

べん工による湾曲深掘れ部の埋め戻し

東京工業大学大学院 学生員 萱場 祐一
 東京工業大学工学部 正員 福岡 捷二
 建設省土木研究所 正員 渡辺 明英

本研究の目的 河川湾曲部に発生する二次流は、外岸では洗掘、内岸では堆積を引き起こす。この作用は、河岸侵食・欠壊につながる可能性があるため、種々の対策がとられてきた。新しい対策工であるべん工法は、直接、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。べん工の形状、配置、べん工配置後の平衡河床形状については、建設省土木研究所において明らかにされてきた^{1), 2)}。しかし、河岸侵食を引き起こす外岸深掘れ箇所が、べん工の設置によってどの様に、どこまで埋め戻されるかについては十分検討が、なされていない。本研究では、外岸河床の深掘れが生じている河道にべん工を設置することにより、深掘れ箇所が埋め戻される機構を明らかにし、更に、この過程を理論的に説明する。

実験および実験結果 実験には、中心半径 $R_c=4.5\text{m}$ 、水路幅 1.0m 、水路長 24m の一樣湾曲水路を用いた。べん工を、迎え角 20° で千鳥状に配置し（図1）、その諸元を図2に示す。河床材料の粒径は 0.68mm で、河床勾配が $1/500$ に保たれるように給砂を行った。流量は 18l/s 、水深は 4.5cm である。図3に、べん工設置区間の河床高を平均し求めた横断河床形状の時間変化を示す。初期河床はべん工が設置されていないときの外岸深掘れを生じている平衡河床形状である。通水2時間で $r=460\text{cm}$ 付近にみお筋が形成され始め、通水4時間でみお筋が明確に現れる。十分時間が経過すると、外岸側での深掘れ深減少、中央付近のみお筋規模増大、内岸側での堆積減少が生じる。その結果、横断河床形状がゆるやかとなり、河道全体で流れるようになる。最終状態（通水16時間後）では、初期河床と比較して、外岸洗掘深は半減している。べん工がない場合と比較して、流れの場が大きく変わり、みお筋での流速が速くなるため、水深、勾配には認め得る変化は現れない。解析、深掘れが埋まる過程を説明するための基礎方程式は次の(I)~(III)で与えられる。図4に、座標系および各記号の説明を与える。 κ :カマン定数(0.5), ϕ (流速係数) $=u_a/\sqrt{g \cdot h \cdot I}$, ε :拡散係数 $(=\kappa \cdot u_a \cdot h/6)$, u_b, v_b :底面近傍の主流速、二次流速 z_b :河床高, u_s :摩擦速度, τ_s :掃流力, τ_{c0} :限界掃流力 B :水路幅 q_s, q_n :それぞれs方向、n方向の斜面上の掃流砂量 h :水深 λ :砂の空隙率 d :砂の粒径 μ :水中静止摩擦係数, $s = \rho_s - \rho$ F_n :べん工に作用する揚力 βa :揚力補正係数, c_d :抗力係数 Δs :べん工間隔

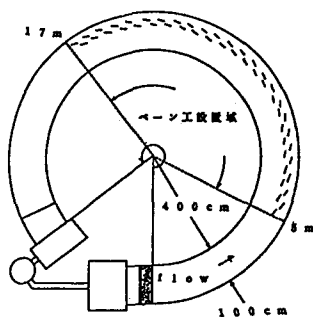


図1 一樣湾曲水路

A_v :面積 l_a :上端長
 l_b :基底長 h :べん工高さ

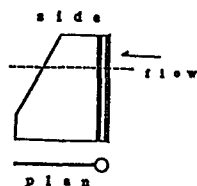


図2 べん工形状

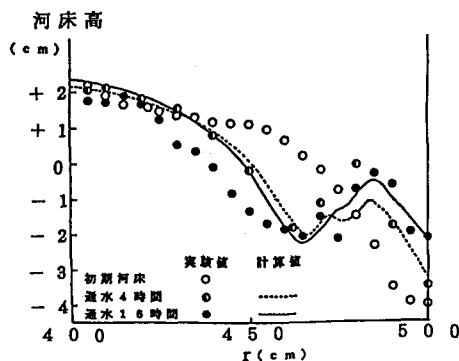


図3 横断河床形状（実験値と計算値）

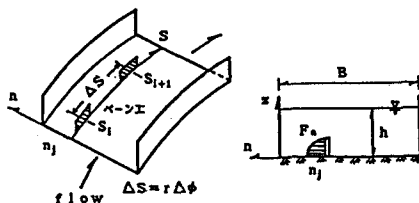


図4 座標系及び各記号の説明

(I) 河床形状予測式: 河床形状の予測式は、流砂の連続式から得られる。一樣湾曲流路において、 $\partial/\partial s(q_s)=0$ より、横断河床形状は次式で与えられる。

$$(1-\lambda) \cdot \partial z_b / \partial t = 1/r \cdot \partial / \partial r \cdot (r \cdot q_n) \quad (1)$$

ここで、斜面上の掃流平衡砂量式³⁾は次式を用いる。

$$q_n = (v_b / u_b + \tau_{c.} / (\mu \cdot \tau_{c.})) \cdot h / \partial n \cdot q_s \quad (2)$$

$$q_s = k \sqrt{s \cdot g \cdot d \cdot d \cdot \tau_{c.}} \cdot (\tau_{c.} \cdot \sqrt{1 + (v_b / u_b + \tau_{c.} / (\mu \cdot \tau_{c.})) \cdot \partial h / \partial n} - \tau_{c.} \cdot \sqrt{1 - (\partial h / \partial n)^2}) \quad (3)$$

式(1)を解くには、 v_b 及び、 $\tau_{c.}$ 、すなわち、二次流と主流の横断分布を求める必要がある。

(II) 二次流²⁾: 河床の変化と共に流れ場も変化するが、河床の変化に対する、流れの応答は比較的早いものと考えられるので、流れについては、ある時刻の河床形状に対する定常解を用いる。ベーン工にかかる揚力の反力をデルタ関数で表現した後、二次流に関するn-z面での渦度方程式を鉛直方向に積分し、流下方向に平均化操作を行う。この際、二次流の鉛直分布形状を、 $v = v_b \cdot \cos(\pi \cdot z/h)$ で与える。境界条件として、 $v_b=0$ 、 $\partial^2 v_b / \partial n^2 = 0$ を用い、次の二次流に関する式を得る。

$$18 / (\kappa^2 \cdot \pi^2) \cdot (\phi - 1 / (2\kappa)) \cdot h / r \cdot u_{*'} \cdot (1 - \gamma_{\downarrow} \cdot \delta_{\downarrow}(n - n_{\downarrow})) \cdot B \\ = \{v_b - 2(h/\pi)^2 \partial^2 v_b / \partial n^2 + (h/\pi)^4 \cdot \partial^4 v_b / \partial n^4\} \quad (4)$$

$$\gamma_{\downarrow} = f_{\downarrow} \cdot \{(\phi - 2/\kappa)^2 / (\phi - 0.5/\kappa) \cdot \kappa \cdot r / (6 \cdot B) \cdot (\beta_0 \cdot \pi \cdot l_0 \cdot \sin \alpha / \Delta s)\}_{\downarrow} \quad (5)$$

γ_{\downarrow} は $n=n_{\downarrow}$ における γ で、 $\gamma = \Sigma \gamma_{\downarrow}$ である。

f_{\downarrow} は、流下方向に平均化し単純化したことによる補正係数で、1.0を用いる。

(III) 主流²⁾: 流れが流下方向に平衡であるとして、 $\partial/\partial s=0$ とし、s方向の運動方程式に主流速の鉛直分布 $u = (\phi - 2/\kappa) \cdot u_*' + 3/\kappa \cdot u_*' \cdot \sin\{\pi \cdot z / (2 \cdot h)\}$

$$u_*'^2 - h \cdot \phi \cdot \partial / \partial n \cdot (\varepsilon \cdot \partial u_*' / \partial n) + D \cdot u_*'^2 \cdot B \cdot \delta(n - n_{\downarrow}) = g \cdot h \cdot i \quad (6)$$

ここで、二次流の運動量輸送の項は省略してある。デルタ関数で表されるベーン工の抗力は、集中型ではなく、ベーン工を中心として横断方向に分布を持っている。計算では、抗力は実際の流れを近似できるように、横断方向に図5に示す三角形分布を持ち、水深の2倍程度の範囲で拡散させて与えている。Dは、ベーン工の存在が付加的抵抗を与え、流速を減少させる効果を示し、以下の式で与えられる。

$$D = c_d \cdot A_v / (2 \cdot \Delta s \cdot B) \cdot \phi'^2 \quad (7)$$

$$\phi'^2 = \int (u^2 \cdot l) dz / (u_*'^2 \cdot A_v) \doteq \phi^2 \cdot \{l_0 \cdot (1 - 4/\phi) + l_0' \cdot (1 + 1/(\kappa \cdot \phi) - 1/(\kappa \cdot \phi) \cdot (1 - H/h)^2)\} / (l_0 + l_0') \quad (8)$$

(1)~(4)、(6)の方程式を差分化し、(1)~(8)を連立して数値計算を行った。図3の点線及び実線は、それぞれ通水4時間後、16時間後の平均横断河床形状の計算結果である。解析結果はベーン工による、外岸深掘れの埋め戻し、中央部のみお筋形成を含む横断形状の変化を良く説明している。図6に、ベーン工設置域内の外岸付近の河床高を平均したものの時間変化の実験値と解析結果を示す。外岸の深掘れの時間変化についても、実測値をよく説明している。**結論** 一樣湾曲水路において、ベーン工の設置による、外岸側での深掘れの埋め戻し、横断河床形状の変化が実験によって明らかにされた。また、解析はこれらの変化過程をよく説明し、ベーン工を設置した場合の横断河床形状予測手法として有効であることが示された。

参考文献1) 福岡、渡辺 第32回水講演文集, pp467-472, 1988
 2) 福岡、渡辺、黒川 土木研究所資料2644号, 1988
 3) 福岡、山坂 第27回水講演文集, pp703-708, 1988

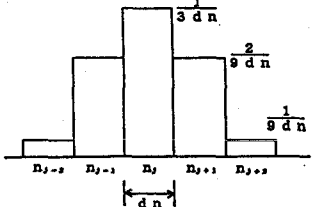


図5 ベーン工の抗力の横断分布状況

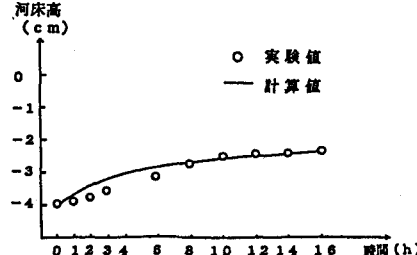


図6 外岸付近河床高の時間変化