解析, 水工学論文集, 第46巻, pp. 427-432, 2002. 2
- 5) 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
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英, 岡田将治: 静水圧近似3次元解析モデルによる複断面蛇行水路河床変動解析, 水工学論文集, 第42巻, pp. 1015-1020, 1998. 2
- 7) 清水康行, 板倉忠興: 河川における2次元流れと河床変動の計算, 北海道開発局土木試験所報告, No. 85, 1986. 10
- 8) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, Journal of Hydr. Div., ASCE, Vol. 100, No. HY11, pp. 1631-1648, 1974

(2002. 9. 30受付)