

横断方向流砂を制御するベーン工の設計法

Design Method of Vanes Controlling Transverse Sediment Discharge

建設省土木研究所 正員 福岡 捷二 S.Fukuoka
建設省土木研究所 正員 ○渡辺 明英 A.Watanabe

1. はじめに

河川の湾曲部では遠心力により二次流が生じ、外岸付近に洗掘がそして内岸に堆積が発生する。河岸付近の局所洗掘対策は河川工学上の重要な課題であり、護岸・根固め・水制等によりこれに対処してきた。これらは河岸付近の主流および二次流を弱め、また洗掘が生じる位置を根固め・水制の前面に移行させる事により河岸侵食を軽減する方法である。これに対し、二次流そのものを積極的に抑制し、河岸侵食を軽減する工法にベーン工法がある。このベーン工については、アイオワ大学の理論^{1), 2), 3)}がある。この理論では湾曲部における流下方向の流れの遠心力による回転モーメントとベーン工を置いたことにより発生する回転モーメントが湾曲部の全領域で相殺することにより二次流の発生を抑制し局所洗掘を軽減するとしており、これによって局所洗掘を防止するベーン工の数が決まると考えている。しかし、ベーン工は有限翼の性質を持つことから、翼の下流端から渦を発生させ、これにより外岸付近に設置されたベーン工の周囲に循環が発生する。この循環に伴う二次流は湾曲流の遠心力による二次流と逆向きの回転を持ち、外岸付近の流れの構造、特に洗掘に寄与する二次流を弱めることになる。このことは、2つの回転力が剛体的につりあい、遠心力による二次流を全体的に相殺すると仮定しているアイオワの理論は不十分で、ベーン工は外岸付近の流れ場を局所的に変形させ、その結果河床の洗掘も減少すると考える方が正しい。したがって、ベーン工の設計に際してはベーン工の構造や大きさだけを定めれば良いのではなく、ベーン工設置時の流れ場の状況と流れ場が河床に与える影響を把握し、ベーン工設置後の河床形状、特に外岸での河床高を予測する事が重要になる。ベーン工の機能は流れの遠心力による二次流と逆向きの二次流をベーン工の周りに形成させることであり、この逆向きの二次流を定量的に評価することによってベーン工の効果と河床形状が求められる。

本研究では、一様湾曲水路に種々の配置と形状・形式を持つベーン工を設置したときの動的平衡河床形状を解析的に求め、実験結果と比較を行う。これによって湾曲部外岸の局所洗掘と内岸の堆積を軽減するベーン工の設計法を提案する。

2. 基礎方程式

一様湾曲水路において流砂運動が動的平衡状態であれば横断方向流砂量 q_{Bn} は側壁における境界条件より、 $q_{Bn} = 0$ である。また流砂が掃流砂の場合、 q_{Bn} は一般に縦断方向流砂量 q_{Bs} と底面を流下している砂粒子の運動方向を表わす $p = v_{bs} / u_{bs}$ を用いて、 $q_{Bn} = p \cdot q_{Bs}$ の形式で表わせる。ここで p は河床の横断勾配

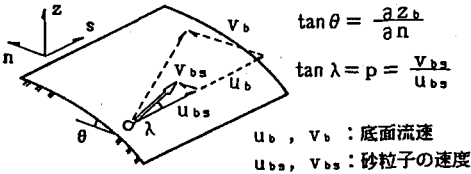


図1 記号の説明

$$p = \frac{v_b}{u_b} - \frac{1}{\mu_s} \left(\frac{\mu_s}{\mu_k} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{u_{*c}}{u_*} \right)^{2-\alpha} \frac{\partial z_b}{\partial n} \quad (1)$$

u_* : 摩擦速度, u_{*c} : 限界摩擦速度
 μ_s : 静止摩擦係数, μ_k : 動摩擦係数

$$\frac{\partial z_b}{\partial n} = \mu_s \frac{\tau_s v_b}{\tau_c u_b} \quad (2)$$

τ_s : 底面摩擦力, τ_c : 限界掃流力

表一 従来の研究

m		
0	斜面上の流砂量 交互砂州	福岡・山坂 ⁴⁾
1	斜面上の流砂量 ($v_b=0$) 側岸侵食	平野 ⁵⁾
	湾曲部平衡河床形状 ($p=0$)	池田 ⁶⁾
	蛇曲部平衡河床形状	長谷川 ⁷⁾
2	湾曲部平衡河床形状	Engelund ⁸⁾

と底面せん断力や底面流向及び河床材料の物理特性によって定まる。平衡状態では $q_{Bn}=0$ であるから、 q_{Bs} の表示式に関わらず、横断方向に常に $p=0$ となる河床形状が求める解である。この p は従来の研究(表1)より一般に式(1)の形式で表わせる。この式(1)における m の値の違いは、砂粒子にかかる流体力の取り扱いの違いによるものである。砂粒子に対して底面せん断力が底面流向の方向に働くとすれば $m=0$ を得る。また砂粒子が一定速度で移動しているとして底面流速ベクトルと砂の速度ベクトルとの相対ベクトルの向きに流体力が働くとすれば $m=1$ を得る。したがって、掃流力が限界掃流力に近い場合は砂粒子の運動方向は $m=0$ で表わされ、逆に掃流力が限界掃流力に比べてかなり大きいときには $m=1$ で表わせると考えることができる。実際にはこの m の値は状況に応じて0~1の間で変化するとみなすことができる。ここでは、掃流力が限界掃流力に近い状態を想定して $m=0$ とする。この時、平衡状態の河床形状は式(2)によって表わされる。したがって、底面流向を表す v_b/u_b の横断分布すなわち二次流強度の横断分布を求める事が重要な課題となる。

湾曲部にバーン工が設置された場合の流れ場は運動方程式にバーン工の効果を外力項として加えることで表わせる。運動方程式を渦度方程式に変換して簡略化を行うと^{9), 10)}式(3)を得る。記号は図2に示されている。ここで、 F_n はバーン工によって流体に加えられる力、すなわち反力としてバーン工に加わる水平力である。式(3)において $F_n=0$ であれば池田ら¹⁰⁾の用いた式に一致する。二次流はこの式(3)を解けば求まるが、平衡横断河床形状を得るために必要なものは流下方向に平均化された底面流速 v_b の横断分布である。一般に水深は水路幅よりも十分小さいことから渦度は鉛直方向に急速に拡散し相似の分布形になると考えられる。したがって渦度の鉛直分布形すなわち二次流の鉛直分布形を仮定して鉛直方向並びに流下方向に渦度方程式の平均化操作を行い、それより底面流速 v_b の横断分布を解くことにする。二次流の鉛直分布形を $v = -v_b \cdot \cos(\pi z/h)$ と仮定する。これは、二次流に関する

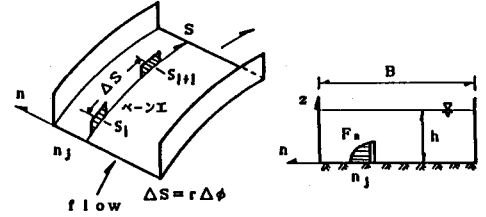


図2 座標系及び記号の説明

$$u \frac{\partial \omega}{\partial s} - \frac{1}{R} \frac{\partial u^2}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_n}{\partial z} \delta(s-s_1) \cdot \delta(n-n_1) + \varepsilon \nabla^2 \omega \quad (3)$$

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial n}, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial n^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

(s_1, n_1): バーン工の設置位置, δ : デルタ関数

$$2\varepsilon \left(-\frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} - \left(\frac{\pi}{h} \right)^2 v_b \right) = \frac{1}{R} (u_s^2 - u_b^2) - \frac{F_n \delta(n-n_1)}{\rho \frac{\partial s}{\partial n}} \quad (4)$$

$$v_b - \left(\frac{h}{\pi} \right)^2 \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} = \frac{1}{2} \left(g_c \frac{36}{\kappa^2 \pi^2} \left(\psi - \frac{1}{2\kappa} \right) \frac{h}{R} - g_v \frac{6\kappa \beta_0 l_0 \pi \sin \alpha (\psi - 2/\kappa)^2 h}{\kappa^2 \pi^2 \frac{\partial s}{\partial n}} \right) \delta(n-n_1) u. \quad (5)$$

l_0 : 底面近傍のバーン工の長さ, α : バーン工の仰角, κ : カルマン定数(0.5)

$$\frac{h}{R} = \left(\frac{1 - (1-m/2) A \ln(R/R_s)}{1 - (1-m/2) A \ln(R/R_s)} \right)^{\frac{2}{1-m}}, \quad A = \frac{18(\psi - 0.5/\kappa)}{\kappa^2 \pi^2 (\psi - 2/\kappa)}, \quad \mu_s = \left(\frac{\mu_s}{\mu_b} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{\tau \cdot c \cdot d} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad m=0 \sim 1 \quad (6)$$

流関数 Ψ について $\Psi=0, \omega=0$ の境界条件に対応する鉛直方向の固有関数系が $\sin(n\pi z/h)$ であり、また流下に伴い高波数成分は急速に減衰することから定まるものである。式(3)を流下方向に平均化操作して $\omega = \partial v / \partial z$ を代入し、鉛直方向に積分すると式(4)を得る。式(4)は二次流の生成と消散の関係を表しており、右辺第一項は遠心力による二次流の生成を表わし第二項がバーンによる遠心力によるものと逆向きの二次流の生成を表わしている。ただし、式(4)では水深の1階及び2階微分に関する項を他の項に比べて小さいとみなして省略してある。ここで F_n は底面近傍においてバーン工にかかる水平力すなわち揚力の反力であり、一般にクッタ・ジューコフスキーの理論より $F/\rho = u \Gamma = c_L l u^2/2$ で表わせる。薄翼の理論より揚力係数 c_L はバーン工のアスペクト比の関数である補正係数 β を用いて、一般に $c_L = \beta 2\pi \sin \alpha$ と表わせるので $F/\rho = \beta \pi l \sin \alpha u^2$, $F_n = F_n(0)$ より $F_n/\rho = \beta_0 \pi l_0 \sin \alpha u_b^2$ となる。また、主流の鉛直分布についてはEngelundの用いた2次曲線すなわち、 $u_s = (\psi + 1/\kappa) u_*$, $u_b = (\psi - 2/\kappa) u_*$, $\psi = u_a/u_*$, $\varepsilon = \kappa u_* h/6$ を用いる。ただし $u_* = \sqrt{g h I}$ であり、流速係数 ψ , 水面勾配 I はここでは横断的な平均値を用いることにし $\psi = \psi(h_a)$, $I = I$ 。とおく。これらを式(4)に代入すると式(5)となる。ただし、 g_c, g_v は簡略化に対する補正係数である。

式(2),(5)を連立して v_b 及び z_b または h について解けば、バーン工を設置した場合の平衡河床形状を得ることができる。バーン工がない場合の v_b は、式(5)において $F_n=0$ とおき、拡散項を無視すれば直ちに求まり、河床形状は式(6)で表わされる。この解とEngelundのように水面勾配を $I=I_o R_o/R$ とした時の解を実験値と同時に図3に示す。これより、式(2),(5)の解は二次流による河床形状を概ね表わしていることがわかる。

このようにバーン工が無い場合は比較的容易に河床形状を得ることができるが、バーン工がある場合は横断方向の拡散は無視できず、式(2),(5)は弱非線形の式になるため解析的に解くことはできない。そこで式(2),(5)を数値解法によって解く。すなわち、河床形状に対応する v_b の分布を差分法により計算し、求めた v_b を用いて河床形状を数値積分によって求める。得られた河床形状が v_b を求めた河床形状と一致するまで繰り返し計算を行う。

3. 解析と実験結果との比較

実験水路は図4に示す幅1m、曲率半径5m、湾曲角 90° を有するものである。実験条件は表2に示す。バーン工は図4に示すように標準的には長さ $l=6$ cm、初期河床からの高さ $H=2$ cmのものを仰角 20° となるように湾曲区間の外岸から25cmのところへ等間隔に15基設置した。実験は検討項目別にRun1, Run2, Run3からなる。Run1, Run2の実験は過去に土木研究所で行われたもので、Run3の実験は今回新たに追加されたものである。Run1¹⁾はバーン工の仰角すなわちバーン工にかかる揚力の強さに関する検討を、Run2²⁾はバーン工の横断配置に関する検討を、Run3はバーン工の形状・形式に関する検討を行ったものである。図5にバーン工設置時の横断河床形状の一例を示す。一樣湾曲流路においても流れは発達領域にあるため流れの集中度の違いにより横断河床形状は縦断的に変化している。一方、一樣湾曲河道における平衡時の横断河床形状の解析解は唯一に定まり、これは実験での河床形状及び外岸での局所洗掘深をほぼ説明している。バーン工の設計に際してはバーン工の設置により横断河床形状及び最深河床の大きさがどの様に変化するかわかることが重要であるので、以後その変化が顕著に現れる断面 $\phi=\pi/4$ の横断河床高分布に着目して検討する。

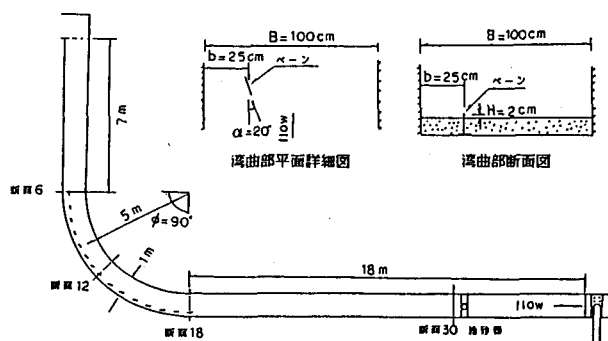


図4 実験水路

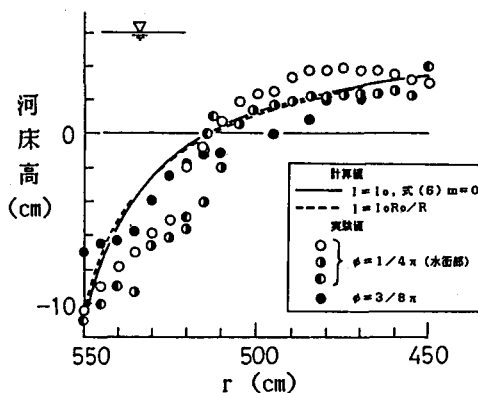


図3 湾曲部の河床形状

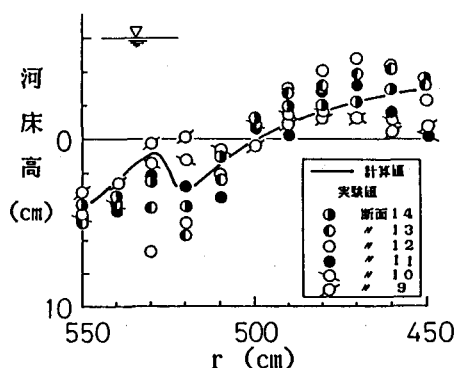


図5 バーン工設置時の河床形状

表-2 実験条件

流量 Q (l/s)	水深 h_o (cm)	勾配 I_o	砂の粒径 d (mm)	流速 u_o (cm/s)	摩擦速度 u_{*o} (cm/s)	限界摩擦速度 u_{*c} (cm/s)	流速係数 ψ
24.6	6.0	1/770	1.0	41.0	2.76	2.34	15

Run1のシリーズの実験値と計算結果を図6に示す。図6はバーン工の仰角の違いによる河床形状の変化を示している。バーン工の仰角が 20° までは仰角が大きくなるにつれて外岸の洗掘防止効果は高くなることが明らかにされている¹¹⁾。計算結果は最も知りたい外岸の局所洗掘深については実験結果を良く説明している。バーン工の周囲の洗掘は解析解より大きくなるがこれはバーン工自身による局所洗掘が重なったものである。したがって、この大きさについては理論の中では考慮されていない。図中のパラメータ γ は、式(7)によって表わされる。これは式(5)の右辺の2つの項の比を川幅 B で除したものであり、 $n=n_j$ の横断位置にバーン工が配置されたときの遠心力による二次流の生成力とバーン工による逆向きの二次流の生成力の全体的な比を示す。これを二次流相殺率と呼ぶ。図6は γ の値が増加すると外岸付近の河床の洗掘は軽減されることを示す。 γ は式(7)に示されるように $\beta \cdot l \cdot \sin \alpha / B \Delta \phi$ 、すなわち $\beta \cdot l \cdot \sin \alpha \cdot N_v / B \phi$ に比例する。したがって仰角 α 、設置数 N_v 、またはバーン工の長さ l の増加とともに外岸付近の洗掘が減少する事が理論的に示された。また、 α 、 l が一定の時、設置数が多いほど(γ が大)効果的であることがわかる。ここで γ に対する B の影響については4節で述べる。

Run2のシリーズの実験値と計算結果を図7-1、2に示す。図7-1はバーン工の設置位置の違いによるバーン工の効果の違いを示したものであり、計算結果は河床形状の変化の様子を良く表わしている。実験結果・計算結果ともにバーン工の設置位置が外岸から内岸へ移動するにつれて外岸付近の河床は洗掘され、バーン工周辺の洗掘は減少している。バーン工の河床に対する効果は、バーン工を境として内岸側の砂を外岸側に移動させ内岸側の河床を全体的に下げ、外岸側の河床を全体的にあげることにより最終的には横断方向に段差があるような河床形状を形成することである。式(2)、(5)よりこの段差の大きさは $h^2 F$ 。すなわちバーン工の効果にほぼ比例することがわかる。これは先の結果図6からも明らかである。そしてバーン工によって生じる段差の大きさが一定の条件下で、バーン工の設置場所が右に移動した時、バーン工の左側の堆積量と右側の洗掘量が等しくなるためには、堆積高は減少し洗掘深は増加しなければならない。したがってバーン工の設置位置が外岸から内岸へ移動するにつれて外岸付近の河床は低下することになる。また、遠心力による二次流のため外岸に近づくにつれて河床は低下し水深は増大する。このため段差の大きさはバーン工の設置場所が外岸に近づくにつれて水深の増加のために大きくなり、この傾向は一層強まることになる。

また図7-2はバーン工を複列として配置したときの河床形状を示している。これらをみれば、バーン工

$$\gamma = \frac{g_v(\psi - 2/\kappa)^2 \kappa \beta \cdot \pi \cdot l \cdot \sin \alpha}{g_c(\psi - 0.5/\kappa) 6 B \Delta \phi} \quad (7)$$

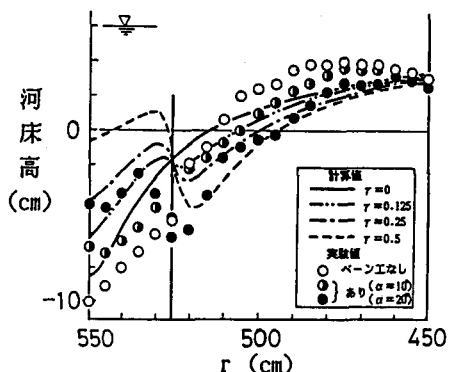


図6 バーン工の仰角の違いによる河床形状の変化

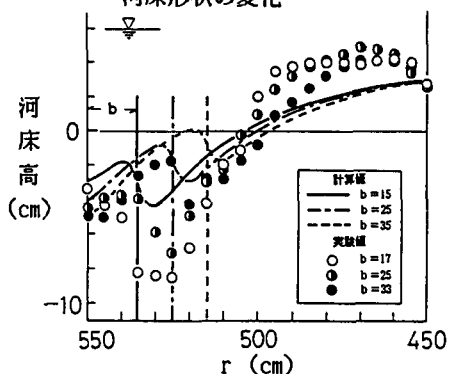


図7-1 バーン工の設置位置の違いによる河床形状の変化

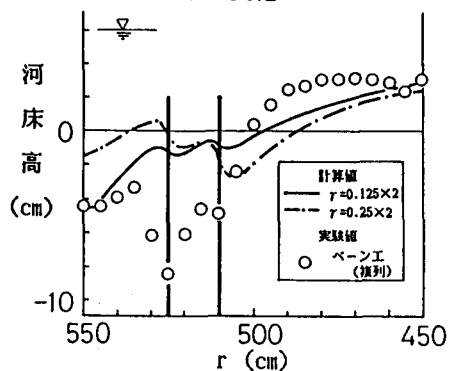
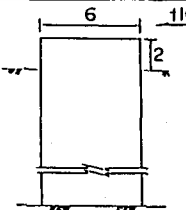
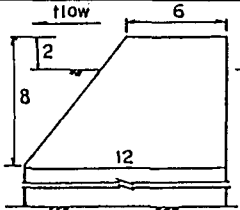
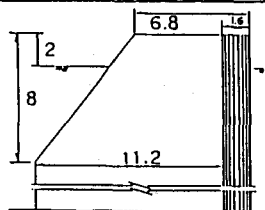


図7-2 バーン工を複列とした時の河床形状

を複列として配置したときの河床の横断形状は単列に配置したときよりも（図6）より平坦に近くっており横断面内の局所洗掘・堆積の軽減に対しより効果的にベーン工が機能していることがわかる。

Run3の結果を図8，9に示す。図8はベーン工の各種形状の違いによる横断河床形状の差異を表わしており、図9は外岸から5cmの位置での河床高の縦断変化を表わしている。実験に用いたベーンの形状は表3に示す通りであり、これに外岸から5cmの位置で洗掘の著しい $\phi = 30^{\circ} \sim 75^{\circ}$ の区間における平均洗掘深と最大洗掘深をあわせて記した。図8より、長方形型（アイオワ形式）・台形型ともにベーン工周辺が洗掘されるが台形型の方が長方形型よりもやや内側を洗掘し外岸の河床の洗掘を減少させていることがわかる。この理由は、主に底面付近におけるベーン工の長さ l 。が長方形型のものに比べて大きいために γ が増大したためである。しかし l 。の増大ほど変化していないのは台形型の方がベーン工のアスペクト比が小さくなり β 。が減少したために γ が l 。ほど増大していなかったためである。以上のことから同一の条件では l 。が大きい方が効果は大きくなるがその時効率を下げないようにするためにはアスペクト比が小さくならない様な形状にするのが望ましいこと、 l 。を単純に2倍にする構造よりはベーンの数に2倍にした方がよいことなどが予想される。また図9より円柱付きベーン工は円柱なしの場合と比較して洗掘深の縦断的な変化は小さくなり、そのため最大洗掘深が小さくなっていることがわかる。この理由は、円柱によりベーン工の周りの河床を積極的に洗掘させ全てのベーン工を常時ある面積露出させることで、縦断的に配置されたベーン工を効率的かつ一様に働くようにさせたことによる。したがって、ベーン工前面に円柱を取り付けベーン工の設置位置における河床高を安定させ、ベーン工が安定して機能するような工夫を施すことが外岸付近の河床の洗掘を軽減するために必要である。この実験結果では円柱付ベーン工が最も優れていると判断される。

表－3 ベーン工の形状 （単位：cm）

	Type-I (長方形型)	Type-II (台形型)	Type-III (円柱付台形型)
形 状			
平 均 洗 掘 深	5.83	4.61	4.92
最 大 洗 掘 深	6.90	6.51	5.32

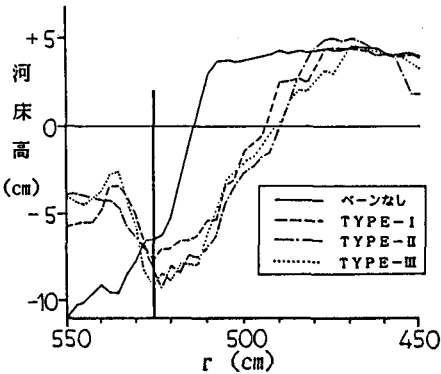


図8 ベーン工の形状の違いによる河床形状の変化

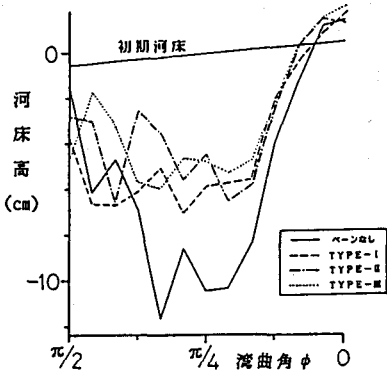


図9 外岸から5cmの位置での河床高縦断図（湾曲部）

4. 設計法について

先に示した実験及び解析結果より、河床の横断形状を決定する主なパラメータは、二次流相殺率 γ およびベン工設置位置 b/B であることが明らかとなった。まずこの2つのパラメータの値の与え方について考える。この γ 及び b/B の違いによる外岸の河床高の変化について計算結果をまとめ直すと図10, 11のようになる。これらの図より、外岸付近の局所洗掘を効率良く軽減しベン工の周りの局所洗掘を大きくしないためには、外岸の河床高が平均河床高に近くなる $\gamma=0.5\sim0.6$ となるように設定し、またベン工の内岸側の洗掘が外岸付近の洗掘に比べて大きくならないように、 $b/B=0.2\sim0.25$ (単列), $b/B=0.2\sim0.25, 0.4\sim0.5$ (複列) とすればよいことがわかる。

次に具体的な設計諸元の与え方について考える。 γ は式(7)からわかるように、水理条件(B, h_a, ϕ)とベン工の構造に関する条件によって決定される。補正係数 g_v/g_c は、1に近い数であるので、ここでは1.0とする。与えられる流量や水位に対して γ の値が $0.5\sim0.6$ となるように、ベン工に関する値 $\beta_0, l_0, \sin\alpha, \Delta\phi$, または N_v を決定する。仰角 α は揚力を最大にする 20° とする。また l_0 はベン工から放出される渦構造のスケールが l に関係することから、与えられた水深 h_a に対して $l_0=(1\sim2)h_a$ とする。 β については、一様流中に置かれた翼に関する揚力線理論より、その平均値 β_0 は平均アスペクト比 H^2/A , A :ベン工の面積, H :ベン工の高さを用いて、 $\beta_0=1/(1+A/H^2)$ の関数で表わすことができる(図12)。したがって、与えられた水理条件とその水理条件によって決定されたベン工の構造諸元に対して $\gamma=0.5\sim0.6$ となるようにベン工の設置数 N_v を決定すれば良い。ただし、 $\gamma=0.5\sim0.6$ の値を設定すると、川幅 B が大きくなるにつれてベン工の数 N_v が必然的に増えることになる。この時には、 B/h_a ($l_0=(1\sim2)h_a$)に応じてベン工の列数を増やすことになる。

5. おわりに

本研究で示した理論解析法により、河道湾曲部における洗掘と堆積を軽減するためのベン工の配置や構造などの設計諸元を求めることが可能となった。

(参考文献)

- 1) Odgaard・Kennedy IHR Report, No.241, 1982
- 2) Odgaard・Kennedy ASCE, Vol.109, HY8, p.1164 1983
- 3) Asano・Odgaard JSCE, JHHE, VOL.2, No1, p.1, 1984
- 4) 福岡・山坂 第27回水講演文集 p.703 1983
- 5) 平野 土木学会論文報告集 210 p.13 1973
- 6) 池田 土木学会論文報告集 229 p.55 1974
- 7) 長谷川 土木学会論文報告集 338 p.105 1983
- 8) Engelund ASCE, Vol.100, HY11, p.1631 1974
- 9) 村本 京大防災研年報第9号 p.525 1966
- 10) 池田・西村 土木学会論文報告集 369 p.99 1986
- 11) 橋本・浅野・坂野 第29回水講演文集 p.603 1985
- 12) 坂野・福岡・浅野 第41回年講演文集 p.387 1986

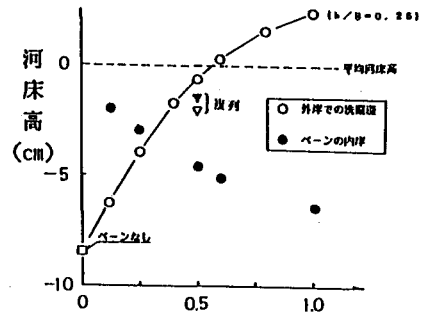


図10 γ の違いによる外岸の河床高の変化

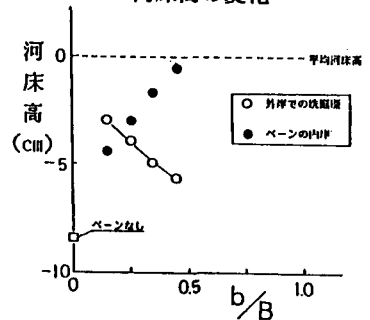


図11 b/B の違いによる外岸の河床高の変化

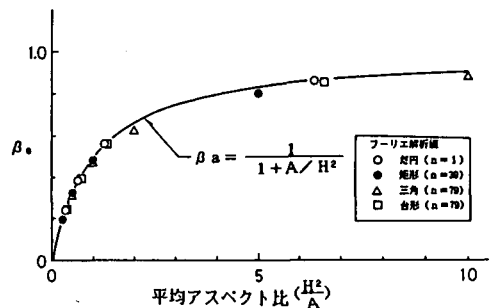


図12 β_0 と平均アスペクト比の関係