

ベーン工による河道湾曲部の局所洗掘箇所の埋め戻し課程

Decreasing Process of Scour Depth due to PWRI Vane Works Placed in a Curved Channel

東京工業大学工学部
建設省土木研究所
東京工業大学大学院

福岡 捷二 Shoji FUKUOKA
渡辺 明英 Akihide WATANABE
萱場 祐一 Yu-ichi KAYABA

The bed Scour near the outer bank in the curved reach of natural rivers is generally caused by the secondary flow and it tends to become exaggerated by the formation and movement of alternate bars. Experimental and theoretical works are conducted in order to investigate that vane works provide a useful means to reduce the scour depth even in such a curved channel. The lateral bed profile obtained by the theory is found to be in a fairly good coincidence with observed one and the PWRI vane functions well so as to reduce the scour depth produced by the secondary current and alternate bar formation

Keywords: Vane, Bank protection, Secondary current, Alternate bar

1. 序論

河道湾曲部で発生する二次流は、外岸で洗掘、内岸で堆積を引き起こす。この作用は河岸侵食につながるため、従来から種々の侵食対策工が取られてきた。ベーン工法もその一つであり、遠心力によって生じる二次流を弱め河岸侵食を軽減するものである。これまで、ベーン工の形状、配置、また、初期河床を平坦としたベーン工設置後の平衡横断河床形状については実験的、解析的に明らかにされてきた^{1)、2)}。しかし現実の河川では湾曲部外岸側では既に洗掘が生じており、このような河道を初期形状としたベーン工設置後の横断形状の変化はまだ十分に明かにされていない。また、湾曲部での河床変動は二次流による外岸深掘れに加えて、砂れき堆などによる外岸局所洗掘が発生し、外岸側深掘れ深は二次流のみによるものより大きくなる。本研究では、二次流と砂れき堆による外岸深掘れが発生しているところにベーン工を設置し、外岸側洗掘の埋め戻し量に着目し、実験と解析の両面から検討する。

2. 実験

2.1 実験方法：実験には中心半径 $R_c=450$ cm、水路幅 100 cm、水路長 24 mの一樣湾曲水路を用いた。ここに 20° の迎え角をもつベーン工を千鳥状に配置した。ベーン工の諸元、配置は土研式の設計法にもとずいて決められている^{1)、2)}。まず、ベーン工を設置しない場合について河床が十分平衡に至るまで通水を行った(RUN1)。その後この河床を初期河床としベーン工を設置し、河床が平衡に至るまで通水を行った(RUN2)。流量は 18 l/sで平均水深は 4.8 cm、河床材料は平均粒径で 0.82 mm、河床勾配は $1/500$ である。上流端で給砂を行っているが、この量はRUN1の条件で長時間通水し河床が低下しない量を予備実験で求め給砂の量としている。RUN2でもRUN1と同じ量の給

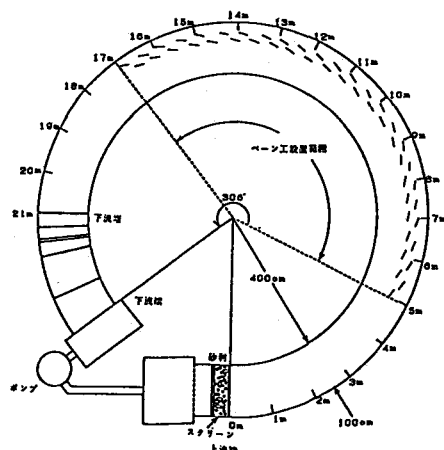


図-1 一樣湾曲水路

砂を行った。

2.2 実験結果

(1)平均横断河床形状の時間変化について：図-3は、ベーン工が設置されているRUN2において、断面5～17までの河床を縦断的に平均することによって得られた横断河床形状の時間変化を示す。初期河床はRUN1における最終河床形状である。通水4時間後には、ベーン工の効果によって初期河床は大きく変形され、河道中央部に明確なみお筋が形成されている。さらに、十分時間が経過すると（通水16時間後）みお筋がさらに発達し外岸側の河床の洗掘深は初期洗掘深の半分程度まで減じ、その結果、横断河床勾配が緩やかになる。この事は流速が中央のみお筋で最も大きくなり、外岸への流れの集中が著しく小さくなることを意味している³⁾。

(2)外岸洗掘箇所の埋め戻し：図-4はRUN1の断面10～12付近での河床の状況を示す。外岸側に砂れき堆前縁が形成されている。この図から外岸側の洗掘深は縦断的に様でなく、洗掘深の極大値は砂れき堆前縁の直下流に位置する事が解る。RUN1では測定範囲内に図-4に示すような8箇所の大きな局所洗掘が見いだされたが、そのどれもが砂れき堆の前縁に位置し、断面6付近の局所洗掘深は、-12cmにも達していた。このように、本実験の条件では、二次流による河床変動に加えて、砂れき堆による河床変動が重なり、外岸の深掘れが二次流のみの場合よりもかなり大きくなることがわかる。砂れき堆を形成している河道に、ベーン工を設置した場合、ベーン工が砂れき堆に埋もれてしまい、ベーン工の洗掘軽減効果が減ずることが考えられる。この場合にはベーン工に、二次流の制御という機能のほかに砂れき堆をある程度「破壊」する作用も求められる。これまでの研究によって¹⁾、ベーン工の前面に取り付けられた円柱は、ベーン工自身の周辺を積極的に洗掘しベーン工の効果を縦断的に安定して発揮させることが解っている。この円柱は、本実験ケースのように砂れき堆が流下する場合に対してもかなりの程度効果を発揮することが確認できた。図-5、図-6にその結果を示す。図-5はベーン工付近の代表位置での河床高コンター図を

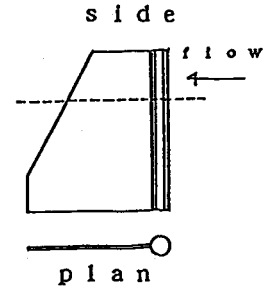


図-2 ベーン工形状

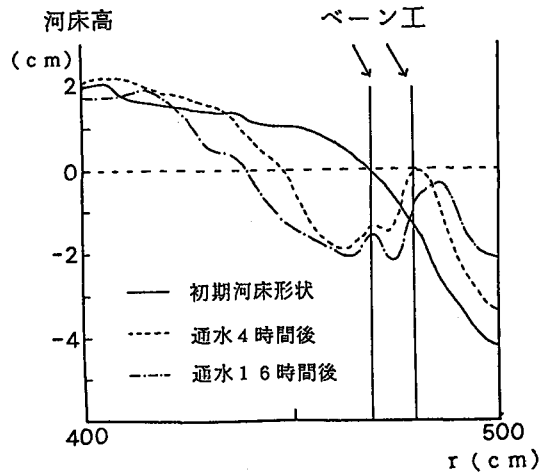


図-3 RUN2横断河床形状の時間変化

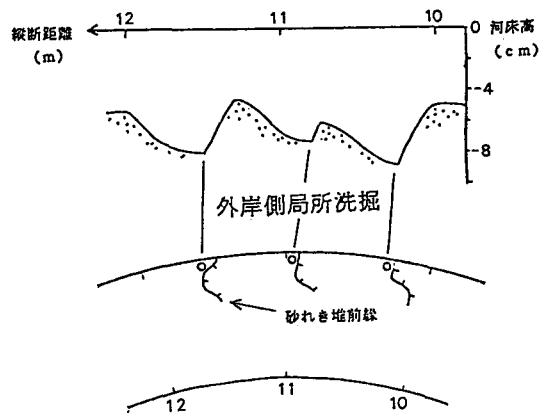


図-4 砂れき堆前縁の局所洗掘

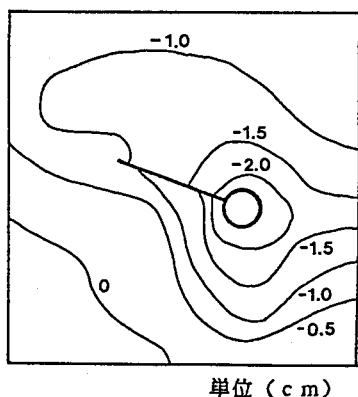


図-5 ベーン工周辺の河床高

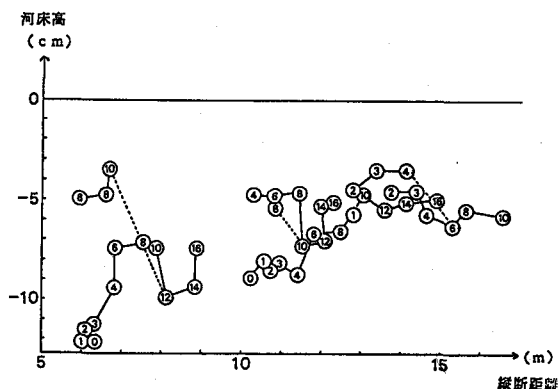


図-6 局所洗掘の埋め戻し過程

示す。円柱及びベーン工本体の周りは、周囲の河床よりも低くなりベーン工が露出していることが解る。図-6は、RUN2において、砂れき堆と二次流により外岸の局所洗掘深が、砂れき堆の移動と共に、どの様に変形していったかを示している。丸印の中の数字は通水時間を示す。また、図中の実線は局所洗掘が継続して存在したことを示し、点線は2つの局所洗掘がそこでの位置と時間で合体したことを示している。なおこの図では、短時間のうちに埋まってしまった局所洗掘は記されていない。この図から、2つの砂れき堆が合体する場合を除き、砂れき堆前面の外岸での局所洗掘は流下方向に移動しながら埋め戻されていくことが解る。時間がある程度経過すると、局所洗掘箇所は砂れき堆と共に移動するだけとなり、洗掘深は概ね、 $-5 \sim -6$ cm

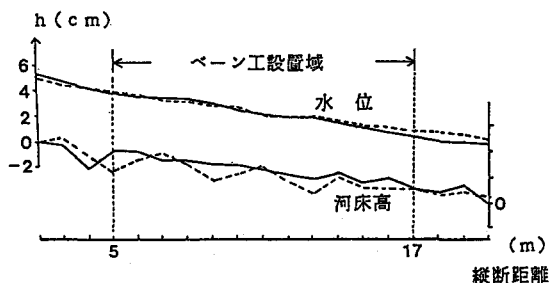


図-7 水位と河床の縦断変化

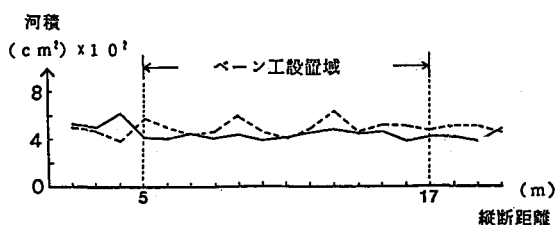


図-8 河積の縦断変化

の間ではほぼ一定となる。断面9付近の局所洗掘は上流端の影響がまだ残っており更に通水時間を延ばせば、この程度の洗掘深になるものと考えられる。RUN2では、RUN1で存在していた8個の局所洗掘箇所は3個に減少した。これより、ベーン工は二次流の制御による外岸洗掘の埋め戻しだけではなく、砂れき堆を変形、破壊し、それによる局所洗掘も有効に減ずることが解った。

(3)ベーン工による水深、河積の変化：ベーン工設置前(RUN1)と後(RUN2)の水深と河床形状の縦断図を図-7に示す。この図からベーン工の設置前後で水深の増大はなく、また河床勾配の変化もほとんど見られない。RUN2のベーン工設置域の河床は初期河床と比較すると僅かに低下している。給砂量はRUN1、RUN2とも同じ量である。図-8はRUN1及びRUN2の河積の縦断変化を示す。ベーン工を設置した場合、その設置領域では河積が増大していることが解る。給砂量はベーン工が存在しない場合の平衡流砂量で与えているので、ベーン工を設置したことにより、断面内の二次流分布が変化し河床形状と平均流

速分布が変化し、結果的に流砂量の増大と河積の増大がもたらされたものと考えられる。

(4)実験のまとめ：二次流と砂れき堆により外岸側で洗掘が生じている河道にベーン工を設置したときにも、外岸側局所洗掘は埋め戻され、ベーン工の効果をあげることが明かになった。また、ベーン工の有無の違いでは水深の変化はほとんど生じなかった。これは、ベーン工を設置したことにより、流れの抵抗は増大しても、中央部のみお筋の形成による河積の増大と流速分布の変形によって相殺された結果と考えられる。

3. 外岸側洗掘埋め戻しと中央部のみお筋形成の解析

ベーン工による埋め戻し過程の解析手順は(I)～(III)で与えられる。

図-9に座標系の説明を与える。

(I) 河床形状予測式：流砂運動は流下方向に平衡であるとし、 $\partial/\partial s (q_s) = 0$ とすると、横断河床形状は次式を解くことによって与えられる。

$$(1-\lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial q_n}{\partial n} \quad (1)$$

q_s, q_n : s方向、n方向の流砂量、 λ : 空隙率、 z_b : 河床高、ここで、流砂量式は斜面上の付加的掃流力を考慮した次式⁴⁾を用いる。

$$q_n = \left(\frac{v_b}{u_b} + \frac{\tau_{\cdot c}}{\mu \tau_{\cdot s}} \right) q_s \quad (2)$$

$$q_s = k \sqrt{(s g d) d \tau_{\cdot s} (\tau_{\cdot s} \sqrt{1 + (1 + \frac{v_b}{u_b} \frac{\partial z_b}{\partial n})^2} - \tau_{\cdot s} \sqrt{1 - (\frac{\partial z_b}{\partial n})^2})} \quad (3)$$

$s = \rho_s - \rho$: 粒径、 u_b, v_b : 底面での主流速、二次流流速

$\tau_{\cdot s}$: s方向の底面せん断力、 $\tau_{\cdot c}$: 限界掃流力

式(I)を解くには二次流と主流の底面での横断分布が必要となる。

(II) 主流式：s方向の運動方程式を次式で表わす。

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \varepsilon \nabla^2 u - f_n(s, n) \frac{F_s(s_i, n_j)}{\rho} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \kappa u \cdot h / 6, \quad \nabla^2 u = \partial^2 u / \partial n^2 + \partial^2 u / \partial z^2$$

式中の F_s は流れがベーン工から受ける抗力を表す。また、 $f_n(s, n)$ は流れがベーン工から受ける抗力の空間分布を表わす関数で、分布領域で積分値は1となる。主流の鉛直分布形を次式で表わす。

$u = (\phi + 1/\kappa) u_{\cdot} - 3/\kappa u_{\cdot} (1 - z')^2$ これを $u = (\phi - 2/\kappa) + 3/\kappa u_{\cdot} \sin(\pi z'/2)$ の様に表現し(4)式を、鉛直方向に積分、流れ方向に平均すると次の主流式を得る。

$$u_{\cdot}^2 - h \phi \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial}{\partial n} \right) - \frac{2}{\kappa \pi} \frac{\partial}{\partial n} (u_{\cdot} v_{\cdot} h) + f'_n(n) D u_{\cdot} B = g h I \quad (5)$$

$u_{\cdot}$: s方向の摩擦速度 ϕ : 流速係数 ($= u_{\cdot} / \sqrt{g h I}$)

$z' = (z - z_b) / h$

ここで流れは流下方向に平衡であるとして、 $\partial/\partial s = 0$ 、式中のDはベーン工による流れに対する抵抗を表し、以下の式で与えられる。

$$D = c_d A v / (2 \Delta s B) \phi'^2$$

$$\phi'^2 = \int (u^2 / I) dz / (u_{\cdot}^2 A v)$$

c_d : 抵抗係数、 $A v$: ベーン工の面積、

Δs : ベーン工の縦断間隔、 B : 水路幅

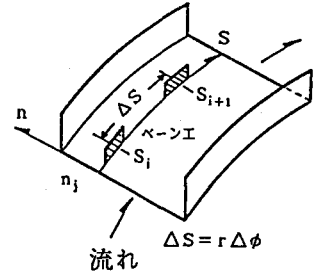


図-9 座標系

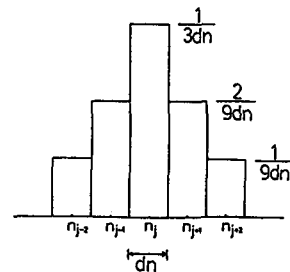


図-10 三角形分布

次に、ベーン工の抗力の分布について考える。洗掘埋め戻しには、ベーン工付近の流砂量が大きく影響する。従って、解析ではベーン工付近での流速の減少、掃流力の低下といった現象を正確に表現する必要がある。上述の解析では渦動粘性係数 ε を水深平均値で与えるため、ベーン工付近のシアーによる流れの拡散まで表わすことができない。そこでこの点を改善するため本解析では ε を各水深での u で表現した水深平均値で表現する代わりに、ベーン工の抗力を図-10に示す三角形分布であたえた。すなわち

$$f^1(n) = 1/9 (\delta(n-n_{j-2}) + \delta(n-n_{j+2})) + 2/9 (\delta(n-n_{j-1}) + \delta(n-n_{j+1})) + 3/9 \delta(n-n_j)$$

ここで分布をもたせる幅は、ベーン工付近の砂粒子の移動から考え水深の2倍程度としている。

(III) 二次流式: $n-z$ 面での渦度方程式は以下の様に表される。

$$u \frac{\partial \omega}{\partial s} - \frac{1}{r} \frac{\partial u^2}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_n}{\partial z} \delta(s-s_i) \delta(n-n_j) + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial n^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

F_n : ベーン工から生じる揚力

(6) 式で、ベーン工から生じる揚力を除けば上式は、池田らの用いた式に一致する⁶⁾。境界条件は以下の様に表される。

水面、底面、側壁で $\omega = 0$ 、また $\omega(s) = \omega(s + \Delta s)$ 、 $u(s) = u(s + \Delta s)$

底面での渦なし条件は境界層上で与えられるべきであるが、ここでは境界の上で薄い渦層を仮定しこの上で流体がスリップするものとした。(6) 式はこのままでは簡潔な解を得ることが出来ない。そこで、この式を簡単化し、横断面内での二次流分布のみについて解くことにする。二次流の鉛直分布形を相似形で次のように表わす。

$$v = v_b \cos(\pi z')$$

また、側壁近傍以外では $\partial w / \partial n$ が小さいとして $\omega = \partial v / \partial z$ と仮定すると、

$\omega = -v_b \pi / h \cos(\pi z')$ となる。これを(2)式に代入し、先の境界条件を用いて、鉛直方向に積分、流れ方向に周期境界条件を用いて平均化すると次の二次流式が得られる。

$$-\frac{18}{\kappa \pi} \left(\phi - \frac{1}{2\kappa} \right) \frac{h}{r} u \cdot [1 - f \gamma_j \delta(n-n_j) B] = \left[v_b - \left(\frac{h}{\pi} \right)^2 \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} \right] \quad (7)$$

ここで、 f は二次流の縦断変化を考慮した補正係数であり、 γ_j は $n=n_j$ での遠心力による二次流とベーン工による二次流の生成力の比を表し、次式で与えられる。

$$\gamma_j = f_i \frac{(\phi - 2/\kappa)^2}{(\phi - 0.5/\kappa)} \frac{\kappa r_j}{6B} \left(\frac{\beta_a \pi l_0 \sin \alpha}{\Delta s} \right)_j$$

ここに、 β_a : 揚力補正係数、 l_0 : 河床でのベーン工の長さ α : ベーン工の迎え角

f_i は流下方向に単純化したことによる補正係数で1.0を用いる⁵⁾。

以上の河床の連続式、流砂量式、主流式、二次流式を連立して解くことにより埋め戻し及びみお筋形成の数値計算を行った。

4. 解析結果

(1) ベーン工を設置した場合の横断河床形状

提案した解析法の妥当性を検証するために、まず、ベーン工を設置しない場合の河床変動計算を行い、実験値が計算値とよく対応することを確認した。図-11はRUN2における縦断的に平均化された横断河床形状の時間変化と計算値された横断河床形状の時間変化の比較を示したものである。計算は各時間とも、外岸側での洗掘箇所埋め戻し、河道中央部でのみお筋増大を含む横断河床形状の時間変化の実測値をよく説明している。図-12は外岸側河床高の計算値と実験値の時間変化を比較したものである。計算値は実測値とよく対応している。図-13は水深方向に平均した主流速横断分布の計算値と実測値の比較を示す。主流速

分布は全体的により対応を示している。ベーン工周辺で流速の実測値が小さくなっているのは、この付近では二次流成分が大きく、ピトー管を用いた流速の測定値は精度が良くないためと考えられる。抗力が集中型で与えられる場合について、同様の検討を行ったところ、外岸の埋め戻し過程、流速分布とも実測値との対応は三角形型に比べて良くなかった。集中型以外の他の分布形については、拡散幅が同程度であれば、三角形分布を与えた結果とそれほど差が現れない。

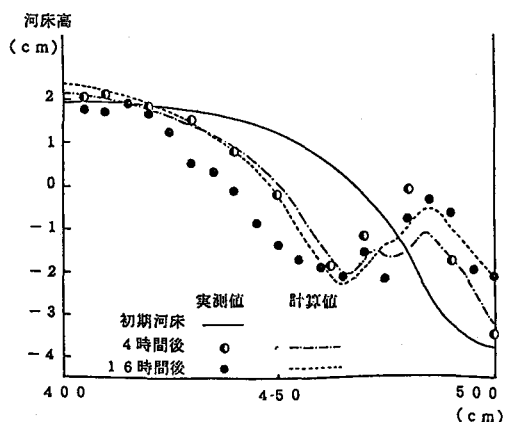


図-1-1 横断河床形状(実測値と計算値)

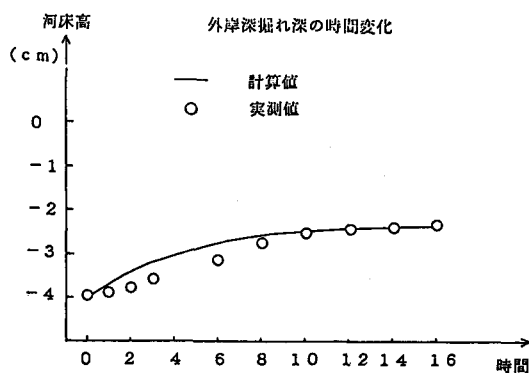


図-1-2 外岸付近河床高の時間変化

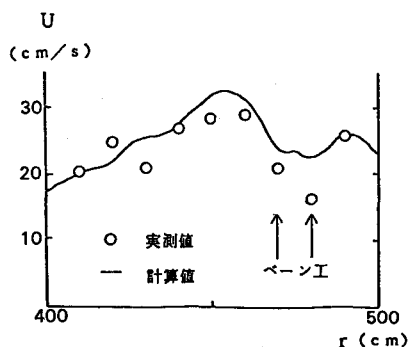


図-1-3 主流速の横断分布

6. 結論

一様湾曲水路における、ベーン工の設置により洗掘箇所の埋め戻しを実験と解析から検討した。河道湾曲部において、二次流と砂れき堆が一体となって外岸側洗掘が生じている河道においてもベーン工が有効に機能することが明かになった。また、外岸側深掘れ部の埋め戻し、河道中央部のみお筋形成といったベーン工設置による横断河床形状の変化過程を解析的に扱えるようにし、これが実験値により説明を与えることが示された。

参考文献

- 1) 福岡、渡辺、 「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, 1988
- 2) 福岡、渡辺 「ベーン工の洗掘軽減効果と設計法に関する研究」、土木研究所資料第2644号, 1988
- 3) 萱場、福岡、渡辺 「ベーン工による湾曲深掘れ部の埋め戻し」、第44回年次講演会論文集, 1989
- 4) 福岡、山坂、 「直線流路の交互砂州」、第27回水理講演会論文集, 1983
- 5) 福岡、渡辺 「土研式ベーン工とアイオワ式ベーン工の設計論の比較」
第34回水理講演会, 水工学論文集, 1990
- 6) 池田、西村 「砂床蛇行河川の三次元流れと河床形状」、土木学会論文報告書第369号, 1986