

河岸侵食を防止するベーン工の設計法の研究

渡辺明英*・福岡捷二**

弯曲流路における流れによる河岸侵食を防止するベーン工の配置及びベーン工設置範囲の決め方を、ベーン工の配置に対する流れの二次流分布、外岸河床の洗掘軽減の考察から検討している。実験結果及び解析結果を踏まえて、ベーン工の設計法が提案されている。現地施工の調査結果から、ベーン工の効果が確認され、また、ベーン工の設計法の合理性が示されている。

Key Words : vane, secondary flow control, bed variation, protection of bank erosion, design method, layout method, execution of vane works.

1. 緒 言

河道弯曲部の外岸河床の洗掘を防止し、河岸侵食を防止するベーン工について、これまでに幾つかの研究が行われてきた^{1)~6)}。ベーン工の水理設計を行うためには、ベーン工が設置された河道における流れと河床形状がベーン工の形状と配置との関係で求まることが不可欠である。そのため、これまではベーン工が設置された河道弯曲部の流れ、河床形状の解明と解析に努力が払われてきた^{7),8)}。

ベーン工が設置された河道弯曲部における流れと河床形状を表現できる理論に、福岡、渡辺^{7),8)}や Odgaard ら^{9),10)}のものがある。Odgaard らの理論は、河床形状及びこれによって決まる主流速の横断分布は近似的に表せる。しかし、最も重要なベーン工設置による二次流分布の変化とそれを考慮したベーン工の配置法を求められないという重大な欠点がある。すなわち、遠心力によるものは逆回りの回転を持つベーン工による二次流が河床の横断形状を変化させるだけでなく、ベーン工周辺で主流鉛直分布の一樣化を促進し、その結果として遠心力に起因する二次流を弱め、外岸河床の深掘れをさらに小さくするというベーン工の機能を正しく表現できていない。したがって、ベーン工の設計法を議論するにはこのような二次流や主流の横断面内の流速分布を合理的に表現できる著者らの理論^{7),8)}に基づく必要がある。

本文では、ベーン工の構造と著者らの理論に基づくベーン工の配置法を、ベーン工の設計法としてまとめて示し、この方法を現地に適用し、ベーン工の河岸侵食対策工としての効果について考察する。

2. ベーン工の配置

ベーン工を設置した河道弯曲部における流れと河床形状は、ベーン工の存在を考慮に入れた流れの支配方程式及び流砂の連続式を用い、河道形状、水理条件、ベーン工が供給する二次流の強さ及びベーン工の位置と与条件として求められる⁷⁾。これより、ベーン工による洗掘軽減量は、式(1)に示すベーン工の二次流の強さを表す無次元量 γ^j と外岸からベーン工までの距離 b を川幅 B で除した無次元位置 b/B で表せる。ベーン工が複数列からなる場合には、 b/B の値はベーン工の設置中心位置で表す。 γ はベーン工による二次流と遠心力による二次流の強さの比を表し、二次流相殺率と呼ぶ。これは、与えられた河道形状、水理条件に対して各時間で定まる河床形状、流速分布に対して以下の様に表される。

$$\gamma \cong \sum \gamma_j = \sum f_j \frac{(u_b|u_b)_j}{((u_m - u_d)u_d)_m} \frac{\kappa r}{6B} \left(\frac{\beta \pi l_0 \sin \alpha}{\Delta s} \right)_j \dots (1)$$

ここで、 $()_j$: ベーン工の横断位置 $n=n_j$ における値、 $()_m$: 断面平均値を示し、 u_b : 底面近傍での主流速、 u_m : 主流の水深平均流速、 u_d : 主流の水深平均流速からの偏差に關係する速度である。主流の鉛直分布は、その場所の河床高 z_b 、水深 h に対して

$$u = u_m + \frac{2}{\kappa} \left[\frac{3}{2} \sin \left(\frac{\pi z'}{2} - \frac{3}{\pi} \right) \right] u_d, \quad z' = \frac{z - z_b}{h}$$

で表される。ここに、 κ : カルマン定数、 r : 曲率半径、 β : ベーン工の揚力補正係数、 l_0 : 底面近傍でのベーン工の長さ、 α : ベーン工の迎え角、 Δs : ベーン工の縦断間隔、 f : ベーン工に対する流れの迎え角の変化の補正係数である。

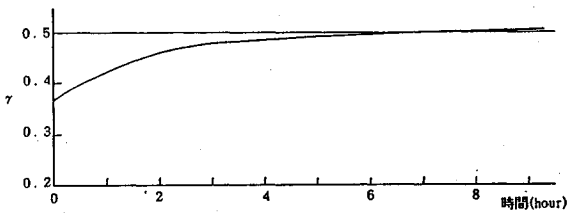
本節では、ベーン工が設置された弯曲河道の流れ場と河床変動に関する数値解析モデル⁷⁾を用いて、ベーン工の配置方式と横断河床形状、特に外岸河床の洗掘深さの関係を調べ、適切な配置方法について検討する。また、

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

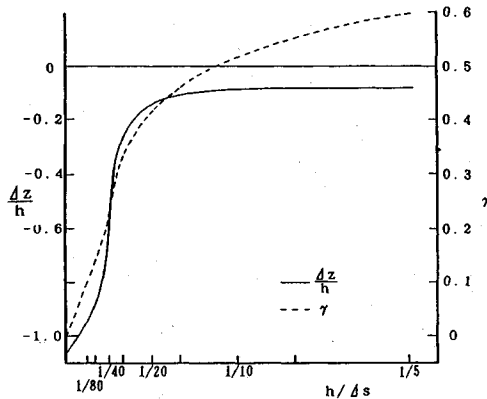
** 正会員 工博 ph. D., 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

表一 解析に用いた条件

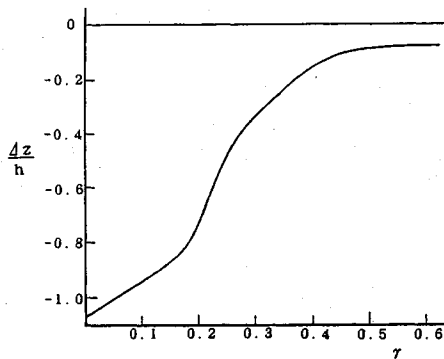
流量 Q (l/s)	水深 h (cm)	流速 u (cm/s)	勾配 l	水路幅 B (cm)	曲率半径 r (cm)	粒径 d (mm)
18.0	4.85	37.2	1/50.0	100	450	0.82



図一 γ の時間変化



(a) ベン工の設置間隔と洗掘深, γ の関係



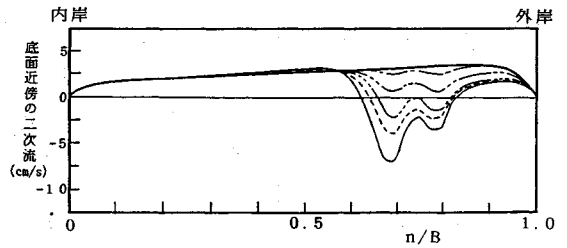
(b) γ と洗掘深の関係

図二 ベン工の設置数と γ , 洗掘深の関係

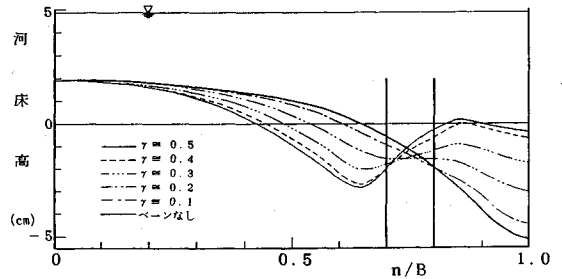
ベン工設置区間より下流における河道形状の変化に対する外岸河床の洗掘深の変化について考察し, 設置区間より下流での洗掘深を小さくするベン工の設置範囲を検討する. 計算条件は, 実験^{7),8)}に用いた条件と同じであり, 表一に示す. また, ベン工は2列以上の場合には千鳥状⁹⁾⁻⁸⁾に配置されている.

(1) ベン工の縦断間隔と横断河床形状

彎曲部における1列当たりのベン工の数, すなわちベン工の縦断間隔に対する外岸の河床洗掘深について考察する. ベン工の効果を示す γ の値はベン工の数



(a) 底面近傍の二次流横断分布



(b) 河床横断形状

図三 河床横断形状 (横断間隔 $2h$)

(式(1)の $1/\Delta s$) に大きく依存するので, γ の値と洗掘深の関係を指標に検討する. ベン工は $b/B = 0.20, 0.30$ の位置(代表値 0.25) に千鳥状に配置されている.

図一は, 最終的に外岸河床がほとんど洗掘されないベン工配置の場合について, 初期の平坦河床から最終河床に至るまでの γ の時間変化を示す. 図二(a)は, ベン工の無次元縦断間隔 $h/\Delta s$ に対する最終的な γ 及び外岸での無次元河床洗掘深 $\Delta z/h$ の関係を, 図二(b)は, γ と外岸での無次元河床洗掘深の関係を示している. 各 γ の値に対する底面近傍の二次流の横断分布と横断河床形状をそれぞれ図三(a), 図三(b)に示す. 図中の n は内岸からの横断距離である.

図一より, 時間経過とともに, γ の値は大きくなる. この変化の主な原因は, 図三(b)に示した様なベン工の周囲で生じる洗掘である. 洗掘深が大きくなるとベン工の翼面積, 周囲の流速が増大し, ベン工にかかる揚力が大きくなる. したがって, γ の値が大きくなることになる. しかし, その値の増大率は, γ の値の増大とともに小さくなる. これは, γ の値が大きくなると, 当該ベン工の直上流のベン工で生じる二次流が強くなり, そのために当該ベン工に当たる流れの迎え角 α が小さくなるからである. これらの要因が絡み合って, 図二(a)に示すように, γ の大きさはベン工の数 ($h/\Delta s$) に比例して単純には増大しない.

ベン工の数が増えると外岸での洗掘深は小さくなる. ただし, ベン工の縦断間隔を必要以上に狭くしても, 洗掘軽減の効果はある大きさ以上には増大しない.

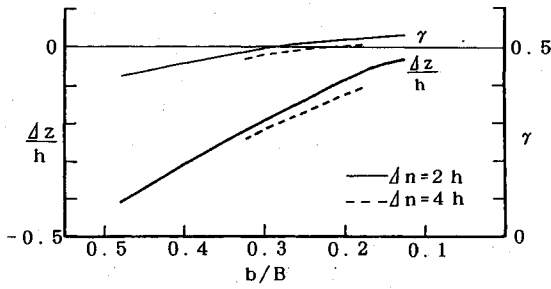


図-4 ベーン工の設置位置と洗掘深の関係

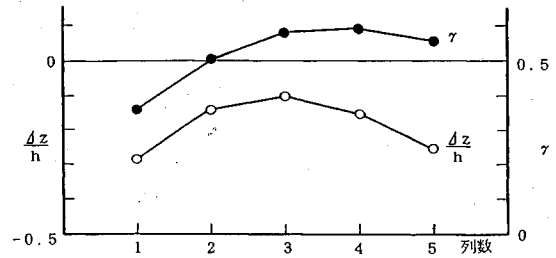
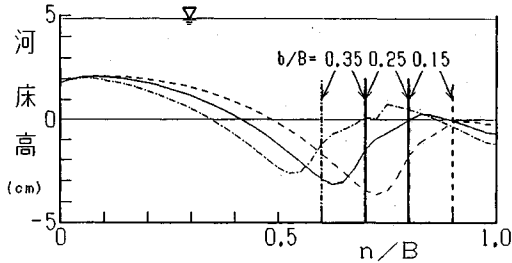
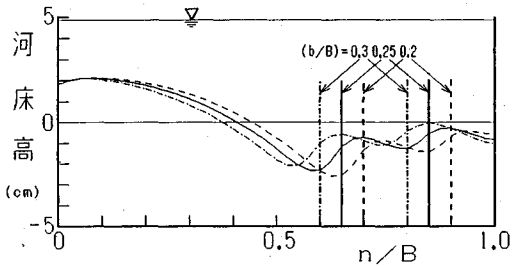


図-6 列数と洗掘深の関係



(a) 横断設置位置の違いによる影響 (Δn=2h)



(b) 横断間隔の違いの影響 (Δn=4h)

図-5 横断河床形状

これは、図-3 (b) にも示されている様に河床形状の変化にも現れている。ベーン工の縦断間隔は図-2 (a) から、平均水深の10倍前後に選べば良いことが分かる。

図-2 (b) より、2列配置では γ が0.2~0.3で洗掘深が急減している。これは、ベーン工によって作り出される流れ場がこの γ の範囲で急変するためである。 γ が0.2よりも小さい場合(1列当たりの γ が0.1より小さい場合)には、図-3 (a) に示す様に、縦断的に平均した二次流の強さは、ベーン工周りで弱くなってはいないが、逆向きの二次流が形成されるまでには至っていない。このため、底面近傍において平均的に外岸に向かう流れが発生しない。図-3 (b) と対照すると明らかな様に、河道中央部のみお筋の形成が小さく、河岸付近の流速も小さくなり得ず、河岸侵食の抑制は期待できなくなる。一方、 γ の値が0.3よりも大きい場合には、遠心力とは逆向きの二次流がベーン工の周囲で縦断的に形成され、ベーン工の周りで主流鉛直分布の一様化が進む。このために、遠心力による二次流の生成がさらに抑制されて外岸での河床洗掘が軽減される⁷⁾。

(2) ベーン工の横断設置位置及び横断間隔

ベーン工を千鳥状に配置しベーン工の横断設置位置 b/B を変えた場合について、 γ の値と外岸での無次元河床洗掘深の変化を図-4に示す。計算は、ベーン工の横断間隔 Δn が水深の2倍、4倍の場合について行った。

図-4から b/B が大きくなりベーン工の位置が外岸から離れるにつれて外岸河床の洗掘深が増大していく。横断間隔 Δn が水深の2倍の場合(図-5 (a))、みお筋位置を河道中央部側に固定し、外岸付近の洗掘深を小さく保つには、 b/B を0.25程度に選べば良い。図-5 (b) には横断間隔 Δn を水深の4倍に広くとった場合、すなわち横断間隔の影響を示す。この場合、外岸河床の洗掘深は横断間隔の違いによって認め得るほど変化していない。横断河床形状はベーン工の影響範囲で平坦形状に近づき、明瞭なみお筋が形成されなくなる。

ベーン工によって形成される二次流セルの大きさは水深の2倍程度であることが実験から明らかにされている⁸⁾。ベーン工の横断間隔を水深の2倍程度に選ぶと、ベーン工に起因する二次流が効率よく集中的に強く形成され、流れ場と河床形状が特徴づけられることになる。このことは、ベーン工の間隔を水深の2倍程度に選ぶと、実河川で様々な外的な乱が作用しても、ベーン工の効果安定に働くことを意味する。また、ベーン工と壁面との距離は、壁面近傍で洗掘を小さくするために、水深の2倍以上離す必要がある⁸⁾。

(3) 設置列数の違いと河床形状の違い

ベーン工の総数を同一とした場合におけるベーン工の最適な設置列数すなわち配置法を求める。これは、(1)で示したようにベーン工の効果は基本的にベーン工の数に依存し、施工費用もベーン工の数で決まるためである。ベーン工は、ベーン工の位置を $b/B=0.25$ とした場合に外岸河床での洗掘が軽減され、平衡状態で γ が $\gamma \approx 0.5$ となる様に定めた。ベーン工の設置総数、設置中心位置並びに横断間隔を一定にし、ベーン工の列数のみを変えた場合について、外岸河床高と γ の変化を図-6に示す。

図-6より、列数が2列以上で γ はそれほど変化しないが、洗掘深は4列以上になると大きくなっている。したがって、この場合は2列~4列配置にするのが良い。

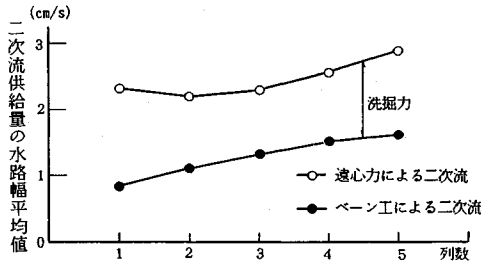


図-7 列数と二次流の供給量の関係

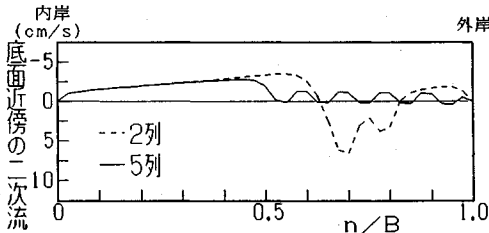


図-8 バーン工が2列と5列の場合の二次流の横断分布の比較

この理由はバーン工によって生成される二次流との関係で説明できる。図-7は、遠心力による二次流供給量とバーン工による二次流供給量の関係を列数に対して示したものである。二次流の供給量は、渦度方程式を鉛直方向に積分して得られた二次流に関する基礎式⁷⁾の遠心力ならびにバーン工に起因する二次流の生成項を、それぞれ横断方向に積分し、水路幅で平均したもので

$$\left(\begin{array}{l} \text{遠心力による} \\ \text{二次流供給量} \end{array} \right) = \frac{1}{B} \int_0^B \frac{18}{\kappa^2 \pi^2} \frac{u_d}{u_*} (u_m - u_d) \frac{h}{r} dn$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{バーン工による} \\ \text{二次流供給量} \end{array} \right) = \frac{1}{B} \int_0^B f \frac{\beta \pi l_0 \sin \alpha}{4s} |u_s| u_b \frac{3h}{\kappa u_* \pi^2} \delta(n - n_i) dn$$

と表される。定義式(1)から分かるように、この比が

$$\gamma = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{バーン工による二次流供給量} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{遠心力による二次流供給量} \end{array} \right)}$$

である。遠心力による二次流とバーン工による二次流の差が外岸河床の洗掘深を決める。図-6と図-7を対照すると、この両者の二次流の差が小さい場合に洗掘深が小さくなっている。これは、列数の大小によって主流の流速分布が変化し、これに伴って遠心力に起因する二次流の大きさが変化するためである。この変化の主因である主流の鉛直分布の一樣化の度合いは、バーン工の列数が2~4列の場合に特に強い。

このような列数の違いによる主流の鉛直分布の一樣化の度合いの変化、すなわち遠心力による二次流の大きさの変化は、以下の理由で生じる。1列の場合には、縦断間隔が狭くなるため、(1)で示したようにバーン工から供給される二次流の総量は小さい。また、流れの一

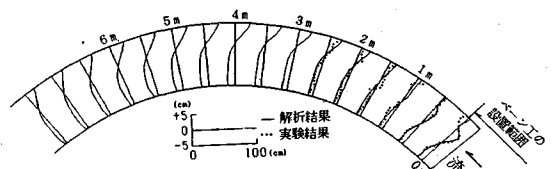


図-9 河床高分布 (下流部の曲率半径 $r_0=4.5$ m)

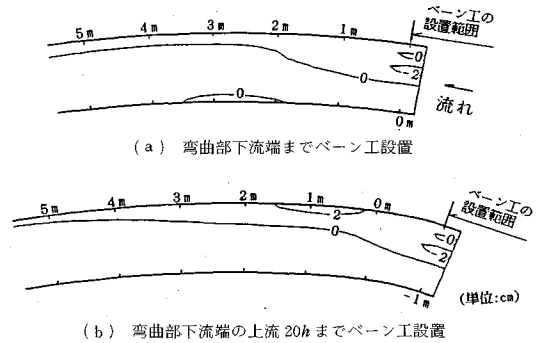


図-10 河床高分布 (下流部の曲率半径 $r_0/r=1/4$)

様化が生じる範囲も狭い。その結果、バーン工の効率が低くなる。一方、列数が増えると遠心力による二次流が大きくなる理由は二次流の横断分布から次の様に説明できる。図-8は、2列と5列の場合の底面近傍の二次流の横断分布を示す。これより、2列の場合には遠心力によるものとは逆向きの強い二次流が明瞭に形成され、5列の場合には水路半分の外岸側で二次流がほぼ0となっている。二次流による主流の鉛直分布の一樣化は、二次流の回転方向に関わらず、二次流が大きいかほど強く現れる。したがって、二次流の弱い5列配置よりも二次流の強い2列配置の方が主流の鉛直分布が一樣化され、遠心力による二次流も小さくなる。

以上(1),(2),(3)から次のことが結論される。 γ の値は0.4~0.5程度の大きさとし、バーン工群の設置中心は外岸から2~3割の位置とする。さらに、バーン工の列数は1列当たりの γ_i が0.15(4列)~0.25(2列)程度の値を保つ様に定める。この場合に遠心力によるものとは逆向きの二次流が縦断的に長い距離にわたって生成され、バーン工の機能が最も発揮されることになる。

(4) バーン工の設置区間

バーン工設置部終端の下流域が弯曲している場合には、外岸河床は再び洗掘を受ける。したがって、河道法線形状との関係でバーン工終端位置を決めることが重要である。河道弯曲部におけるバーン工設置終端から下流の流れと河床形状について考察し、下流の洗掘を小さくするバーン工の終端位置を検討する。

バーン工設置域では流れと河床形状は一樣弯曲流路の流れと河床形状で近似できる⁷⁾ことから、これを終端の

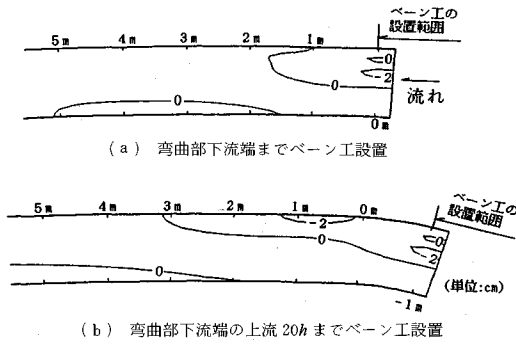


図-11 河床高分布 (下流部の曲率半径 $r_0/r=1/16$)

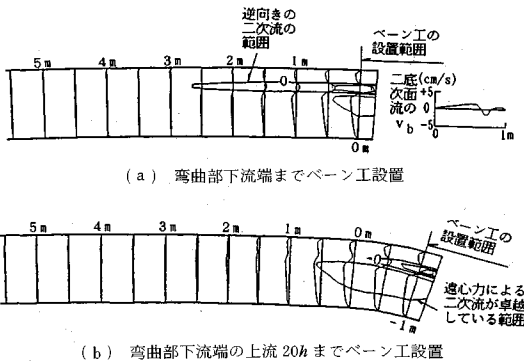


図-12 二次流分布 (下流部の曲率半径 $r_0/r=1/16$)

境界条件として与え、これより下流の流れと河床形状を求める⁸⁾。ベーン工を設置した弯曲部の下流の河道形状は、水路の曲率 r を弯曲部と同一の曲率 r_0 からほぼ直線の場合まで3通り ($r_0/r=1, 1/4, 1/16$) に変化させた。

図-9は、ベーン工の終端が弯曲部の途中にある場合の計算河床形状と実験値を示す⁸⁾。流下に従って外岸で再び洗掘が生じている。これは、流水が徐々に外岸に集中し、遠心力による二次流が再形成されるためである⁸⁾。

図-10, 11はベーン工の終端位置と下流部の曲率がそれぞれ異なる場合の河床高コンターを示す。ベーン工の設置域が上流の弯曲部内で終わり、設置域終端の下流が緩く弯曲している場合にはベーン工の設置域の下流で洗掘が生じている (図-10 (b))。さらに下流では河床は弯曲度に応じた洗掘形状に落ち着く。下流部がほぼ直線的であってもベーン工の設置域が上流の弯曲区間で終わる場合には、緩やかな弯曲の場合と同様に曲率の変化する箇所ですら洗掘が生じている (図-11 (b))。この洗掘深は、図-9に示されるベーン工が設置されていない場合に弯曲部で生じる洗掘深の約 $1/2$ である。下流部の曲率が上流部の弯曲の曲率と比べて小さい場合には、曲率の違いによって洗掘位置と洗掘深はほとんど変化していない。したがって、ベーン工の設置域を下流まで延ばさなければ、終端より下流で洗掘が生じる可能性が高い。

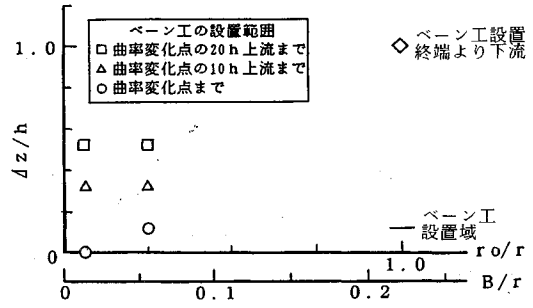


図-13 下流部の曲率とベーン工設置位置と洗掘深の関係

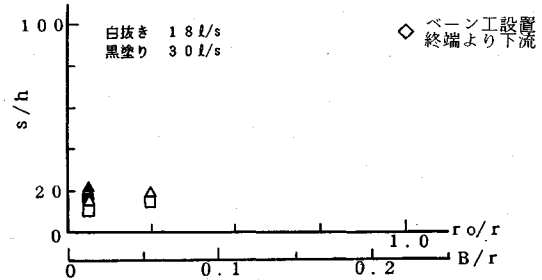


図-14 下流部の曲率、ベーン工の設置範囲と洗掘位置の関係

これは、終端下流の二次流分布から説明できる。図-12は、弯曲部の下流をほぼ直線とした場合の底面近傍の二次流の横断分布を示す。ベーン工設置位置が弯曲部終端の場合 (図-12 (a)) には、ベーン工によって作られた逆向きの二次流が、図-12 (b) の場合と比べて長い距離にわたって維持されている。この逆向きの二次流が外岸河床の洗掘を抑制するため、洗掘はほとんど生じていない。一方、ベーン工設置区間が弯曲区間で終わる場合には、弯曲区間で遠心力による二次流が再生され、ベーン工による二次流の影響が比較的短い流下距離で小さくなる。ベーン工による二次流が小さくなくても、弯曲区間より下流部では遠心力に起因する二次流もベーン工のない弯曲区間の二次流の $1/3 \sim 1/2$ の値に減少する。したがって、洗掘深は弯曲部で生じる値の $1/2$ 程度の大きさとなる。

下流部の曲率に対するベーン工の設置区間下流の外岸の洗掘深を図-13に示す。また、比較のためにベーン工設置区間の洗掘深とベーン工終端から下流での洗掘深も併せて示している。これより、ベーン工終端から下流域の洗掘深は、最大でもベーン工が設置されていない弯曲部の洗掘深の約 $1/2$ である。図-14に下流部の曲率、ベーン工の設置終端位置に対する弯曲下流端から洗掘部までの距離 s との関係を示す。前述の様に洗掘位置は下流部の曲率が $B/r < 0.1$ の場合にはほとんど変化していない。洗掘位置は流量によってもあまり変化していない。

以上のことから、ベーン工の設置域を十分下流まで延ばせない場合には、弯曲部の $1/2$ 程度の洗掘が設置域の

下流部で生じる可能性がある。この洗掘が再び始まる位置はベン工による二次流が減衰する距離で決まる。ベン工による二次流が減衰過程にある範囲では河床洗掘は小さい。この位置より下流の河道の曲率が $B/r < 0.1$ の場合には先に示した様に洗掘深は小さいため、簡単な根固め工で対策を行うことができる。これより曲率が大きい場合には、ベン工の設置区間の延長を行い、外岸河床の洗掘を小さくする必要がある。

3. ベン工の設計法

河道弯曲部に、ベン工を河道法線形状に対して適切に配置すると、ベン工による二次流によって比較的短い距離で平衡状態に近い流れ場が形成される。このとき、主流はベン工に沿って流れ、流れ場と河床の縦断的な変化が小さくなる。このため、一様弯曲流れを近似した流れと河床変動の解でこれらを表現できるようになる。したがって、ベン工の設計法は、これまでの実験結果及び解析結果に基づいて定めることができる。

(1) 設計条件

ベン工を設置した河道における洗掘深及び河床の横断形状を規定する主なパラメータは、2節で示したように二次流相殺率 γ 及び無次元設置位置 b/B である。外岸付近の洗掘深を軽減し、かつベン工の周りの局所洗掘が外岸に及ばないようにするためには、 γ 及び b/B に対して、次の条件が課せられる。

ベン工の横断設置範囲は、

$$b/B = 0.1 \sim 0.4 \dots\dots\dots (2)$$

とし、この範囲内に必要なベン工群が入る様にする。

$$\gamma = 0.4 \sim 0.5 \dots\dots\dots (3)$$

に選ぶ。この条件で、遠心力のものと逆向き二次流がベン工の周りで形成され、洗掘が効率よく軽減される。流れと河床形状に平坦河床のものを選び、 $\gamma = 0.35 \sim 0.4$ となるように設計すると平衡状態でこの条件は満たされる。また、個々のベン工が十分機能を発揮するように、千鳥状に配置し、所要の縦断間隔を確保すれば良い。

γ は、河道形状 (B, r)、水理条件 (ϕ, h_a) とベン工の構造 ($l, \sin\alpha, \beta, \Delta s$) に関係する。ここで、 ϕ : 流速係数、 h_a : 断面平均水深である。したがって、与えられる流量や水深に対して、 γ が上記の値となるように、ベン工の構造に関する値 $\beta, l, \sin\alpha, \Delta s$ 及び列数または設置数 N_b を決定する。

① 設計水深及び河道形状

ベン工に関する基礎実験から以下のことが明らかにされている^{1)~6)}。ベン工から放出される渦のスケールはベン工の長さに依存する。ベン工の長さが水深の1~2倍の場合に、ベン工による渦流が水深規模の二次流に効率よく変換され、河床の洗掘軽減に効果を発揮

する。したがって、ベン工の高さ、長さは設計水深に対して決められる^{1)~3), 5)}。

ベン工は、河床の土砂をベン工の周囲から外岸へ向けて移動させて外岸河床の洗掘を抑える。したがって、設計水深は土砂移動が生じる、すなわち掃流力が限界掃流力よりも大きい水深である必要がある。しかし、出水規模は極端に大きい必要はなく、むしろ頻度の高い方が良い。これを出水の確率年で表せば、低水路満杯程度の出水から (1/5~1/10) 確率年程度と考えられ、設計水深にはこれらの出水に対応する水深を用いる。

河道条件 (B, r) は、低水路の法線形から与えられる。これは、設計水深が低水路水深よりもそれほど大きくないので、流水はそのほとんどが低水路部を流れることによる。水理条件は、設計水深を定め、それより流速係数 ϕ を計算する。 ϕ は、対象とする断面平均水深 h_a に対応する低水路部分のマニングの粗度係数 n_m を用いて

$$\phi = h_a^{1/6} / n_m \sqrt{g} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。これを用いて、流速が求められる。

② ベン工の構造

迎え角 α は揚力が最大となり、外岸での洗掘深が小さくなる

$$\alpha = 20^\circ \dots\dots\dots (5)$$

とする^{2), 3)}。

ベン工の長さ l は、 B/h_a が大きい通常の場合については、Odgaard ら¹⁾ 及び橋本ら^{2), 3)} の実験結果より、与えられた断面平均水深 h_a に対して、

$$l = (1.0 \sim 2.0) h_a \dots\dots\dots (6)$$

とする。

ベン工の設計高さは、断面平均河床からのベン工の高さを H_i とすると、実験結果^{1)~3)} から

$$H_i = (1/4 \sim 1/3) h_a$$

とし、平水時にも水面に出ない高さに定める。

揚力補正係数 β には、一様流中に置かれた翼に関する理論解を用いる。すなわち、揚力線理論より、平均揚力補正係数 β_a は、ベン工の平均アスペクト比 A_v/H^2 を用いて、近似的に

$$\beta_a = 1 / (1 + A_v H^2) \dots\dots\dots (7)$$

で表す^{5), 7)}。アスペクト比が1.0~2.0では、 $\beta_a = 0.3 \sim 0.5$ である。ここで、 H はベン工の河床面からの高さであり、 A_v は河床より上のベン工の翼面積である。

③ ベン工の設置列数

水理条件から定まるベン工の構造諸元に対して、式(3)を満足し、ベン工が効率よく機能する縦断間隔 Δs 及び列数を定める。ここで、式(1)を川幅から水深スケールの式に書き直す。これは、ベン工周りの二次流の強さは水深スケールで決まるためである。これをベン工1列当たりの局所的な二次流相殺率 γ とする。

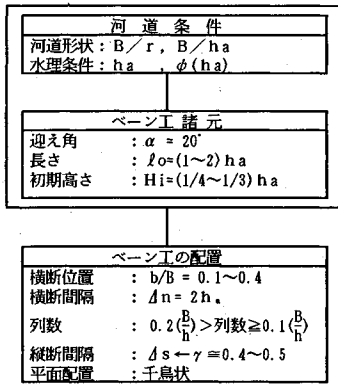


図-15 ベン工設計のフロー

$$\gamma \cong f_j \frac{(u_b|u_b)_j}{((u_m - u_d)u_d)_m} \frac{\kappa r (\beta \pi l_0 \sin \alpha)}{6h \Delta s} \dots (8)$$

べん工によって生成される二次流セルは水深の2倍程度の大きさを持つ。したがって、 γ を2で割った値が、遠心力による二次流の強さに対するべん工周りの逆向きの二次流の平均的な強さの比を表している。すなわち、 $\gamma=2$ は、べん工周りの二次流と遠心力による二次流が縦断的にほぼ打ち消し合うことを意味する。

γ は式(1),(3),(8)から

$$\gamma \cong (0.4 \sim 0.5) \left(\frac{B}{h}\right) / \text{列数} \dots (9)$$

となる。式(8)を構成する量それぞれの大きさは、通常の河道での水理条件及びべん工の設計諸元から

$$f_j \frac{(u_b|u_b)_j}{((u_m - u_d)u_d)_m} \cong 6 \sim 20 \dots (10.1)$$

$$\frac{\kappa r}{6h} \cong 5 \sim 10 \dots (10.2)$$

$$\left(\frac{\beta \pi l_0 \sin \alpha}{\Delta s}\right) \cong 0.06 \sim 0.02 \dots (10.3)$$

である。式(10.1)と式(10.2)の積の値が小さく、遠心力による二次流が強くなる場合には、べん工の縦断間隔を狭くするなどして式(10.3)の値が大きくなるように調整される。したがって、べん工の縦断間隔を必要以上に狭くとらず適切に選ぶならば、式(9)(10)より列数は

$$\text{列数} \geq (0.13 \sim 0.22) \left(\frac{B}{h}\right)$$

となる。

一方、2節の理論解析からべん工周りで逆向きの二次流を生成するには、1列当たりの γ は0.15以上であることが要求される。 $B/h \cong 20$ に対し、これを γ で表せば $\gamma > 3$ を意味する。この場合、式(1),(8)から

$$\text{列数} \leq \frac{\gamma}{3} \left(\frac{B}{h}\right)$$

となる。この関係式は、 γ が大きくなければ列数は多くは取れないことを示す。べん工を設置する範囲は最大

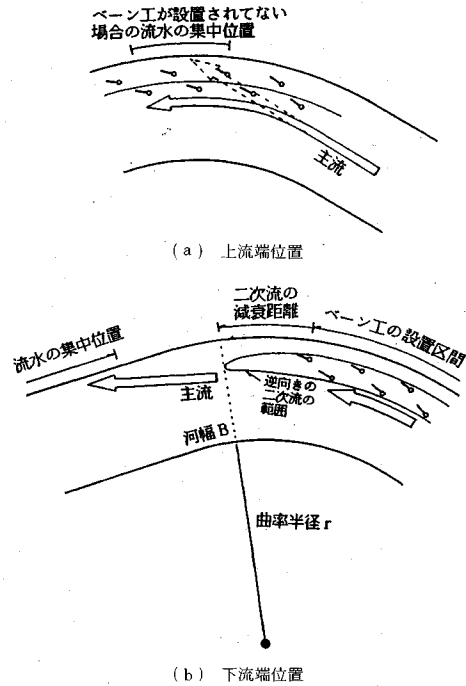


図-16 ベン工の設置範囲の概略決定法

で川幅の0.4倍までであること、べん工が創り出す流れ場が横断方向に干渉しない様に横断方向に水深の2倍離して設置することを考慮すると、列数は最大で

$$(\text{列数})_{\max} \cong \frac{0.4B}{2h} = 0.2 \left(\frac{B}{h}\right)$$

である。以上のことを総合的に判断すると、列数は概ね

$$0.2 \left(\frac{B}{h}\right) > \text{列数} \geq 0.1 \left(\frac{B}{h}\right) \dots (11)$$

となる。これは、例えば $B/h \cong 20$ では2列~4列となることを示し、2節の結果と一致している。式(11)から列数を決め、式(1)を満足するようにべん工の縦断間隔 Δs を求める。

以上より、べん工の設計は図-15に示すフローに従って行われる。

(2) 設置範囲

設置範囲は、基本的には彎曲部で河岸が洗掘されている範囲とする。しかし、べん工設置による河床の変化により、流れが変化することもある。したがって、その変化を予想し、上下流まで延ばす。まず、福岡らの準三次元解析法¹¹⁾などを用いて、低水路外岸での主流の加速領域を定める。これより、曲率が大きく二次流が強くなる範囲と主流速が速くなる範囲が得られる。彎曲、蛇行にかかわらず、通常、洗掘領域はこの2つの間の範囲に入るので、この範囲に河岸侵食対策工が必要とされる。

この場合、べん工の上流端位置と下流端位置の決め方に注意する必要がある。べん工を設置した場合には、

みお筋または主流線は河道中央部に形成される。したがって、洗掘を防ぐためには、主流がベン工設置位置よりも上流側から外岸側へ入り込まないように、主流線がベン工設置区間でベン工の内岸側に生じるみお筋とつながるように設置する必要がある。また、下流端位置は設置区間より下流で著しい洗掘が生じないように決める。下流で洗掘が生じるかどうかについては、先に2.で示した様にベン工下流端でベン工連続設置の場合の解を与えて、下流に向かって流れと河床形状を解いても求められる。しかし、多くの場合、ベン工による二次流の減衰距離を簡便法⁸⁾で求めて、ベン工終端位置及びそれより求めた二次流が減衰する位置の河道の曲率が十分小さいかどうかで判断が可能となる。遠心力による二次流は河道の曲率に対する位相のずれは、対象区間の曲率やその縦断変化が緩やかな場所では小さい。ベン工による二次流のためにベン工の周りで主流の鉛直分布がほぼ一樣になる程ベン工が機能している場合には、ベン工下流で二次流の効果がなくなる距離 L ⁸⁾は、

$$L < (0.8 \sim 1.6) \phi h + \Delta s / 2 \dots\dots\dots (12)$$

で与えられる。この L の範囲内においては外岸での河床洗掘は小さい。この位置より下流での洗掘深は、基本的には下流河道の曲率と河幅の比 B/r で決まる。この値が概ね0.1よりも大きい場合(図-13)にはベン工設置範囲を延伸するか、または洗掘が生じる場所から再びベン工を設置するなど断続配置方式の採用によって⁸⁾洗掘を防ぐことが必要になる。しかし、下流まで延ばせない場合には、洗掘予想範囲の外岸河床に根固め工などの洗掘対策を行う必要がある。

(3) ベン工を設置する河道の適用条件

ベン工は、河道弯曲部の様に河床変動が局所的な約合関係で決まる場合に適用すると効果的である。すなわち、遠心力による二次流が十分発達し、これによって局所洗掘が生じている様な場に適用することが望ましい。この場合に、ベン工による二次流セルが遠心力による二次流を分割した流れ場を形成するため⁷⁾、安定な河床形状を保つことができる。また、ベン工が機能を発揮するには水深が大きく、流れ場が安定している必要がある。したがって、洪水時に水深が浅く、流れが乱流する様な河道については適用は避けるべきである。

4. 熊本県黒川で施工されたベン工の調査結果と現地への適用性の検討

(1) 黒川ベン工

熊本県は、1988年3月～4月に白川水系黒川(15.10km～15.20km)において、ベン工の施工を行い、その効果について調査を行っている¹²⁾。黒川は、阿蘇山のカルデラの北の谷(阿蘇谷)を流れる河川である。この区間の堤間幅は30m～40m程度であり、河床材料は主

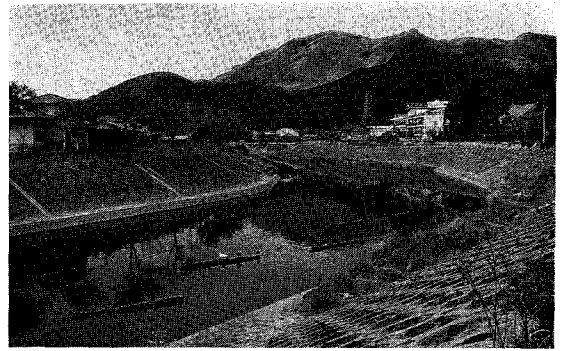


写真-1 現地施工区間の状況
(ベン工の最終形状は、水面上に出ている部分を切り落とし、平水時には水没している。)

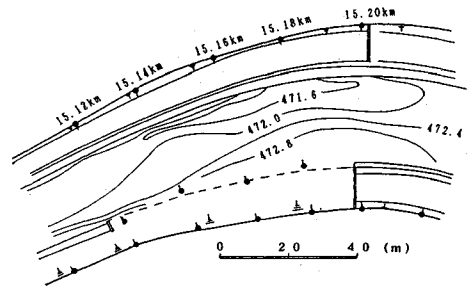


図-17 河床高コンター(昭和62年9月)

に火山灰である。粒径は d_{60} で約0.9mmであり、2～3cm程度の円礫が混入している。表層はかなり粗いものが多く、アーマー化が生じている。黒川のベン工施工区間の計画高水は、計画流量 $410 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水深6.4m(H.W.L.)であり、計画水面勾配は約1/700である。写真-1に施工区間周辺の河道を、図-17にベン工施工前の河床高コンターを示す。弯曲部の内岸に砂州が発達し、外岸では護岸の根入れ先端に達する程の洗掘が生じている。そこで、ベン工を用いて、河道弯曲部の外岸河床の洗掘を抑制し、護岸とベン工を一体とした河道の安全確保が試みられた。

図-18にベン工の配列、施工区間及び施工順序を設置後の河床高コンターと共に示す。ベン工は図-19に示す形状のものを用いた。ベン工の施工には周囲の景観を考慮し、自然となじむように松丸太杭を連ねて打ち込む方法が取られた。平均河床高からのベン工の突出高は、平水時水深に対応する1mとし、ベン工の長さは、平均河床位置で3mとなるように計画された。また、根入れ深は平均河床から約4mである。

ベン工は、昭和63年に図-18に示されるように、右岸から河幅の1/4程度の位置を中心として千鳥状に15m間隔で13基施工された。次いで平成元年に第二期工事が行われ、流れが弯曲部の入口からベン工内岸沿いのみお筋を流れるように上流に7基、下流にも4基増

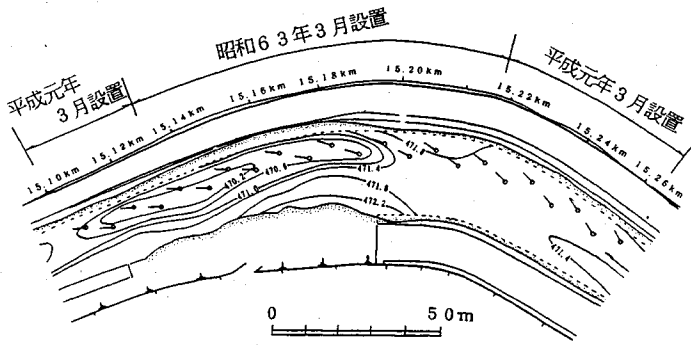


図-18 河床高コンター及びベーン工の配置状況 (平成元年7月)

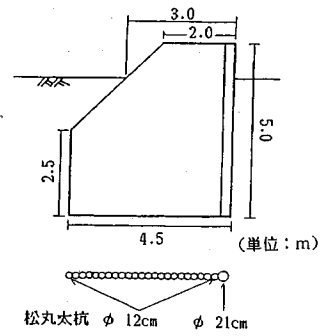


図-19 ベーン工の形状

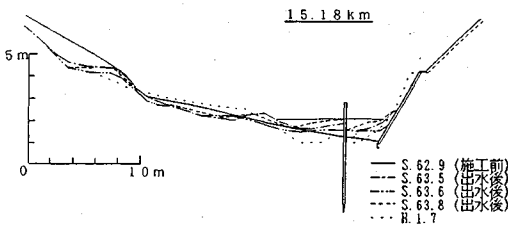


図-20 横断河床形状

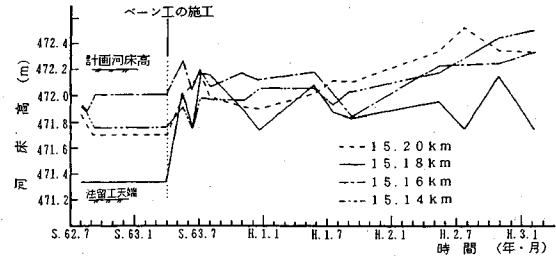


図-21 外岸河床高の時間変化

設されている。増設されたベーン工の諸元は第一期工事のものとはほぼ同じである。

黒川ベーン工のこれらの設計諸元は、3章で述べた設計法に基づいて定められた。河道の条件は、 $B=24\text{m}$ 、 $r=136\text{m}$ であり、設計水理条件は $\phi=10$ 、 $h_d=3.0\text{m}$ とした。流速係数は計画流量時の値を用い、設計水深は既往出水の実績を踏まえて計画高水位の水深よりも小さいものを選んだ。ベーン工の構造諸元を先に述べた様に、 $\alpha=20^\circ$ ($\sin\alpha=0.34$)、 $l=4.5\text{m}$ (水深の1.5倍)、 $\beta_a=0.43$ (ベーン工周りの洗掘深1.5mを仮定して $H=2.5\text{m}$)とした。列数は $B/h \cong 8$ より、1列となる。しかし、黒川は洪水時の流速が大きく、流路の曲率に対して水深が大きいため遠心力による二次流が大きくなり易いなど、洗掘を受け易い条件がそろっている。このことから、安全側として、列数=2と決め、千鳥状に配置した。これらの条件に対し、式(1)の γ が $\gamma \cong 0.4 \sim 0.5$ となるように縦断間隔 $\Delta s=15\text{m}$ が選ばれた。横断位置は、 $b/B \cong 0.2$ とした。ベーン工の設置幅を川幅の1/4にとると横断間隔は設計水深の1倍となる。3章では横断間隔は水深の2倍が望ましいことが述べられたが、この場合には B/h の値が小さいため、横断間隔は水深の1倍とし3mに決定した。

(2) 河床変動結果

図-17,18のベーン工設置前後の河床高コンターの比較により、ベーン工の施工によって内岸の砂州は著しく小さくなり、ベーン工の内岸側にみお筋が形成され、外

岸河床の洗掘が埋め戻されている様子が分かる。また、図-20に15.18kmにおける横断河床形状を示す。これより、外岸の河床高は平均河床高まで復し、外岸側の護岸の上に土砂が堆積している。一方、内岸側は河床高が低くなり、ベーン工が有効に働いていることが分かる。

図-21に各位置での外岸河床高(法留工土被り厚)の時間変化を示す。図-21より、ベーン工の設置により洗掘量の大きかった15.18kmで、急速に河床が平均河床に復しており、他の地点でも同様に外岸河床が復し、縦断的な変化が小さくなっている。このように、ベーン工の設置により護岸法留工の土被り厚が増大し、護岸の安全性が向上している。5~8月の出水期において河床は上昇し、それ以後は横這いか低下傾向にある。これは、ベーン工による外岸への土砂輸送が洪水時に活発に行われ低流量時には土砂輸送が減少するために徐々に土砂が流出していくためである。ベーン工は出水中に効果を最大に発揮する。したがって、平時時には河床形状は流量に応じた形へと変形する。しかし、変形速度は流砂量に依存するために小さく、ここで示した様に洪水時に河道中央部に形成されたみお筋はほとんど変動しない。

以上のことから、ベーン工が洗掘箇所の埋戻しや内岸河床高の低下等に、現地スケールにおいても有効であることが確認された。

(3) 解析結果との比較

現地における施工の調査結果を、理論解析の結果と比較し、設計法の妥当性、予測可能性について検討する。

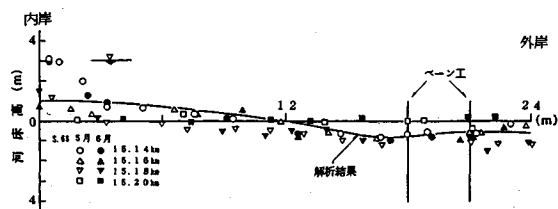


図-22 黒川ベン工の測量結果と解析結果の比較

計算に用いる水理条件は、各洪水に対する流量及び水位ハイドログラフのデータが得られていないので、洪水痕跡などを参考にして水深 3 m、水面勾配 1/800 と仮定して求めた。ただし、昭和 63 年 5 月洪水のピーク水位の痕跡は平均水深にして約 4 m である。計算では、初期河床を平坦河床として流量 120 m³/s を 16 時間にわたって通水し、河床形状の時間変化を求めた。河床には、顕著なアーミングが生じていることから解析では河床材料の代表粒径として、 $d_{90} \cong 0.4$ cm を用いた。

図-22 に計算結果を測量結果とともに示す。流量や水位など計算に用いた水理条件の精度にやや問題があるにもかかわらず、解析結果は河道の中央部のみお筋形成、外岸河床の洗掘軽減をうまく表現している。このように本解析法を用いることにより、ベン工を設置した現地河川の河床高を予測することは可能であり、本設計法が現地にも適用可能であると判断される。

5. 結 論

主要な結論を以下に記す。

- (1) 弯曲部におけるベン工の配置方法と外岸河床の洗掘深軽減量の関係を、二次流構造、ベン工の構造緒元との関係で明らかにした。これより、ベン工が河岸侵食対策工として効率よく機能する配置方法を見出した。
- (2) 上記の結果及び従来の実験結果を踏まえて、河道弯曲部に生じる外岸河床の洗掘、その結果として生じる河岸侵食を軽減するベン工の設計法を提案した。
- (3) 本設計法に基づいて施工された黒川における調査結果から、侵食対策工としてのベン工の有効性及び設計法の妥当性が確認された。

謝辞 黒川においてベン工の施工及び調査を実施された熊本県土木部河川課に感謝致します。本研究の一部は、平成 2, 3 年度文部省科学研究費補助金一般研究 B (研究代表者 東京工業大学工学部 福岡捷二) によって行われたもので、ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Odgaard, A. J. and Kennedy, J. F. : River-bend protection by Submerged Vanes, J. of Hyd. Div., Proc. of ASCE, Vol.109, HY 8, pp.1164~1173, 1983.
- 2) 橋本 宏・浅野富夫・坂野 章：アイオワ式ベン工の迎角に関する実験的検討，土木技術資料，Vol. 27, No. 8, pp. 32~37, 1985.
- 3) 橋本 宏・浅野富夫・坂野 章：アイオワ式ベン工の仰角と長さに関する実験的検討，第 29 回水理講演会論文集，pp. 603~608, 1985.
- 4) 阿部宗平・鈴木浩之：流路工弯曲部におけるベンの配置と形状に関する実験的考察，土木技術資料，Vol. 27, No. 2, pp. 9~14, 1985.
- 5) 福岡捷二・渡辺明英・黒川信敏：ベ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.
- 6) 福岡捷二・渡辺明英・萱場祐一：ベン工による河道弯曲部の埋め戻し過程，水工学論文集，Vol. 34, pp. 325~330, 1990.
- 7) 福岡捷二・渡辺明英：ベン工が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. 45~54, 1992.
- 8) 福岡捷二・渡辺明英・萱場祐一・曾田英揮：ベ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，土木学会論文集，No. 479/II-25, pp. 61~70, 1993.
- 9) Odgaard, A. J. and Mosconi, C. E., "Streambank Protection by Submerged Vanes", J. of Hyd. Eng., Proc. of ASCE, Vol.113, No.4, pp.520~536, 1987.
- 10) Odgaard, A. J. and Wang, Yalin : "Sediment Management with Submerged Vanes. I : Theory", J. of Hyd. Eng., Proc. of ASCE, Vol.117, 1991.
- 11) 福岡捷二・渡辺明英・西村達也：水刺工の配置法の研究，土木学会論文集，No. 443, 11-18, pp. 27~36, 1992.
- 12) 福岡捷二・渡辺明英・浜田精一：ベン工の現地施工と調査結果の解析，第 45 回年次学術講演会講演概要集第 2 部，pp. 24~25, 1990.

(1993. 7. 7 受付)

DESIGN METHOD OF VANE WORKS FOR PREVENTING BANK EROSION

Akihide WATANABE and Shoji FUKUOKA

To determine the layout method of vane works for preventing bank erosion in bend river, secondary currents and bed profiles in the stream where vanes are installed in various layout are investigated. Based on experimental and analytical results, vane design method is proposed. It is shown that vanes works are useful through the field execution and layout method presented here is appropriate.