

ベーン工が断続的に配置された河道弯曲部の流れと河床形状

福岡捷二*・渡辺明英**・萱場祐一***・
曾田英揮****

弯曲部の外岸侵食量軽減を目的として、ベーン工を断続的に配置した場合の流れ場と河床形状を、実験及び解析で検討している。連続配置のベーン工の理論を準3次元モデルに拡張し、これをベーン工設置域の下流部のベーン工が設置されていない区間に適用し、流れと河床形状が適切に表せることを示している。また、ベーン工を断続的に配置する場合のベーン工がない区間の長さについて、ベーン工による二次流の減衰及び遠心力による二次流の回復を考慮に入れて決定する方法を示している。

Key Words : discontinuously installed vane, bed profile, secondary current, curved channel, scour reduction

1. 研究の目的

弯曲部河岸の侵食は、主として外岸河床の著しい洗掘により河岸の安定性が減じ、河岸が崩落することによって生じる。この外岸河床の洗掘を防ぐためには、洗掘の原因となる遠心力に起因する二次流を弱めることが重要になる。遠心力による二次流を弱める機能を持つベーン工を連続的に配置することによって、外岸河床の洗掘を著しく減じ、河岸侵食を抑制できることが示されてきた^{1)~9)}。この中で、Odgaardら^{5),6)}が示した研究は先駆的ではあるが、ベーン工が設置された弯曲流路での流れ場の解析には、多くのあいまいな点が残されており、現地にそのまま適用するには問題が多い。著者らは、ベーン工が連続配置された場合について、Odgaardらと異なる解析方法を用い、現地にまで適用可能な設計法を示している¹⁰⁾。

河道幅や蛇行長など河川の規模が大きい場合には、ベーン工を弯曲区間全域にわたって連続的に配置するとベーン工の数が著しく多くなる。連続配置の場合と同程度の洗掘軽減効果が上がるようなベーン工の断続配置法が確立できれば、その方がより望ましい。また、ベーン工を一連で施工するのではなく段階的に施工していく場合には、ベーン工設置域の下流で起こる洗掘現象を明らかにする必要がある。

この場合の問題解明の核心は、断続的に配置されたベーン工によって引き起こされる二次流分布と河床形状の関係を解明するところにある。断続配置においてベーン工を設置しない区間の適切な長さを見出すには、遠心

力による二次流がこの区間内で回復する過程を明らかにする必要がある。このためには、ベーン工を断続配置した場合の流れと河床変動について理論解析と実験結果を照らし合わせて検討し、二次流強度の回復を定量化する必要がある。

本文では、ベーン工を連続的に配置した場合の解析法¹⁰⁾を断続配置の場合にも適用できるように準3次元モデルに拡張する。次に、ベーン工を断続的に配置した場合について、流れ場・河床形状を計測し、これと解析結果を比較検討し、解析の妥当性を示す。最後に、連続配置した場合と同等の効果をもたらすベーン工の断続配置法を見い出している。

2. ベーン工を断続的に設置した場合の流れと河床形状の解析

(1) 流れの基礎方程式

弯曲部にベーン工を断続的に設置した場合の流れ場は、流れの運動方程式に、ベーン工によって加えられる力を取り込んだ積分方程式モデルによって表せる¹⁰⁾。また、二次流については鉛直方向の運動も含めて簡単に解析できる渦度方程式を用いる。この場合の流れ及び渦度に関する基礎方程式並びに連続式は、

$$\int_V \left(u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} \right) dV = - \int_V \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} \right) dV + \int_V \left(\epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} + \epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) dV - \int_V \frac{F_s'(s_i, n_j, z)}{\rho} \delta(s-s_i) \delta(n-n_j) dV \dots \dots (1)$$

$$\int_V \left(u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} \right) dV = - \int_V \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \right) dV + \int_V \left(\epsilon \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + \epsilon \frac{\partial^2 v}{\partial n^2} + \epsilon \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) dV$$

* 正会員 工博, Ph. D, 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)

** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 建設省土木研究所研究員 環境部 河川環境研究室

**** 正会員 水資源開発公団 味噌川ダム事務所

$$-\int \frac{F_n'(s_i, n_j, z)}{\rho} \delta(s-s_i) \delta(n-n_j) dV \dots \dots \dots (2)$$

$$\int_V \left(u \frac{\partial \omega}{\partial s} + v \frac{\partial \omega}{\partial n} + w \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial u^2}{\partial z} \right) dV$$

$$= \int_V \left(\varepsilon \frac{\partial^2 \omega}{\partial s^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 \omega}{\partial n^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) dV$$

$$+ \int \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_n'(s_i, n_j, z)}{\partial z} \delta(s-s_i) \delta(n-n_j) dV \dots \dots \dots (3)$$

$$\int_V \left(\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{v}{r} \right) dV = 0 \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで、 s : 流下方向座標, n : 横断方向座標, z : 鉛直方向座標, u, v, w : s, n, z 方向の流速, ω : s 方向の渦度, r : 曲率半径, p : 圧力 (静水圧), ρ : 水の密度, ε : 鉛直方向に平均した渦動粘性係数, (s_i, n_j) : ベーン工の位置座標, δ : デルタ関数である。積分のコントロールボリューム dV は、ベーン工を十分包含できる大きさを取る様に選ばれる¹⁰⁾。 u, v, ω に対する境界条件は、次の通りである¹⁰⁾。 u, v については、slip condition を適用する。側壁上では、主流 u について側壁せん断力を与え、 v は 0 とする。底面 z_b では、 u, v に対しそれぞれ底面せん断力を与える。水面 ξ では、 u, v に対しせん断力 0 を与える。 ω に関しては、便宜上全ての境界で 0 を与える¹⁰⁾。

ここで、水深平均流速 u_m , 主流の鉛直勾配の大きさを表す u_d , 横断方向の水深平均流速 v_m , 二次流の底面流速 v_b を用いて、流速と渦度の水深に対する鉛直分布を次式で表す¹⁰⁾。

$$u = u_m + \phi_1 u_d, v = v_m - v_b \phi_2, \omega = \left\{ -\left(\frac{\pi}{h}\right)^2 v_b + \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} \right\} \phi_3$$

$$\phi_1 = \frac{2}{\kappa} \left\{ \frac{3}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} z'\right) - \frac{3}{\pi} \right\}, \phi_2 = \cos(\pi z'), \phi_3 = \frac{h}{\pi} \sin(\pi z')$$

κ : カルマン定数, $z' = (z - z_b)/h$, z_b : 河床高, h : 水深
これを式 (1) (2) (3) (4) に代入し、鉛直方向に河床から水面まで積分し、 u_d については Galerkin 法を用いて各成分ごとの基礎式を導き、さらに各項の大きさの order 比較を行うと次式が得られる。

$$\int \left(u_m \frac{\partial u_m}{\partial s} h + v_m \frac{\partial u_m}{\partial n} h \right) ds dn + \frac{c_1}{3} \int \frac{\partial u_d v_b h}{\partial n} ds dn$$

$$= - \int g h \frac{\partial \xi}{\partial s} ds dn - \int \frac{\tau_s}{\rho} ds dn$$

$$+ \int \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial u_m}{\partial n} h \right) ds dn$$

$$- \int \frac{F_s}{\rho} \delta(s-s_i) \delta(n-n_j) ds dn \dots \dots \dots (5)$$

$$c_3 \int \left(\frac{\partial u_m u_d}{\partial s} h + v_m \frac{\partial u_d}{\partial n} h \right) ds dn + \frac{c_1}{3} \int \frac{v_b}{r} \frac{\partial r u_m}{\partial n} h ds dn$$

$$+ c_2 \int \frac{v_b}{r} \frac{\partial r u_d}{\partial n} \frac{u_d}{2} h ds dn + c_2 \int \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_b}{\partial n} \right) \frac{u_d}{2} h ds dn$$

$$= c_1 \int \frac{\tau_s}{\rho} dn - c_4 \int \varepsilon \frac{u_d}{h} dn + c_3 \int \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial u_d}{\partial n} \right) h dn$$

$$\dots \dots \dots (6)$$

$$\int \left(u_m \frac{\partial v_m}{\partial s} h + v_m \frac{\partial v_m}{\partial n} h \right) ds dn + \int \frac{h}{2} v_b \frac{\partial v_b}{\partial n} ds dn$$

$$- \int \frac{h}{r} (u_m^2 + c_3 u_d^2) ds dn$$

$$= - \int g h \frac{\partial \xi}{\partial n} ds dn - \int \frac{\tau_n}{\rho} ds dn + \int \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial v_m}{\partial n} h \right) ds dn$$

$$+ \int \frac{F_n}{\rho} \delta(s-s_i) \delta(n-n_j) ds dn \dots \dots \dots (7)$$

$$\frac{c_1}{\pi u_*} \int \left[u_m \frac{\partial}{\partial s} \left\{ v_b - \left(\frac{h}{\pi}\right)^2 \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} \right\} h \right.$$

$$+ v_m \frac{\partial}{\partial n} \left\{ v_b - \left(\frac{h}{\pi}\right)^2 \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} \right\} h \left. \right] ds dn$$

$$+ \int \frac{18 u_d}{\kappa^2 \pi^2 u_*} \left\{ u_m - \frac{1}{2\kappa} \left(\frac{12}{\pi} - 3\right) u_d \right\} \frac{h}{r} ds dn$$

$$= \int \left\{ v_b - 2 \left(\frac{h}{\pi}\right)^2 \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} + \left(\frac{h}{\pi}\right)^4 \frac{\partial^4 v_b}{\partial n^4} \right\} ds dn$$

$$+ \frac{F_b'}{\rho} \frac{3h}{\kappa u_* \pi^2} \int \delta(s-s_i) \delta(n-n_j) ds dn \dots \dots \dots (8)$$

$$\int \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial u_m h}{\partial s} + \frac{\partial v_m h}{\partial n} \right) ds dn = 0 \dots \dots \dots (9)$$

$$c_1 = \frac{6}{\kappa \pi}, c_2 = \frac{36}{\kappa^2 \pi^2} \left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{2}{3} \right), c_3 = \frac{36}{\kappa^2 \pi^2} \left(\frac{\pi^2}{8} - 1 \right),$$

$$c_4 = \frac{\pi^2 \theta}{\kappa^2 8}, \varepsilon = \frac{\kappa u_* h}{6}, \tau_s = \rho (u_b / \phi_b)^2$$

u_b : 底面近傍の流速, ϕ_b : 底面流速係数

これらを解くことによりベーン工を伴う流れ場を表すことができる。式 (8) に対する境界条件としては、側壁で $v=0, \omega=0$ という条件から、 $v_b=0, (\partial^2 v_b / \partial n^2) = 0$ を得る。ベーン工の全抗力 F_s 及び底面近傍においてベーン工にかかる単位高さ当たりの揚力の反力 F_b' は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_s}{\rho} &= \frac{C_D}{2} A_b \frac{1}{H} \int_0^H |u| u dz \\ F_n &\cong \frac{\pi}{4} H F_b' \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

$$\frac{F_b'}{\rho} = \beta \pi l_0 \sin \alpha |u_b| u_b \dots \dots \dots (11)$$

C_D : 抗力係数 ($2\pi A_b / H^2 \cdot \beta_0^2 \sin^2 \alpha'$)

A_b : ベーン工の面積, H : 底面からのベーン工の高さ,
 β : 揚力補正係数, l_0 : 底面近傍のベーン工の長さ,
 α : ベーン工の向き (外向きを正方向にとる)

と表される¹⁰⁾。

これをベーン工の設置区間と非設置区間について同時に解けば、ベーン工を断続配置した場合の流れ場が得られる。これを直接数値的に解くことは可能であるが、計算に労力を要する。そこで、以下のように考える。

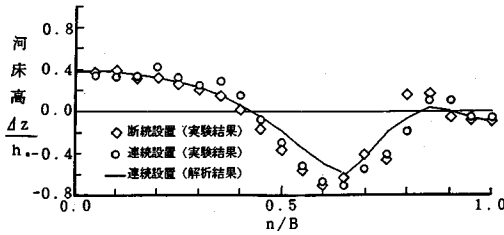


図-1 ベーン工を断続設置した場合の河床形状 (ベーン工の設置域)

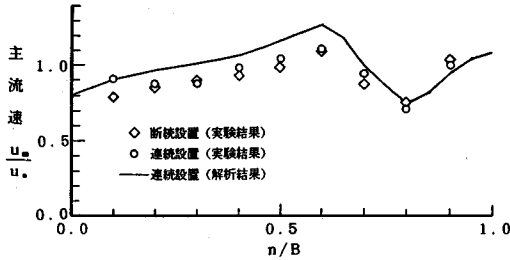


図-2 ベーン工を断続設置した場合の平均流速分布 (ベーン工の設置域)

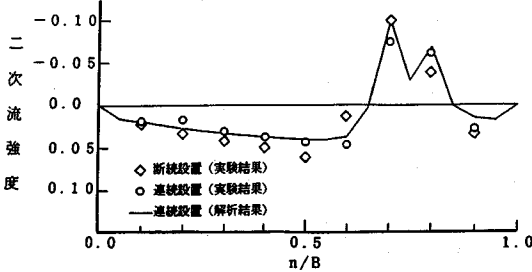


図-3 ベーン工を断続設置した場合の二次流速強度の横断分布 (ベーン工の設置域)

図-1, 2, 3にベーン工を断続配置した弯曲流路におけるベーン工の設置区間について縦断的に平均した横断河床形状、水深平均流速分布、二次流速強度分布の実験結果を示す。これらの図には、ベーン工を連続設置した弯曲流路における平衡状態の横断河床形状、水深平均流速分布、二次流速分布の実験結果、解析結果¹⁰⁾も併せて示している。図-1, 2から明らかな様に、ベーン工の設置区間ではベーン工を断続的に配置しても、比較的短い距離でベーン工を連続的に設置した場合の平衡状態のものと同様になり、河道中央部におも筋が形成され、外岸の洗掘が抑制されている。これに応じて、流速は河道中央部で速くなっており、外岸付近で遅くなっている。実験結果は断続配置、連続配置のどちらの場合もほぼ一致しており、ベーン工設置範囲では連続設置した場合の解析法を断続配置の場合にも用いることができることを示している。図-3から、二次流速強度は断続設置、連続設置に関わらず、ベーン工を設置している $n/B=0.7, 0.8$ の付近を中心にして、遠心力による二次流に対して逆向きの二次流となっている。この分布も両者ほぼ一致して

おり、連続配置の解析結果で表すことができる。

なお、二次流速強度とは二次流速 v' ($=v-v_m$) の絶対値を底面から水面まで平均化し、これを断面平均流速 u_a とその地点の水深 h で除した無次元量 $\int |v'| dz / (u_a h)$ ¹¹⁾ に $(v_s - v_b)$ の符号をかけた値をいう。ここで、 v_s : 水面での流速、 v_b : 底面近傍での流速である。二次流速強度の正負は $v_s - v_b$ の値の正負で表され、水面で外岸に向かい、底面で内岸に向かう二次流が正、逆の場合が負の値をとる。

以上のことから、ベーン工が縦断方向に断続配置された場合であっても、ベーン工が設置されている区間の流れ場と河床形状は、ベーン工により決まった形をとり、これは連続配置の場合の解析法で表せることが分かる。

したがって、以下の方法に基づいて、断続設置された弯曲流路でのベーン工が存在しない区間の解析を行える。すなわち、先の図-1~3に示した連続設置の場合の流れと河床形状の解を解析区間の上流端で境界条件として与え、式(5)(7)(8)においてベーン工の外力項を除き式(5)~(9)を用いて、流れ場の計算を下流へ向かって進めることにより、流れ場を求めることが可能となる。

なお、計算では水位の境界条件は下流端で設定される。この場合、下流から積分されて定まる上流端の水位と上流端で与えた境界条件の水位及び水面勾配が必ずしも一致するとは限らない。ここでは、水面勾配、流量が連続するように上流端の水位、流れを再度計算して境界条件を変更し、全体が満たされるまでこれを繰り返す。河床の流速係数は、与えられた流量に対して、水深及び上流端の水位が実験結果とほぼ一致するように決める。

(2) 河床変動の基礎方程式

河床形状は流砂の連続式(12)から求められる。ベーン工が設置された弯曲河道の河床形状は、局所的に大きく変化し、河床の縦断勾配・横断勾配が大きくなる。このため、この影響を流砂量式に取り込む必要がある。

縦断方向の流砂量式には、芦田・道上の式を用い、この影響を付加掃流力の形で取り入れる。また、横断方向の流砂量は、縦断河床勾配も同時に考慮して、長谷川の式の基礎方程式を拡張して解き直した式(14)(15)を用いる。ここで、縦断河床勾配が0であれば長谷川の式と一致する。ただし、河床勾配が小さいという近似の下に得られた式なので、河床勾配が極めて大きい箇所ではそのままでは使えない。これらを流砂の連続式に代入して、時間積分することによって河床変動が得られる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_B \cos \theta}{\partial s} + \frac{\partial q_B \sin \theta}{\partial n} \right) = 0 \dots \dots \dots (12)$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 17 \left(\tau_{*c}' - \frac{\tau_{*e}'}{\tau_{*c}} \tau_{*c} \right) \left(u_{*e}' - \frac{u_{*e}'}{u_{*c}} u_{*c} \right) \dots \dots \dots (13)$$

$$\tau_{*e}' = |\vec{\tau}_e + \Delta \vec{\tau}| / sgd = u_{*e}'^2 / sgd$$

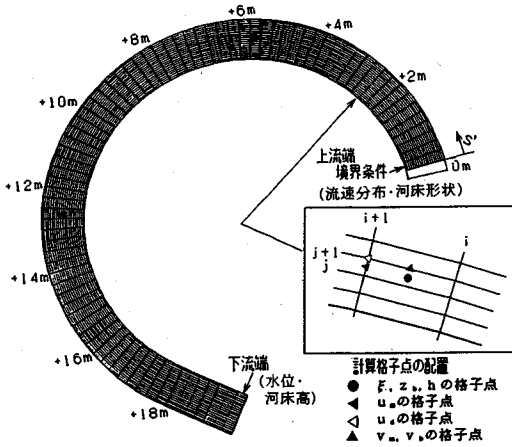


図-4 計算格子と計算格子点の配置

表-1 実験条件

流量 Q (l/s)	水深 h _s (cm)	流速 u _s (cm/s)	勾配 I b	平均 粒径 (mm)	給砂量 Q _b (l/h)
18.0	4.85	37.1	1/500	0.82	6.0

$$\vec{\tau}_e = \left(\frac{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}}{\psi_b} u_b, \frac{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}}{\psi_b} v_b \right)$$

$$\Delta \vec{\tau} = \left(-\frac{\tau_{co}}{\mu_s} \frac{\partial z_b}{\partial s}, -\frac{\tau_{co}}{\mu_s} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right)$$

$$\cos \theta = \frac{u_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_k}} \frac{u_{*c}}{u_{*e}} \frac{\partial z_b}{\partial s} \quad \dots (14)$$

$$\sin \theta = \frac{v_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_k}} \frac{u_{*c}}{u_{*e}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \quad \dots (15)$$

sg: (水中比重)・(重力加速度), d: 粒径, τ_{*c} : 限界掃揚力, u_{*c} : 限界摩擦速度, μ_s : 静止摩擦係数, μ_k : 動摩擦係数

(3) 計算方法

図-4に解析に用いた計算格子を示す。同図に示した計算格子点で流れと水位及び河床変動の計算を行っている。本文では計算上の流れ方向の座標軸をs'としており、上流端s'=0は次節で示す実験水路におけるs=8m, 14mに対応する。計算の境界条件を与えた断面は図-4に示す通りであり、境界条件は上流端s'=0で、ベーン工を連続設置した場合の流速、水位及び河床形状並びに平衡流砂量を与え、下流端で水位及び河床高を与える。

3. ベーン工設置区間に挟まれたベーン工非設置区間の流れと河床変動の解析と実験の比較

(1) 実験方法

実験には図-5に示す中心半径450cm、水路幅100cm、水路長約24mの一樣弯曲水路を用いた。この水路

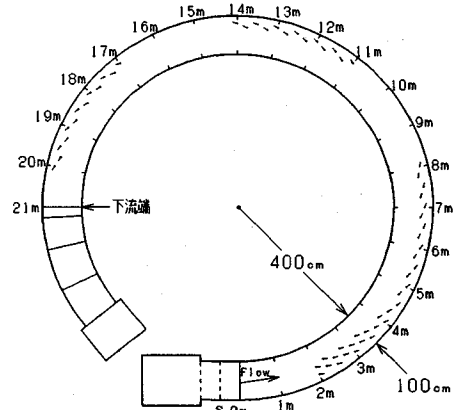


図-5 実験水路及びベーン工設置状況

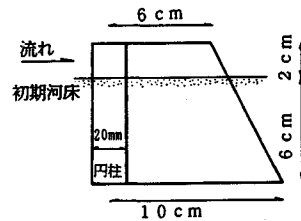


図-6 ベーン工諸元

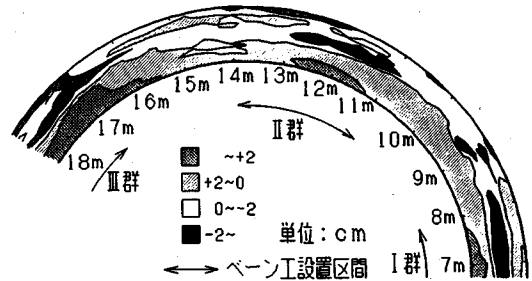
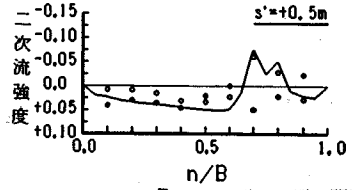
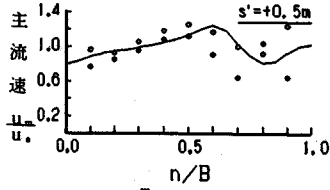
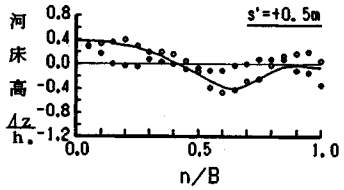
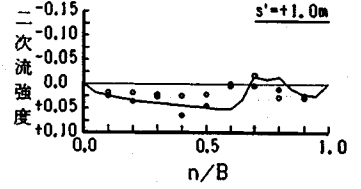
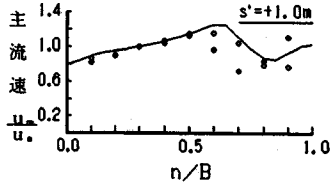
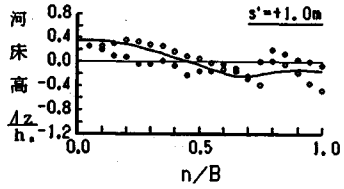
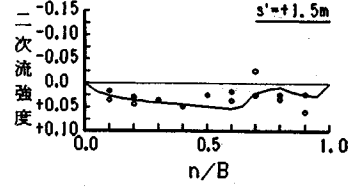
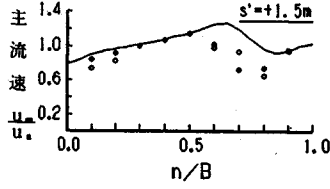
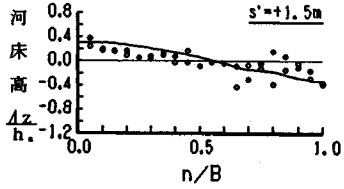
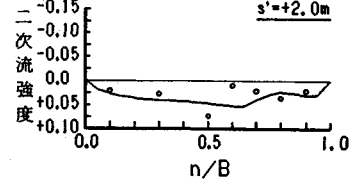
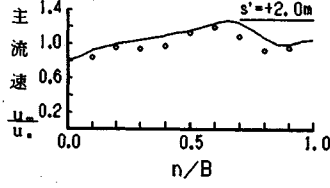
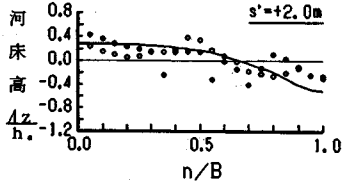
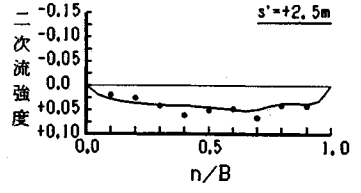
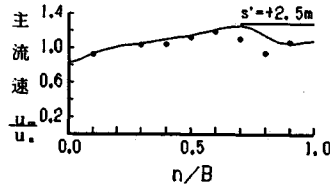
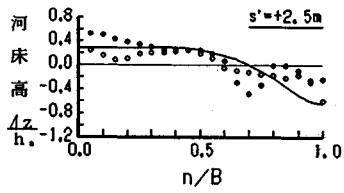


図-7 河床高コンター (実験結果)

の中心軸沿いにs軸を選び、s軸に沿う流下距離を縦断距離とする。s軸に直交して内岸から外岸向きにn軸をとり、内岸からの距離を横断距離とする。図-6に用いたベーン工を示す。ベーン工の形状及び諸元は、福岡・渡辺の研究結果^{2)~4)}を用いて決定した。実験は表-1に示す水理条件のもとで行われている。

図-5には、ベーン工の設置状況が併せて示されている。ベーン工はs=2m~8m, 11m~14m, 17m~20mの区間に設置されている。ここで、これらのベーン工の一まとまりをそれぞれベーン工のI群、II群、III群と呼ぶ。II群とIII群のベーン工の設置基数はそれぞれ13基ずつで、これらのうち、上流から3基はベーン工の角度を25°、他の10基を20°に設置した。ベーン工の設置方法はI群ではs=4.25mから下流を2列千鳥状配置、ま



● Exp. (I群~II群の間)
● Exp. (II群~III群の間)
— Cal.

● Exp. (I群~II群の間)
● Exp. (II群~III群の間)
— Cal.

● Exp. (I群~II群の間)
● Exp. (II群~III群の間)
— Cal.

図-8 横断河床形状の縦断変化の実験結果と解析結果の比較

図-10 主流横断分布の縦断変化の実験結果と解析結果の比較

図-11 二次流強度横断分布の縦断変化の実験結果と解析結果の比較

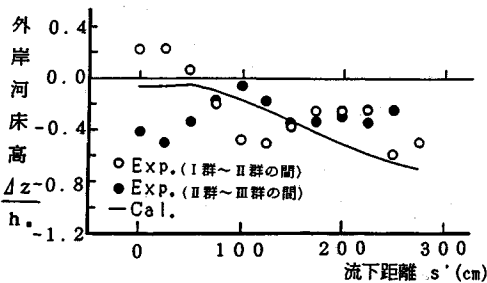


図-9 外岸付近の河床高の縦断変化

た $s=2\text{m}\sim 4.25\text{m}$ までを図に示すように 4列配置とした。これは水路の上流端で生じる内岸側の相対的に速い流れを、バース工によって徐々に河道中央部に誘導し、上流域の流れと流砂の境界条件を安定させるためである¹²⁾。

河床高、水位、流速の測定は、河床が平衡に達した後に行った。流速の測定は、通水終了後河床を速乾性セメダインで固定した後で行い、ピトー管を流向に合わせることで流速の大きさ、 s 軸に対する流向の角度を測定し、流速の s 成分、 n 成分を求めた。また、電磁流速計を用いて流速 w と u を同時に測定した。

(2) 河床横断形状とその縦断変化

図-7に河床高コンターを示す。I群とII群の間及びII群とIII群の間がバース工を設置していない区間である。ここでは、バース工によって生じた河道中央部のみお筋が下流に進むに従い次第に小さく浅くなり、平坦な河床形状に近づいていく。II群の先頭のバース工により急激に洗掘された河床砂がII群の下流端付近に堆積して、この付近の河床は平坦な形状となっている。一方、II群とIII群の間の非設置域ではIII群のバース工の上流端

である $s=17$ m 付近で、小規模ではあるが外岸洗掘が生じている。この場合にはベーン工が設置されていない区間長を短くすることによって、外岸洗掘を防ぐことが可能となる。このように、ベーン工が設置されていない区間と設置区間の長さを適切に決定できれば、ベーン工を断続的に配置することによっても外岸洗掘を生じさせない弯曲流路をつくることができると考えられる。

図-8 に、ベーン工が設置されていない区間の $s=8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5$ m 及び $11.5, 12.0, 12.5, 13.0, 13.5$ m (ベーン工の終端位置からそれぞれ $s'=+0.5, +1.0, +1.5, +2.0, +2.5$ m) における横断河床形状の実験結果を解析結果とともに示す。実験値は、河床波により局所的な変動が見られるが、 $s'=+2.0$ m 付近までは、それぞれの流下距離での河床形状の変化過程をおおよそ表現できている。 $s'=+2.5$ m の位置では、外岸付近で河床形状及び河床高が異なっている。これは、次のベーン工群が $s'=+3.0$ m の位置に設置されており、この影響を受けたものと考えられる。解析では $s'=+1.5$ m 付近から外岸での洗掘が現れ始めている。

図-9 に外岸での河床高の縦断変化を示す。河床波等の影響により、実験結果から明確なことは言えない。しかし、解析結果と照らし合わせてみれば、 $s'=1.5\sim 2.0$ m 付近で全区間ベーン工なしの場合にあたる $s'=3$ m の約 $1/2$ 程度の洗掘が生じることが分かる。また、この流下距離は、先に示したようにベーン工が設置されていない場合の縦断平均二次流強度の値の約 $1/2$ 程度まで回復した地点である。したがって、この地点もしくはやや下流から再びベーン工群を断続的に配置すれば、外岸洗掘を軽減できると考えられる。

(3) 主流速、二次流速の横断分布とその縦断変化

ベーン工の設置域から非設置域における流れ場と横断河床形状の変化は、“ベーン工ありの流れ”から“ベーン工なしの弯曲流れ”へ遷移していく過程とみなすことができる。ここでは、ベーン工が設置されていない区間 ($s=8$ m \sim 11 m, 14 m \sim 17 m) において、流速分布形の縦断変化の過程を明らかにする。

図-10, 11 は、ベーン工が設置されていない区間における河床形状を示した図-8 の断面と同じ断面での主流及び二次流強度の横断分布について、その流下方向の変化を示す。 $s'=+0.5$ m の位置では、直上流側にあるベーン工の影響が顕著で、横断位置 $n/B=0.65\sim 0.85$ の範囲でベーン工による二次流が強く残っており、その範囲では主流の減速が認められる。 $s'=+1.0$ m では、遠心力とは逆向きのベーン工による二次流は小さくなってはいるが、ベーン工の影響は今なお大きく、主流場の縦断変化は小さい。 $s'=+1.5\sim 2.5$ m にかけて、ベーン工の影響は徐々に小さくなっていき、外岸付近での主流の横断変化が小さくなり、最大流速の発生位置が徐々

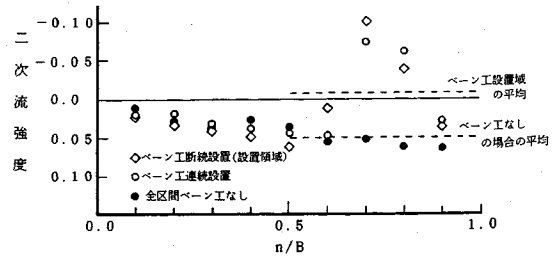


図-12 二次流強度の横断分布の比較

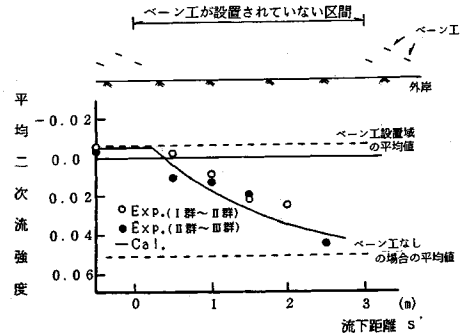


図-13 平均二次流強度の縦断変化

に外岸へ移動していく。しかし、外岸近傍では、顕著な加速は見られない。 $s'=+2.5$ m に至ると、遠心力による二次流がかなり回復しているが、流れは未だ外岸へは集中していない。

解析結果は、主流及び二次流の各位置での横断分布及びその流下方向への変化の過程を良く表現しており、本解析法がベーン工が断続配置されている弯曲河道のベーン工非設置区間における流れの解析に有効であることが分かる。このように、ベーン工を断続的に設置した場合においても、ベーン工設置区間で発達した主流は、ベーン工が存在しなくなっても比較的長い区間にわたってその特徴を保持する。また、ベーン工により形成された遠心力のものとは逆向きの二次流は、 $s'=1.0\sim 1.5$ m 程度で小さくなるが、その影響は遠心力による二次流が回復してくる $s'=2.0\sim 2.5$ m 程度下流まで持続しており、弯曲部外岸での流れを加速させない効果をもたらしている。

次に、外岸深掘れに密接に関係する遠心力に起因する二次流強度の回復過程について検討する。二次流強度の分布は河床波などの影響により各断面でバラツキがあり、分布形も含めた議論は問題を複雑にする。ここでは、“ベーン工あり”と“ベーン工なし”の弯曲流れ場の大きな特徴の違いを抽出し、その縦断変化について議論する。図-12 に、ベーン工が設置された区間の二次流強度の横断分布と水路の全長にわたってベーン工が設置されていない場合の同様弯曲流れの二次流強度の横断分布を示す。これより、 $0 < n/B < 0.5$ の区間では、二次流

強度及びその横断分布形はほぼ等しくなっている。これは、この範囲ではベーン工の影響が及ばず、ベーン工の有無に関わらず、河床形状及び流速分布がほとんど変わらないためである。一方、 $0.5 < n/B < 1$ の区間では、ベーン工の有無の違いにより二次流強度が大きく変化している。

そこで、流下方向への二次流の減衰や発達が明確に表われている $n/B=0.5\sim 1$ の範囲における二次流強度を平均した値を指標として用いる。本文では以後これを平均二次流強度と呼ぶ。“ベーン工あり”、“ベーン工なし”の場合の平均二次流強度は、図-12に示すように、それぞれ -0.006 、 $+0.051$ である。

図-13にベーン工が設置されていない区間（I群→II群、II群→III群）での平均二次流強度の流下方向の変化の様子を解析結果とともに示す。解析結果は先に横断分布でも示した様に実験結果とほぼ一致している。平均二次流強度の値は、流下距離 $s'=1.5\sim 2.0$ mで、ベーン工なしの場合の二次流強度の50%程度まで回復している。 $s'+3.0$ mに達すると、同様弯曲の平均二次流強度に近い状態になることが分かる。

以上、(2)、(3)の検討から、ベーン工が流れ場及び河床形状に大きな影響を与え、非設置区間の洗掘を抑制している範囲は、本実験条件ではおよそベーン工終端より下流 $s'=1.5\sim 2.0$ mの範囲である。したがって、ベーン工の存在しない区間長がこの程度であれば、二次流及び主流の制御が可能と考えられる。

4. ベーン工設置終端より下流の流れ場と河床変動の解析的検討

弯曲部に設置されたベーン工の終端からの下流域における水流の集中並びに洗掘が生じる過程について述べる。先に示した領域も含め、さらに下流の $s'+7.0$ mまでの範囲について数値解析によって流れと河床形状を求め、ベーン工による二次流の縦断的な変化について検討する。

(1) 流れと河床変動

図-14, 15, 16に河床変動、平均流速ベクトル、二次流分布を示す。まず、二次流に着目する。先に示した様に、ベーン工により形成された逆向きの二次流は、 $s'+1.0\sim 1.5$ m程度でなくなるが、その影響は $s'+2.5$ m付近まで及んでいる。その下流では、遠心力による二次流が発達し始め、 $s'+5.0$ m付近の外岸側において最も発達する。さらに下流では二次流は、再び減衰している。これは、以下の理由による。遠心力による二次流が発達すると、二次流と主流の非線形作用によって主流の鉛直分布の一樣化が進む。すなわち、流下に従って遠心力による二次流が一度大きくなった後で主流の鉛直分布の一樣化が進むので、その下流で二次流が小さく

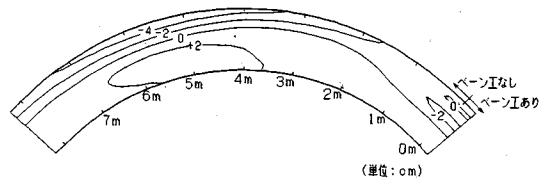


図-14 河床変動状況

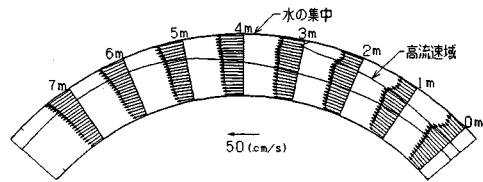


図-15 平均流速ベクトル

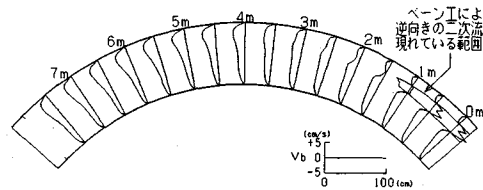


図-16 底面近傍の二次流分布

なる。また、平均流速ベクトルをみると、高流速領域はベーン工設置域から下流に向かって外岸に近づいていき、 $s'+4$ m付近で外岸に達する。この付近ではまだ、流れは外岸にそれほど集中しては、強制渦型の流速分布に移行するのは $s'+6$ m付近である。ベーン工の影響を受けた流れの低流速域が十分加速されてから、外岸付近の流速が加速されている。これらの結果を考慮して、図-14の河床形状から以下のことが分かる。外岸付近の河床洗掘は、ベーン工による二次流の影響が小さくなり始める $s'+2.0$ m付近から生じ始める。水流が集中するようになる $s'+4.0$ m付近で洗掘が一端急速に大きくなり、外岸付近の二次流が小さくなり始めると洗掘も減少し、やがて平衡に至る。

水流の集中過程及びその位置をまとめると、以下の様になる。ベーン工の影響が二次流分布に現れているうちは、高流速領域は外岸へほとんど移動することができない。二次流に対するベーン工の影響が小さくなった位置で主流は、ベーン工を設置した横断位置付近から外岸へ直線的に向かい、外岸に達した所で水流の集中が生じる。こより下流で、外岸河床の顕著な洗掘が生じ、二次流も増大する。

(2) 二次流の減衰過程

以上のことから、ベーン工が設置されていない区間であっても、河床形状及び主流の流速分布はベーン工による逆向きの二次流の影響を受け、強い水の集中が形成さ

れないことが分かった。したがって、外岸に著しい洗掘を生じさせないためには、主流が外岸へ向かい始める位置、すなわちベーン工が作り出した逆向きの二次流がなくなり始める位置を求め、この後の位置から次のベーン工群を設置すれば良い。ここでは、ベーン工設置域下流の水利現象を支配するベーン工により発生した二次流の減衰・流速鉛直勾配の回復に伴う遠心力に起因する二次流の発達に着目し、外岸侵食を生じさせないベーン工の断続区間の長さを検討する。

弯曲流路にベーン工が設置された場合には、遠心力によるものとは逆向きの二次流が生じる。先の図-14, 15, 16 に示したように、ベーン工の設置された横断位置 $n/B=0.65\sim 0.85$ 付近では、この逆向きの二次流が存在する間は、主流速横断分布、河床横断形状はそれほど変化しない。流下に伴う二次流の減衰に従い、逆向きの二次流が現れる横断範囲は狭くなっていくが、二次流の大きさが0に達するまでは、この横断幅の変化量は小さい。また、二次流が逆向きになっている範囲の外側では、遠心力による二次流はほとんど変化していない。

このことから、ベーン工による逆向きの二次流が顕著に現れている領域内でのベーン工による二次流の減衰及び遠心力による二次流の発達は、その領域内での釣り合い関係で大まかに決められると考えられる。そこで、二次流が逆向きである領域について、逆向きの二次流が0になるまでの減衰過程及び距離を求める。平均流による移流の影響は、横断方向よりも流下方向の方が大きいとし、この領域からの拡散は小さいと仮定する。底面の二次流 v_b 及び鉛直勾配を表す u_d についての基礎方程式 (6), (8) を、二次流が逆向きとなっているベーン工の位置を中心とする横断範囲について平均化し、これを無次元化する。さらに、オーダー比較を行い、微小項を無視すると、式 (16) (17) が得られる。

$$p_1 \phi_3 \frac{\partial u_d^*}{\partial s^*} = -u_d^* + a p_1 v_b^* + 1/\phi \quad (16)$$

$$p_3 \frac{\partial v_b^*}{\partial s^*} = p_2 u_d^* - v_b^* \quad (17)$$

$$u_d^* = u_d/u_m, \quad v_b^* = v_b/u_m, \quad s^* = (s' - \Delta S/2)/h$$

$$p_1 = -\frac{\phi h}{3u_m} \frac{\partial u_m}{\partial n} \Big|_0, \quad p_2 = \frac{18h}{\kappa^2 \pi^2 r} \phi, \quad p_3 = \frac{6\phi}{\kappa \pi^2},$$

$$p_4 = \left(\frac{\pi^2}{8} - 1\right) \pi$$

ここで、 p_1 : 鉛直勾配を表す u_d^* に対する二次流の干渉の影響の割合、 p_2 : 鉛直勾配に起因する遠心力による二次流の u_d^* に対する供給率、 p_3 : 減衰率の逆数、 p_4 : 減衰率の比を表している。また、水深で無次元化された流下方向の座標 s^* は、図-17 に示す様にとっている。ベーン工の設置域において、二次流はベーン工の存在により、縦断的に変化する。千鳥状に配置されたベーン工による

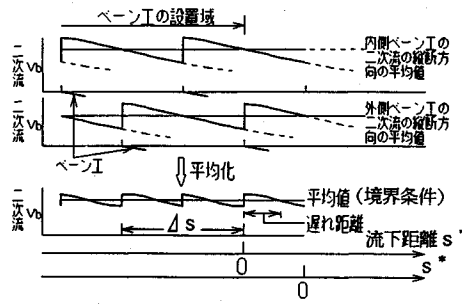


図-17 二次流の局所的な縦断変化と座標軸 s^* の定義

二次流を横断的に平均化し、その縦断変化を模式的に表すと図-17 に示す様になると考えられる。したがって、二次流は $s'=0$ ではベーン工の連続設置区間の平均値よりも高く、終端のベーン工より下流で遅れて平均値に一致する。この遅れ距離は二次流の減衰過程から $0\sim 1/2\Delta s$ の範囲に入ると一般に考えられる。縦断間隔が狭い本実験結果を説明するためには、この遅れ距離を $1/2\Delta s$ とするのが適当であった。ここでは、二次流が連続設置区間の平均値と一致する位置を $s^*=0$ とし、これをベーン工位置からベーン工の設置間隔 ΔS の半分流下した場所 $s'=\Delta S/2$ の位置に選んだ。

p_1 に含まれる平均流速 u_m の横断勾配は流下方向に変化する。ここでは、 p_1 を $s^*=0$ の値で代表しており、これに対する補正量を a で表現する。 a は、各位置での流速横断勾配と $s^*=0$ での流速横断勾配の比をとったものである。 a は場所の関数であるが、これを規定する主流速の横断分布について、その縦断変化はベーン工による逆向きの二次流がなくなるまでは小さい。二次流 v_b^* が負 ~ 0 に変化する範囲では、 a は1.0から二次流が減衰した時の値0.5まで変化する。 a にこれらの値を与え、ベーン工が設置されていない区間で、 v_b^* が0をとる付近まで二次流の流下方向変化を求める。

式 (16) (17) の境界条件は、 $s^*=0$ で u_d^* , v_b^* がベーン工連続設置域の平均値と一致する様に与えられる。 $s^*=0$ での初期値 u_{d0}^* , v_{b0}^* は、式 (6) (8) を先と同様に簡略化して得られる式 (18) (19) で与えられる。

$$u_{d0}^* = \frac{1}{\phi} + p_1 v_{b0}^* \quad (18)$$

$$v_{b0}^* = p_2 u_{d0}^* - \frac{p_3 f \beta \pi I \sin \alpha \left(\frac{u_b}{u_m}\right)^2}{2 \Delta B \Delta S^*} \times \text{列数} \quad (19)$$

ここに、 ΔB はベーン工による二次流が顕著に現れる幅であり、実験結果からこれは $(2\sim 2.5)h \times \text{列数}$ で表せることが分かっている²⁾。ここでは、 $\Delta B=2.25h \times 2$ 列とした。 ΔS^* は無次元化されたベーン工の間隔、 f は補正係数である。このとき式 (16) (17) の解は、

$$u_d^* = \left(u_{d0}^* - \frac{1/\phi}{1 - a p_1 p_2}\right) e^{-\lambda_1 s^*} + \frac{1/\phi}{1 - a p_1 p_2} - \frac{(1 - \lambda_2^*)}{(\lambda_1^* - \lambda_2^*)}$$

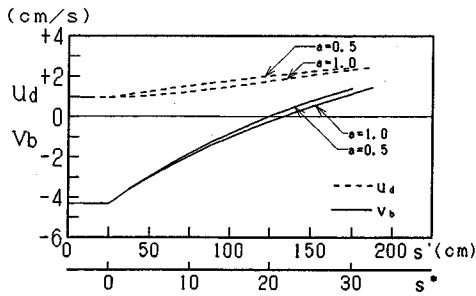


図-18 u_d, v_b の流下方向の変化

$$\cdot \left\{ \left(u_{b0}^* - \frac{1/\phi}{1-ap_1p_2} \right) + (\lambda_1^* - 1) \left(\frac{v_{b0}^*}{p_2} - \frac{1/\phi}{1-ap_1p_2} \right) \right\} \cdot (e^{-\lambda_1 s^*} - e^{-\lambda_2 s^*}) \dots \dots \dots (20)$$

$$v_b^* = \left(v_{b0}^* - p_2 \frac{1/\phi}{1-ap_1p_2} \right) e^{-\lambda_2 s^*} + p_2 \frac{1/\phi}{1-ap_1p_2} - \frac{p_2}{(\lambda_1^* - \lambda_2^*)} \cdot \left\{ \left(u_{b0}^* - \frac{1/\phi}{1-ap_1p_2} \right) - (1-\lambda_2^*) \left(\frac{v_{b0}^*}{p_2} - \frac{1/\phi}{1-ap_1p_2} \right) \right\} \cdot (e^{-\lambda_1 s^*} - e^{-\lambda_2 s^*}) \dots \dots \dots (21)$$

$$\lambda_{1,2}^* = \frac{(1+1/p_4) \pm \sqrt{(1-1/p_4)^2 + 4ap_1p_2/p_4}}{2}$$

$$\lambda_{1,2} = \lambda_{1,2}^* / p_3$$

となる。実験条件及び解析結果より、 p_1, p_2, p_3, p_4, ϕ 及び u_{b0}^*, v_{b0}^* は、それぞれ以下の数値で与えられる。

$$p_1=0.4, p_2=1.56, p_3=19.8, p_4=0.73, \phi=13, u_{b0}^*=0.028, v_{b0}^*=-0.123$$

ここで、前述のように a を 1.0 と 0.5 に選ぶと、 λ_1^* と λ_2^* はそれぞれ a に対応して $\lambda_1^*=2.12, 1.86, \lambda_2^*=0.24, 0.5$ で与えられる。これらの数値を用いると、式 (20) (21) は図-18 で表される。

図-18 より、ベーン工による逆向き二次流 v_b の減衰は比較的早いことが分かる。これは、二次流の減衰に伴い、主流の横断勾配と二次流の干渉が弱まり、主流の鉛直勾配を表す u_d が回復するため、遠心力による二次流が発達し、減衰が一層促進されるためである。 v_b の正負の値が反転するまでの流下距離には、 a の値による大きな違いはない。逆向きの二次流がなくなる無次元距離を L^* とすると、図からこの場合には $L^*=20$ 程度であることが分かる。この距離 L^* は $v_b^*=0$ より、式 (21) を変形して、

$$L^* = \frac{p_3}{\lambda_2^*} \left[\ln \left\{ 1 - \frac{v_{b0}^* \phi (1-ap_1p_2)}{p_2} \right\} - \ln \left\{ 1 + \frac{p_3 \phi (1-ap_1p_2)}{p_2} \right\} \right] \dots \dots \dots (22)$$

で与えられる。ここで、 p_3 は式 (21) の右辺第三項であり、 L^* の関数である。しかし、右辺第二項に比べて小さく、流下方向の変化も小さいことから数回の繰り返

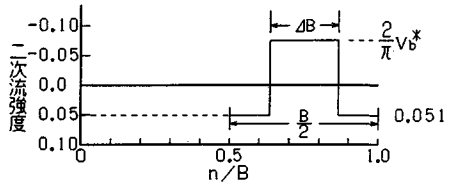


図-19 二次流強度の横断分布

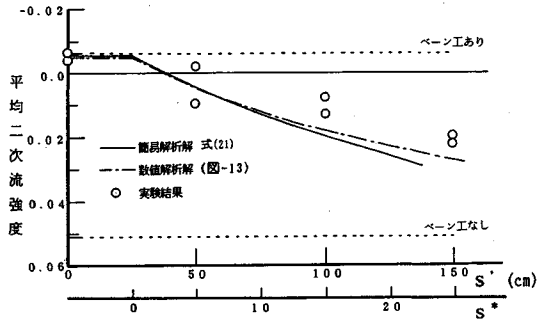


図-20 平均二次流強度の減衰の簡易解析結果

し計算で、 L^* が求められる。 L^* は、式 (21) の第一項、第二項の関係でほぼ決まり、第三項が補正項になる。したがって、ベーン工による二次流が減衰する距離は、ベーン工による二次流 v_{b0}^* 、二次流供給率 p_2 、減衰率の逆数 p_3 、二次流の干渉の強さ p_1 で表せる。このうち、ベーン工の設計を適切に行った場合には、 $v_{b0}^* \phi / p_2$ の値は大きく変わらない。したがって、 L^* は p_3 が大きく、二次流と流速横断勾配の干渉の大きさを示す $p_1 p_2$ が大きい程長くなる。しかし、二次流の干渉の影響の大きさが異なっても、先に a による違いで示した様に減衰するまで距離の変化は小さい。これは、干渉する v_b^* の大きさが減衰するとその影響が小さくなるためである。したがって、ベーン工により発生した二次流が減衰するベーン工からの距離 L' は、 p_3 すなわち流速係数 ϕ で決まり、通常の河道の水理条件では、

$$L' = (0.8 \sim 1.6) \cdot \phi h + \Delta S / 2 \dots \dots \dots (23)$$

で表せる。本解析では $v_{b0}^* < 0$ が解析の前提条件であるから、 ΔS はこれを満たす短い縦断間隔であり、 $v_{b0}^* = 0$ となる程 ΔS が大きい場合には L' は $\Delta S / 2$ よりも短くなる。

この結果を、これまで検討に用いてきた平均二次流強度に直すと以下ようになる。図-11 に示される様な二次流強度の横断分布の形状を、図-19 に示すように簡略化して表すと、平均二次流強度は、

$$\text{平均二次流速} = \left[\frac{2}{\pi} v_{b0}^* \Delta B + 0.051 \left(\frac{B}{2} - \Delta B \right) \right] \frac{2}{B}$$

となる。各流下距離での v_b^* を用いて求めた平均二次流強度の流下方向の変化を先の図-13 の実験結果、数値解析結果とともに図-20 に示す。

図一20より、簡略化した解、式(21)を用いて求めた平均二次流強度の減衰は、流下距離が大きくなるに従って仮定が満たされなくなるために減衰が大きくなっている。しかし、減衰の初期では先の図一13で示した数値解析解による平均二次流強度とほぼ一致しており、逆向きの二次流がなくなるまでは本方法により平均二次流強度の縦断変化を表せることがわかる。平均二次流強度が、先に述べた外岸河床が大きく洗掘されない値、すなわちベーン工なしの場合の強度のほぼ1/2になるのは、ベーン工による二次流 v_s が0になった直後であることが、図一18、20の比較から分かる。したがって、この位置までの流下距離は、 L' で表すことができる。

ベーン工は、河道の弯曲部で生じる二次流と逆向きで半分程度の大きさの二次流を供給する様に設置される。この状況では流下初期での平均二次流強度はほぼ0となる。また、ベーン工は河幅の1/4程度の幅の中に集中して設置することによって、主流の流速分布の鉛直方向の一樣化を図れるほどの逆向きの強い二次流を作り出すことができる¹⁰⁾ことがこれまでに行われた実験及び解析から分かっている。この様にベーン工を配置した場合には、ベーン工による二次流はベーン工設置終端の下流域で長く存在することができ、断続配置でも連続配置の場合と同様な効果を生み出すことが可能である。この場合の断続区間の範囲は、ベーン工による逆向きの二次流が存続できる範囲であり、これは式(23)から求めることができる。

5. 結 論

主要な結論を以下に記す。

(1) ベーン工を断続設置した場合の流れと河床変動を明らかにした。また、ベーン工を断続的に配置した場合の流れと河床形状を解析的に表す手法を開発し、実験結果と比較検討を行った。その結果、本解析法の有効性が確認された。

(2) ベーン工を断続配置にしても、連続配置の場合と同等の効果をもたらすことの出来る断続区間の長さの

決定方法を示した。

(3) ベーン工設置終端より下流において、ベーン工がつくり出す流れの影響が減衰する過程と遠心力による二次流が回復してくる過程を定量的に示した。

参 考 文 献

- 1) Odgaard, A.J. and Kennedy, J.F. : River-bend Protection by Submerged Vanes, Proc. of ASCE, Vol.109, Hyd. pp.1164-1173, 1983.
- 2) 福岡捷二・渡辺明英・黒川信俊：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) 福岡捷二・渡辺明英：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.
- 4) 福岡捷二・渡辺明英：河岸侵食対策工としてのベーン工の設計法，土木技術資料，Vol.29, No.3, pp.127~132, 1988.
- 5) Odgaard, A.J. and Wang, Y. : Sediment Management with Submerged Vanes, I : Theory, J. of Hyd. Eng. Proc. of ASCE, Vol.117, No.3, pp.267~283, 1991.
- 6) Odgaard, A.J. and Wang, Y. : Sediment Management with Submerged Vanes, II : Applications, J. of Hyd. Eng. Proc. of ASCE, Vol.117, No.3, pp.284~302, 1991.
- 7) 福岡捷二：ベーン工の設計と施工，河川，No.520, pp.55~64, 1989.
- 8) 福岡捷二・渡辺明英・萱場祐一：ベーン工による河道弯曲部の局所洗掘箇所の埋め戻し過程，水工学論文集，Vol.34, pp.325~330, 1990.
- 9) 福岡捷二・渡辺明英・浜田精一：ベーン工の現地施工と調査結果の解析，第45回年次講演会概要集第2部，pp.24~25, 1990.
- 10) 福岡捷二・渡辺明英：ベーン工の設置された弯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.98~109, 1992.
- 11) 石川忠晴・金舜範：湾曲部の二次流に関する基礎的研究，土木学会論文集，第375号，II-6, pp.143~150, 1986.
- 12) 福岡捷二・萱場祐一・三宮武・曾田英揮：ベーン工による砂礫堆の縮小化と河床の平坦化，東京工業大学土木工学科研究報告，No.43, pp.1~10, 1991.

(1992.12.8受付)

FLOW AND BED PROFILES IN CURVED CHANNELS WITH DISCONTINUOUSLY INSTALLED VANES

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE, Yuichi KAYABA and Hideki SODA

The flow and bed profiles in a curved channel with the discontinuously installed vanes are studied. The semi-3D numerical model is developed, extending 2D model for the design of continuously installed vanes. The theoretical results agree with the experimental results. The longitudinal interval between vanes-installed region and no vane region is determined by considering the streamwise change in the secondary current distribution.