

土 木 研 究 所 資 料

ベーン工の洗掘軽減効果と設計法に 関 する 研 究

昭和63年4月

建設省土木研究所
河川部河川研究室

Copyright © (1988) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ベーン工の洗掘軽減効果と設計法に 関する研究

河川研究室 室長 福岡 捷 二
渡 辺 明 英
黒 川 信 俊

要 旨

本資料は、河道湾曲部における外岸側の河床の洗掘と内岸側での土砂の堆積を軽減する河床変動対策として、ベーン工法を取り上げ、従来のものとは異なる土研型ベーン工の開発を行い、その配置法と設置後の河床形状の変化特性について定量的な考察を理論的及び実験的に行い、この結果を用いた設計法についての検討結果を述べたものである。

キーワード：ベーン工，湾曲部，河床変動，局所洗掘，二次流，河岸侵食

ま え が き

ベーン工は、河道湾曲部において、翼板状の構造物を流れに対して外岸に向けて河床に設置し、ベーン工内岸の堆積土砂をベーン工外岸に輸送することによって、河道湾曲部に生じる外岸付近の河床の洗掘と内岸付近の土砂の堆積を軽減する新しい局所洗掘対策工である。

また、ベーン工を適切に設置すれば、ベーン工は河床横断形状を変形することによって、主流の流れ場をも変え、主流を外岸から引き離しベーン工の内岸側に移動させ、外岸沿いの流速を軽減することができ、河岸侵食対策としての機能を併せ持っていることが、本研究によって示されている。

ベーン工は、板を河床に垂直に設置するボトム・パネル^{*}と呼ばれたものの応用技術の一つとして位置づけることができる。これは、洪水時の水深の1/3位の高さの板を流れに対して角度をもたせて、連として河床に設置し、これにより“二次流を発生させて河床材料の移動方向を制御する”ものである。これについては、古くは19世紀の終わり頃から研究が行われており、このボトム・パネルを設置することにより、流れに対する仰角が小さい場合には河床の洗掘（みお筋の形成）を、逆に大きい場合には土砂の堆積（砂州の形成）を行えることが実験的に示されていた。1950年代になって、この洗掘と堆積を生じさせるという特性を利用し、航路の形成や維持、または派州の閉塞や流路の安定に用いるための研究や現地試験が行われたが、この時点においては、二次流による斜面上での土砂移動に関する定量的な関係が得られておらず、定性的な関係が示されたのみで、まだ経験によるところが多く設計法は確立されなかった。1980年代初めになって、ようやく Odgaard らが、河道の湾曲部において流体に作用する回転力を、河床に板を流れに対し外岸に向けて設置することによって生じる回転力で相殺し、“洗掘の原因となる二次流の発生を抑制する”という理論を提唱し、ベーンという言葉が使われた。ただし、この理論では、ベーン工の仰角や長さに対して湾曲部で必要とされるベーン工の設置数が得られるだけで、ベーン工の配置法やベーン工設置時の横断河床形状についてまで言及してはいない。しかし、ベーン工を局所洗掘対策工として設計する際には、ベーン工設置時の横断河床形状、特に湾曲部外岸付近の河床高、すなわち、ベーン工による洗掘軽減効果を定量的に把握し、そして予測することが重要になる。本資料は、局所洗掘及び河岸侵食対策工としてのこのベーン工法について、ベーン工の構造及び配置諸元とその洗掘抑制効果に関する検討結果をまとめたものである。

本研究では、種々の形状と配置を持つベーン工を湾曲流路に設置して、河床変動の抑制効果について実験的に調べ、従来のものよりも効率的に機能するベーン工を開発し、その設置数と配置法について検討を行った。また本研究では、“湾曲部外岸付近に設置されたベーン工により発生させられた二次流によって、内岸の堆積土砂が外岸に輸送されて、洗掘が軽減される”という考え方に基づいた解析手法を用いて、ベーン工諸元と洗掘抑制効果の関係を定量的に評価した。最後にこれらの結果を用いて、従来のものとは異なる河床形状に着目したベーン工の設計法について考察を行い、本資料に示した。

なお、本研究は海外技術共同研究経費「低平地河川の改修工法に関する研究」の一環として行われたものである。

^{*} 例えば Chabert, J. of Waterway and Harbors Div., Proc. of ASCE, vol. 91, 1965
Remillieux, J. of Waterway, Harbors and Coastal Eng. Div., Proc. of ASCE, vol. 98, 1972

目 次

まえがき

1. ベーン工法の概要	1
1.1 ベーン工法の概要	1
1.2. ベーン工の働き	1
1.2.1 ベーン工による渦流発生原理	1
1.2.2 ベーン工による洗掘抑制の原理	3
(1) 一様湾曲流路における外岸の洗掘	3
(2) ベーン工による洗掘抑制作用	4
1.3 従来の研究	5
2. 横断河床形状の予測手法	7
2.1 理論的考察	7
2.1.1 河床形状予測式	7
2.1.2 二次流分布予測式	8
2.2 実験値との比較	11
3. 湾曲流路におけるベーン工に関する実験	13
3.1 概 要	13
3.2 実験結果及び考察	15
3.2.1 ベーン工の形状・形式に関する実験	15
(1) ケース1（ベーン工なし）	16
(2) ケース2（アイオワ式ベーン工）	20
(3) ケース3（台形型ベーン工）	24
(4) ケース4（円柱付台形型ベーン工）	28
3.2.2 ベーン工の設置数と配置に関する実験	32
(1) ケース5（1列30基）	32
(2) ケース6（2列30基）	36
(3) ケース7（30基を千鳥型に配置）	40
3.2.3 実際の施工に関して考慮すべき事項	44
(1) ケース8（湾曲部末端に生じる洗掘の対策）	44
(2) ケース9（埋め戻し効果の検討）	51

3.3	ベーン工の水理機能に関する検討	54
3.3.1	ベーン工の形状・形式に関する検討	54
3.3.2	ベーン工の設置数と配置に関する検討	58
3.3.3	実際の施工に関して考慮すべき事項	62
3.4	ま と め	64
4.	ベーン工の設計法に関する考察	65
4.1	水理設計法の考え方	65
4.2	ベーン工諸元の与え方	65
4.3	土研式ベーン工の根入れ深さについて	68
4.3.1	転倒に対する安定条件	68
4.3.2	根入れ深さの決定例	70
5.	結 論	72
	あ と が き	73
	謝 辞	73
	参 考 文 献	74
	Appendix	76

1. ベーン工法の概要

1.1 研究の目的

河川の湾曲部では遠心力により生じた二次流と流水の集中と発散によって、外岸付近では河床の洗掘が、内岸では堆積が生じる。この外岸付近での河床の洗掘は、河岸付近の流速を増大させ、河岸侵食を引き起こす。また、この河岸付近の洗掘は、護岸の根入れが十分でない所では、護岸の崩壊を生じさせる。これを回避するため、従来より護岸工・根固工・水制工等により洗掘防止対策が実行されてきた。これらの対策工は、河岸付近の主流および二次流を弱め、また洗掘位置を根固め・水制の前面に移行させることにより、河岸を侵食から守るものである。これに対し、湾曲部の二次流そのものを積極的に抑制し、河床の洗掘と河岸の侵食を軽減する工法にベーン工法がある。ベーン工には、アイオワ式¹⁾²⁾³⁾⁴⁾に代表される水中に没するベーン工（水没式）と、阿部ら⁵⁾⁶⁾の水面から頭を出すベーン工（突出式）がある。水没式ベーン工は流れに対して外岸を向いており主に底面付近の流体に作用し、突出式ベーン工ではこれとは逆に内岸を向いており主に水面付近の流体に作用するという特徴がある。なお、本資料では水没式ベーン工（以下ベーン工と略す）について述べる。このベーン工の設計法については、アイオワ式ベーン工に関する Odgaard らの理論¹⁾²⁾³⁾⁴⁾がある。この理論では1湾曲あたりに設置するベーン工の数が定まるだけであり、ベーン工の平面配置やベーン工設置後の河床形状については詳しく論じられていない。しかし、ベーン工設置の最終目的は、局所洗掘及び河岸侵食の対策にあり、ベーン工の設計に際してはベーン工の構造だけを定めれば良いのではなく、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。

本研究の目的は、以下の3点である。

- 1) 従来のものよりも効率的に機能するベーン工（土研型ベーン工）の開発を行う。
- 2) 湾曲流路に種々の配置でベーン工を設置したときの横断河床形状（外岸の河床高）を理論的に解析し、これについて実験的に検討を行う。
- 3) この結果を用いてベーン工の合理的な設計法を提案する。

1.2 ベーン工の働き

ベーン工は、湾曲部外岸の河床の洗掘を抑制する流れ方向に軸を持つ渦流を発生させるために設けられるものである。ここではまず、ベーン工のその基礎となる渦流の発生の原理を簡単に述べ、次に、この渦流による洗掘抑制作用の原理について述べる。

1.2.1 ベーン工による渦流の発生の原理

今、図1.2.1に示すように、ベーン工が一様流中にある角度をもって設置されているとする。このように翼板状の物が流れに対し、迎え角を持って存在すると、この翼板には F という大きさの揚力がかかる。これは以下の理由によって説明される。図1.2.1、2に示されるように、翼板の上側では流線が集中し流速が

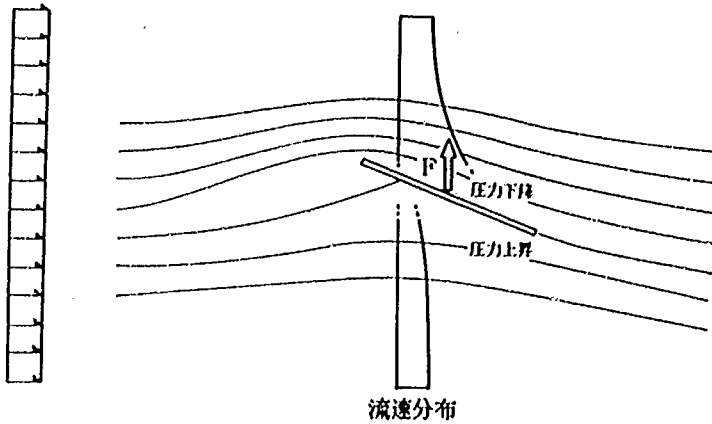


図 1.2.1 翼のまわりの流れの状況

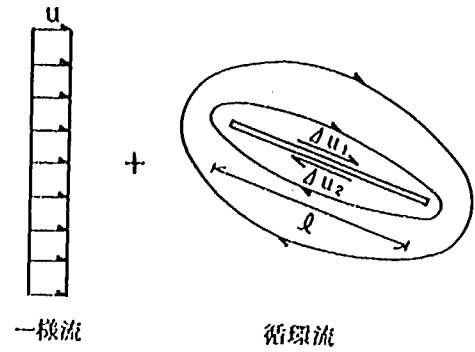


図 1.2.2 翼のまわりに生じる流れ

Δu_1 速くなり、このためエネルギー保存則に従い圧力が $\rho(2u + \Delta u_1)\Delta u_1/2$ 低下する。また、下側ではこれとは逆に流速が Δu_2 遅くなり、圧力が $\rho(2u - \Delta u_2)\Delta u_2/2$ 上昇する。その結果、この上下面に生じた圧力差 $\rho u(\Delta u_1 + \Delta u_2)$ によって上向きの力

$$F = \rho u(\Delta u_1 + \Delta u_2)l, \quad l: \text{翼板の弦の長さ} \quad (1.1)$$

が生じる。また、このように翼板の上下面で流速差を生じているということは、翼板の周りで、

$$\Gamma = \oint u \cdot ds = (\Delta u_1 + \Delta u_2)l \quad (1.2)$$

で表される循環（流れの回転を表す量）が生じていることを示しており、式(1.1)、(1.2)より、この揚力の強さは、この循環を用いて

$$F = \rho u \Gamma \quad (1.3)$$

と表せることがわかる。

翼板が紙面方向に無限に続き、流れが平面二次元であるならば、この力 F は紙面に対して垂直方向には変化しない。しかし、ベーン工は十分水没したときに効果を発揮するものであり、図 1.2.3 に示されるように、その高さは水面よりも低く、有限で端をもつことから、流れはベーン工の周りで三次元的に変化する。すなわち、ベーン工の上端では、流体の圧力と流速が左右で連続しなければならないことから、ベーン工の左右で生じていた流速差と圧力差すなわち揚力（上向きの循環）はそこで 0 となる。また、この圧力及び流速もベーン工の左右においてそれぞれ鉛直方向に連続しなければならないので、圧力分布は図 1.2.3 のようになる。また、 z 軸を鉛直上向きに取り、鉛直流速 w について運動方程式を表し、主要項のみを残すと

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \epsilon \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (1.4)$$

となり、右辺第1, 2項による力は図1.2.4に示されるようになる。したがって、ベーン工の左側では上向き、右側では下向きの力が生じ、この力とつりあうように流体は加速される。その結果、流体はベーン工の左で上向きに、右側では下向きに流れるようになり、この流れが、ベーン工の下流端において図1.2.5に示されるような流れ方向に軸を持つ渦流を形成する。またこれは、ベーン工の底面近傍でベーン工の周りで存在していた鉛直上向きの循環（渦運動）がベーン工の上端では存在できなくなるため、これが渦の保存則に従って存続するために流れ方向に軸の向きを変えて放出されていることに対応する。

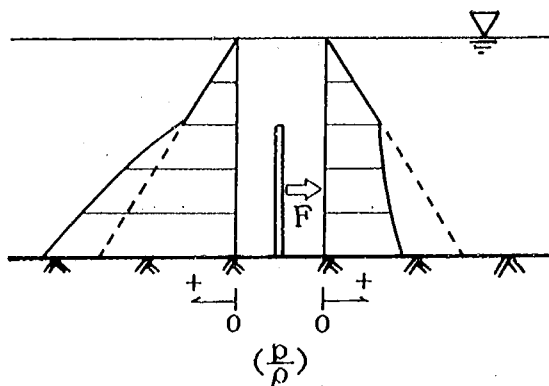


図 1.2.3 ベーン工にかかる圧力分布

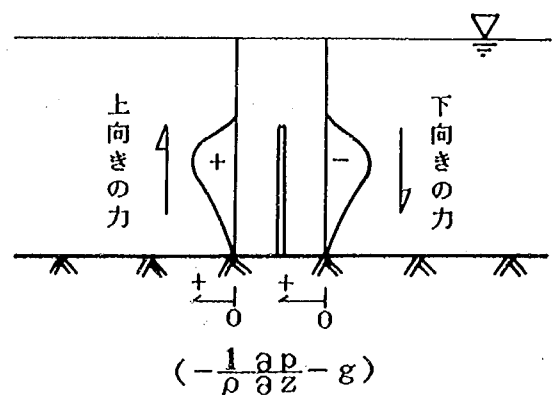


図 1.2.4 ベーン工により流体に作用する力

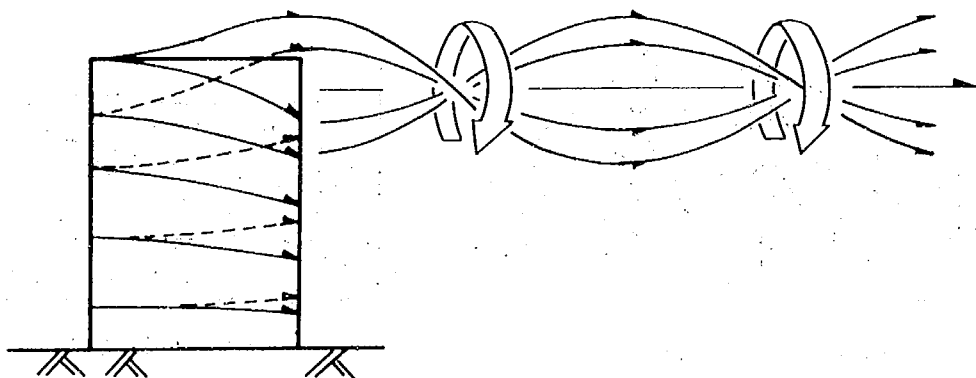


図 1.2.5 ベーン工から放出される渦流

1.2.2 ベーン工による洗掘抑制の原理

(1) 一様湾曲流路における外岸の洗掘

湾曲部では $\rho u^2/r$ で表される遠心力が外岸向きに流体に働く。流速は、表面付近が速く、底面付近では遅い。したがって、この遠心力は図1.2.6(a)のように表面付近が大きく、底面付近が小さくなる。また、断面全体にかかる遠心力とつりあうために、外岸側の水位が上昇し横断方向に水面勾配が生じる。この横断水面勾配に起因する圧力勾配による力と遠心力を重ね合わせると図1.2.6(a)のようになり、この力によ

って、流体は表面付近では外岸方向に加速され底面付近では内岸方向に加速される。その結果として、主流のほかに図 1. 2. 7 (a) に示すような横断面内で二次的な流れ（二次流）が形成される。³⁾

この二次流のために底面付近の流体は内岸へ向うため、土砂もこの流れによって外岸から内岸に運ばれる。その結果、外岸に洗掘が、内岸に堆積が生じる。

(2) ベーン工による洗掘抑制作用

湾曲部外岸で洗掘が生じているところへ、図 1. 2. 7 (b) のようにベーン工を設置する。ベーン工は流れに対してある角度をもって設置されるために、飛行機の翼と同様に図 1. 2. 6 (b) のように揚力（ベーン工を内岸に押そうとする力）を受ける。また、流体はその反作用として揚力と同じ大きさの力を逆向きに、すなわちベーン工の周りで外岸向きに力を受ける。そのため流体は、先に示した理由によって、遠心力による二次流と逆向きの二次流を発生させる。ただし、ベーン工によって流体に加えられる力はそれほど遠くまで及ばず、ベーン工の周囲に限定されることから、ベーン工による二次流もベーン工の周りで強い。この二次流は遠心力による二次流と回転の向きが反対となるため、遠心力による二次流によって生じる河岸付近の河床の洗掘深は軽減される。このようにベーン工は、ベーン工に加わる流体の力を積極的に利用し、ベーン工内側の土砂を外岸方向に輸送することによって、遠心力による二次流によって生じる洗掘を軽減する。さらに、ベーン工の配置を工夫し、横断河床形状を変えることによって、二次流のみならず主流の流速場をも変形し、河岸付近よりも河道中央の流速を増大させ、一層効果的に河岸侵食を軽減させることも可能である。これについては 3. 3. 2 節で詳述する。

水制工とベーン工の流れ場（河幅一定）及び河床形状に対する関係を関連図に表せば、図 1. 2. 8 のようになる。

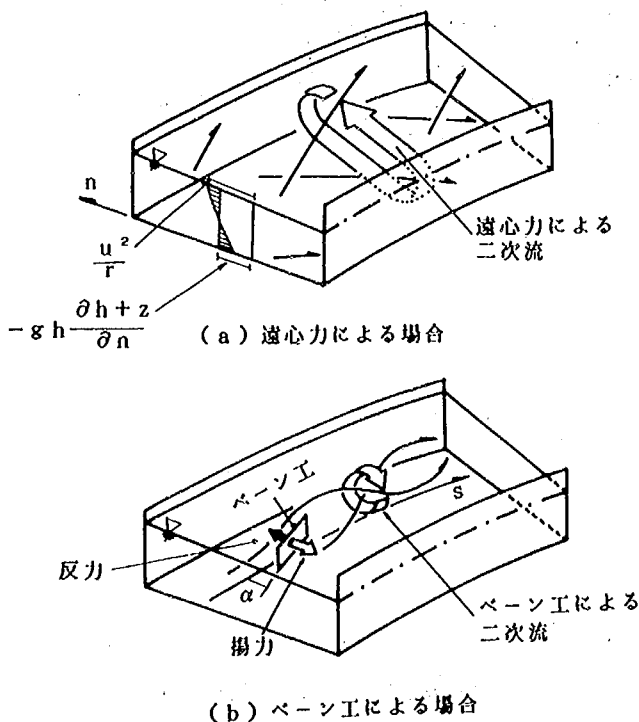


図 1. 2. 6 二次流の形成

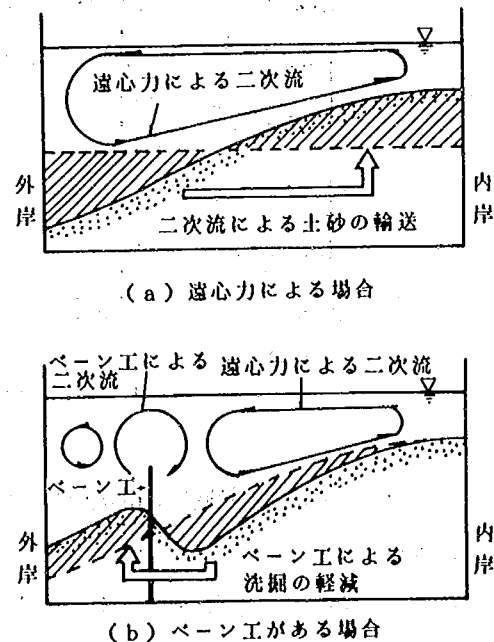


図 1. 2. 7 河床形状の変化

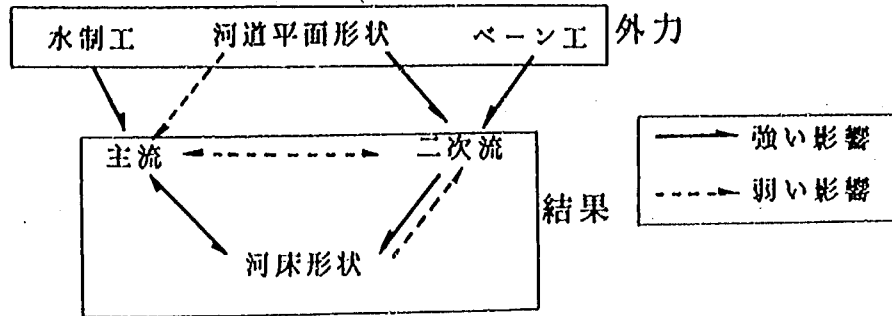


図 1.2.8 流れ場と河床形状の関連（河道形状が固定されている場合）

水制工が直接主流に対して干渉し、河床形状を制御するのに対し、ベーン工は二次流を制御することによって河床形状を変形させ、それとつりあうように主流の流れ場を変形させる。

1.3 従来の研究

理論的研究としては Odgaard ら^{1) 2) 3) 4)}のものがある。これは湾曲部におけるベーン工の設置基数に関する理論である。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

$$T_f = \frac{1}{2} \frac{n+1}{n(n+2)} \rho B U^2 h_a^2 \phi$$

U ：断面平均流速， B ：流路幅， h_a ：断面平均水深， n ：流速分布を表す係数（ $n = 5 \sim 15$ ）

ϕ ：湾曲角

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

$$T_v = \frac{1}{2} \pi \beta \rho \sin \alpha H l N U^2 \left(\frac{H}{h_a} \right)^{2/n} (h_a - H)$$

H ：ベーン工の高さ， l ：ベーン工の長さ， N ：ベーン工の数， α ：仰角，

β ：揚力係数の補正值

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いる。すなわち、

$$\frac{n(n+2)}{n+1} \frac{\beta \pi l \sin \alpha N}{B \phi} \left(\frac{H}{h_a} \right)^{(n+2)/n} \left(1 - \frac{H}{h_a} \right) = 1$$

となるようにベーン工の設置基数を決めるとしている。

実験的研究としては土木研究所で行われた水没式ベーン工に関する浅野らの研究^{8) 9) 10)}と突出式ベーンに関する阿部らの研究^{5) 6)}がある。

浅野らにより以下のことが報告されている。

1. 1) ベーン工の仰角 α が増すとともにベーン工の効果は増大し、 $\alpha = 15^\circ \sim 20^\circ$ において著しい効果が得られる。
1. 2) ベーン工の長さ l は、水深 h_a に対して $0.5 h_a \leq l \leq 2 h_a$ のとき、ベーン工を1列に配置した場合、1湾曲あたりの Σl が同じならば河床形状に大きな違いがみられないが、水深程度が効果的である。
1. 3) 設置位置が外岸から離れるにつれて、外岸の河床は低下する。しかし、ベーン工周辺の洗掘は軽減される。
1. 4) 横断的な河床変動の減少、ベーン周辺の局所洗掘軽減のためには複列として配置した方がよい。
1. 5) ベーン工の設置による平均水深、平均河床高の変化は少なく、疎通能力に対する影響は無視できる。

また阿部らにより以下のことが報告されている。

2. 1) ベーン工を密に設置するほど外岸の洗掘は軽減されるが、ベーン工周辺の洗掘は大きくなる。
2. 2) ベーン工の長さ l が $1 h \leq l \leq 2 h$ のとき、1湾曲あたりの Σl が同じならば1基当りの l の違いによる効果の違いはあまりない。
2. 3) ベーン工の高さ H は、仰角 $\alpha = 0^\circ$ のときは、 $H = 0.6 h$ 以上に大きくしても効果は増さない。
2. 4) また、ベーン工の高さ H が、 $H \geq h$ の(ベーン工が水面から突出する)ときは、 $\alpha = -10^\circ \sim -15^\circ$ (内岸向き)とするのが最も効果的である。

このように従来の研究においては、理論的研究ではベーン工の数に対する定量的な考察がされているが、河床形状については言及しておらず、また実験的研究では河床形状を求めているが、定量的な関係について理論的な考察がなされていない。

そこで本調査においては、ベーン工の設計法に資するために、ベーン工設置時の河床形状とベーン工の構造及び配置諸元との定量的な関係を明らかにすることに重点をおいた。

2. 横断河床形状の予測手法

本章では、ベーン工を設置した時の河床形状の予測手法を提案し、それについて検討を行う。一様湾曲流路におけるベーン工設置時の平均的な横断河床形状の算定法は文献 11) 12) に詳述されている。ここでは簡潔にその内容についてのみ述べる。式の展開については Appendix に示した。

2.1 理論的考察

2.1.1 河床形状予測式

ここでは比較的簡単に解の得られる一様湾曲河道における動的平衡状態の横断河床形状について求める。

流砂形態が掃流砂の場合、一様湾曲流路での平衡状態の河床形状は横断方向流砂量が 0 となる条件から求められる。従来研究より⁷⁾、一般に斜面上の砂粒子にかかる力のつりあいから(図 2.1.1 に示す河床横断勾配による重力の横断方向成分と二次流による抗力の横断方向成分のつりあい)

$$\frac{\partial z_b}{\partial n} = \mu_s \left(\frac{\mu_k}{\mu_s} \right)^m \left(\frac{u_*}{u_{*c}} \right)^{2-m} \frac{v_b}{u_b} \quad (2.1)$$

u_* : 摩擦速度, u_{*c} : 限界摩擦速度, z_b : 河床高, μ_s : 静止摩擦係数,

μ_k : 動摩擦係数, u_b : 底面近傍の主流速, v_b : 底面近傍の二次流速

と表せる。式(2.1)を用いるにあたって、掃流力が限界掃流力に近く、砂粒子の移動速度が底面流速に比べて遅く($u_{bs}/u_b \cong 0$) 流体の運動方向に抗力がかかるとする場合は $m=0$ とし^{13) 14)}、逆に掃流力が限界掃流力に比べてかなり大きく、砂粒子の移動速度が速く($0 < u_{bs}/u_b < 1$) 砂粒子と流体の相対速度ベクトルの向き(入の向き)に力がかかるとする場合には $m=1$ とする^{15) 16)}。ここでは、流れの状態が限界掃流力状態に近い場合を想定して、 $m=0$ を用いることにする。式(2.1)より、横断河床形状を求めるには、ベ

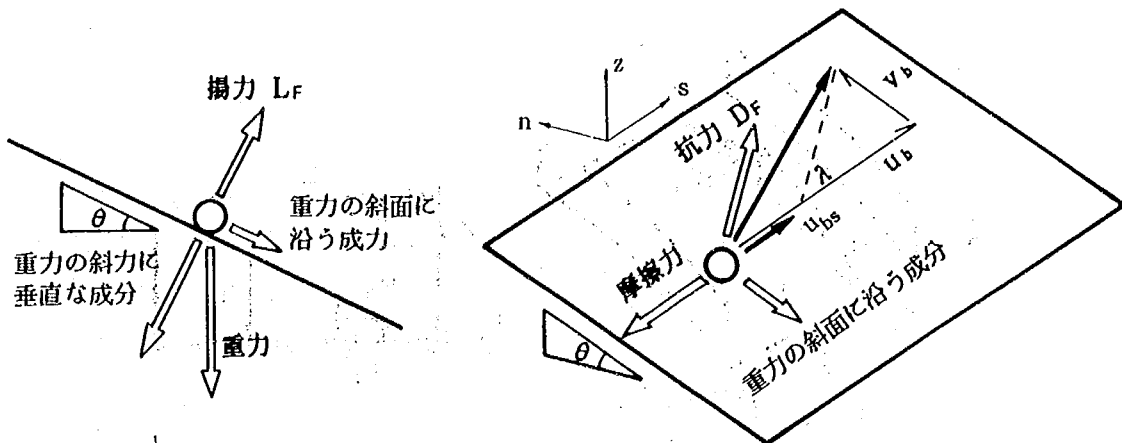


図 2.1.1 斜面上の砂粒子にかかる力のつりあい

ーン工設置時の底面流向を表す 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必要がある。この式は, 遠心力による二次流すなわち湾曲の曲率が大きいほど, また河床に働くせん断力すなわち水深と勾配または流速が大きいほど外岸の河床が洗掘されることを示している。

2.1.2 二次流分布予測式

湾曲部にベーン工が設置された場合の流れ場を, ベーン工によって流体に加えられる力を運動方程式に外力項として加えることで表す。運動方程式を過度方程式に変換して簡略化を行うと^{17) 18)}

$$u \frac{\partial \omega}{\partial s} - \frac{1}{r} \frac{\partial u^2}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_n}{\partial z} \delta(s-s_i) \delta(n-n_j) + \varepsilon \nabla^2 \omega \quad (2.2)$$

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

u, v, w : s, n, z 方向の流速

ε : 拡散係数, (s_i, n_j) : ベーン工の設置位置, δ : デルタ関数

を得る。記号は図 2.1.2 に示されている。ここで, F_n はベーン工に生ずる揚力の反力としてベーン工によって流体に加えられる力である。 $F_n = 0$ であれば池田らの導いた式¹⁸⁾に一致する。式(2.2)を解けばベーン工設置時の二次流分布は得られるが, これは3次元の式であり, このままでは一般的に簡潔には解は得にくい。実験によれば, ベーン工の設置により, 河床形状の縦断的な変化は横断的な変化に対し小さくなり, またこれと対応して流速の縦断的な変化も抑制されることが分かっている。そこで, 流下方向には解かず, 横断分布のみを解くことにする。すなわち, 二次流の横断分布のみを簡単に求めるために式(2.2)をさらに横断方向1次元の式に簡略化する。本手法では, 過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, 鉛直方向に積分し流下方向に渦度方程式の平均化操作を行う。それより底面流速 v_b の横断分布を解く。

二次流の鉛直分布形状を底面横断流速 v_b を用いて最も簡潔に

$$v = -v_b \cdot \cos(\pi z/h) \quad (2.3)$$

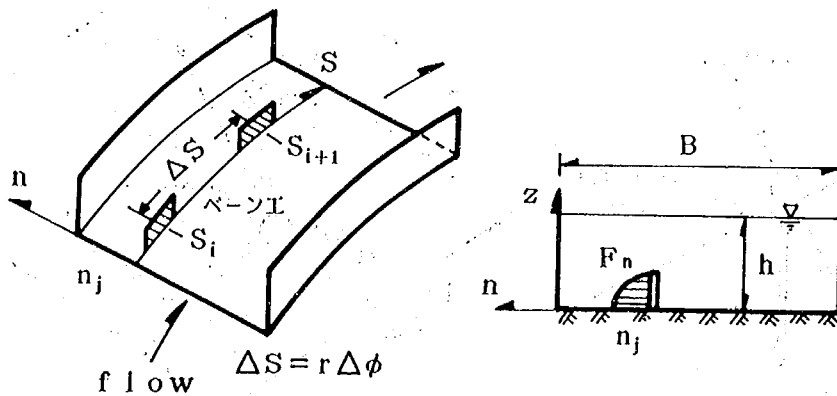


図 2.1.2 座標系及び記号の説明

で表す。これは式(2.2)に対する ω の鉛直方向の固有関数 $\sin(n\pi z/h)$ の一次モードに対応する解を表す。(矩形領域四辺単純支持に対するラプラスの式の固有関数は $\exp(-kn) \cdot \sin(kz)$)

式(2.2)を流下方向に平均化操作して、渦度の式

$$\omega \cong \partial v / \partial z = v_b \pi / h \sin(\pi z / h)$$

を代入し、鉛直方向に積分すると、ベーン工が十分に水没して、ベーン工上端で水面の影響を受けない場合には次式

$$-2\varepsilon \left[\frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} - \left(\frac{\pi}{h} \right)^2 v_b \right] = \frac{1}{r} (u_s^2 - u_b^2) - f_j \frac{F_o \delta(n - n_j)}{\rho \Delta s} \quad (2.4)$$

を得る。これ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し、第二項がベーン工による遠心力によるものとは逆向きの二次流の生成を表しており $F_o / \Delta s$ の値が大きいほどこの二次流は強くなる。すなわち、湾曲によって生じる洗掘が抑制される。ただし、式(2.4)では水深の1階及び2階の横断方向微分に関する項を大部分の場所では他の項に比べて小さいとして省略してある。ここで F_o は底面近傍においてベーン工にかかる揚力の反力であり、これは一般にクッタ・ジュークフスキーの理論より¹⁰⁾

$$F / \rho = u \Gamma = c_L l u^2 / 2$$

l : ベーン工の長さ

で表せる。薄翼の理論より揚力係数 c_L はベーン工のアスペクト比(縦横比)の関係である補正係数 β を用いて、一般に

$$c_L = \beta 2\pi \sin \alpha$$

α : ベーン工の仰角

と表せるので、 F_o は

$$F_o / \rho = \beta_o \pi l_o \sin \alpha u_b^2 \quad (\text{添字 } o \text{ は底面近傍の値を示す。})$$

となる。また、式(2.4)における各変数については次の様に与える。

$$u_s = (\phi + 1/\kappa) u_*, \quad u_b = (\phi - 2/\kappa) u_*, \quad \varepsilon = \kappa u_* h / 6, \quad \kappa : \text{カルマン定数}(0.5)^{20)}$$

$$u_* = \sqrt{g h I}$$

$$\phi = u_a / \sqrt{g h_a I}, \quad h_a = (\int h dn) / B$$

$$u_a = Q / A, \quad Q : \text{流量}, \quad A : \text{断面積}$$

$$I = -\partial(z+h)/\partial s, \quad I = \text{水面勾配}$$

$$f_j : \text{流下方向の変化を簡略化したことに伴って現れる補正係数}(f \div 1)$$

ここで、 ϕ は横断的には一定値で与え、流速の横断分布は $u = \phi u_*$ として与える。すなわち、局所的な流速に対しては、二次流による運動量の輸送よりも河床高（水深）による影響の方が大きいとして、一様湾曲流路での浅水流方程式の解を与え、図 2.1.3 に示すように流速は $\sqrt{h}$ に比例すると仮定している。これらを式 (2.4) に代入すると、

$$v_b - \left(\frac{h}{\pi}\right)^2 \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} = \frac{1}{2} \left[\frac{36}{\kappa^2 \pi^2} \left(\phi - \frac{1}{2\kappa}\right) \frac{h}{r} - f_j \frac{6\kappa \beta_0 l_0 \pi \sin \alpha (\phi - 2/\kappa)^2}{\kappa^2 \pi^2 \Delta \phi} \frac{h}{r} \delta(n - n_j) \right] u_* \quad (2.5)$$

となる。したがって、式 (2.1), (2.5) を連立して v_b 及び z_b または h について解けば、ベ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。

なお、式 (2.4) においてベーン工が水面から頭を出す突出式の場合については、水面においてもベーン工による力を受けるので、

$$\left[\frac{\partial F_n}{\partial z} \right]_0^h = F_h - F_0$$

F_h : 水面近傍でベーン工にかかる力より、右辺第二項は

$$- [F_0 - F_h] / \rho \Delta s \cdot \delta(n - n_j)$$

となる。この状態で長方形型ベーン工が外岸を向いていると、通常、流速は底面近傍よりも水面近傍の方が速いため、これは平均流にして一般に正の値 ($-[l_0 \sin \alpha_0 u_b^2 - l_h \sin \alpha_h u_s^2] > 0$) を取ることが多いと考えられる。これは遠心力に起因する項と同符号である。先に述べたように、ベーン工が有効に機能するためには遠心力による二次流と逆向きの二次流を生成する必要がある。したがって、この場合はベーン工は効果を発揮しにくくなる。このことより、突出式ベーン工が十分に機能を発揮するためにはベーン工を内岸側に向けること ($\alpha < 0^\circ$) が望ましいことがわかる⁶⁾。

また、ベーン工に対する流れの仰角は、二次流の存在のため正確には鉛直方向に異なる。この仰角の鉛直方向の違いにより、ベーン工は二次流に対しては常にそれを打ち消す方向に働く。したがって、平均流に対して仰角 0° でも二次流に対しては仰角が存在するので、二次流及び洗掘の抑制作用が生じる。この二次流による影響は、平均流に対する仰角が大きいときには相対的に平均流による効果と比べて小さいと考えられるので、補正係数の中に含まれるとする。すなわち β は、本来

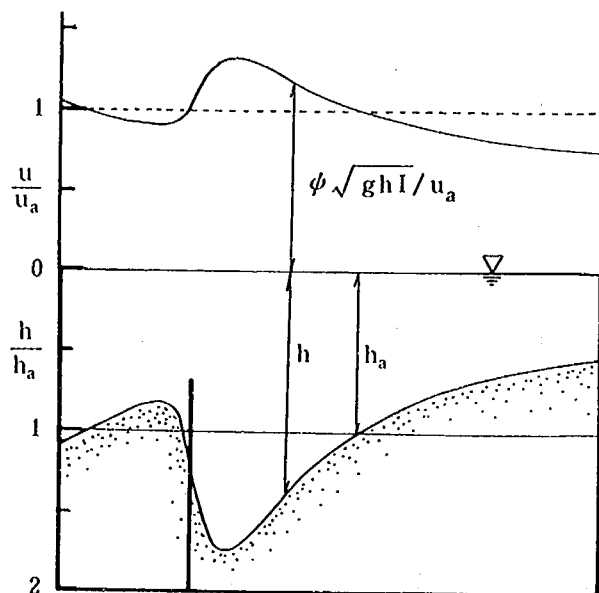


図 2.1.3 流速分布形の仮定

$$\beta' \sin \alpha = \beta \sin (\alpha + \Delta \alpha)$$

β : 一様流中の補正係数, $\Delta \alpha$: 二次流による影響

と表されるべきであり, $\Delta \alpha \cong 0$ とすれば

$$\beta' \sin \alpha = \beta (1 + \Delta \alpha / \tan \alpha) \sin \alpha$$

$$\therefore \beta' = \beta (1 + \Delta \alpha / \tan \alpha)$$

と表すことができる。これは、二次流の向きが遠心力によるものと同じ場合は見かけ上 β の値が上がり、二次流の向きがこれと逆向きの場合は見かけ上 β の値が下がることを示している。しかしながら、本解析法では仰角 α がある程度大きい状態を想定しているので、 $\Delta \alpha / \tan \alpha \cong 0$ ($\beta' \cong \beta$) と考えている。

2.2 実験値との比較

橋本・浅野・坂野による実験結果⁸⁾⁹⁾と解析結果を図 2.2.1 に示す。実験結果は 90° の湾曲角を持つ水路における 45° の断面におけるものである。図 2.2.1 はベ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。実験結果は、ベーン工の仰角が 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っている⁸⁾⁹⁾。解析法によって得られる河床形状は、実験結果の特徴を概略表しており、特に重要な外岸の局所洗掘深については、解析結果は実験結果を良く説明している。実験では、ベーン工の周囲で洗掘が起こっているが、これは、ベーン工の根入れ深さを十分確保することによって安全な構造とすればよい。これについては4章で述べる。図中のパラメータ r は、解析を行うにあたって現れる1つの無次元量で

$$r = f \frac{(\psi - 2/\kappa)^2 \kappa \beta_0 \pi l_0 \sin \alpha}{(\psi - 0.5/\kappa) 6 B \Delta \phi},$$

$$\Delta \phi = \phi / N \quad (2.6)$$

と表され、これは式(2.5)の右辺の2つの項の比を川幅 B で除したものであり、 $n = n_j$ の横断位置にベ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ベ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。本資料では、この r を二次流相殺率と呼ぶことにする。この r の値が大きいほどベーン工による二次流の効果が強く現れる。図 2.2.1 は r の値が増加するにつれて外岸付近の河床の洗掘は軽減されることを示している。 r は式

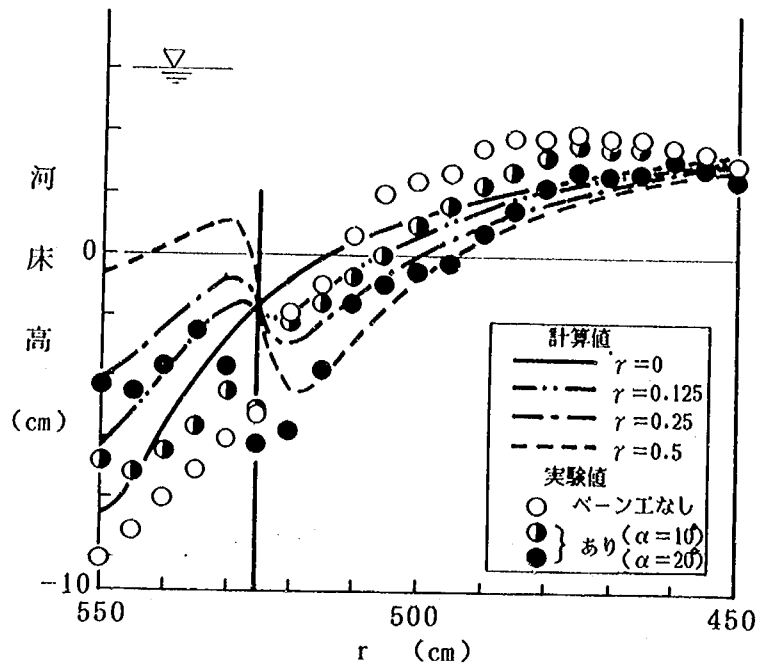


図 2.2.1 ベーン工の仰角の違いによる河床形状の変化

(2.6) に示されるように $\beta_0 l_0 \sin \alpha / B \Delta \phi$, すなわち $\beta_0 l_0 \sin \alpha N / B \phi$ に比例する。このことは、ベーン工設置数 N , ベーン工の長さ l_0 または仰角 α が大きくなるとともに外岸付近の洗掘が減少することを意味する。 r に対する川幅 B の影響については、4 章で述べる。

坂野・福岡・浅野¹⁰⁾による実験結果を解析結果と共に図 2.2.2(a), (b) に示す。図 2.2.2(a) はベーン工の設置位置の違いによるベーン工の効果の違いを示したものである。実験結果はベーン工の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の洗掘の程度は大きくなり、ベーン工周辺の洗掘は減少している。解析結果は、このようなベーン工の設置位置に対する河床形状の変化特性の様子を良く表わしている。

また図 2.2.2(b) はベーン工を 2 列に並列で配置したときの河床形状を示している。解析結果は、外岸付近の河床高をよく説明している。これらをみれば、ベーン工の周辺の局所洗掘が現れない解析結果では、1 列に配置したとき(図 2.2.1)よりも並列に配置するほうが河床の横断形状は、より平坦に近く滑らかになっており、横断面内の局所洗掘と堆積の軽減に対して、ベーン工がより効果的に機能することがわかる。

これらの結果との比較より、本解析法はベーン工設置時の河床形状の様子を概ね表し、特に外岸付近の河床高については、よく説明できることがわかる。

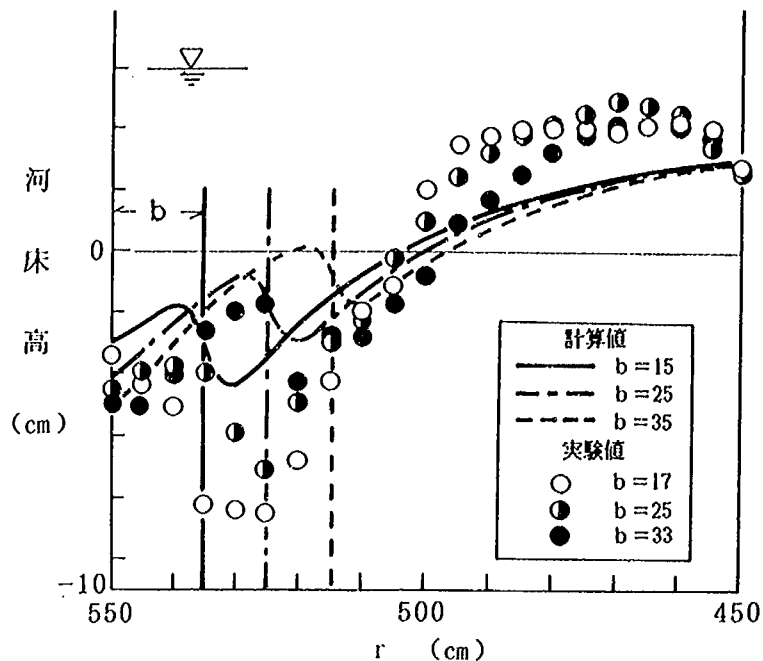


図 2.2.2(a) ベーン工の設置位置の違いによる河床形状の変化

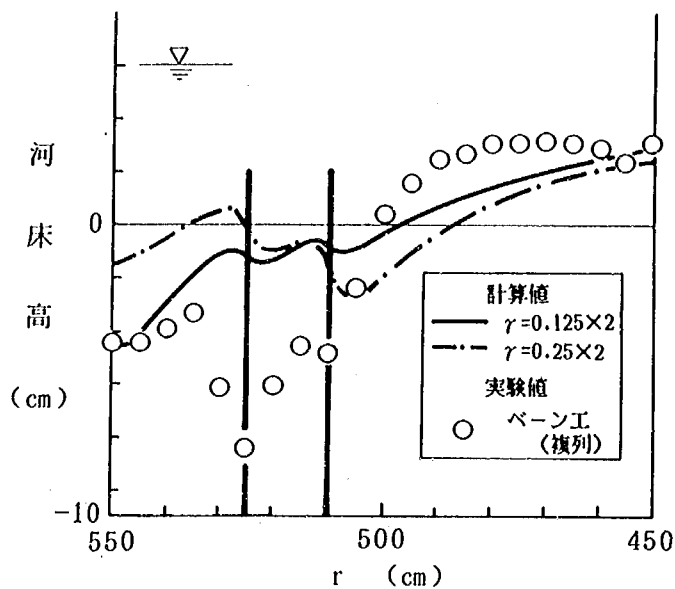


図 2.2.2(b) ベーン工を複列としたときの河床形状

3. 湾曲流路におけるベーン工に関する実験

本章では種々の形状・形式をもつベーン工を湾曲流路に設置し、外岸の洗掘の抑制効果について検討を行った。また河床形状が適当となるベーン工の設置数及び配置に関しても検討を行った。

3.1 実験概要

実験に使用した水路は図 3.1.1 に示す幅 1 m, 曲率半径 5 m, 湾曲角 90° の湾曲部とその上流側に 14 m, 下流側に 6 m の直線部を有するものである。実験条件は表 3.1 に示す通りであり、通水中は河床低下が生じないように上流部より給砂器により給砂を行った。なお、通水時間は 18 時間である。

実験ケースは全 9 ケースであり、その具体的な検討項目は表 3.2 に示す通りである。各ケースでのベーン工の横断設置位置については、図 3.1.2 に示すように 1 列に配置した場合は外岸より 25 cm, 2 列に配置した場合には外岸より 25, 40 cm, 千鳥配置にした場合は 20, 30 cm の場所へベーン工を設置した。またベーン工の河道法線形状に対する仰角は 20° とした。またベーン工の長さ l は標準的には 6 cm とし、初期河床からの高さは 2 cm とした。なお、実験には図 3.1.3 に示す形状の異なる 3 種類のベーン工を用いた。

これらの実験条件及びベーン工に関する諸元については、浅野ら^{8) 9) 10)}の実験を基に設定した。

表 3.1 実験条件

流 量 Q (l/s)	水 深 h_a (cm)	勾 配 I_b	砂の粒径 d (mm)	流 速 u_a (cm/s)	摩擦速度 u_{*a} (cm/s)	限界摩擦速度 u_{*c} (cm/s)	流速係数 ϕ
24.6	6.0	1/770	1.0	41.0	2.70	2.34	15

表 3.2 実験ケース一覧

No.	ベーン工		実 験 内 容	
	形 状	基数	検 討 項 目	備 考
1	な し	—	ベーン工を設置しない場合の流況と河床形状の把握	ベーン工の形状と形式に関する実験
2	長方形	15	アイオワ式ベーン工の効果の把握	
3	台 形	15	揚力分布形を変更したことによる効果の把握	
4	円柱付	15	台形型ベーン工前面に取り付けた円柱の効果の把握	
5	円柱付	30	ベーン工を 1 列に配置した時の洗掘抑制効果の把握	ベーン工の設置数と配置に関する実験
6	円柱付	30	ベーン工を 2 列に配置した時の洗掘抑制効果の把握	
7	円柱付	30	ベーン工を千鳥状に配置した時の洗掘抑制効果の把握	
8	円柱付	15	湾曲部末端に根固工を設置した場合の河床変動状況	実際の施工に対する検討
9	円柱付	30	ベーン工による洗掘の埋め戻し効果の検討	

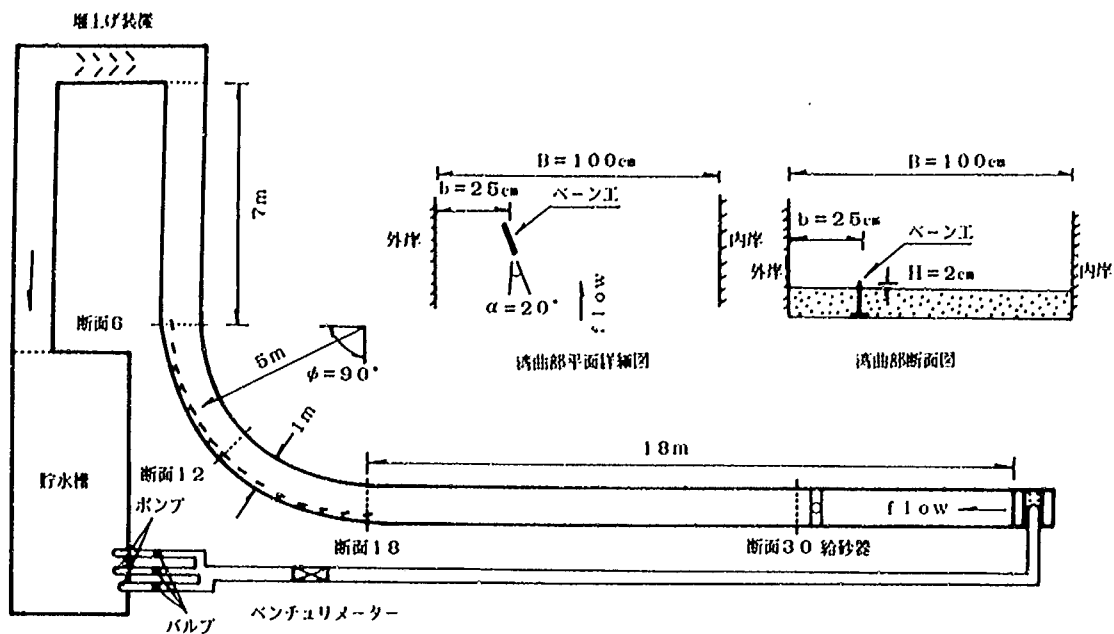
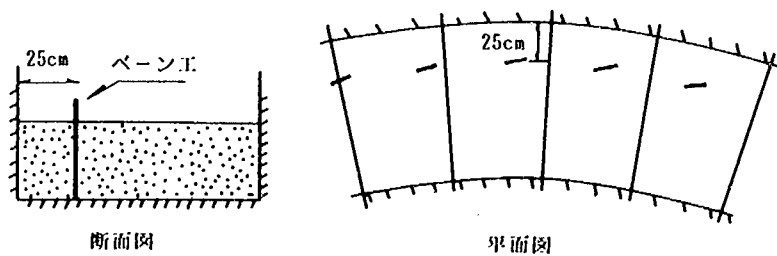
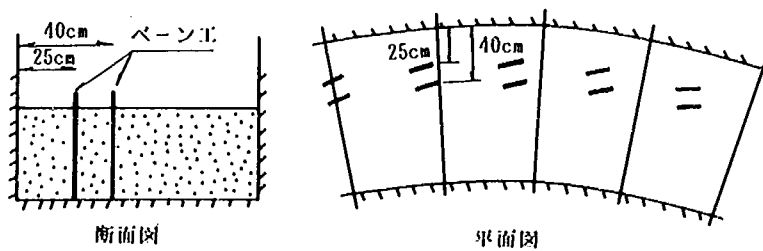


図 3. 1. 1 実験装置

1 列配置の場合



2 列配置の場合



千鳥配置の場合

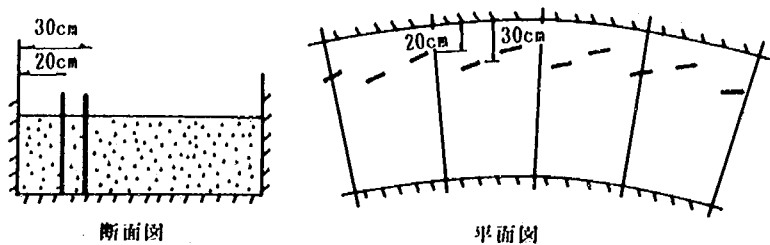


図 3. 1. 2 ベーン工設置位置

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 ベーン工の形状・形式に関する実験

本節では土研型ベーン工の開発に関する実験を行う。

ベーン工に求められる機能と構造は以下の通りである。

- (a) 外岸付近の局所洗掘深を十分軽減でき、かつ、外岸沿いの洗掘深の縦断変化を小さくする構造を持つ。
- (b) 施工が容易で、かつ経済性が高い。
- (c) 流木などが、からみつにくい構造を持つ。

そこで、上述の3点を念頭に置き、ベーン工の形状と形式を考察し、図3.1.3に示す

- (1) 長方形型：アイオワ式で、比較のために用いる。
- (2) 台形型：ベーン工の周囲が洗掘を受け、ベーン工の露出面積が大きくなったとき、より効率よく働くように鉛直下向きに揚力分布形 $F_n(z)$ すなわち、ベーン工の長さが増加する構造を持つ。
- (3) 円柱付台形型：台形型ベーンの前面に円柱を取り付けることにより、ベーン工の露出の程度が縦断的に大きく変化しないように工夫されている。

の3種のベーンを用いて実験を行い、ベーン工の形状と形式について検討を行った。

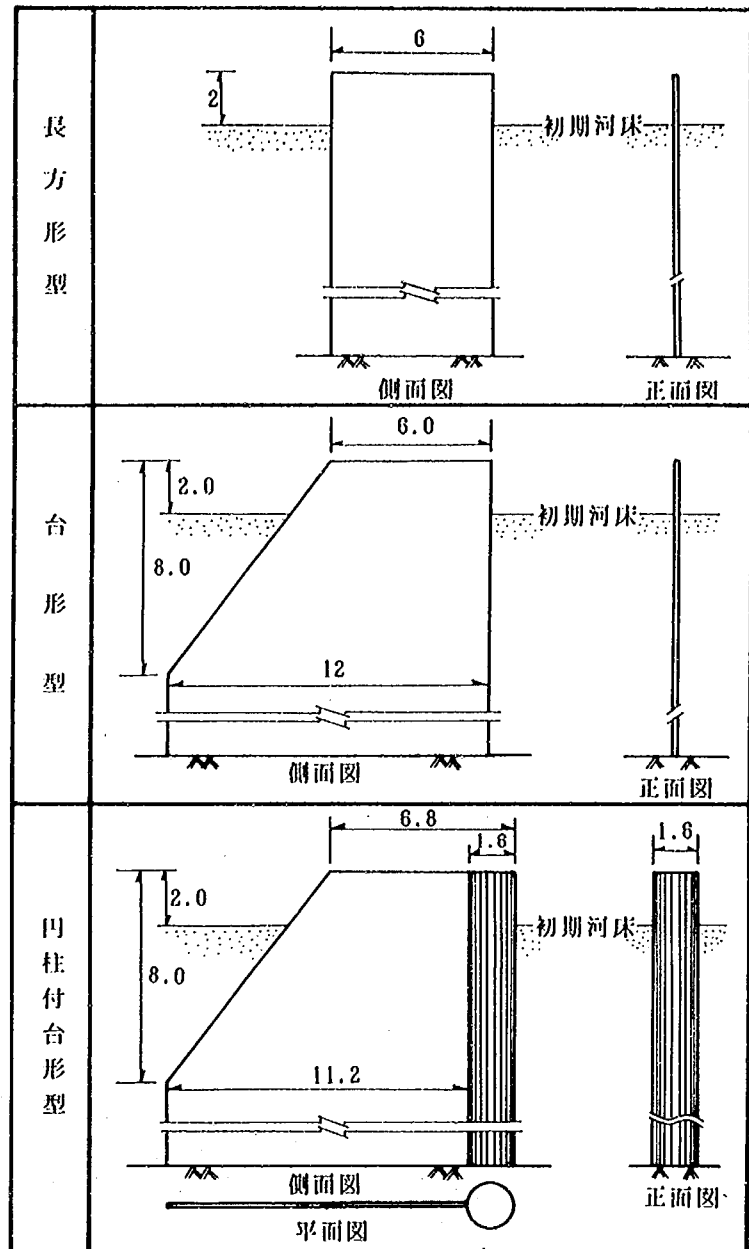


図3.1.3 ベーン工の形状（単位：cm）

(1) ケース 1 (ベーン工なし)

ベーン工を設置しない場合の湾曲部の流況と河床変動を調べた。

(a) 流れについて

図 3.2.1 及び写真 3.2.1 に水衝部の表面流況を示す。ベーン工がない場合では、水面付近の流れは慣性力(遠心力)の影響により外岸に向かって流れ、湾曲部中央付近より下流側では、外岸に沿うようにして流れの集中が起こっている。水衝部は断面13~12である。図 3.2.2 より、水面付近で外岸向き、底面付近で内岸向きの流れが生じており、横断面内の外岸付近において明瞭な二次流が存在していることがわかる。

(b) 河床高について

水衝部では主流は加速され、図 3.2.2, 3.2.3 に示されるように、河床付近では内岸向きの流れが存在し、そのため湾曲部外岸側(左岸側)では、河床が著しく洗掘されている。図 3.2.2 は断面12の、図 3.2.3 は洗掘の著しい断面13~9 の平均値の河床高を表している。図 3.2.4 に外岸から 5 cm の位置での河床高の縦断変化の様子を示す。これより、外岸の洗掘は断面13~9 で激しく、最大洗掘は湾曲中央部のやや後方の断面11~10 に位置する。また水面勾配の急変する湾曲部の入口付近では堆積が、出口付近では洗掘が生じている²¹⁾。

図 3.2.5 及び写真 3.2.2 に河床変動の様子を示す。砂れき堆は湾曲部にわたって生じており、また外岸の洗掘は断面15辺りから生じている。断面13から下流では局所洗掘がスポット状に発生している。最大洗掘深は12~13cmであり、平均水深の2倍にまで達している。これは洗掘が生じた所に、上流から移動してきた砂れき堆が重なってできたものである。

また横断的には、水衝部における洗掘は、外側から40cmの範囲で生じており、それより内岸で堆積が起きている。

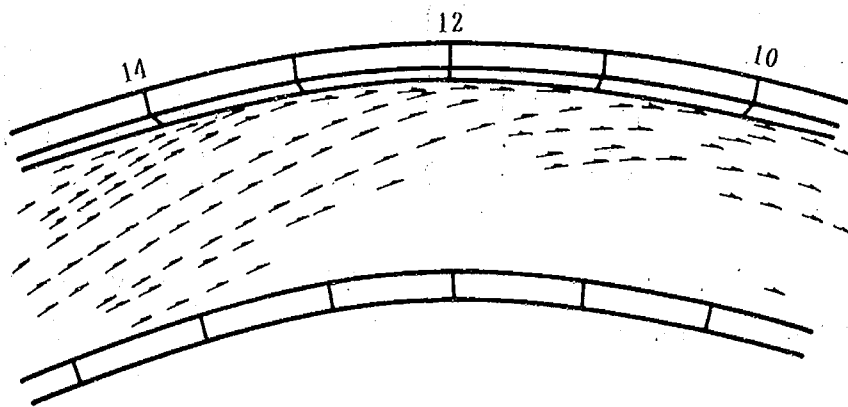


図 3.2.1 表面流向 (ケース 1)

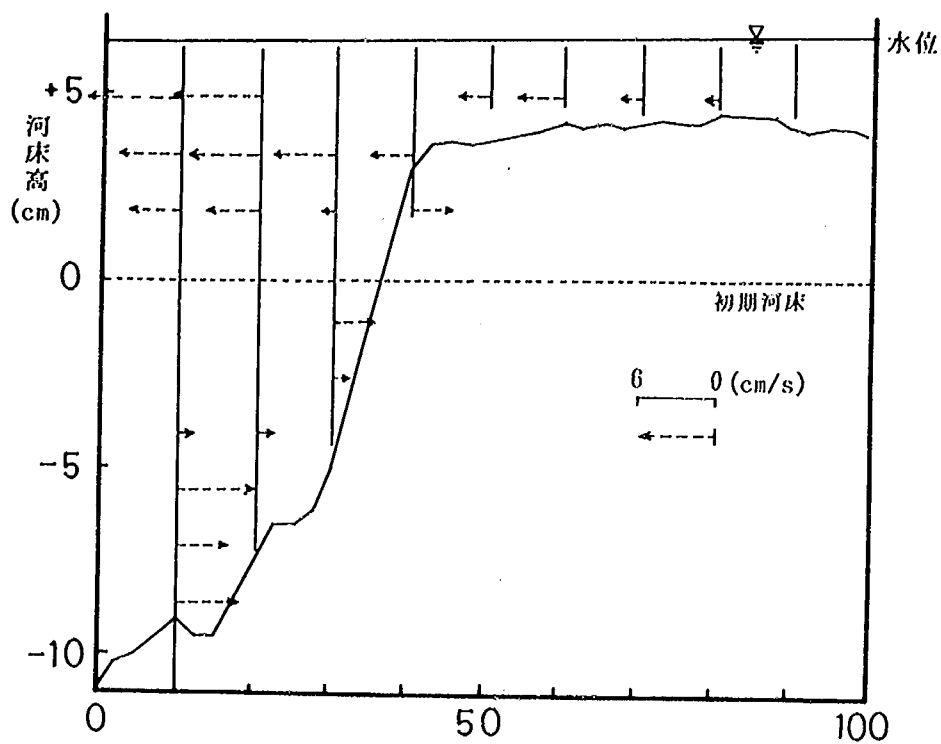


図3.2.2 断面12における河床高と二次流の分布(ケース1)

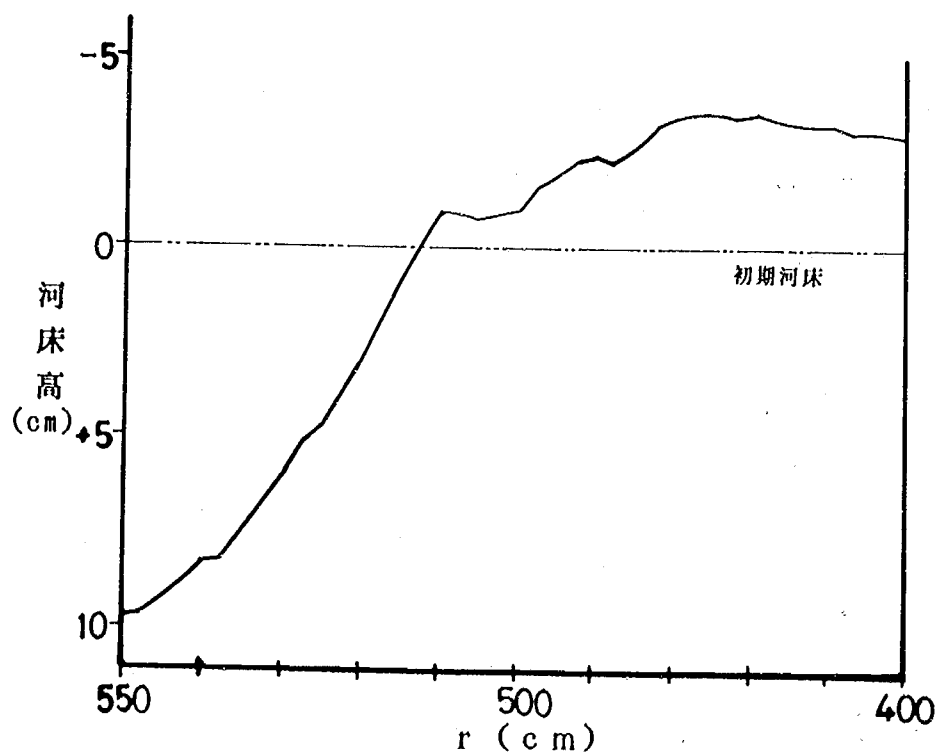


図3.2.3 平均横断河床形状(ケース1)

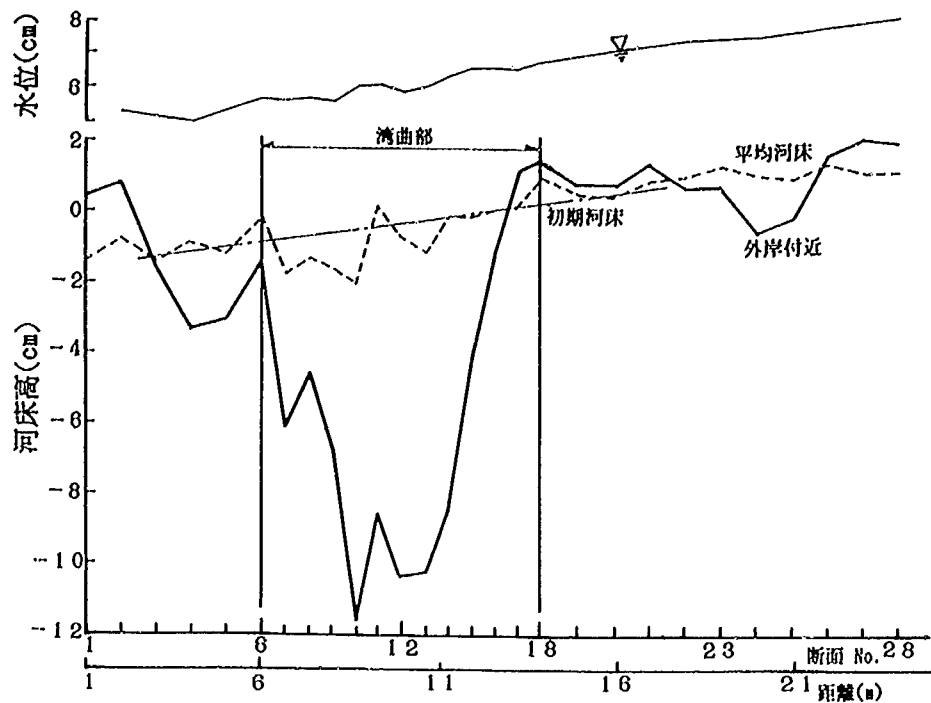


図 3.2.4 水位・河床高の縦断変化 (ケース 1)

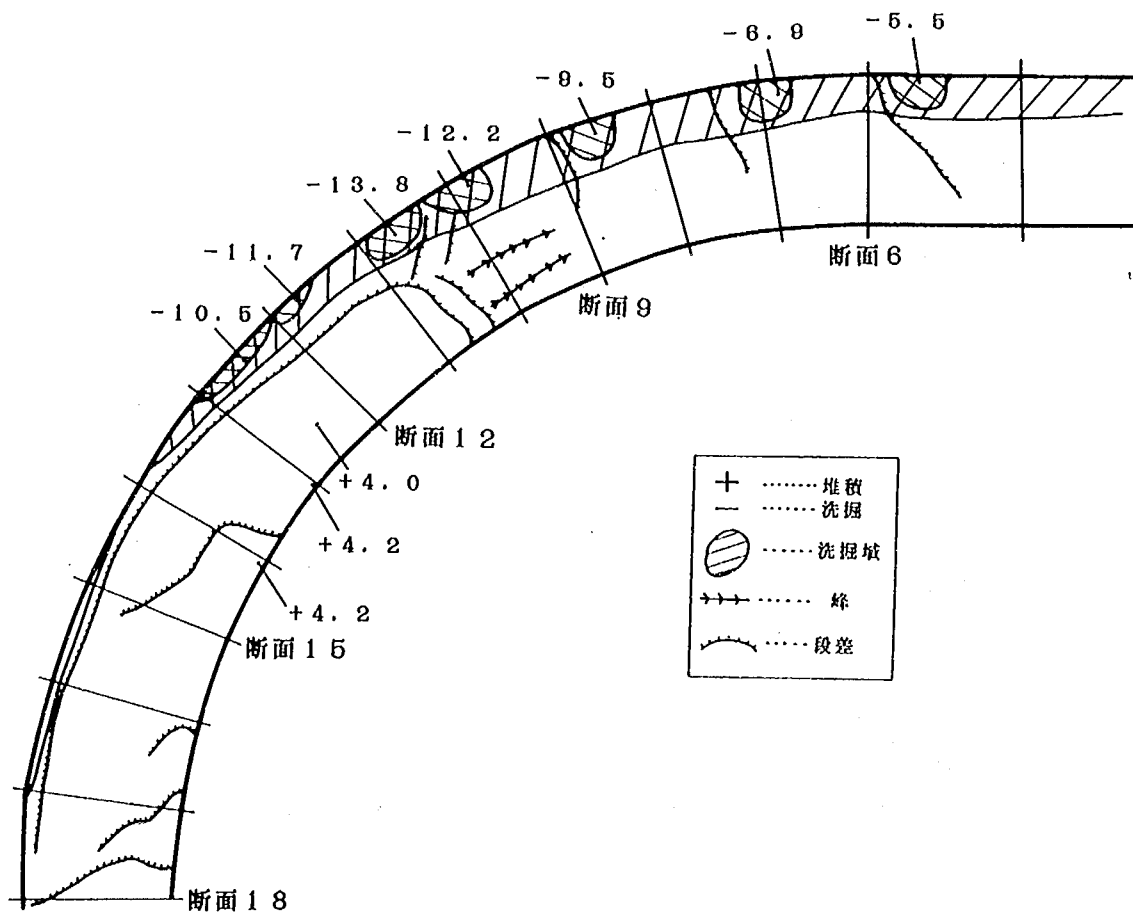


図 3.2.5 河床変動状況 (スケッチ)



写真 3. 2. 1 表面流況（ケース 1）

実 験 名	実 験 1
ベーン工の形状	ベーン工なし
ベーン工の設置計画	—————

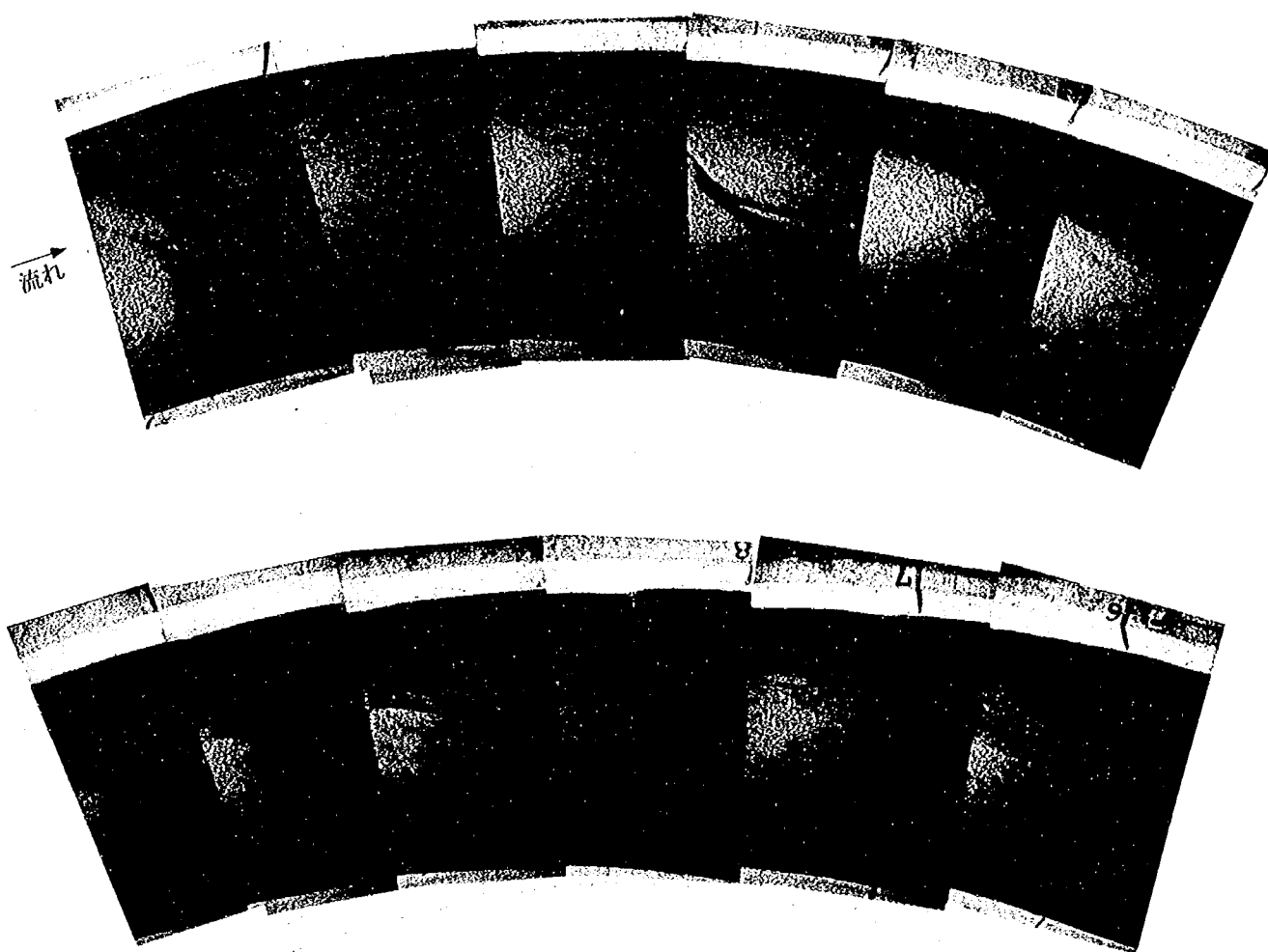


写真 3. 2. 2 河床変動状況

(2) ケース 2 (アイオワ式ベーン工)

湾曲部にアイオワ式ベーン工を 1 列に 15 基設置し、実験を行った。

(a) 流れについて

図 3.2.6 及び写真 3.2.3 に、アイオワ式ベーン工を設置したときの水衝部の表面流況を示す。図 3.2.1 と比べると流れは整流されていることがわかる。ベーン工の影響を受け、表面流はベーン工の設置位置より外岸側へ進むことが抑制され、ベーン工の設置位置に沿う向きに流れるようになる。すなわち、ベーン工を設置したことによりベーン工から放出された渦と遠心力によって生ずる相異なる回転を持つ二次流によって流れ場が分離された様になっており、内岸から外岸への流体の侵入が防がれ、ベーン工はいわば一つの仮の境界の様なものを形成している。そのため、外岸付近の流速は加速され難い。

図 3.2.7 より、横断面においてベーン工の内岸側で遠心力による二次流が生じており、ベーン工周辺ではそれが抑制されている。したがって、ベーン工の効果が高いほど表面流が外岸へ向うことが抑制される。

(b) 河床高について

図 3.2.7, 3.2.8 に示されるようにベーン工を設置した場合は、ベーン工を設置しない場合と比べて、ベーン工より外岸側では洗掘は減少し（断面 12 で 5 cm, 平均で 4 cm）、逆にベーン工より内岸側では洗掘が増大する（断面 12 で 4.5 cm, 平均で 3 cm）。これは、ベーン工から放出された渦によって、ベーン工の周辺の流れ場が変形され、ベーン工の周りで二次流が抑制されるため、流砂の運動方向が変えられ、そして、この結果ベーン工より外岸では洗掘量が減少し、この分、反対に内岸側の堆積量が減少したためである。

図 3.2.9 に外岸から 5 cm の位置での河床高の縦断変化の様子を示す。これよりベーン工を設置しなかった場合に洗掘の著しかった断面 13～9 で洗掘がかなり軽減されていることがわかる。また、全域にわたって全体的に軽減されている。全体的な堆積域と洗掘域の位置関係は変化していない。

図 3.2.10 及び写真 3.2.4 に河床変動の様子を示す。これからわかるようにベーン工の設置をすると外岸近傍の洗掘は軽減され、洗掘位置は外岸付近からベーン工の内岸に移動する。これは、ベーン工の内岸側辺りに、流水が集中したためと考えられている。またベーン工周辺には局所洗掘が生じており、この洗掘量はベーン工の縦断的な設置位置によって異なっており、水あたりの激しい断面 15～12 で著しい。

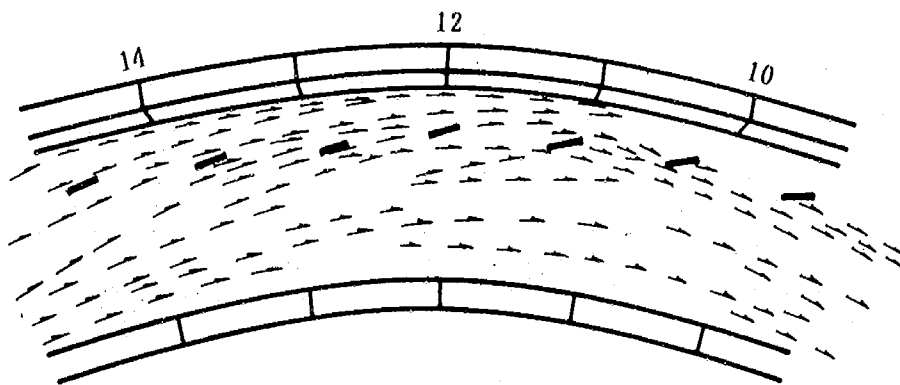


図 3.2.6 表面流向 (ケース 2)

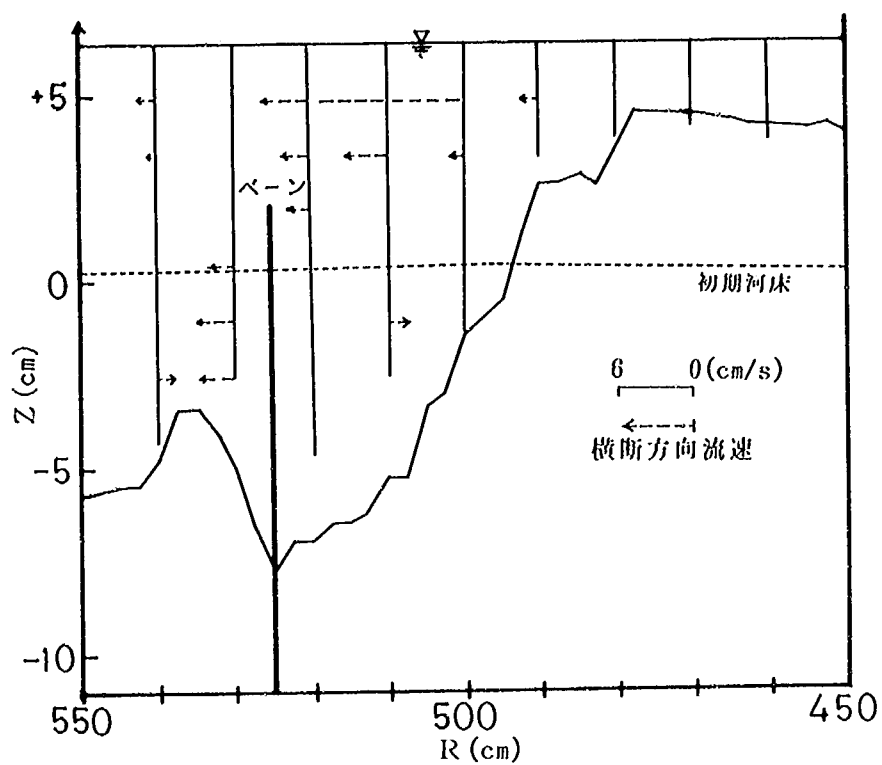


図 3. 2. 7 断面12における河床高と二次流の分布 (ケース 2)

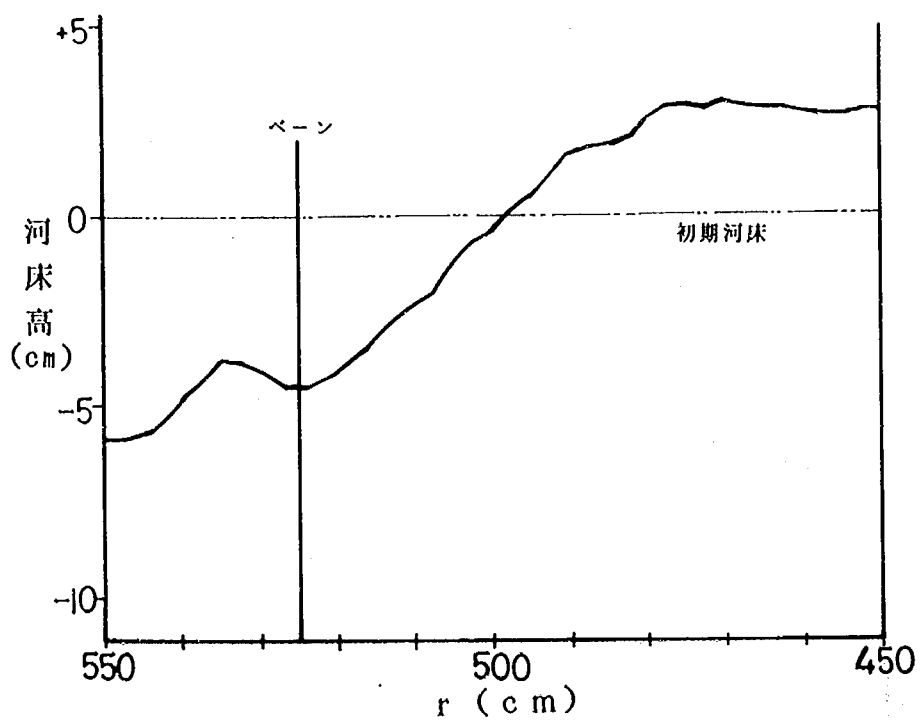


図 3. 2. 8 平均横断河床形状 (ケース 2)

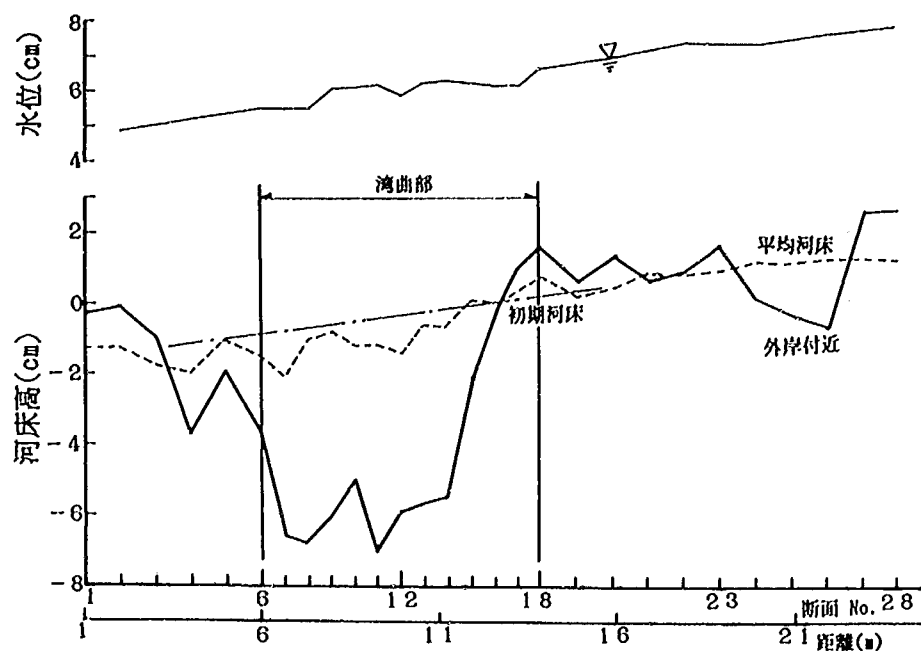


図 3.2.9 水位・河床高の縦断変化 (ケース 2)

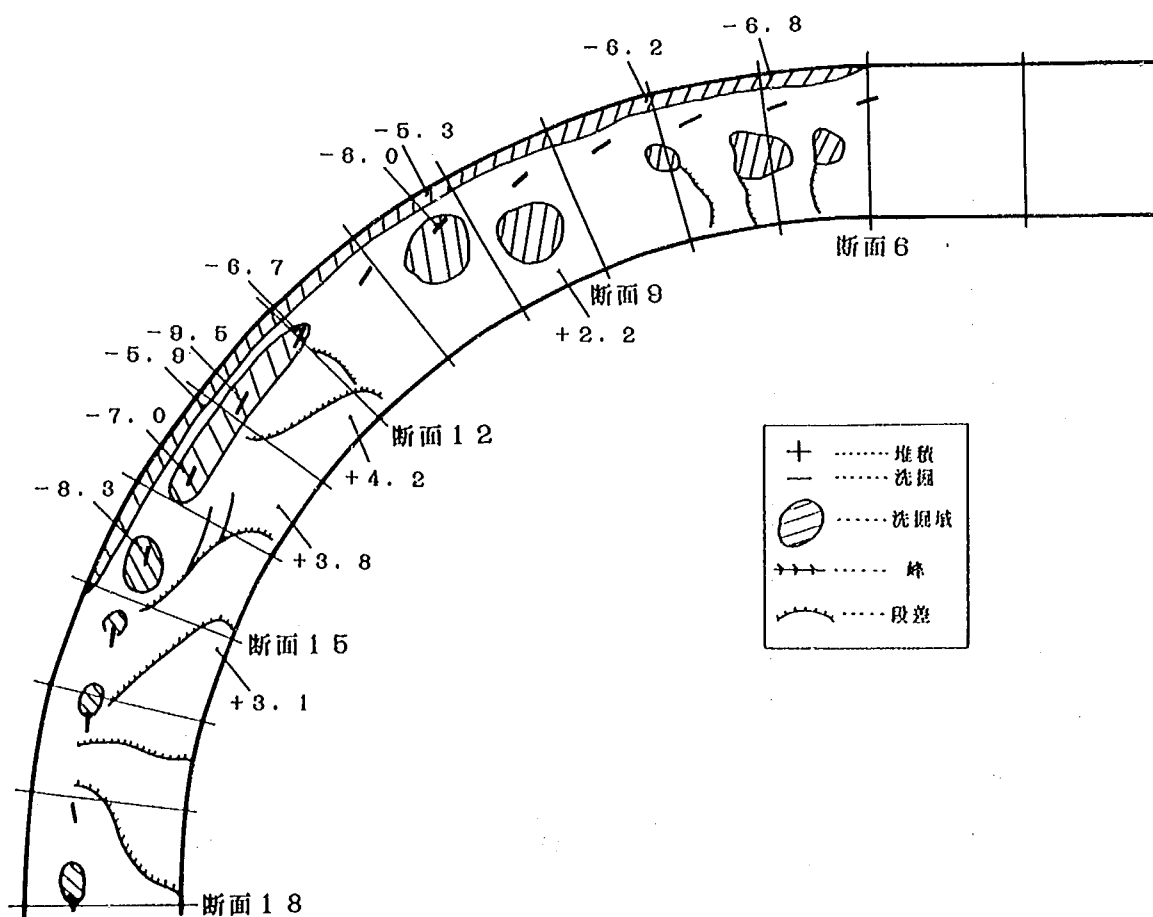


図 3.2.10 河床変動状況 (スケッチ)

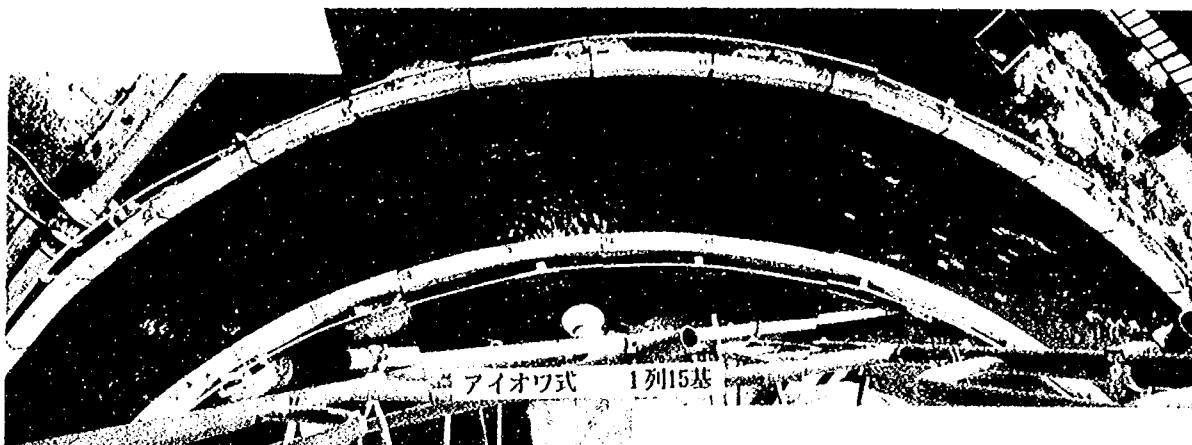


写真 3. 2. 3 表面流況（ケース 2）

実 験 名	実 験 2
ベーン工の形 状	アイオワ式ベーン工
ベーン工の設置計画	1 列に 1 5 個設置

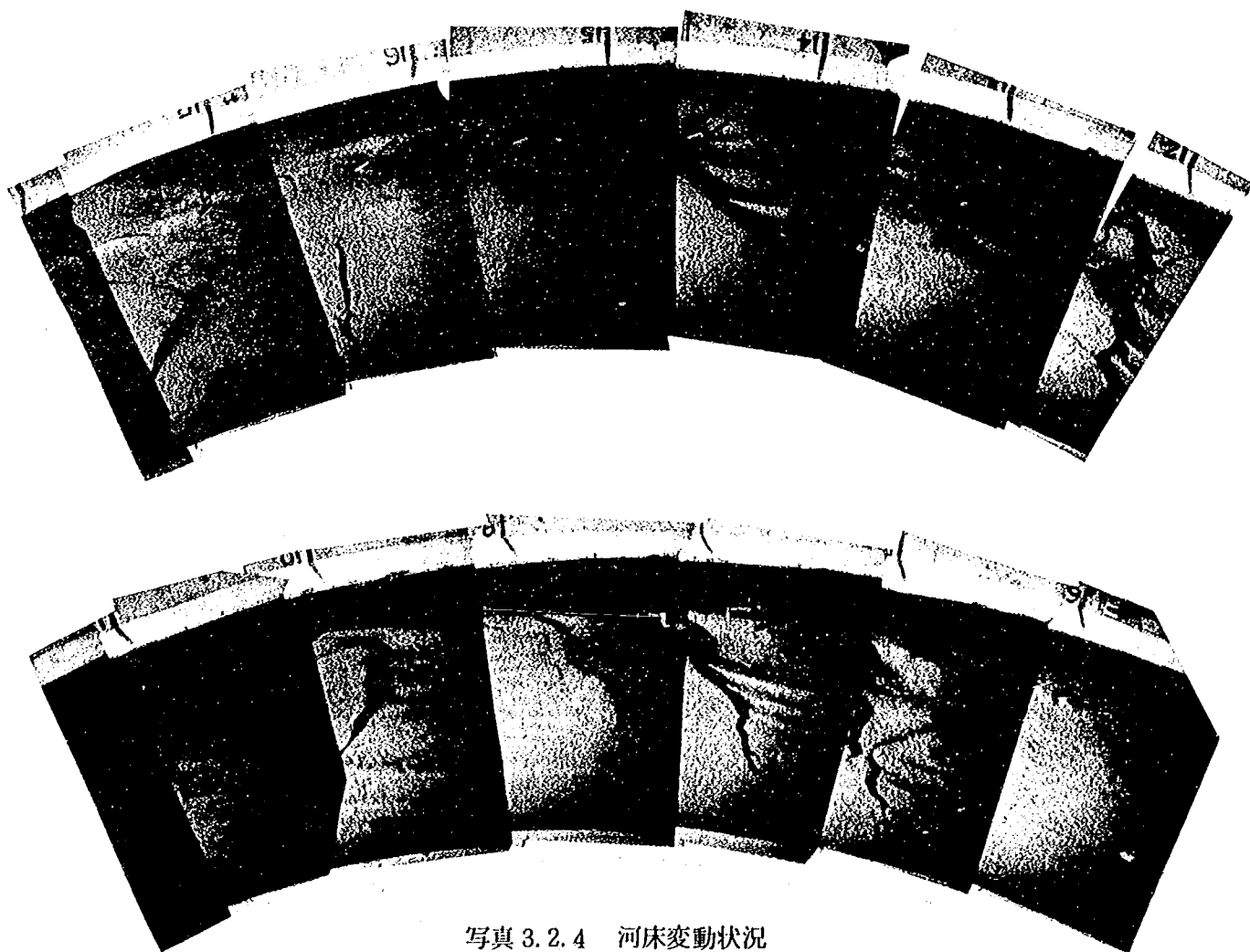


写真 3. 2. 4 河床変動状況

(3) ケース 3 (台形型ベーン工)

湾曲部に台形型ベーン工を1列に15基設置して実験を行い、台形型ベーン工の機能を調べた。

(a) 流れについて

図 3.2.11 及び写真 3.2.5 に台形型ベーン工を設置したときの水衝部の表面流況を示す。この台形型ベーン工を設置した場合はアイオワ式ベーン工を設置したときと比べて、より整流されている。図からわかるように表面流の外岸側への集中がかなり防がれており、このベーン工には表面流に対して“水はね”的な効果も併せ持っていると言える。これはアイオワ式ベーン工を用いた時より台形型ベーン工を用いた時の方が遠心力による二次流を良く制御していることを示す。また“水はね”を起こす位置についてはアイオワ式ベーン工の場合と大差はないようである。

図 3.2.12 に示されるように台形型ベーン工周辺の流れ場は、河床近くから変形されており、ベーン工を中心とする左回りの流れとなっている。また外岸付近における河床近くの内岸向きの流れはかなり抑制されている。

(b) 河床高について

図 3.2.13 に示されるように、外岸側における洗掘量はベーン工を設置したことにより、約 4～5 cm まで軽減されている。またベーン工近傍の洗掘量は、約 4～5 cm となっており、“みお筋”はそれほどはっきりとは固定されず、外岸より 0～40 cm の間であると判断される。

図 3.2.14 に外岸から 5 cm の位置での河床高の縦断変化の様子を示す。外岸側における洗掘量はベーン工を設置したことにより軽減されているが、その値は縦断的に変化しており河床高は場所的に(時間的に)安定していない。そのため、平均洗掘深はかなり軽減されるものの、最大洗掘深はそれほど軽減されるまでには至っていない。

図 3.2.15 及び写真 3.2.6 に河床変動の様子を示す。河床形状としては、スポット状の洗掘の発生が目立つ。これは、アイオワ式ベーン工を用いたときと共通しており、あまり露出していないベーン工の後方に発生する傾向がある。すなわち、ベーン工の露出面積が小さいとベーン工が十分に機能せず、ベーン工周辺で洗掘を受けていないベーン工の下流で局所的な洗掘が生ずる。したがって、ベーン工が機能を発揮するためには、ある程度ベーン工の周辺が洗掘された方がよく、また 1ヶ所だけ深く掘れて、その次のベーン工周辺では堆積が起こる様なことは避けた方がよい。

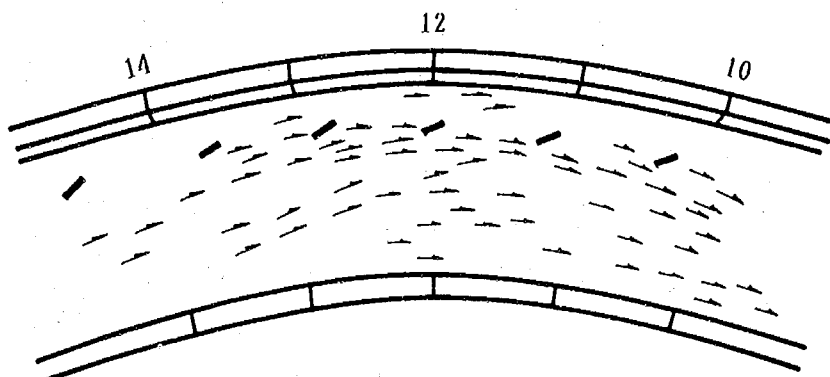


図 3.2.11 表面流向図

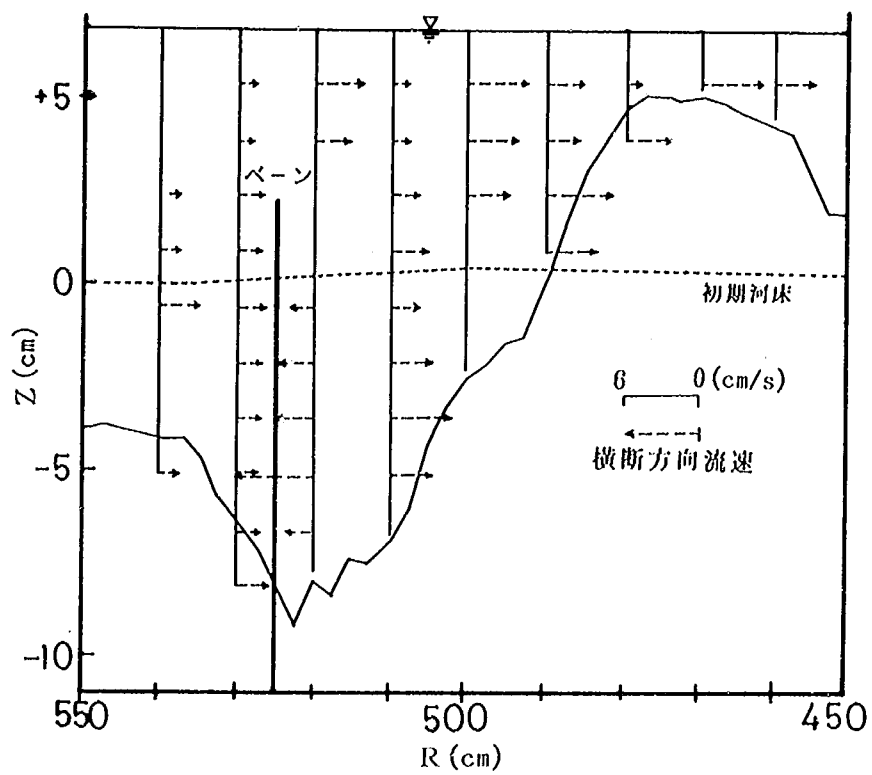


図 3. 2.12 断面12における河床高と二次流の分布 (ケース 3)

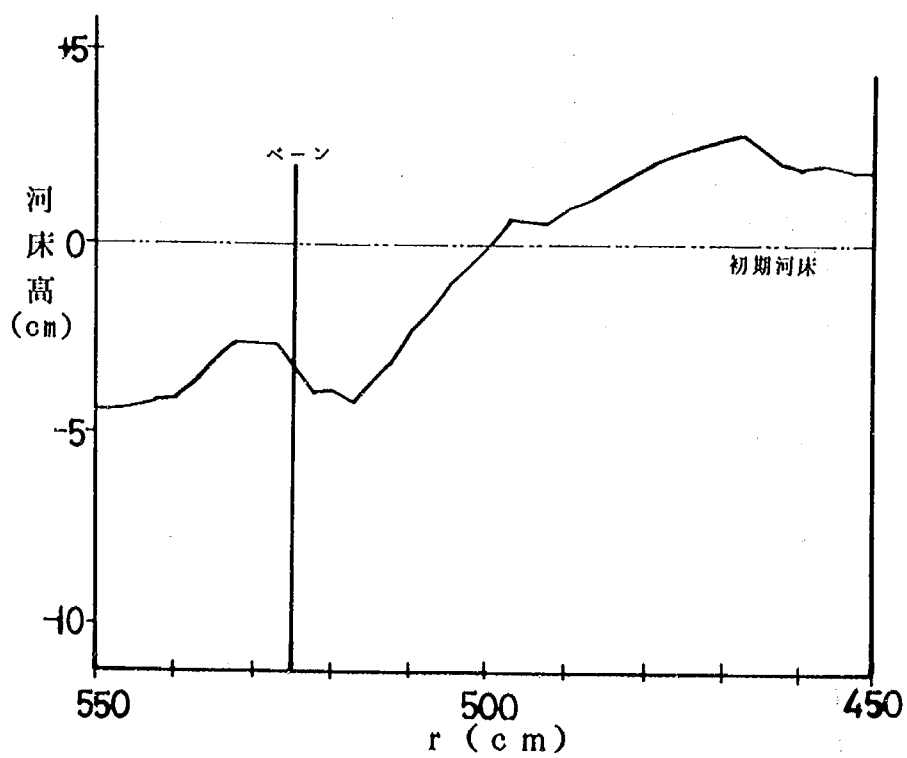


図 3. 2.13 平均横断河床形状 (ケース 3)

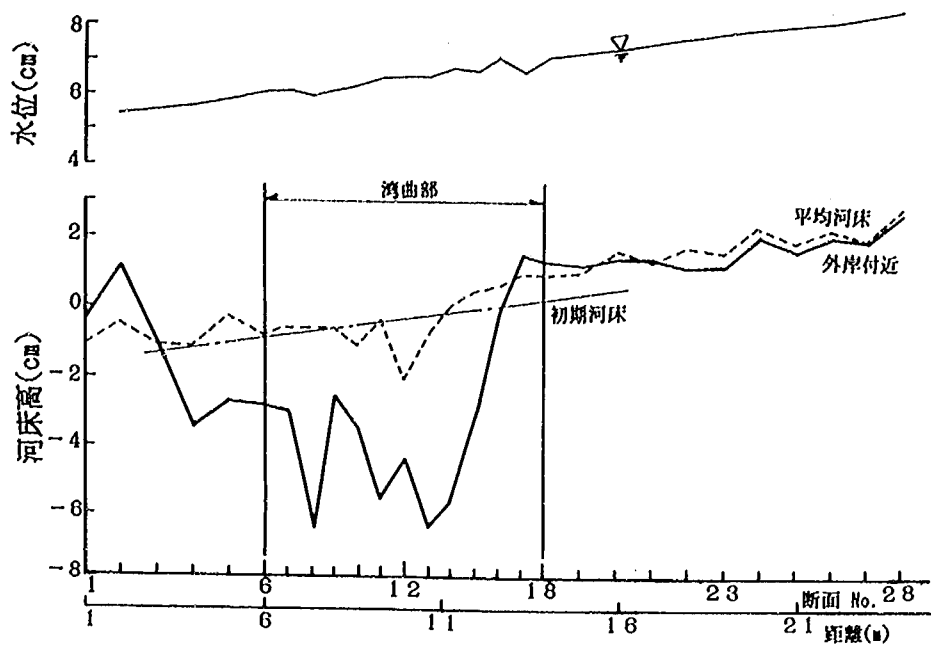


図 3. 2.14 水位・河床高の縦断変化(ケース 3)

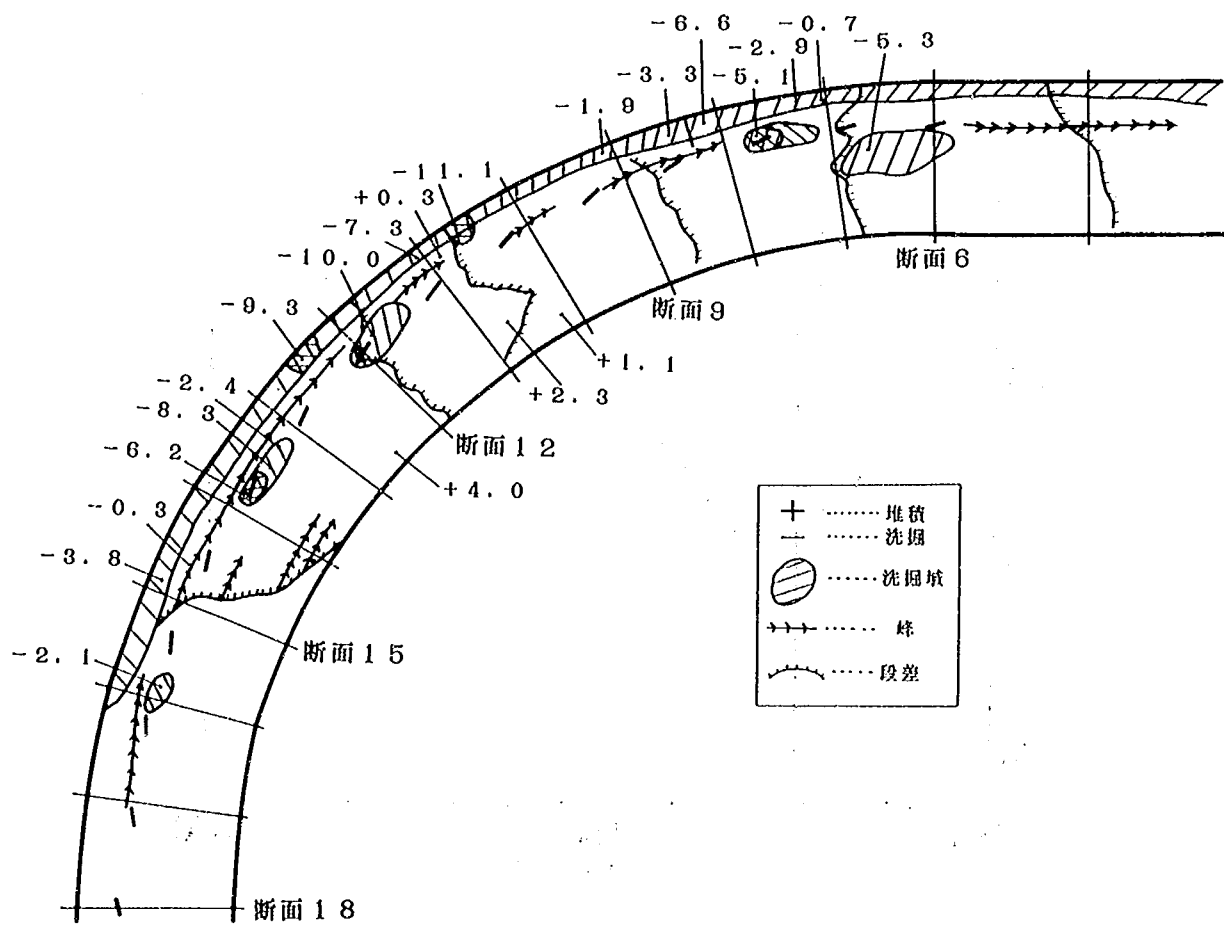


図 3. 2.15 河床変動状況(スケッチ)



写真3.2.5 表面流況（ケース3）

実 験 名	実 験 3
べ ー ン 工 の 形 状	台形型べ ー ン 工
べ ー ン 工 の 設 置 計 画	1 列 に 1 5 個 設 置

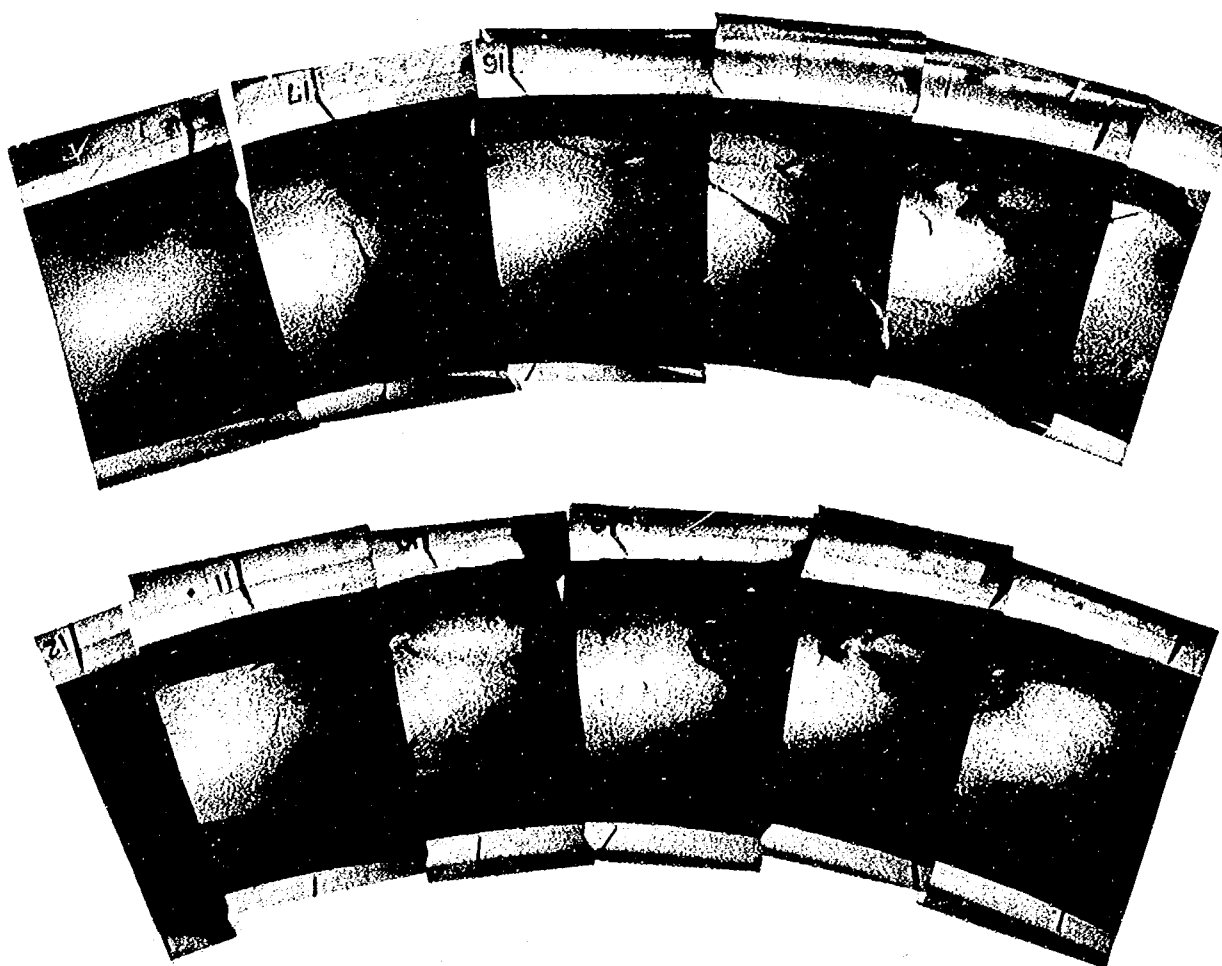


写真3.2.6 河床変動状況

(4) ケース4 (円柱付台形型ベーン工)

台形型ベーン工の前面に円柱を取り付け、円柱の効果について検討を行った。

(a) 流れについて

図3.2.16及び写真3.2.7に円柱付台形型ベーン工を設置したときの水衝部の表面流況を示す。表面流は断面13辺りからベーン工による“水はね”効果により内岸側まで整流されている。この図より、ベーン工が広い範囲にわたって、ケース2、3よりも良く機能していることがわかる。

(b) 河床高について

図3.2.17、3.2.18に示されるように、水衝部における横断河床高は、台形型ベーン工を用いた場合と比べて大きな違いはない。これは、ベーン工の前面に取り付けられた円柱は、水衝部での洗掘を抑制するよう働くものではなく、図3.2.19に示されるように、縦断的な河床変動を抑制するように効果を発揮するものであるからである。このため、最大洗掘深は円柱なしに比べて1 cm以上軽減されている。ただし、図3.2.19に示されるように、外岸沿いの河床は対策工の設置されていない湾曲部末端から直線部にかけて洗掘が生じている。したがって、ベーン工の効果はそれほど下流までは続かないものであることがわかる。

図3.2.20及び写真3.2.8に示されるように、湾曲部における外岸付近の河床高は、縦断的にそれほど変化せず、スポット状の洗掘も発生しなくなった。一方、ベーン工周辺またはその内岸側では、縦断的に広い範囲で洗掘が生じた。すなわち、これはベーン工が縦断的に広い範囲にわたって一様かつ連続的に機能し、流れがベーン工周辺に集中したことを示している。

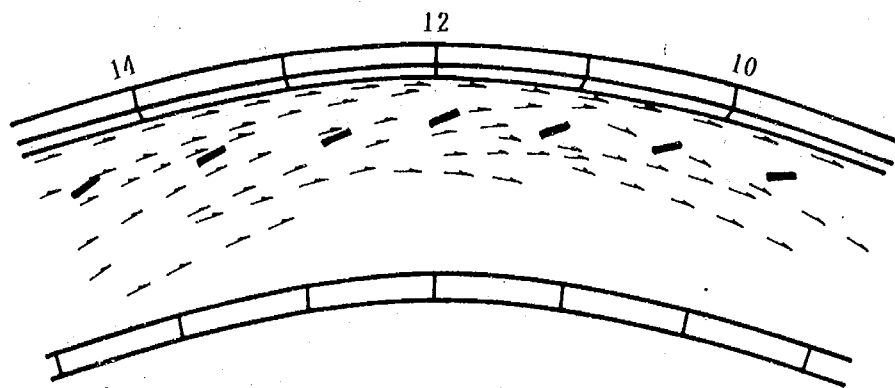


図3.2.16 表面流向 (ケース4)

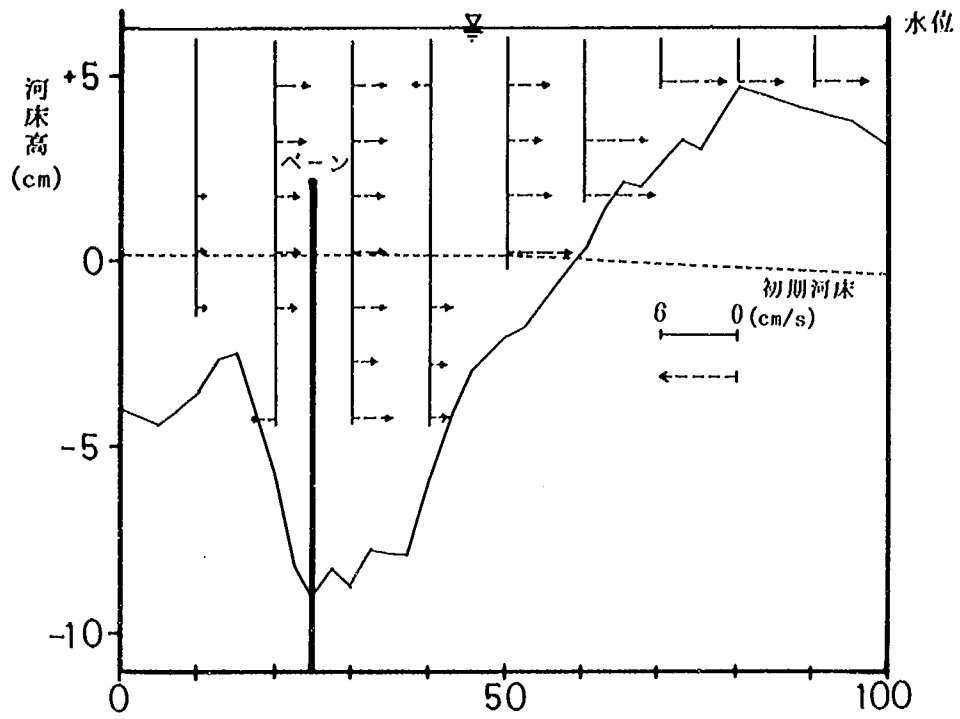


図 3. 2.17 断面12における河床高と二次流の分布 (ケース 4)

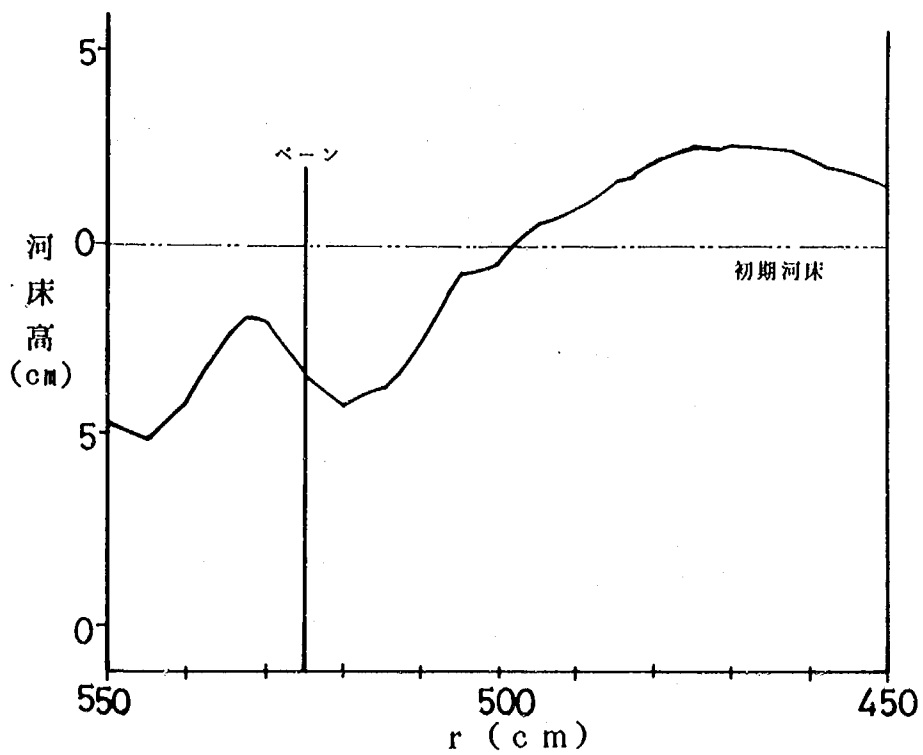


図 3. 2.18 平均横断河床形状 (ケース 4)

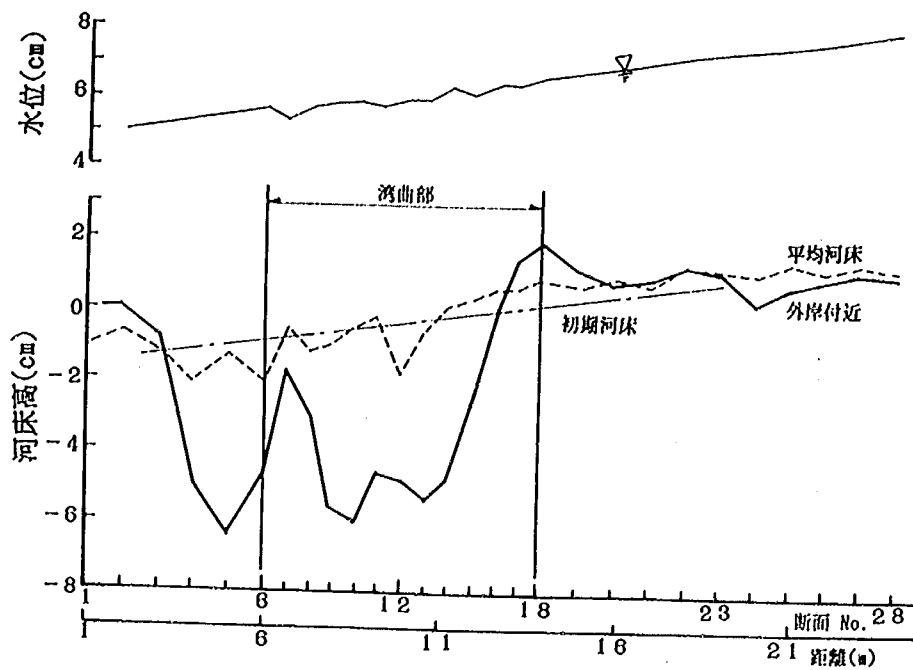


図 3.2.19 水位・河床高と縦断変化 (ケース 4)

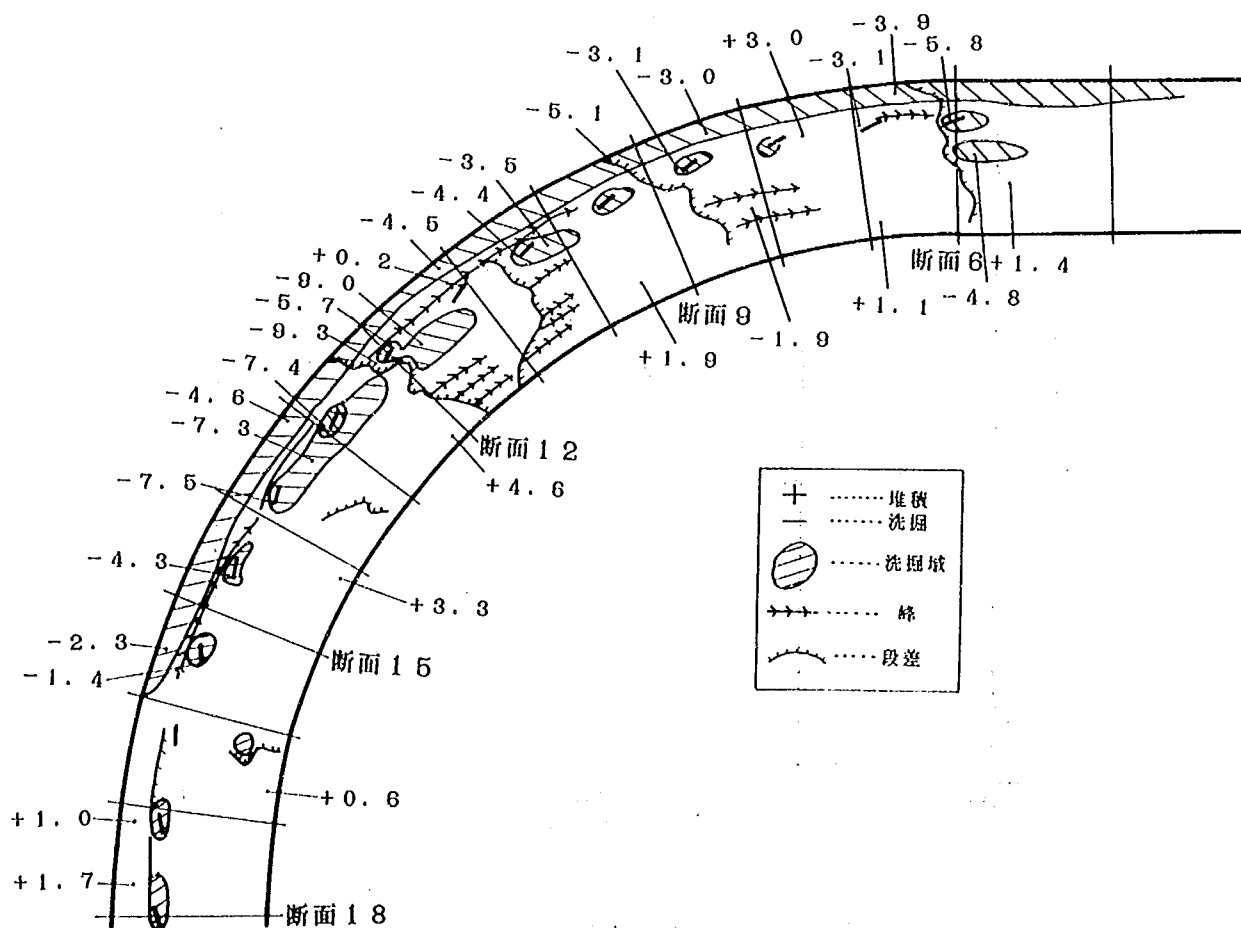


図 3.2.20 河床変動状況 (スケッチ)

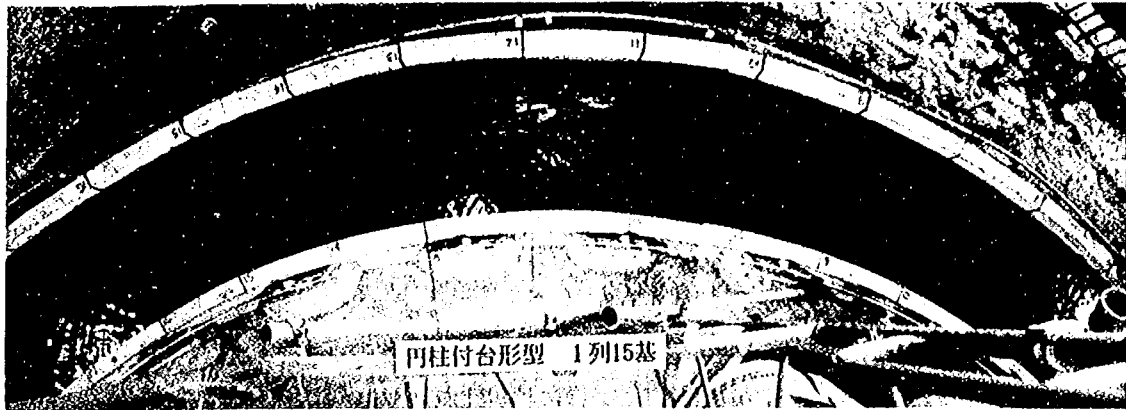


写真 3.2.7 表面流況（ケース 4）

実 験 名	実 験 4
ベーン工の形状	円柱付台形型ベーン工
ベーン工の設置計画	1列に15個設置

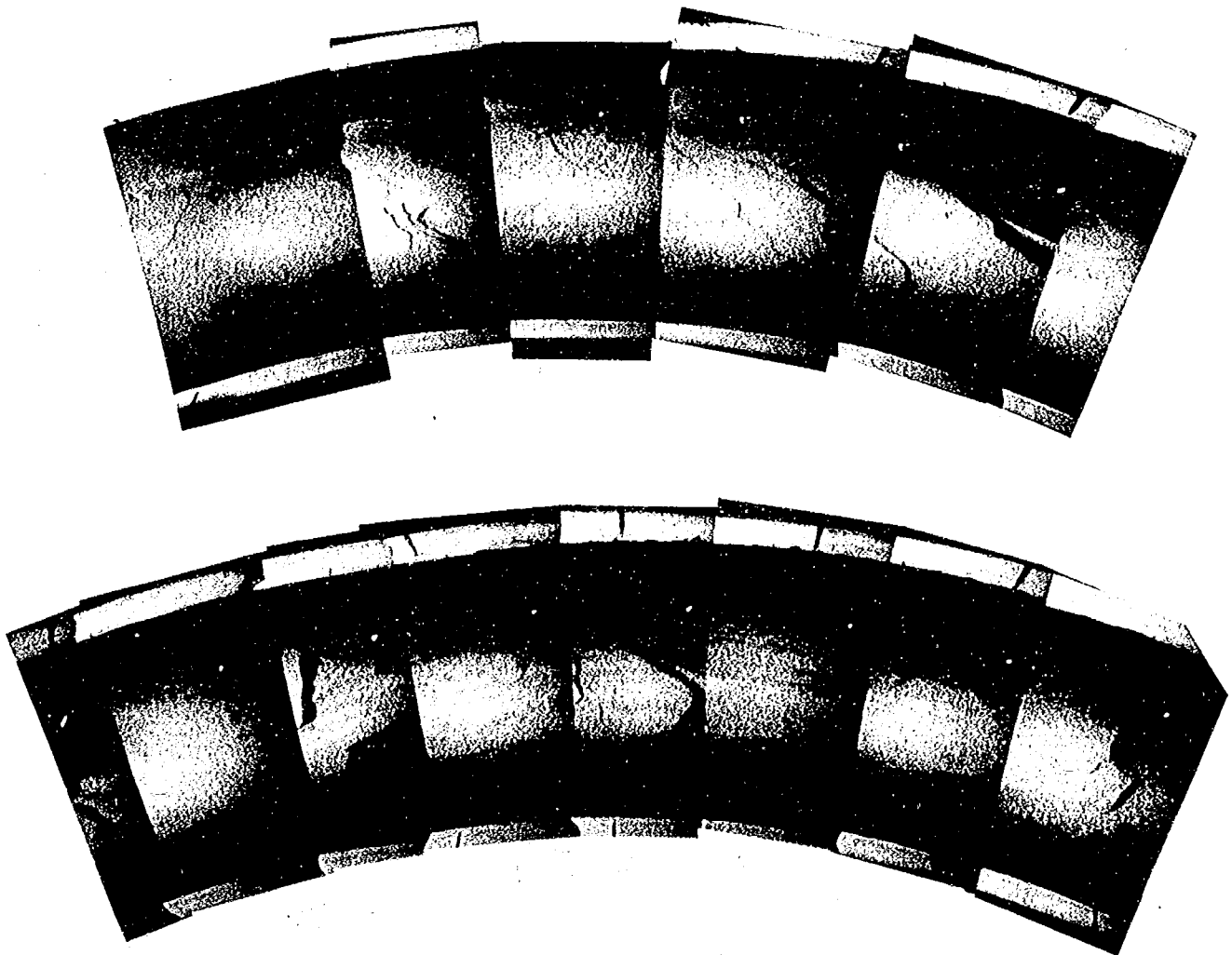


写真 3.2.8 河床変動状況

3.2.2 ベーン工の設置数と配置に関する実験

円柱付き台形型ベーン工を用いて、ベーン工の数と配置を変えて実験を行った。

(1) ケース5 (1列30基)

ベーン工を今までの倍の30基を1列に配置して実験を行った。

(a) 流れについて

図3.2.21及び写真3.2.9に示されるように、ベーン工の効果により、流れの外岸への集中が防がれている。しかし、ベーン工の設置数をケース4の2倍にした程の顕著な効果は現れていないようである。断面13, 11, 10の辺りでは流れが一部外岸へ向かっており、“水はね”効果の強い場所と弱い場所が遍在しているようである。すなわち、ベーン工が縦断的に一様に機能していないと思われる。

(b) 河床高について

図3.2.22に示されるように、ベーン工の内岸にできる“みお筋”はケース1～5の内、このケース5において最もはっきりと確認された。平均横断河床形状(図3.2.23)では、このケース5において、ようやくベーン工の内岸の方が河床が低くなっている。すなわち、主流は主にベーン工の内岸を通る。またベーン工の直外岸、河岸から20cmの位置に生じる峰は今回のものが最も高く、一部初期河床よりも盛り上がっている。このベーン工の内岸側に生じる“みお筋”は、ベーン工の効率性の高さに伴い、明確に形成されることが考えられる。また外岸沿いの河床の洗掘量は、ケース4と比べて十分軽減されており平均洗掘深は3cm程度に抑えられている。

図3.2.24, 3.2.25及び写真3.2.10に示されるように湾曲部外岸の洗掘は、ケース4に比べて全体的に軽減されている。またベーン工周辺は円柱付台形型ベーン工を使用しているため縦断的に一様に洗掘されている。したがって、各ベーン工は縦断的に一様に機能しているはずであるが、外岸の河床高は縦断的に変化している。これは、1列に30基設置したためベーン工の縦断間隔が狭くなり、前のベーン工によって引き起こされた流れ(二次流)が流下と共に減衰せず、後ろのベーン工に悪影響を与えたためである(2.1.2参照)と考えることができる。

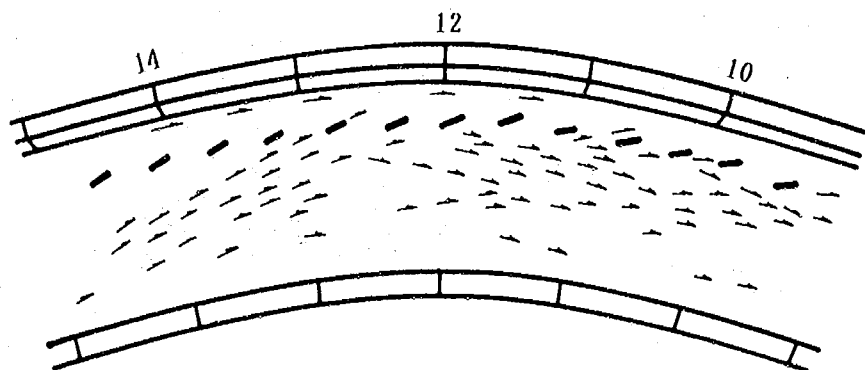


図3.2.21 表面流向 (ケース5)

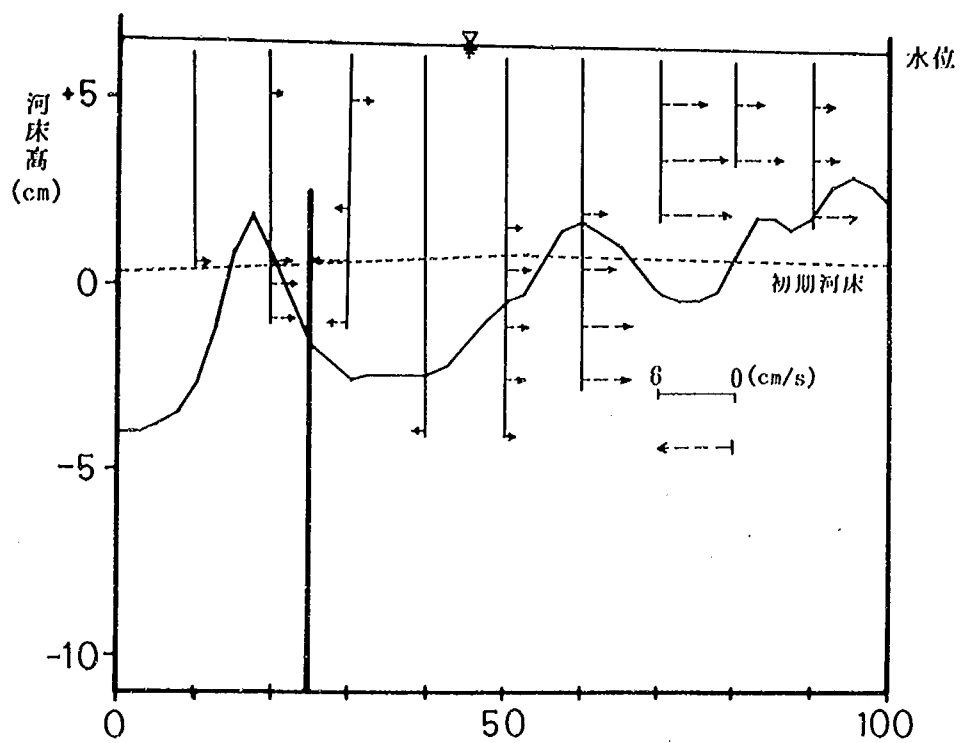


図 3. 2.22 断面12における河床高と二次流の分布 (ケース 5)

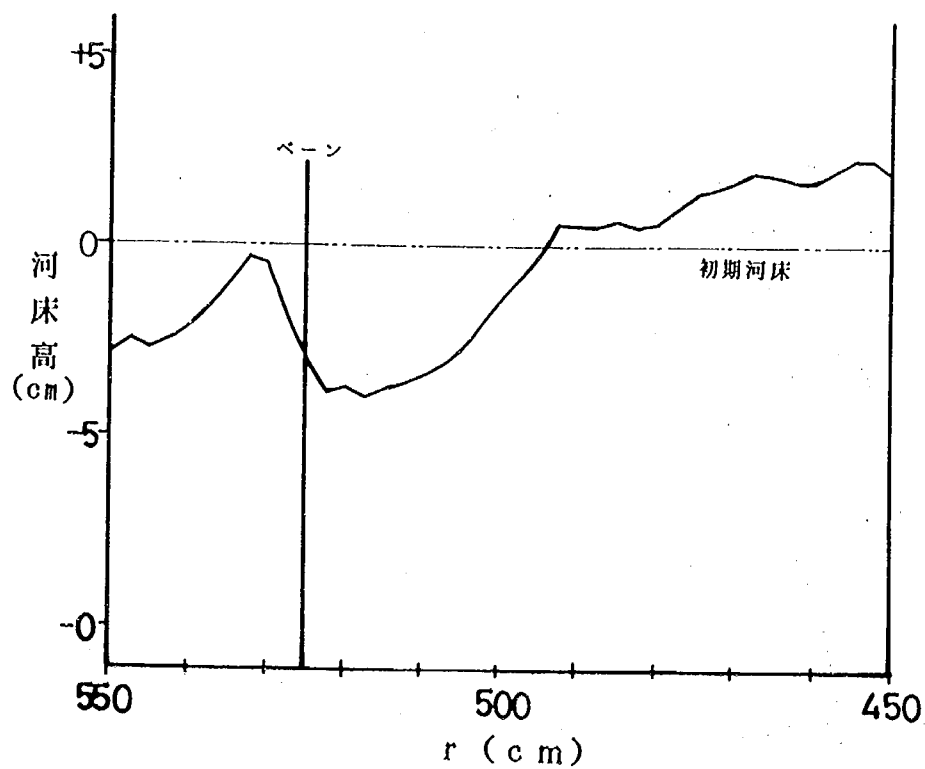


図 3. 2.23 平均横断河床形状 (ケース 5)

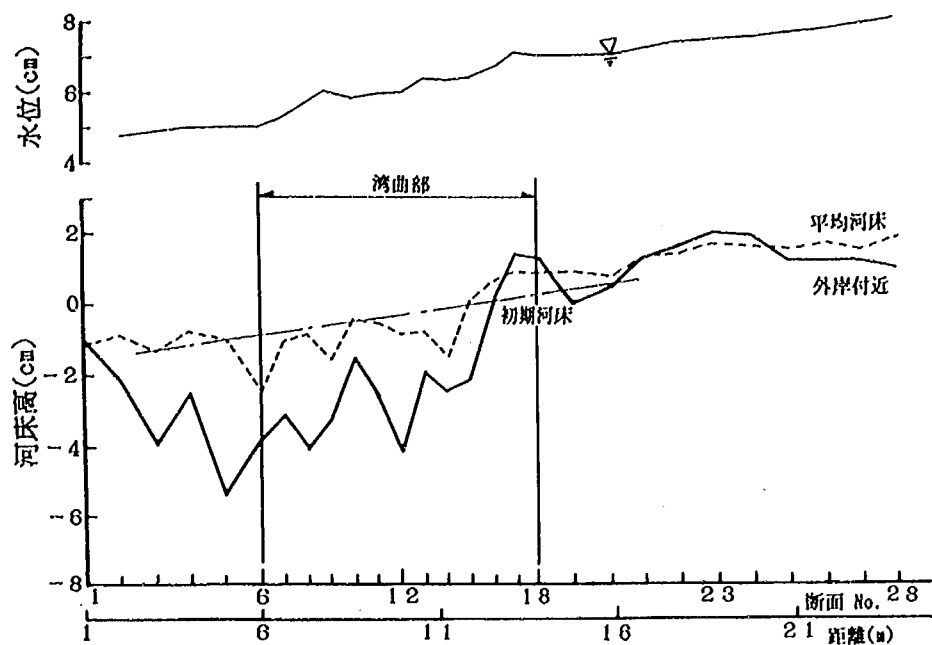


図 3.2.24 水位・河床高の縦断変化(ケース 5)

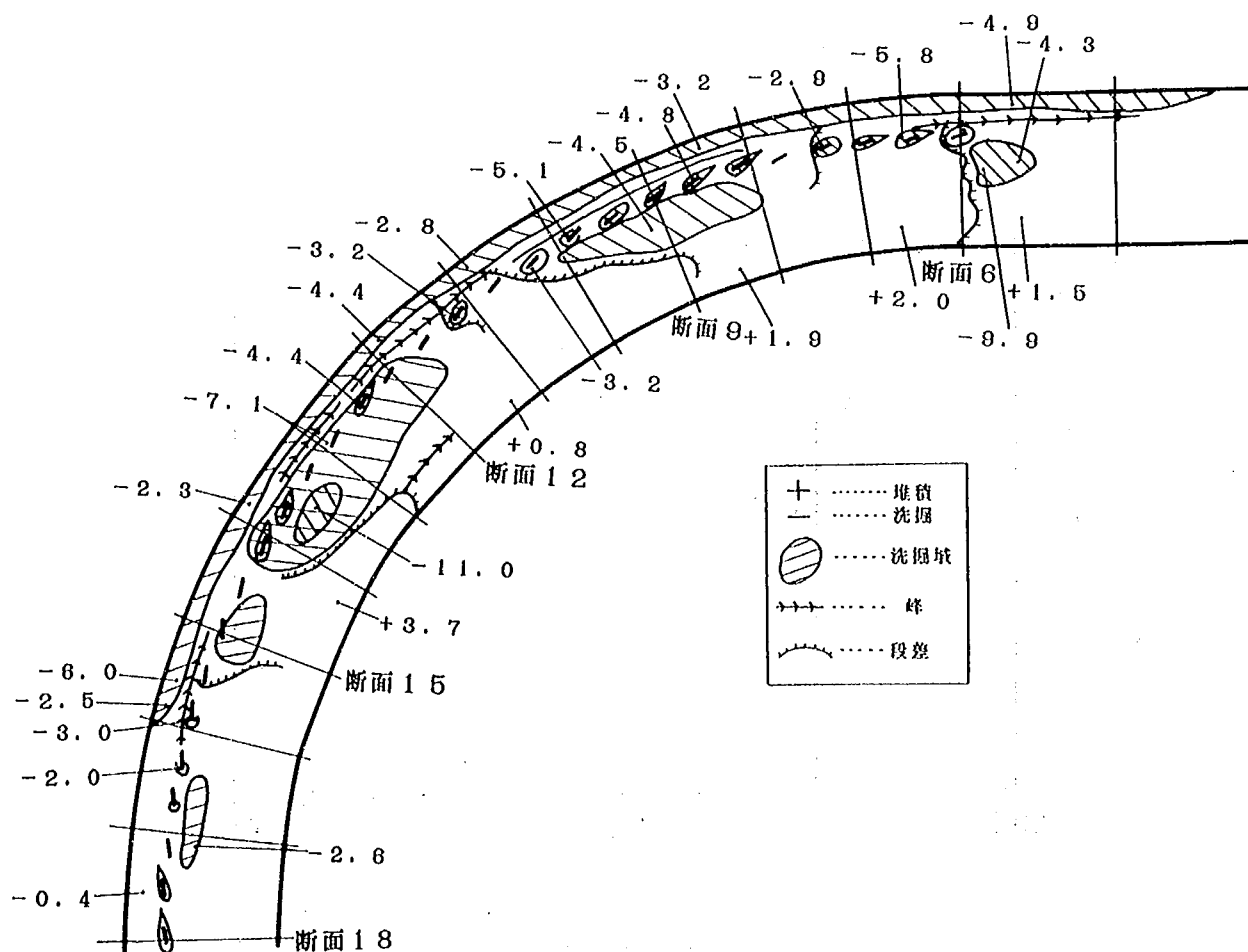


図 3.2.25 河床変動状況(スケッチ)



写真 3.2.9 表面流況（ケース 5）

実 験 名	実 験 5
ベーン工の形状	円柱付台形型ベーン工
ベーン工の設置計画	1列に30個設置

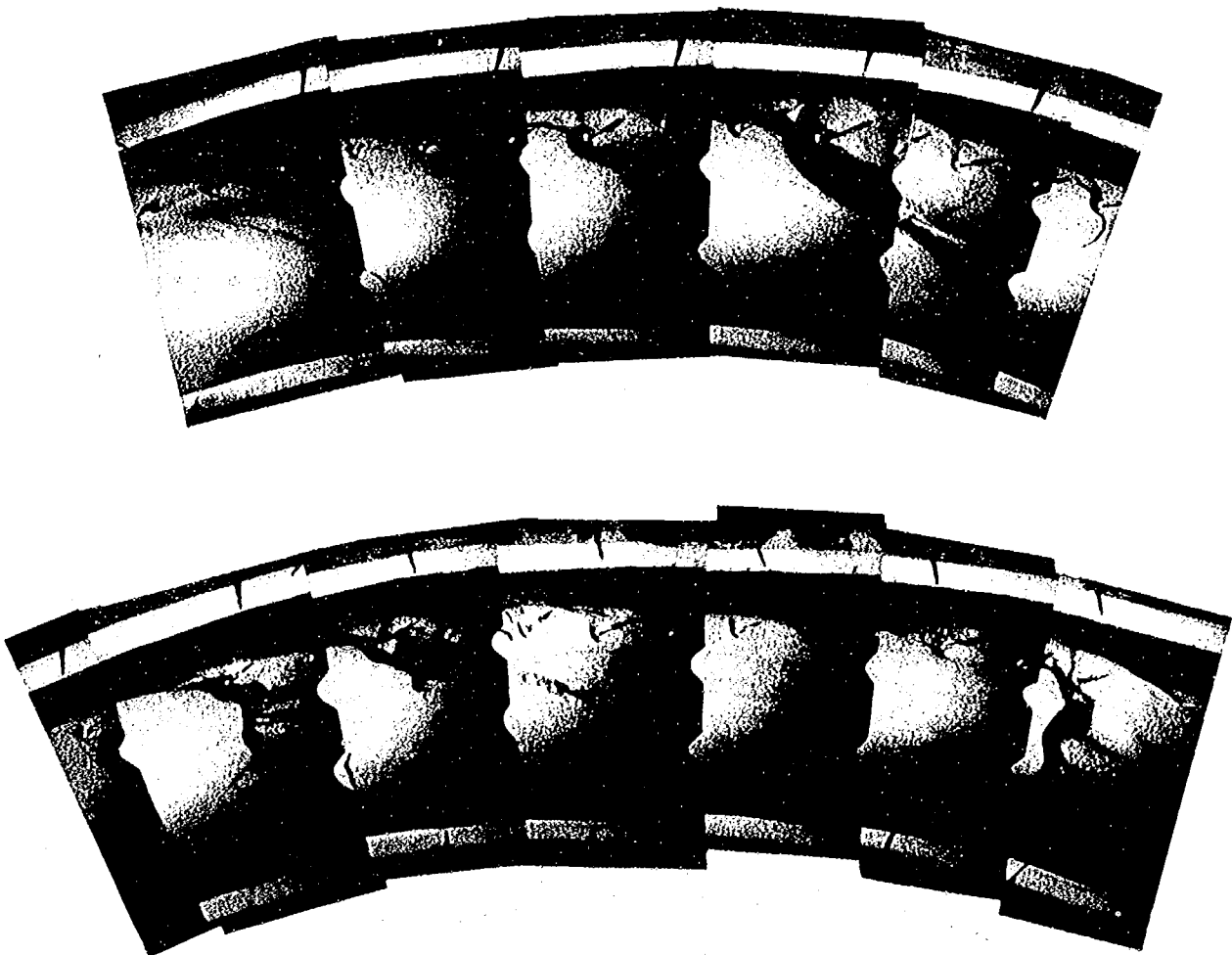


写真 3.2.10 河床変動状況

(2) ケース 6 (2 列30基)

ベーン工30基を 2 列に並列として配置し、実験を行った。

(a) 流れについて

図 3.2.26 及び写真 3.2.11 に示されるように、ベーン工の“水はね”はベーン工の上部辺りでは余り起こらず、ベーン工の直前面では、表面流はそのまま外岸へ向かうことが多い。水はねはベーン工から後ろのベーン工との中間辺りまたは $2/3$ 程度の位置までよく起こっている。したがってケース 5 における縦断間隔では、前のベーン工による流れが後ろのベーン工に影響を及ぼすことがわかる。図 3.2.6 (b) に示されるように、外岸側のベーン工よりさらに外岸側の区間では二次流はよく抑制されている。また 2 つのベーン工の周りでは右回転の二次流ができています。横断方向には、この程度間が離れていれば、ベーン工同士の干渉は防げるようである。そしてベーン工の内岸側では、遠心力による二次流のセルが確認できる。

(b) 河床高について

図 3.2.27, 3.2.28 に示されるように、ベーン工の周辺の洗掘量は、内岸側のベーン工の方が外岸側のベーン工よりも大きい。このようにベーン工を設置することで横断方向の河床変動をより効率的に抑制されることがわかる。また外岸の洗掘深は、ベーン工の平均的な横断位置が内岸よりになったにも関わらず、若干軽減されており、各ベーン工がケース 5 と比べてより効率的に機能していることがわかる。

図 3.2.29 に示されるように湾曲部外岸の河床は、湾曲中央部ではかなり洗掘が軽減されているが、ベーン工がなくなる湾曲部末端においては、主流が加速されるために洗掘が著しくなっている。したがって、ベーン工を湾曲部に設置するにあたっては、その縦断的な位置の決定に十分な検討が必要である。また湾曲部末端の洗掘を防止するためには、ベーン工に限らず他の工法を用いても良いと思われる。

図 3.2.30 及び写真 3.2.12 に示されるように、ベーン工周辺の河床は全体的に一様に洗掘されている。局所洗掘はベーン工の内岸に生じており、この付近に“みお筋”が形成されている。しかしベーン工同士の間及び外岸付近にも同程度の洗掘が生じているため、主流は分散されるように流れる。

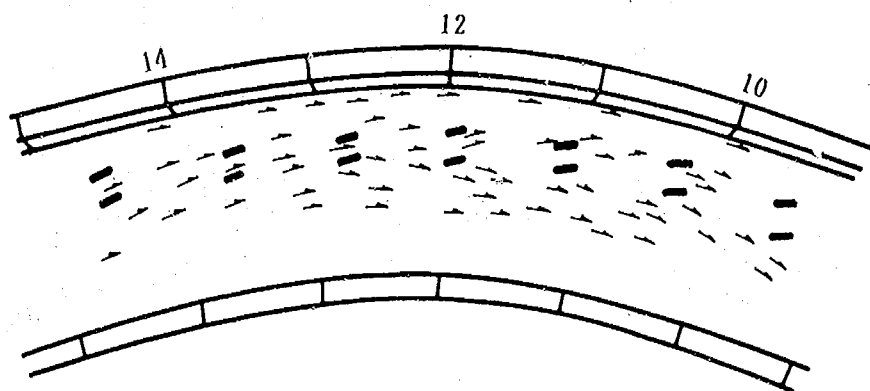


図 3.2.26 表面流向 (ケース 6)

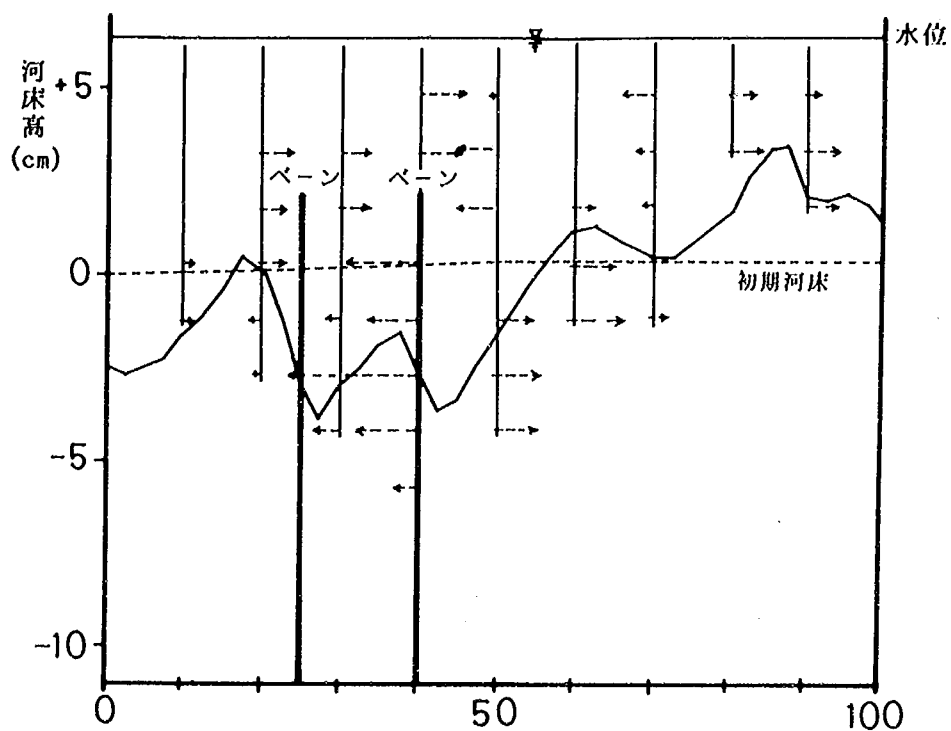


図 3.2.27 断面12における河床高と二次流の分布 (ケース 6)

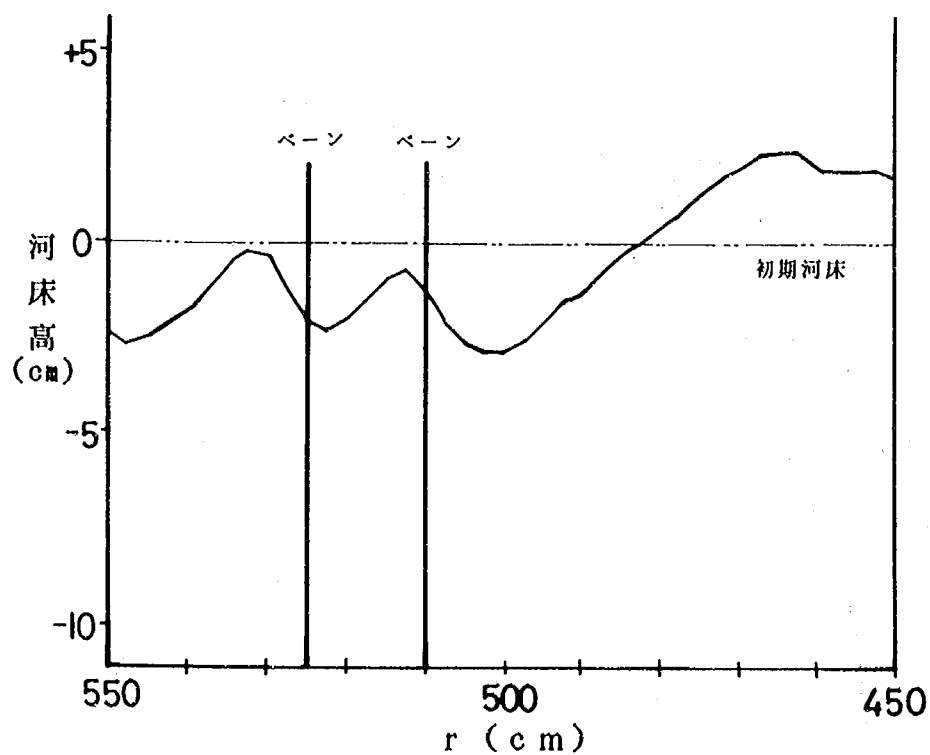


図 3.2.28 平均横断河床形状 (ケース 6)

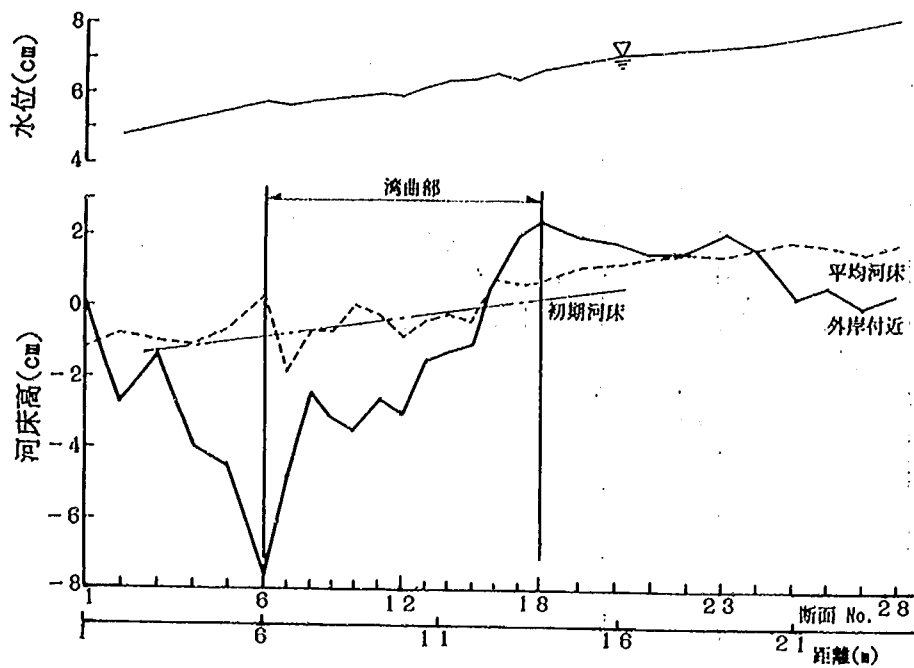


図 3.2.29 水位・河床高の縦断変化 (ケース 6)

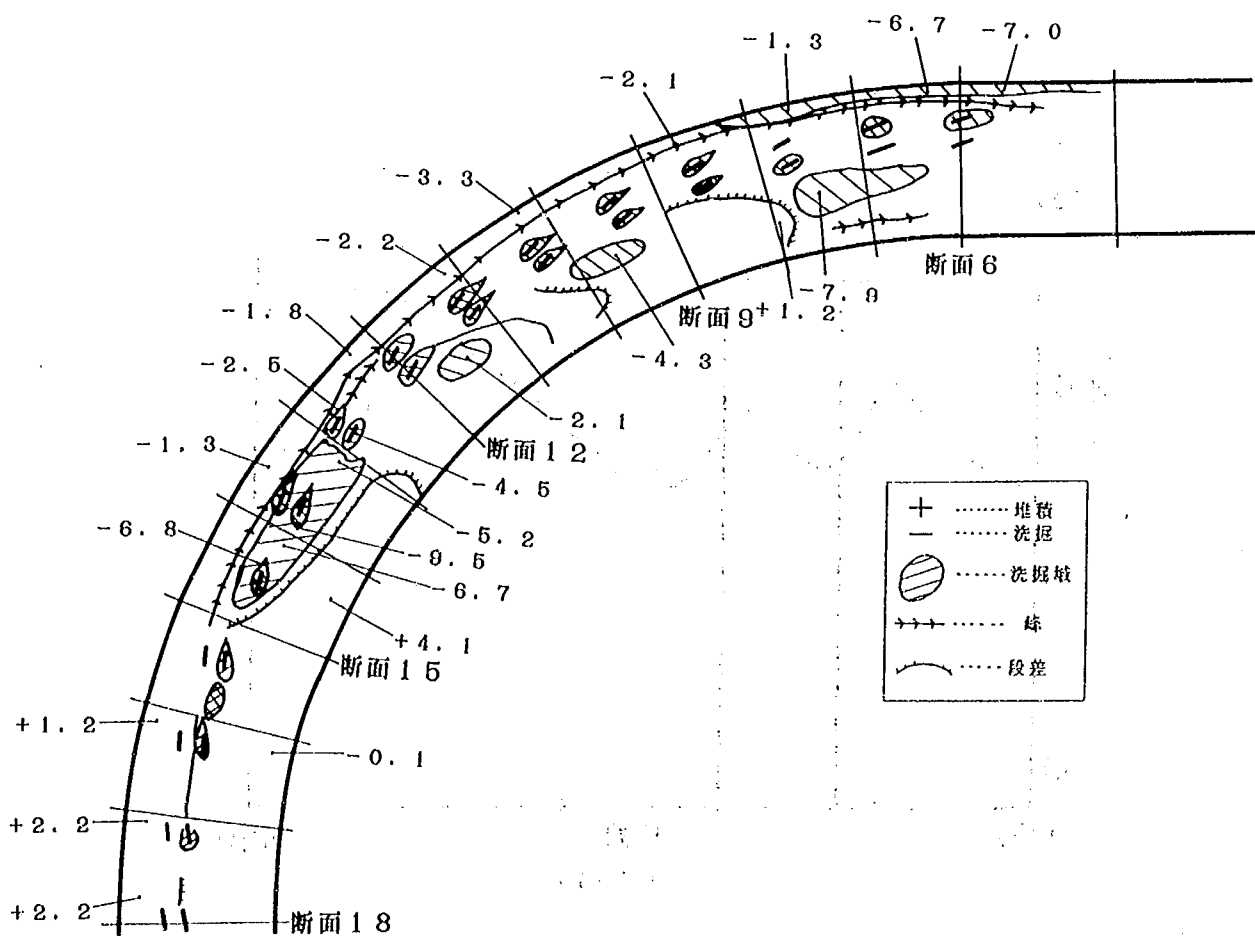


図 3.2.30 河床変動状況 (スケッチ)



写真3.2.11 表面流況（ケース6）

実験名	実験 6
ベーン工の形状	門柱付台形型ベーン工
ベーン工の設置計画	2列に30個設置

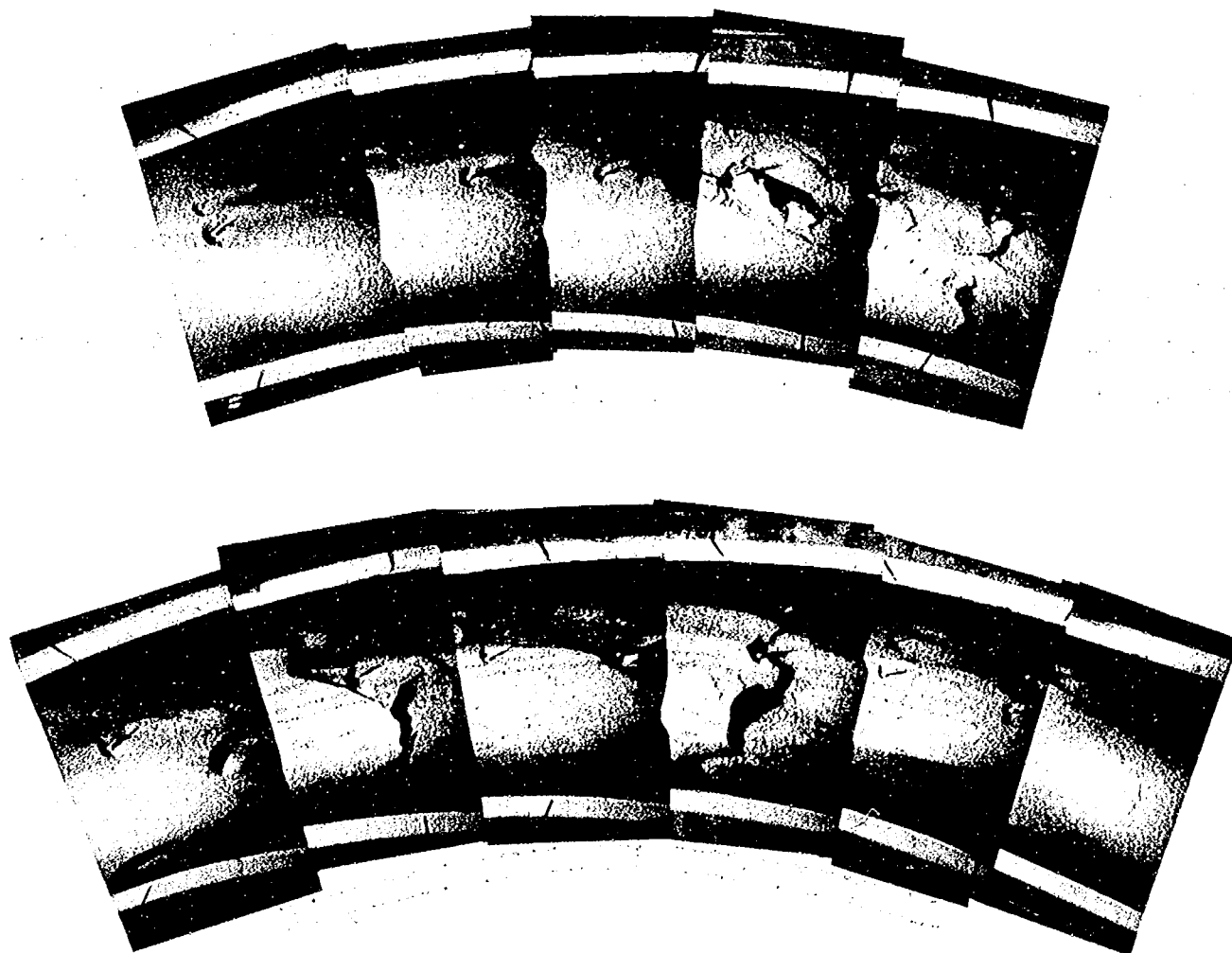


写真3.2.12 河床変動状況

(3) ケース7 (30基を千鳥型に配置)

ベーン工の平均的な横断設置位置を1列の場合と同様にし、ベーン工の縦断間隔を15基の場合と同じにするためにベーン工を千鳥状に設置して実験を行った。

(a) 流れについて

図3.2.31及び写真3.2.13に示されるように、“水はね”は主流のあたる断面13~12辺りで顕著にみられる。そして表面流は外岸へ入り込むことはなく、千鳥状に配置された内岸側か外岸側のどちらかのベーン工によって確実にねられている。また主流は、流路の中央部に集中しており、ベーン工の設置位置に沿うように形成された“みお筋”にそって流れる。したがって、ベーン工によって形成される二次流による流れ場の分離は、このケースが最も著しい。

図3.2.32に示すように、ベーン工周辺において二次流が抑制されている。ベーン工近くでの水面付近では、内岸向きの流れが確認され、これが表面流の“水はね”として視認される。

(b) 河床高について

図3.2.33に示すように、二次流が抑制されるために外岸側のベーン工よりも外側の区域ではほとんど洗掘されていない。外岸付近の洗掘量は本実験の中でもっとも少なく平均で1.5 cm程度となっており、ベーン工が湾曲部外岸の洗掘に対して、最も効率的に機能していることがわかる。また外岸付近よりも河道の中央部の洗掘の方が大きくなっており、ベーン工の内岸側に“みお筋”が形成されていることがわかる。そして、これに伴い、内岸の堆積範囲も著しく後退している。

図3.2.34に示すように、湾曲部の外岸沿いの河床高は、砂れき堆によって生じた1ヶ所を除き、変動が少なくなっており、また洗掘量自体も少ない。したがって、ベーン工が縦断方向に一様にかつ効率的に機能したことがわかる。ただし、湾曲部末端から直線部にかけてやや洗掘が生じている。

図3.2.35及び写真3.2.14に示されるように、縦断的に広い範囲で外岸の洗掘が軽減されている。また縦断的に広い範囲でベーン工内岸側では、“みお筋”がはっきり現れている。

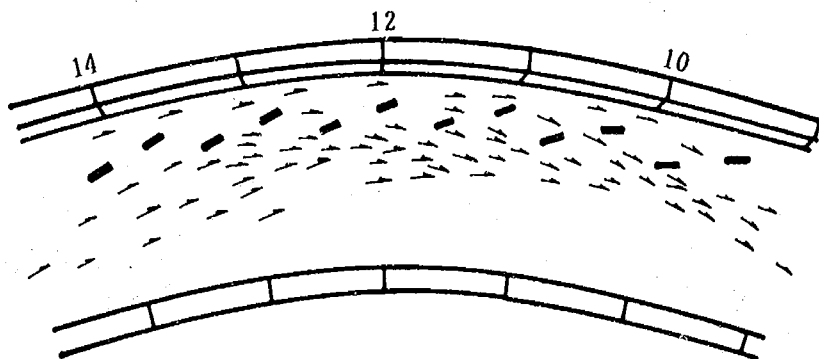


図3.2.31 表面流向 (ケース7)

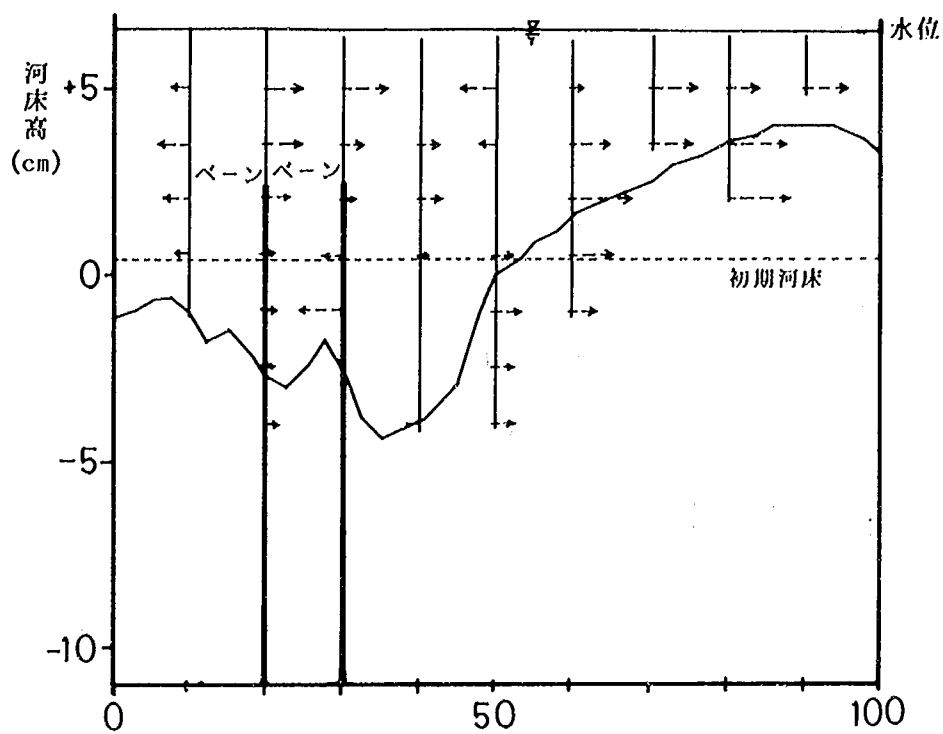


図 3. 2.32 断面12における河床高と二次流の分布 (ケース 7)

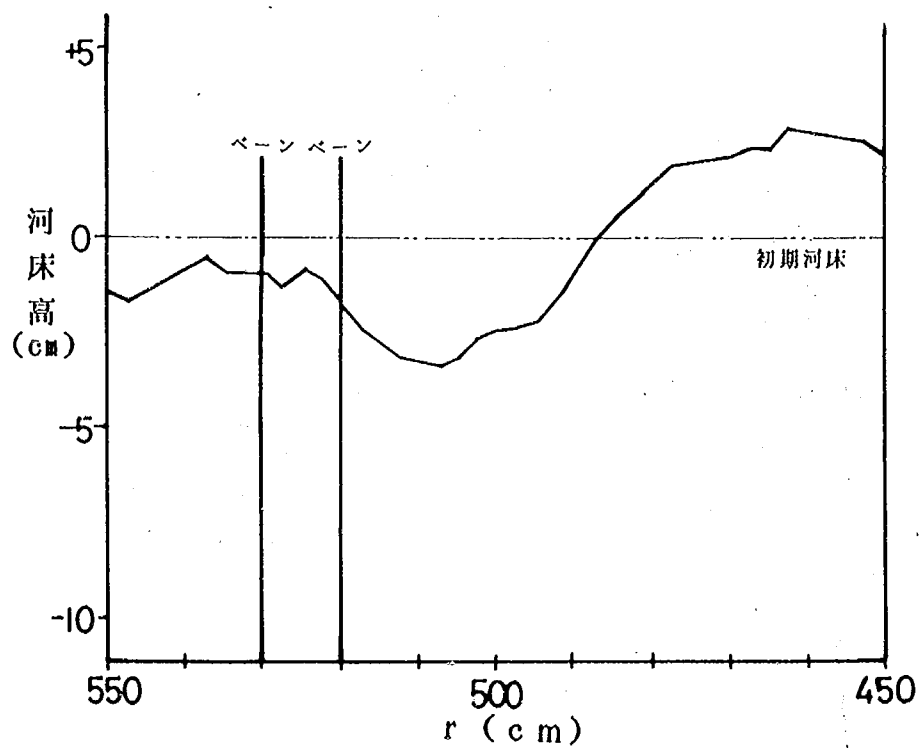


図 3. 2.33 平均横断河床形状 (ケース 7)

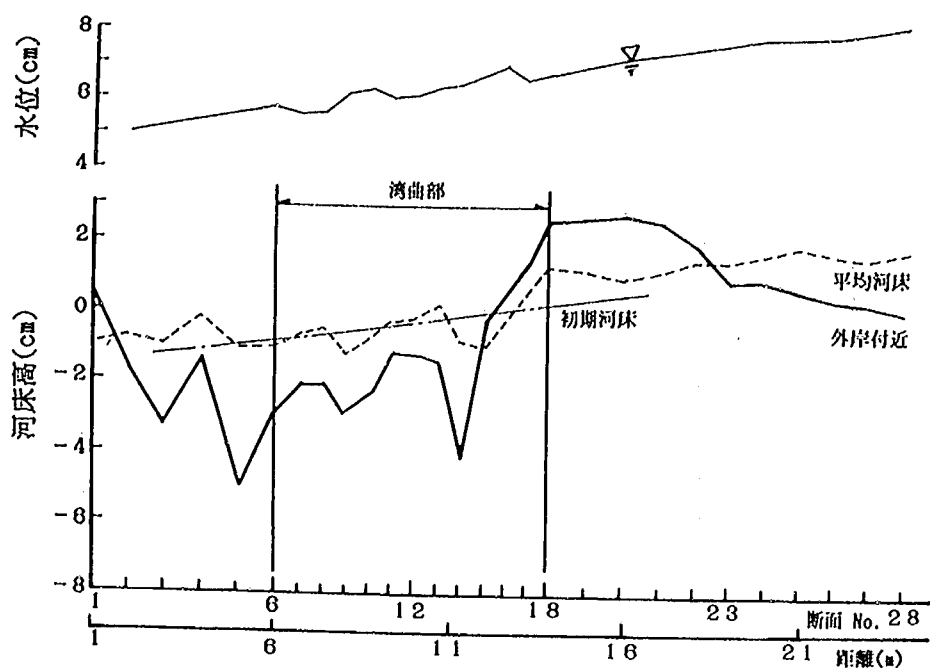


図 3. 2.34 水位・河床高の縦断変化 (ケース 7)

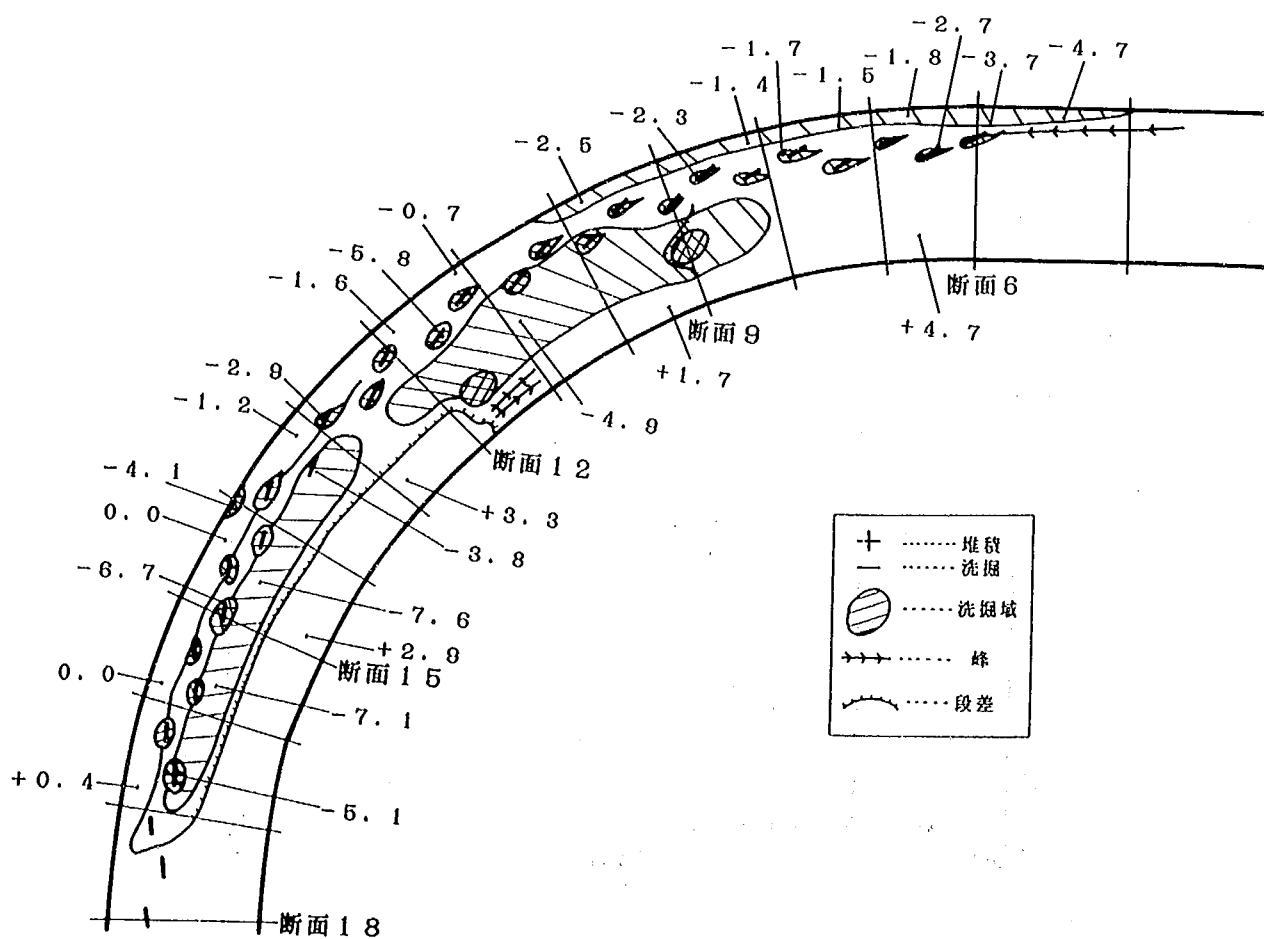


図 3. 2.35 河床変動状況 (スケッチ)

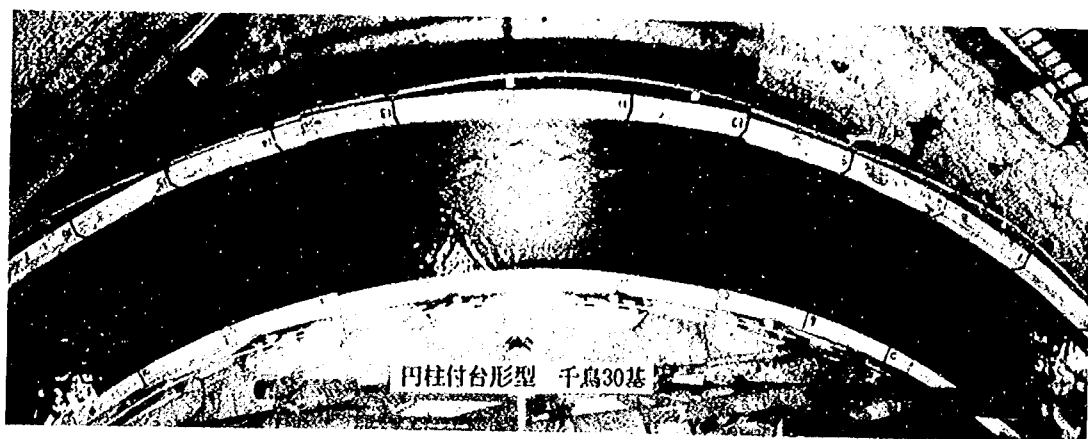


写真 3. 2. 13 表面流況（ケース 7）

実 験 名	実 験 7
ベーン工の形状	円柱付台形型ベーン工
ベーン工の設置計画	千鳥状に 30 個設置

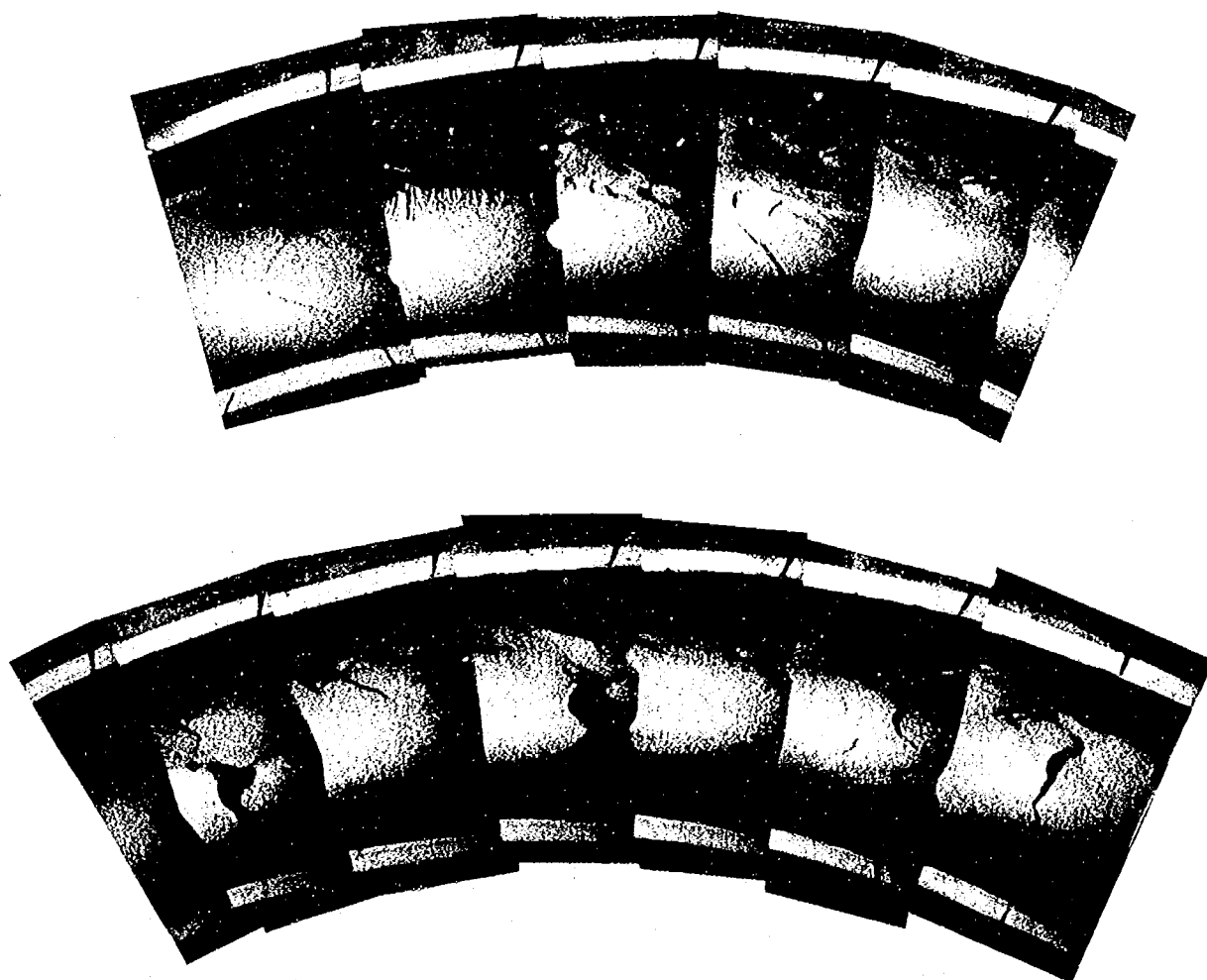


写真 3. 2. 14 河床変動状況

3.2.3 実際の施工に関して考慮すべき事項

本節では、ベーン工を実際に施工するにあたって、検討しておくべき課題について実験を行った。1つ目の課題は、湾曲部末端からその下流にかけて生じる外岸の洗掘の対策(ケース8)であり、2つ目の課題は、洗掘が生じている区間へベーン工を設置した場合の埋め戻し効果の把握(ケース9)である。

(1) ケース8(湾曲部末端に生じる洗掘の対策)

一連の実験結果から示されるように、湾曲部外岸の末端部では、湾曲区間のベーン工の有無に関わらずに、洗掘が生じる。この洗掘は、ベーン工を設置しない場合には湾曲部に生じる洗掘の方が大きいと思われるが、ベーン工設置時には末端部の洗掘が湾曲部の洗掘と比べて、同程度かあるいはそれ以上のものとなるため、対策を考慮しておく必要があると考えられる。本ケースでは末端部の洗掘の始まる断面6を中心として、長さ1m、幅10cmの根固工を碎石により設置した。なお、ベーン工の設置数は15とし、千鳥状に配置してある。また、表面流況と河床高の経時的な変化についても検討を行った。

(a) 流れについて

図3.2.26(a)(b)(c)及び写真3.2.15(a)(b)(c)に通水開始1時間後、7時間後、13(16)時間後の流況を示す。これより、河床変動がそれほど生じていない1時間後では流水はそれほど集中しては流れず、ベーン工の内岸を中心として流れている。また7時間後では、ベーン工によって“みお筋”が固定され、流水がベーン工の内岸側を集中して流れる様子が最も明確に現れている。13(16)時間後では、河道の平面形状に起因する外岸の洗掘と内岸の堆積が発達するために、流れが全体的に外岸に寄るようになってくる。そのため流れは、流水の集中が激しい湾曲中央部では、ベーン工の内岸だけでなく外岸付近も若干流れるようになる。

図3.2.37に示されるように、ベーン工周辺では表面流は内岸を向き、底面付近では外岸を向いている。また、外岸付近では二次流はほとんど見られない。

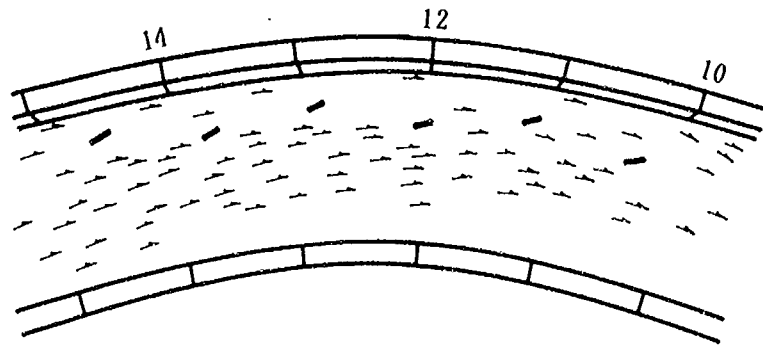
(b) 河床高について

図3.2.38は断面13～9の平均横断河床形状の時間変化を、図3.2.39は根固工を設置した断面6の横断河床形状の時間変化を示している。これより、まずベーン工内岸付近の河床の洗掘が発達し、その次に内岸の堆積と外岸の洗掘が生じていることが分かる。また、内岸の堆積は時間と共に増大しているが、外岸の洗掘はかなり時間が経つまでそれほど変化せず、8時間後位から洗掘が始まり、以後急速に増大している。これは、湾曲部下流端の外岸に設置された根固工によって、外岸付近の下流端での流砂に対する境界条件が異なったためであり、根固工の前面の洗掘が発達して根固工が崩落して流砂が根固工を回り込んで流れやすくなってから、外岸の洗掘が生じはじめたと考えられる。また、外岸の洗掘深は3cm程度であり、これは、根固工と千鳥状に配置されたベーン工の相乗効果によって洗掘が軽減されたと考えることができる。

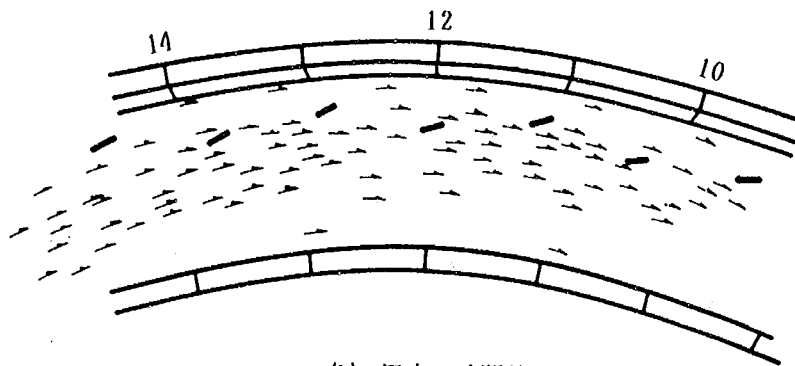
図3.2.40をみれば、外岸付近の河床変動は14から18時間後のあいだで、著しく生じていることが分かる。しかし、根固めを施した断面6では初期河床高を保つため、湾曲部末端では河岸付近の洗掘が抑制され、他のケースと比べて河床高は2～3cm高くなっている。また、そのため外岸付近の平均洗掘深もある程度、抑制されている。

河床変動状況は図3.2.41及び写真3.2.16に示される通りであり、上流の断面18～16の外岸では堆積が生

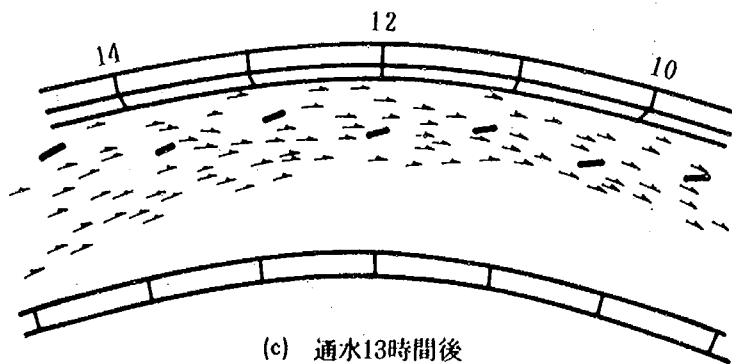
じており，断面15～11で内岸の堆積が見られる。また，ベーン工の内岸にみお筋が形成されているが，外岸沿いにも若干の洗掘がみられる。



(a) 通水1時間後



(b) 通水7時間後



(c) 通水13時間後

図3.2.36 表面流向（ケース8）

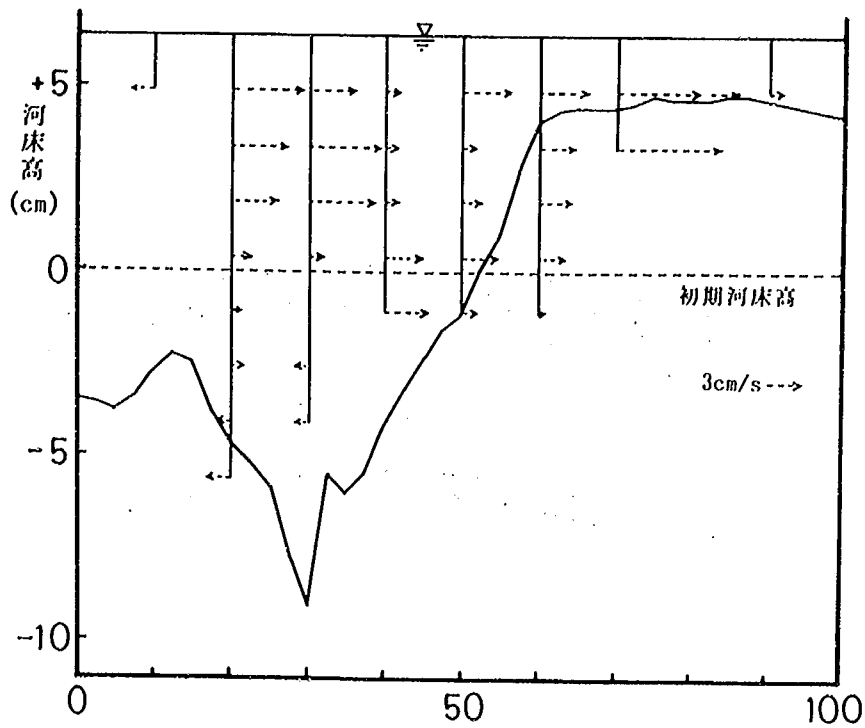


図 3.2.37 断面12における河床高と二次流の分布（ケース 8）

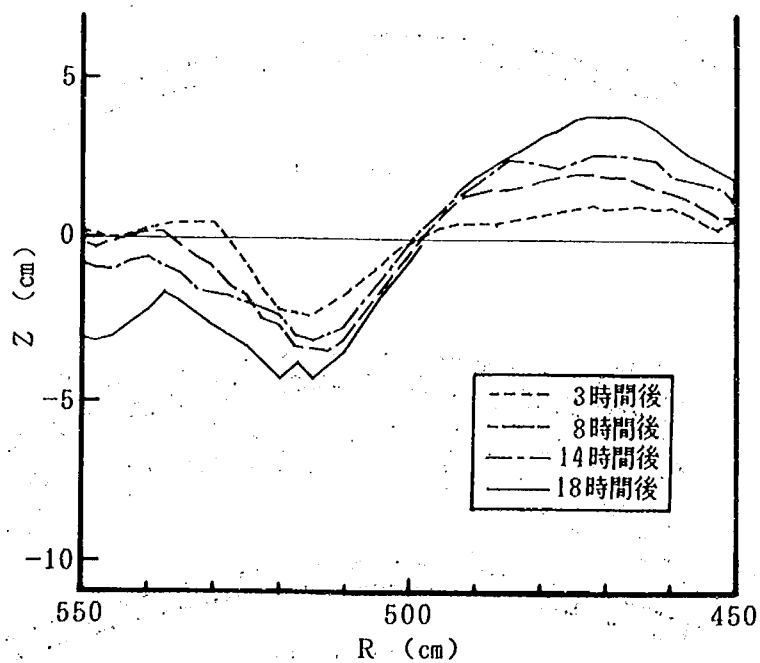


図 3.2.38 平均横断河床形状の時間変化（ケース 8）

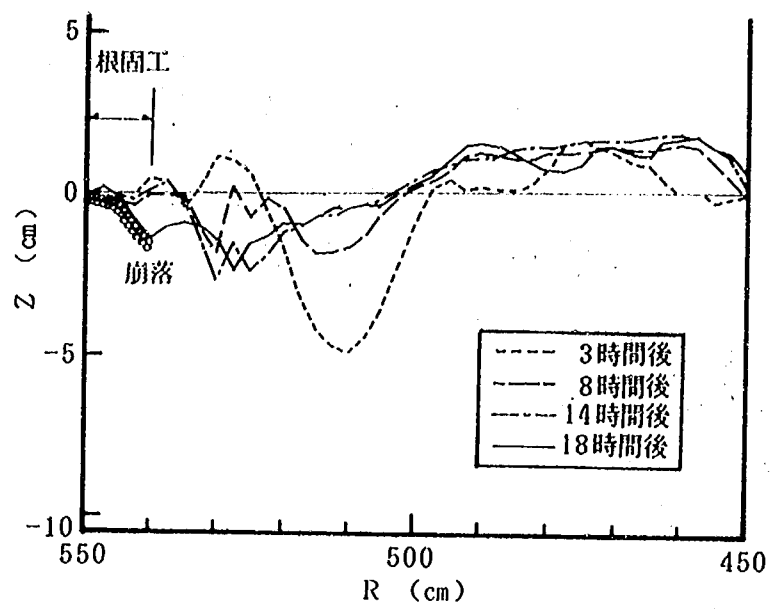


図 3.2.39 断面 6 の横断河床形状の時間変化 (ケース 8)

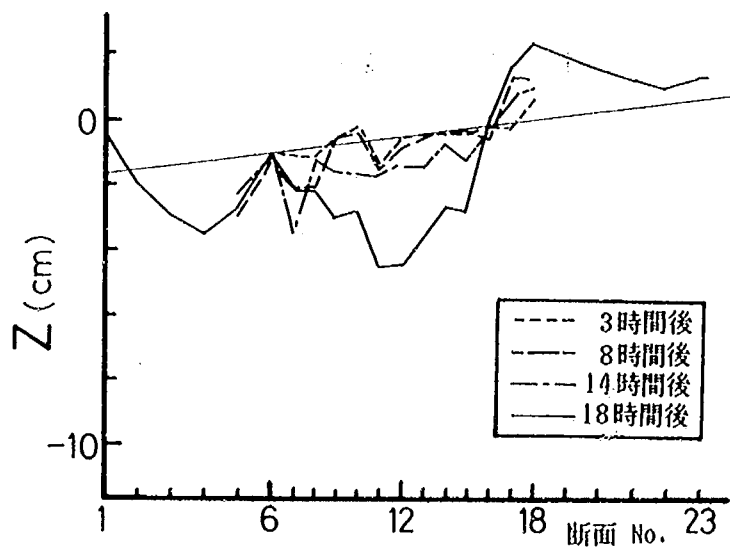


図 3.2.40 外岸付近の縦断河床形状の時間変化 (ケース 8)

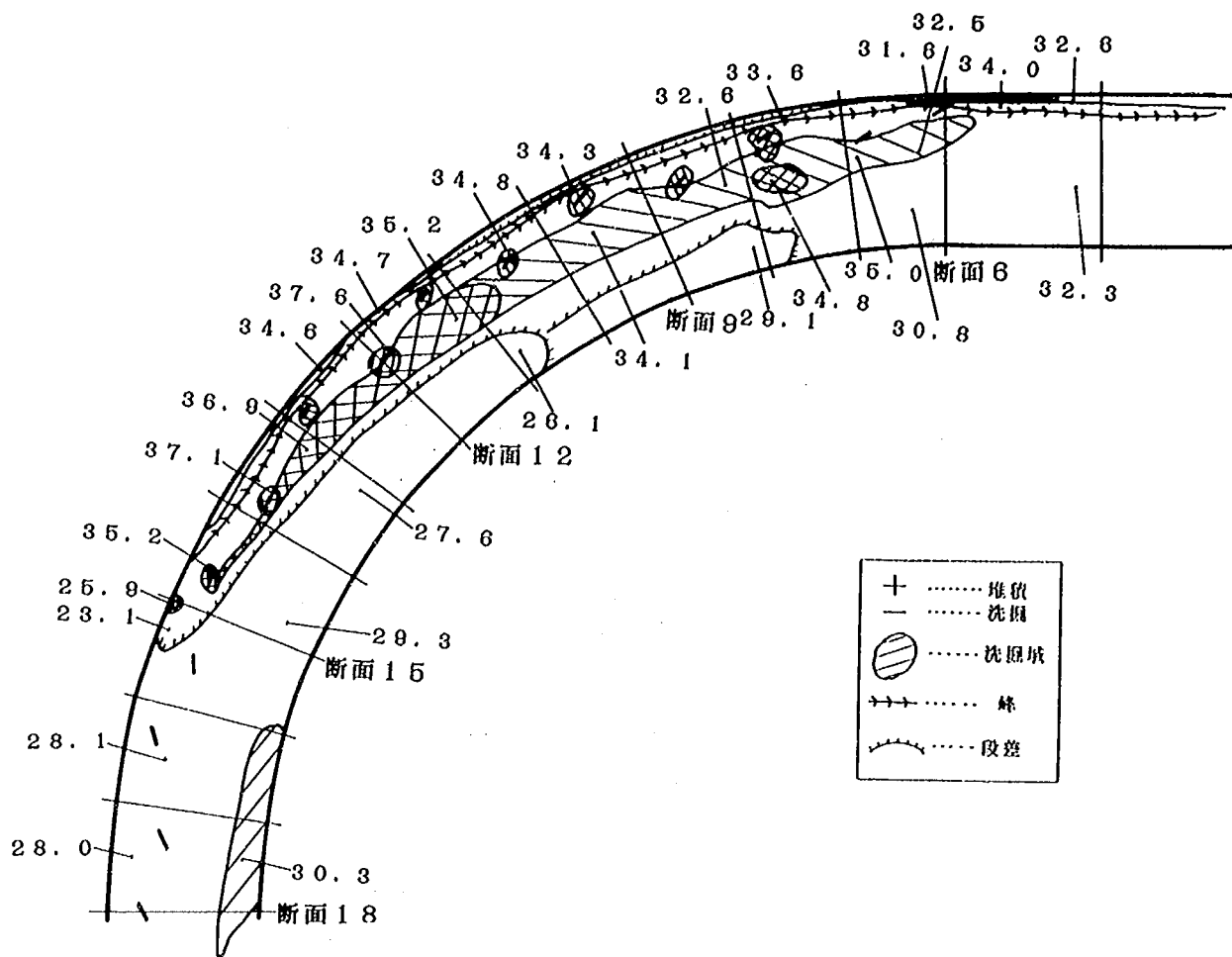
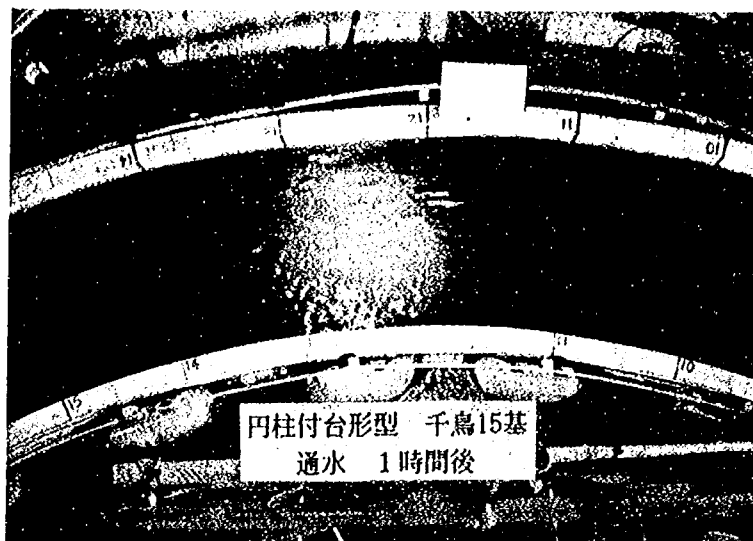
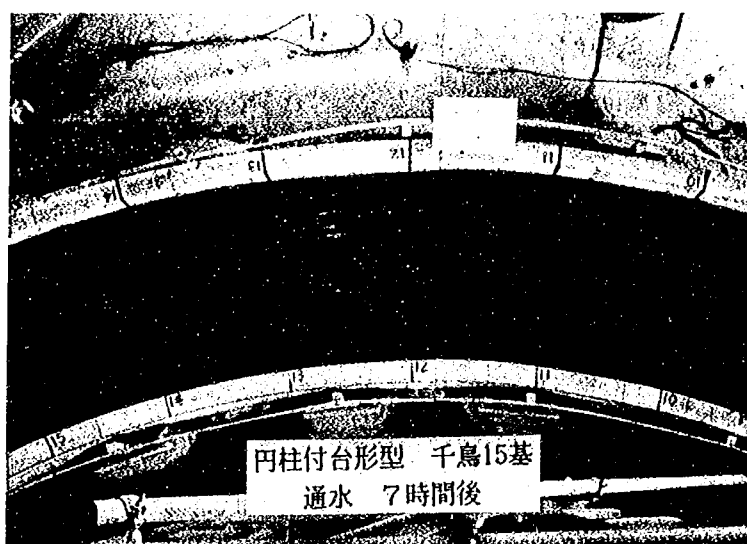


图 3.2.41 河床變動狀況



(a)



(b)



(c)

写真 3.2.15 表面流況

実 験 名	実 験 8
べ ー ン 工 の 形 状	円柱付台形型べーん工
べーん工の設置計画	千鳥状に15個設置

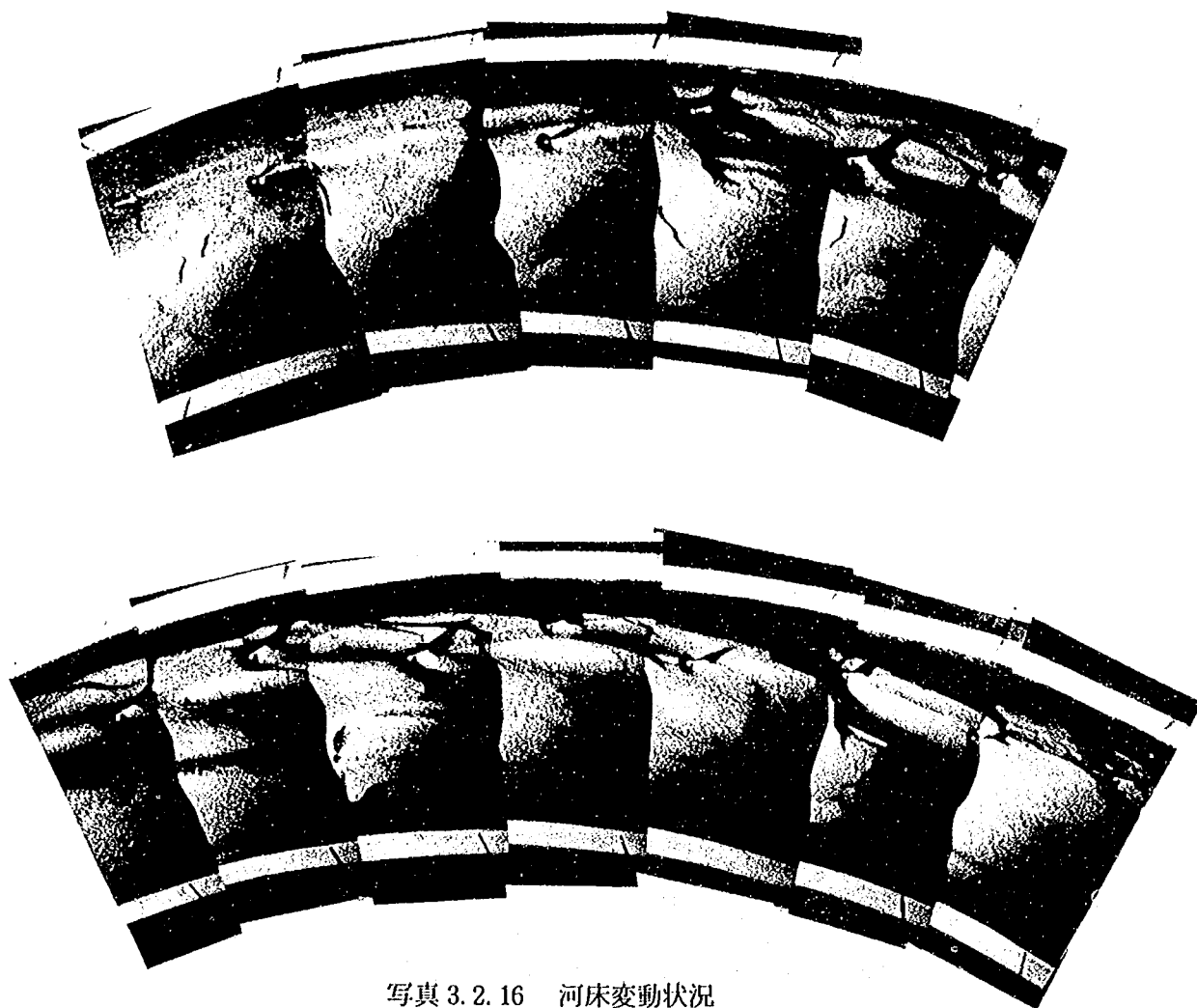


写真 3. 2. 16 河床変動状況

(2) ケース 9 (埋め戻し効果の検討)

ベーン工を局所洗掘対策として施工する際に、洗掘箇所の埋め戻しをあらかじめ行う場合についてはケース 7 が対応する。しかし大河川などでは洗掘の生じている領域や洗掘深が大きく、経済的な問題などから、あらかじめ埋め戻しを行っておくことは困難であると考えられる。このような場合にはむしろ、ベーン工を設置することによって内岸の土砂を外岸に輸送して、“洗掘の埋め戻し”を行わせることや外岸に土砂を堆積し“みお筋を固定”させたりすることが考えられる。したがって、ベーン工による洗掘の埋め戻し効果やその速さについても検討しておく必要がある。本ケースでは、最も効果のあったケース 7 と同じ条件でベーン工を設置し、初期河床をケース 1 (ベーン工なし) の河床形状とし、36 時間通水を行い洗掘の埋め戻し過程を調べた。

図 3.2.42 に平均横断河床形状の時間変化とケース 7 の河床形状を示す。これを見ると、18 時間後ではかなり埋め戻しが生じているが、36 時間後では 18 時間後と比べて外岸の河床高はそれほど変化していない。ただし、内岸の堆積は時間の経過と共に若干減少しており、それに伴って河道中央部の洗掘が埋め戻されている。観察結果によれば、ベーン工による湾曲部外岸の洗掘の埋め戻しは、上流からの給砂だけでなくベーン工内岸側の土砂がベーン工による二次流によってベーン工背後の外岸側に輸送されて、そこに峰が形成され、峰がある程度の高さに達するとそれが外岸に向かって崩れるという間欠的な現象の繰り返しによって行われる。初期状態においては外岸の洗掘深が大きく、外岸付近の流速が速くなり外岸での流砂量も多い。また、ベーン工の露出面積が大きくベーン工が効率的に作用する。このため、峰の形成と崩壊が頻繁に行われ比較的早く埋め戻しが進行する。しかし、ある程度埋め戻しが進み洗掘が軽減されてくると、外岸付近の流速が遅くなり流砂量が減少し、峰の発達が抑制されるようになり、ベーン工による埋め戻し速度は埋め戻し量の増加とすなわち時間の経過と共に減少していく。このため 36 時間後では外岸付近の河床高の時間変化が小さいと考えられるが、いずれ平衡状態に近づいて行くと考えられる。

図 3.2.43 に外岸付近の河床高の縦断変化の様子を示す。これを見ると、断面 6～10 にかけてはほぼ平衡状態に達しており、断面 10～13 で洗掘が顕著である。また断面 13～15 では堆積ぎみになっている。これより湾曲部外岸付近では縦断的な河床変動が若干生じており、このため湾曲中央部では洗掘が大きくなっており、湾曲部全体を通してみれば、かなり洗掘が軽減されたことがわかる。したがって、上流から土砂が供給されれば湾曲中央部の洗掘はいずれ抑制されることが考えられる。しかし、逆に上流からの土砂供給が少なくなる場合については、河床高の変化の速度が遅くなり平衡状態までは達しにくくなると考えられる。

以上のことから、既に洗掘が生じている場所へベーン工を設置すると、短時間の内にかなりの程度まで埋め戻しが可能であることが示された。

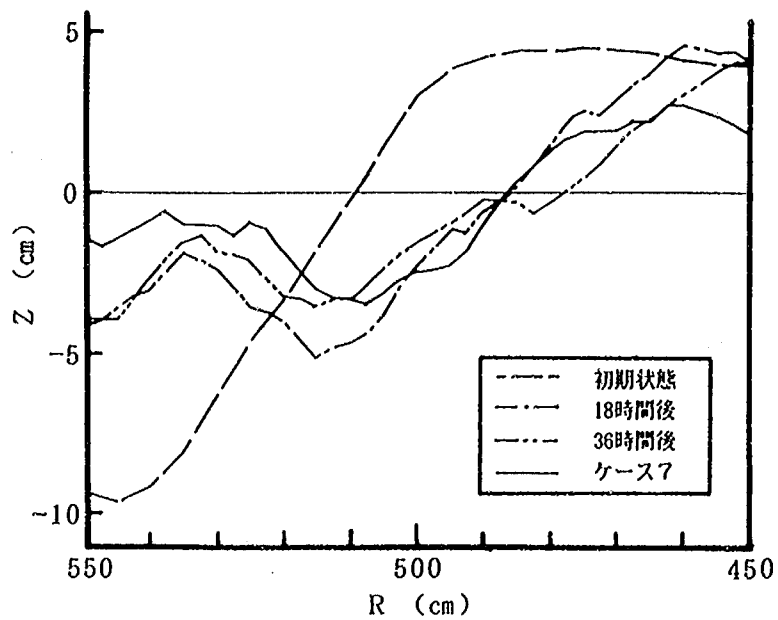


図 3. 2. 24 横断河床形状の時間変化

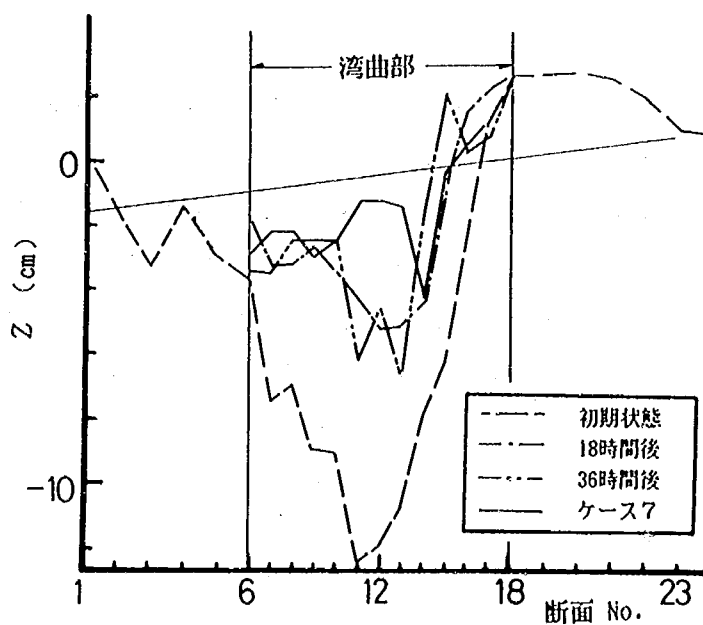
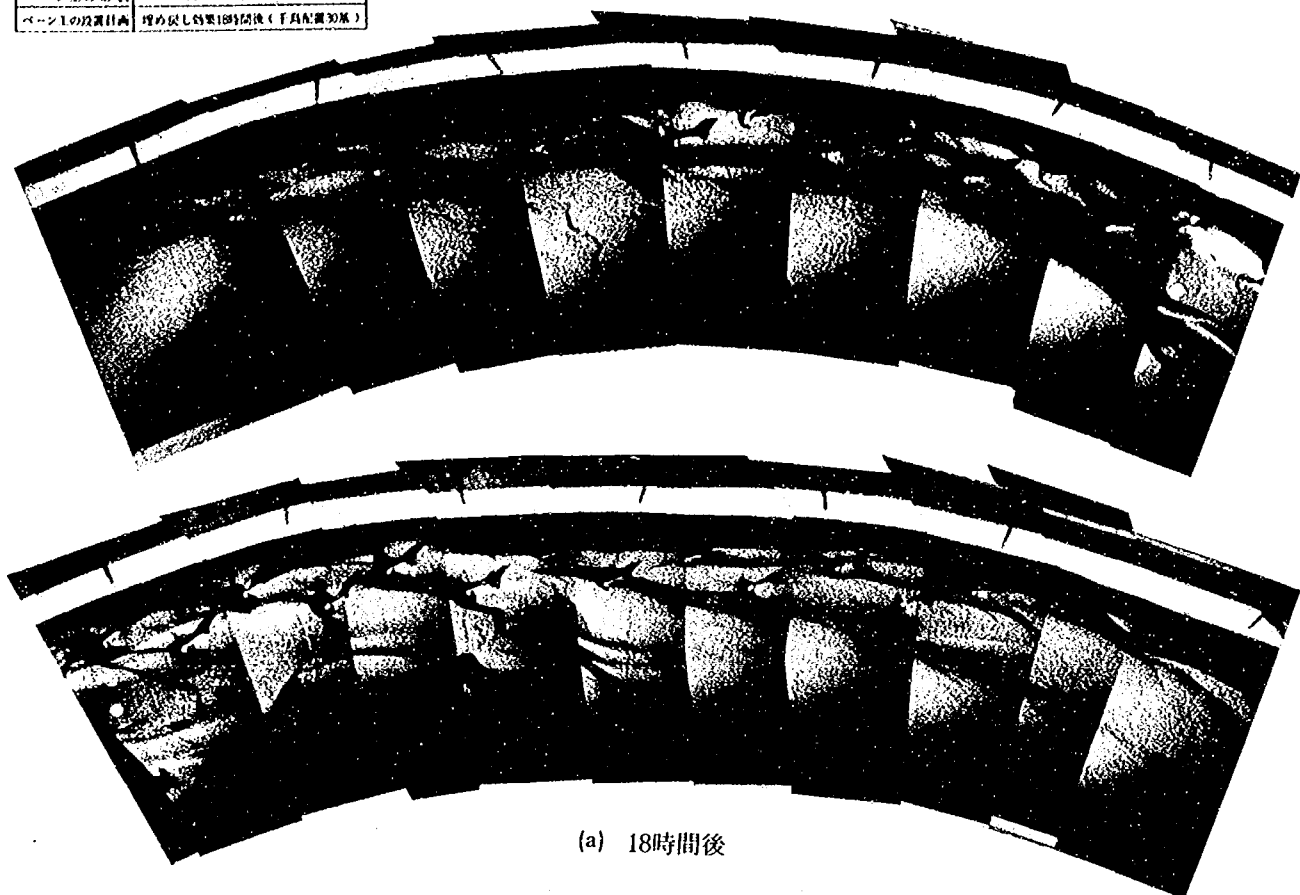


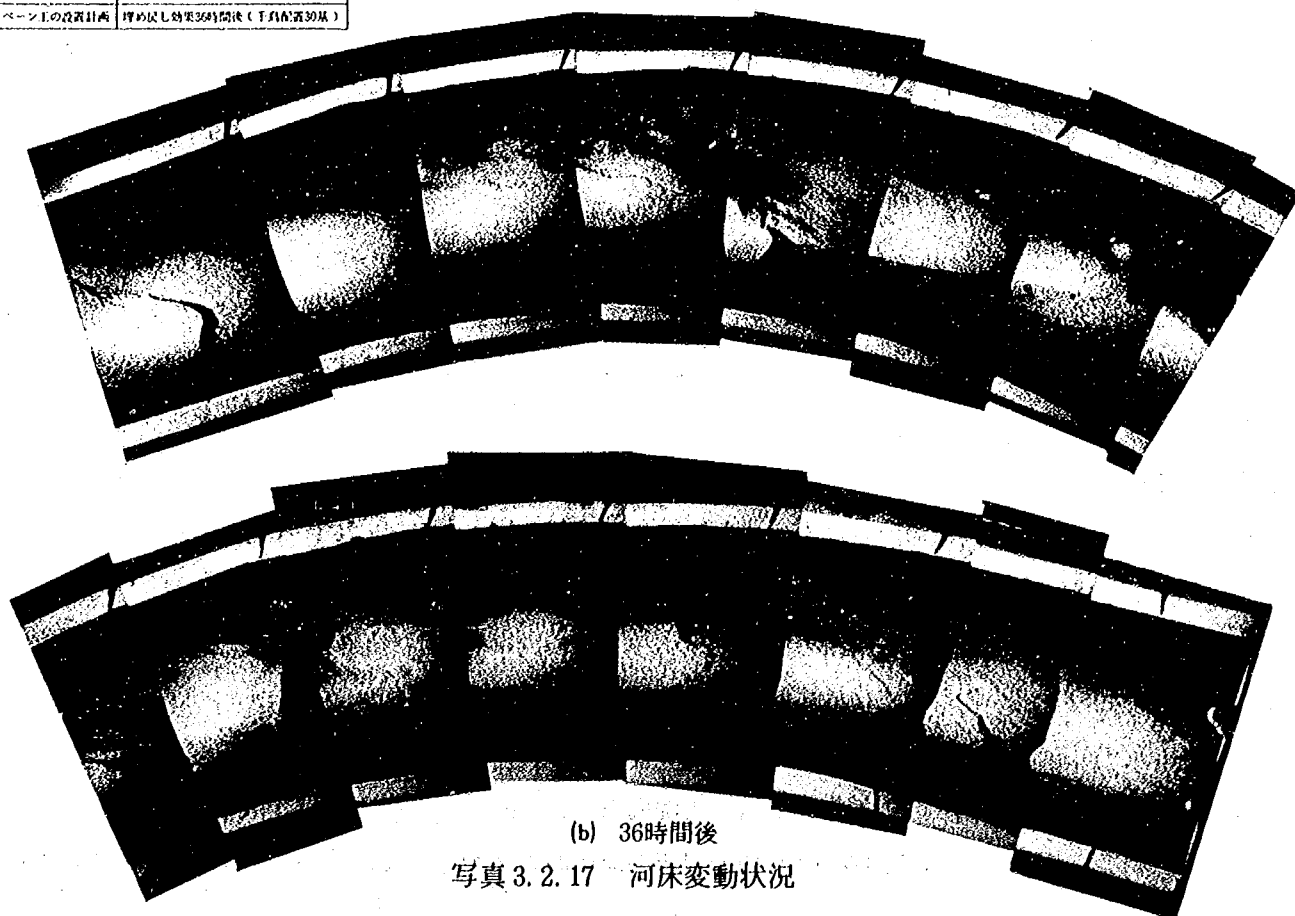
図 3. 2. 43 外岸付近の縦断河床形状の時間変化

実験名	実験
ベーン上の形状	四柱目台形状
ベーン上の設置計画	埋め戻し効果18時間後(千羽配量30基)



(a) 18時間後

実験名	実験
ベーン上の形状	四柱目台形状
ベーン上の設置計画	埋め戻し効果36時間後(千羽配量30基)



(b) 36時間後

写真 3. 2. 17 河床変動状況

3.3 検討結果

3.3.1 ベーン工の形状・形式に関する検討

ベーン工を設置しない場合に外岸の河床が著しく洗掘を受ける断面13～9の横断河床形状を縦断方向に平均化したものをケース1～4について図3.3.1に示す。これを見れば明らかなように、ベーン工を設置した場合、例えばアイオワ式でも設置しない時と比べて、洗掘深は約半減されていることがわかる。したがって、まずベーン工を設置するということが、湾曲部外岸の局所洗掘の軽減に有効であることがわかる。

また台形型は円柱のあり・なしに関わらず、アイオワ式と比べると、平均的にはベーン工の外岸の洗掘を更に1～1.5cm程度軽減されていることがわかる。これは、ベーン工の形状を台形型にし、底面付近のベーン工の揚力を増加させたためである。ただし、このようにベーン工の形状を台形型にせずに長方形のままで長さを長くすると、平均アスペクト比が小さくなるためベーン工の1基当たりの効率は、長さの増加ほどは上がらないので、ベーン工の形状の決定にあたってはこのようなことも検討する必要がある。また台形型の場合には上部に行くに従い長さが短くなるので、平水時においても2.1節で述べた長方形ほどは悪影響を及ぼさないと考える。したがって、ベーン工の幾何形状としては、長方形型よりも台形型の方が良い。

円柱の効果は、ケース4で述べたように外岸付近の河床高の縦断的な変動を抑制することに現れる。横断河床形状としては円柱なしと変わっていないが、図3.3.2に示すように台形型ベーン工では、縦断的に不安定となり河床変動が大きくなっているのに対し、円柱付ではこれが抑制され、その結果、最大洗掘深が小さくなっている。これは、ベーン工の前面に取り付けられた円柱によって、ベーン工周辺が一樣に洗掘されるために、ベーン工の露出面積すなわちベーン工の効果が縦断方向に一樣となり、効率的に機能したためである。したがって、ベーン工の前面に円柱を取り付けるなどの工夫を行うことによって、ベーン工周辺の洗掘を制御することが、重要であることがわかる。

以上の結果より、これらのベーン工の内では円柱付台形型ベーン工が最も優れていると判断された。

図3.3.2より、河道湾曲部の洗掘が生じる位置については、ベーン工の設置により洗掘が軽減されるが、湾曲部末端に生ずる洗掘については軽減されていない。したがって、実際の施工にあたっては、湾曲部の末端の処理を行う必要があり、ベーン工の設置範囲をさらに下流まで延長するか、根固めを施す等の対策を行う。根固めを行う場合については、ケース8の結果について3.3.3節で詳述する。

円柱付台形型ベーン工周辺の洗掘状況を図3.3.3及び写真3.3.1に示す。図3.3.3はベーン工周りの洗掘領域周辺の河床高との相対高のコンターを表しており、これを見るとベーン工周辺の洗掘状況はベーン工前面に取り付けられた円柱の周りに生じる洗掘とベーン工本体の内岸側に生じる堆積と外岸側に生じる洗掘によって表されることがわかる。ベーン工は翼と同様に流れ場を變形し、図3.3.4に示すように、ベーン工の前面で外岸側に流れ込もうとする河床の砂を一度ベーン工の内岸側に回り込ませてから外岸に向かって流下させる。また、ベーン工の極近傍では外岸側の土砂の一部がベーン工前面を回り込んでベーン工の内岸へ運ばれる。この両方の作用によって、ベーン工の両側で流送土砂の不均衡が生じて、局所的な河床変動が起こる。実験結果より、ベーン工の両側での相対的な堆積量と洗掘量はほぼ同程度である。また、図3.3.3に示すように、ベーン工の内岸側の高さはベーン工周りの洗掘領域周辺の河床高とほぼ同じであり、ベーン工外岸側の局所的な

最大洗掘深はベーン工の前面に生じる洗掘深の概ね2倍程度である。またこのベーン工前面に生じる洗掘は、渦流による砂の巻き上げによって特徴づけられ、その形状は円錐形を呈しており、また洗掘が進行すると斜面が崩れるという現象が時々見られる。ベーン工前面の洗掘深 Z_s と洗掘範囲（円錐の半径 r_s ）の関係を円柱の直径 D を用いて無次元表示すると、図 3.3.5 のようになる。これをみると洗掘深は、バラつきはあるが平均的には円柱橋脚周辺の局所洗掘深⁷⁾ではば表され、その値は円柱の直径の2倍程度であることがわかる。また円錐形状の斜面勾配は 35° であり、ほぼ水中安息角をなしていることがわかる。したがって、ベーン工前面の洗掘は円柱周りの洗掘で表すことができ、またベーン工本体の外岸では、その倍すなわち円柱の直径の4倍程度の洗掘が生ずる。また、ベーン工の根入れ深は、このようなことを考慮した上で決定する必要がある。

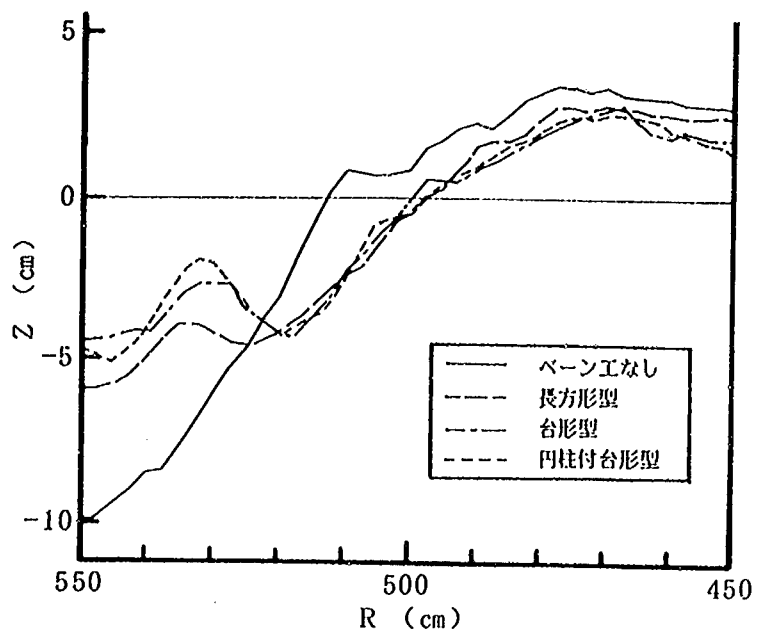


図 3.3.1 平均横断河床形状

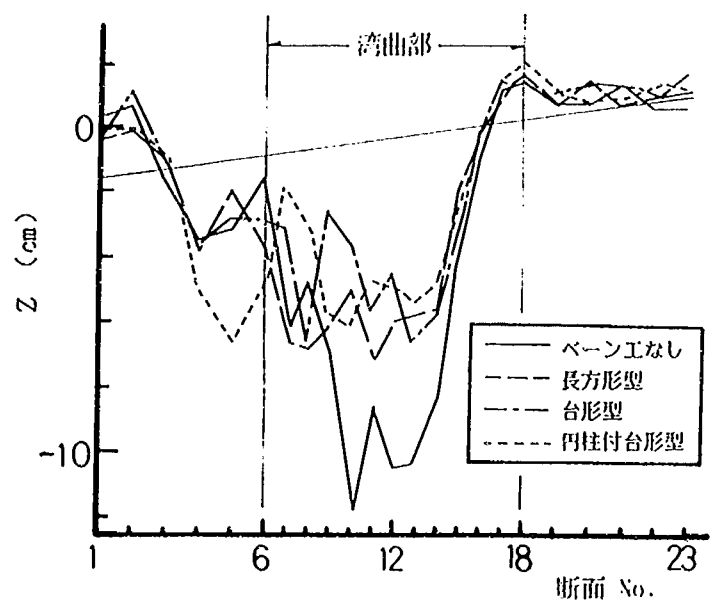


図 3.3.2 外岸付近の河床高の縦断変化

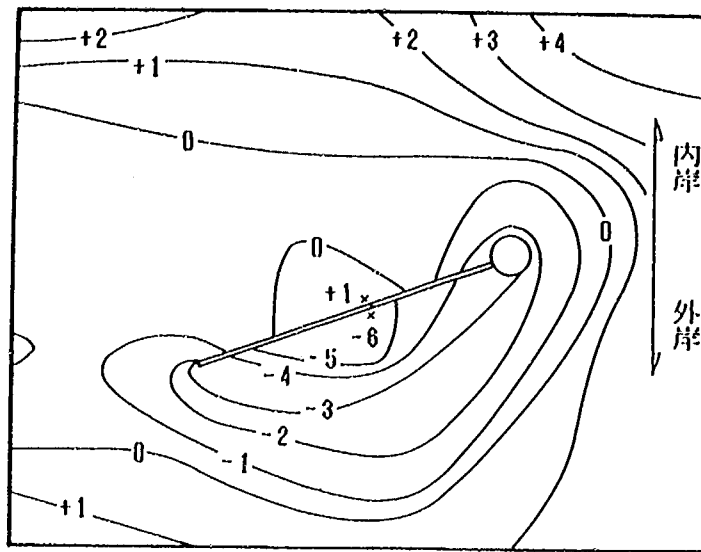


図 3.3.3 円柱付台形型ベーン工周辺の河床変動状況

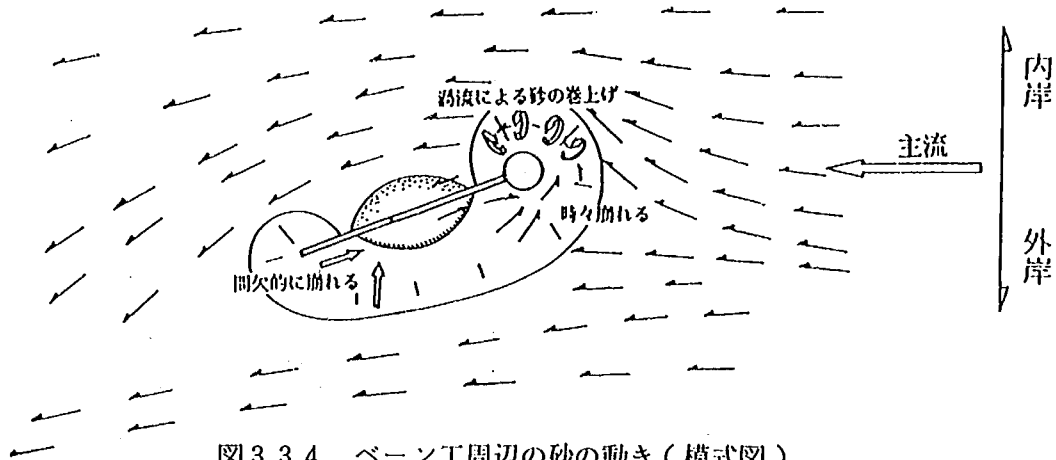


図 3.3.4 ベーン工周辺の砂の動き（模式図）

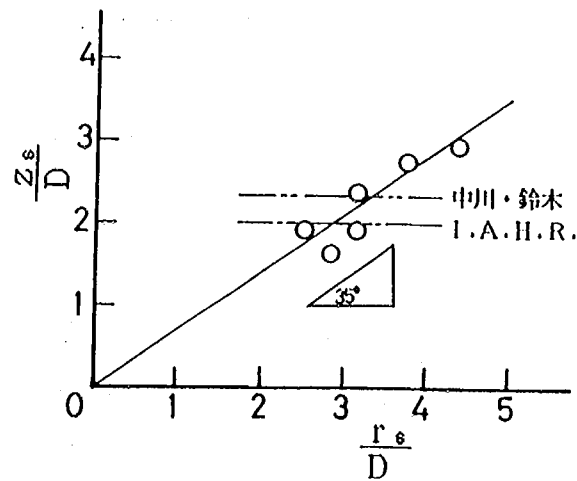
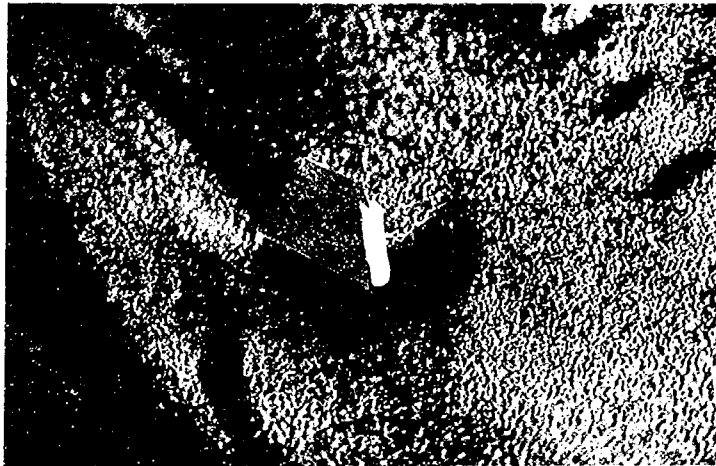


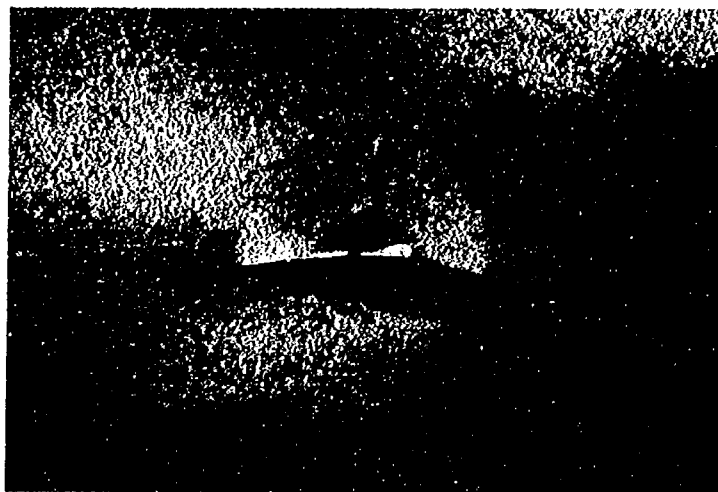
図 3.3.5 ベーン工前面の洗掘深



(a) 上流より撮影



(b) 下流より撮影



(c) 上面より撮影

写真 3.3.1 ベーン工周辺の河床変動状況

3.3.2 ベーン工の設置数と配置に関する検討

3.3.1 にならって、ケース4～7の平均横断河床高を図3.3.6に示す。ケース4の2倍の数の30基のベーン工を1列に配置したケース5では、ケース4に比べれば、外岸付近の洗掘は十分軽減されている。しかし、数を2倍にしたほど明瞭な効果は現れていない。これは、先にも述べたようにベーン工の縦断的な間隔が、1列に15基の場合と比べて1/2となったため、前のベーン工によって生じた二次流が後ろのベーン工に干渉し、揚力係数を下げ、また前のベーン工の後流の影響を受けるために、ベーン工にかかる揚力すなわちベーン工の効果が小さくなるためである。したがって、ベーン工の数を増やす場合には、ベーン工1基当りの効率を下げないようにするために、ベーン工の縦断的な間隔を適当に確保することが肝要である。

ケース6は、ベーン工の数をケース5と、縦断的な位置はケース4と同じにし、横断的には外岸から25cmと40cmの位置へ2列に15基ずつ配置した例である。したがって、ベーン工は効率よく機能していると考えられる。ケース6ではベーン工の周囲で2つの山と谷が現れており、河床の横断形状はケース5とかなり異なっている。したがって、並列にすることは、河床の横断形状を緩やかにすることに効果を発揮する。ただし、ベーン工の平均的な横断位置がケース5と比べて内岸寄りであり、またベーン工の縦断間隔が大きいためにケース2～4と同様に表面流が外岸側に侵入するため、肝心の外岸付近の河床高はケース5とそれ程変わってはいない。

これに対して、ベーン工を千鳥状に配置したケース7では、ケース5、6に比べてさらに1～1.5cmほど外岸の河床の洗掘を軽減しており、ベーン工なしと比べれば洗掘深を1/8程度までに抑制している。これと同様なことが外岸付近の河床高縦断図（図3.3.7）からもうかがえる。湾曲による洗掘が著しい区間では、ケース4、6、7は河床高の変動が小さくなっているが、ベーン工によって引き起こされた流れが後ろのベーン工に影響を及ぼすケース5については、平均的に洗掘抑制効果が低下するだけでなく、それが間欠的に生じるために河床変動が大きくなっている。またケース7は他のどのケースと比較しても縦断的な平均河床高は高くなっており、最も洗掘を軽減していることがわかる。

これは、ケース5と比べればケース6と同様に各ベーン工が効率よく働いたこと、またケース6と比べればベーン工の平均的な横断位置が外岸に近いこと、そして何よりもベーン工の見かけの縦断間隔はケース5と同じで半分流下した位置で隣の軸線上にベーン工が存在し、ベーン工の効果が強さを保ったまま縦断的に持続するので、表面の高速流体が外岸に侵入できず外岸の流速が加速されなくなることによる。このことは、図3.3.8を見ればより一層明らかとなる。図3.3.8はベーン工を設置しない場合（ケース1）と1列に15基（ケース4）、または30基（ケース5）配置した場合、およびこれらの中で最も洗掘を軽減した千鳥型に配置した場合（30基、ケース7）の河床変動状況を示したものであり、断面15～9の範囲について3cmごとの等洗掘深線を表している。また断面15、12、9における平均流速も併せて示している。ベーン工を設置しない場合は、流水は外岸へ向かって流れ外岸付近の流速が加速されており、これと対応して外岸に沿って深掘れが生じている。ケース4の15基の場合ではベーン工の数が十分でないため、軽減はされているものの依然として外岸に沿って洗掘が生じており、外岸付近の流速もそれほど減速されておらず、流速はベーン工の外岸側と内岸側で速くなっている。そのため主流は、ベーン工の外側と内側とに分かれるよ

うにして流れる。またケース5の場合では、かなり洗掘は軽減されるものの断面12を中心として若干の洗掘が生じている。ベーン工外岸の流速はケース4よりは低減されている。これに対し千鳥型配置の場合では、ベーン工から外岸付近にかけての流速はかなり遅くなっている。一方、ベーン工の少し内側の付近に流水が集まり、その付近の河床を洗掘している（写真3.3.2）。この結果、主流は、この「みお筋」に沿って流れるようになる。すなわち、河道湾曲部に適切にベーン工を設置することにより、河岸付近の洗掘を減らすのみならず、平均的な流れ場も変え、最大流速の位置を河道中心付近に移動させ、外岸付近の流速を低減することにより、ひいては河岸の侵食を軽減する事が可能となる。

したがって、ベーン工の配置法としては、ベーン工の設置列数に関わらず、一般的に千鳥状に配置するのがよい。

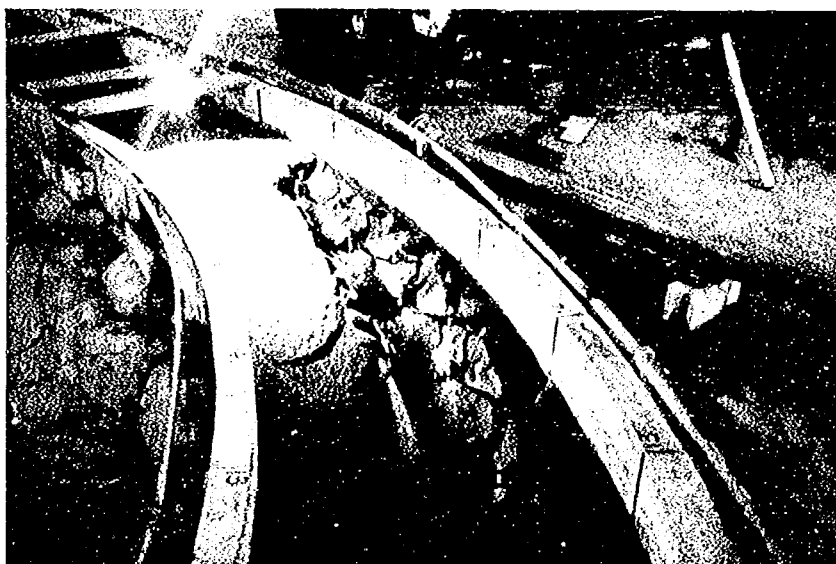


写真3.3.2 ベーン工によるみお筋の形成

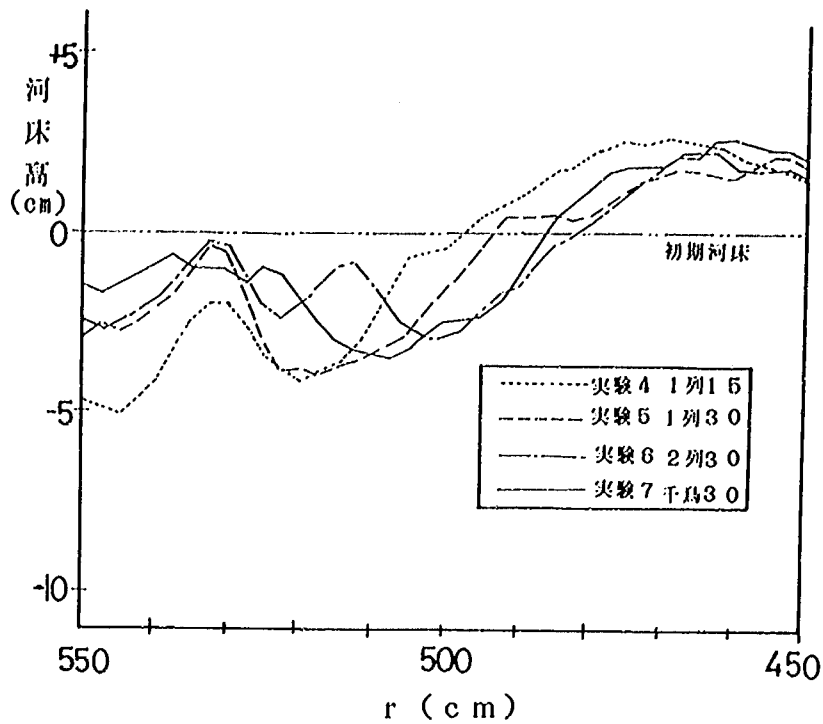


図 3. 3. 6 平均横断河床形状

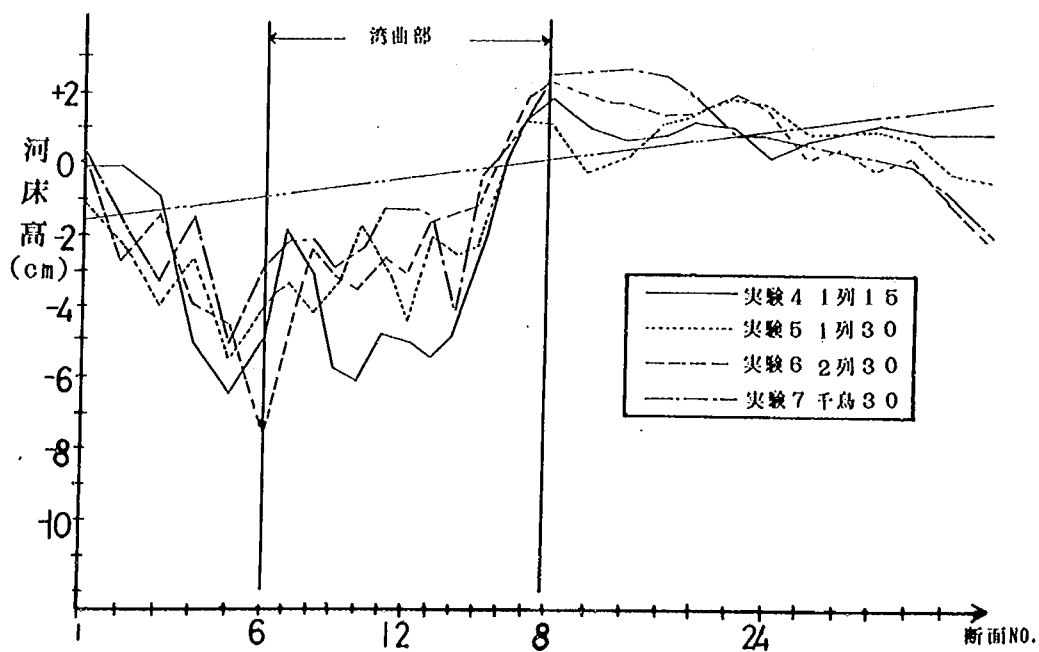
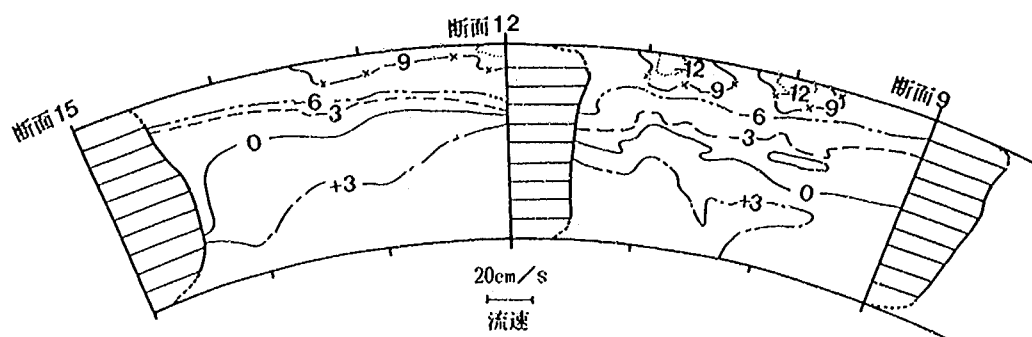
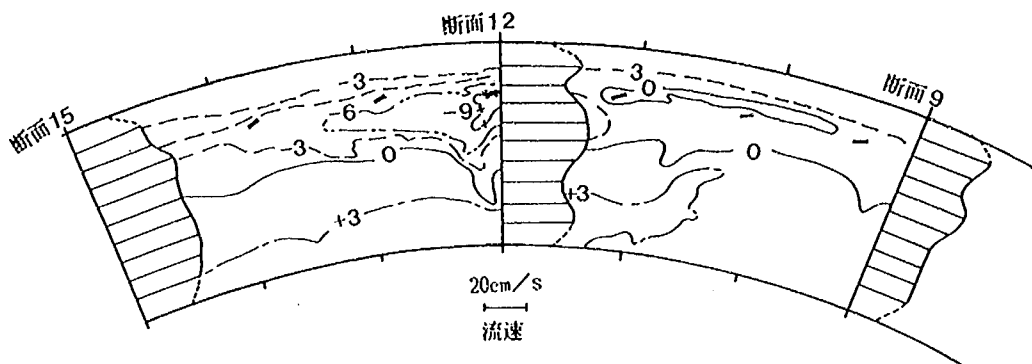


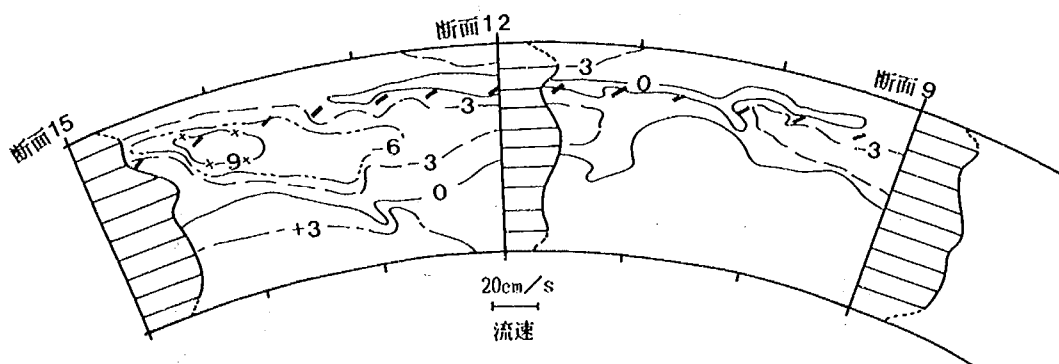
図 3. 3. 7 水位・河床高の継断変化



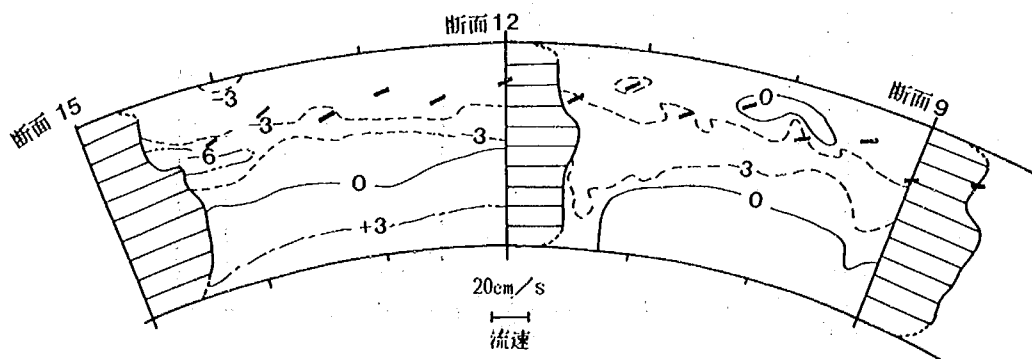
(a) ベーン工を設置しない場合 (ケース 1)



(b) ベーン工を 1 列に 15 基設置した場合 (ケース 4)



(c) ベーン工を 1 列に 30 基設置した場合 (ケース 5)



(d) ベーン工を千鳥状に 30 基設置した場合 (ケース 7)

図 3.3.8 河床高のコンターと平均流速分布

3.3.3 実際の施工に関して考慮すべき事項

図 3.3.9 に断面 13～9 の平均横断河床形状をケース 4, 5, 7, 8 について示す。また図 3.3.10 に同じくケース 4, 5, 7, 8 について外岸付近の河床高の縦断変化の様子を示す。これを見ると、湾曲部外岸付近では、ケース 8 はベン工 15 基を千鳥状に配置し根固めを施したために、1 列に 30 基配置したケース 5 の場合と同程度もしくは若干低い程度まで洗掘が軽減されている。また湾曲部外岸の末端の断面 7～5 では、根固工の効果により他のどのケースよりも洗掘が軽減されている。またそのため、下流の直線部での最大洗掘深は 2 cm 程度まで軽減されている。

このことより、ベン工を設置した湾曲部の末端に根固めを施すことにより、根固工周辺の洗掘を軽減するだけでなく、その周りの湾曲下流及びその更に下流の直線部に生じる洗掘をも全体的に軽減することができる。したがって、湾曲部の末端に根固工等を設置し、外岸付近の河床高を保つことが、重要な役割を果たしていることがわかる。

また図 3.3.11 に河床変動状況と平均流速分布を示す。湾曲中央部の断面 13.5～10.5 で河床変動が若干大きくなっている。外岸付近の河床の洗掘はケース 5 (図 3.3.8) よりも大きくなっており、内岸の堆積量はケース 4 と同程度である。全体的にはケース 4 の外岸付近の河床変動を緩やかにしたような形状を示している。みお筋は、外岸の洗掘が抑制されている分、相対的によく確認できるが、30 基の場合ほどは広範囲にかつ、明瞭には現れていない。また外岸の洗掘範囲がケース 4 と比べて狭くなったために、外岸付近での加速は小さく、断面 9 での外岸の流速はベン工の内岸よりも遅くなっており、1 列配置のケース 4 よりも効果的に河岸侵食を軽減している。

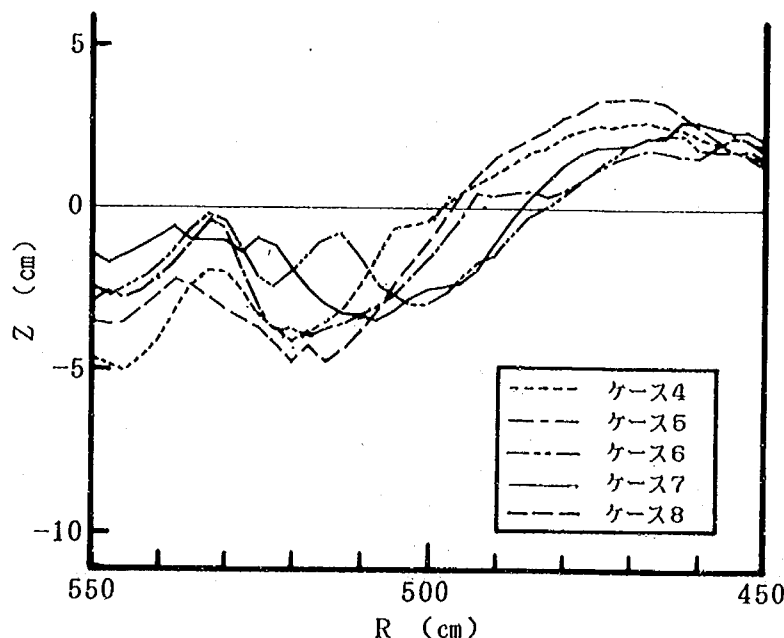


図 3.3.9 平均横断河床形状

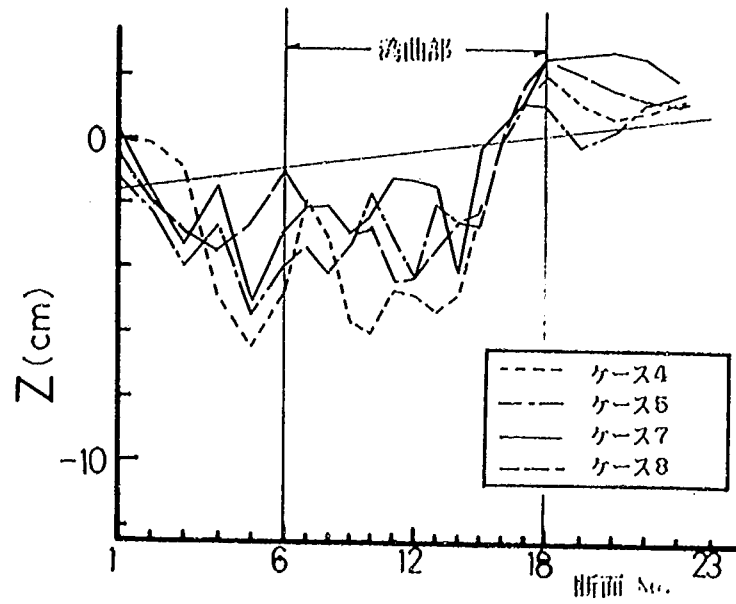


図 3.3.10 外岸付近の河床高の縦断変化

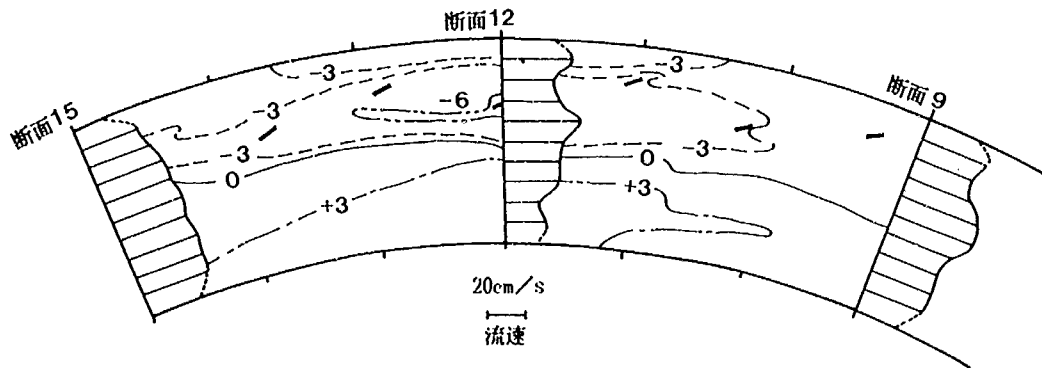


図 3.3.11 河床変動及び平均流速分布 (ケース 8)

3.4 ま と め

ベーン工に関する実験結果をまとめると以下のようになる。

- 1) ベーン工を適切に設置することによって、湾曲部の外岸に生じる洗掘を軽減し、河道中央部に主流を集中させることができる。
- 2) ベーン工の形状は長方形よりも台形型の方がよく、その前面に円柱を取り付けた円柱付ベーン工は最大洗掘深を軽減させ、より効率的に外岸の洗掘を軽減することができる。
- 3) ベーン工の効果はベーン工の形状が同じならば、ベーン工の数が増えるにつれて増大するが、1列に配置するよりも、千鳥状に配置した方がより効果的である。
- 4) 湾曲部にベーン工を設置した場合にも、洗掘の生じる湾曲部末端の外岸に根固工を施すことにより、根固工の周辺だけでなく湾曲下流部の広い範囲にわたって、外岸付近の洗掘を効果的に軽減することができる。
- 5) 既に洗掘が生じている湾曲部にベーン工を設置すると、比較的短時間で外岸の洗掘はある程度まで軽減されるが、その埋め戻し速度は、埋め戻し量が多くなるに従って、すなわち時間の経過と共に遅くなる。
- 6) 円柱付台形型ベーン工の周りでは、ベーン工周辺の局所的な平均河床高に対し、ベーン工の前面では前面の円柱の直径の2倍程度の深さの洗掘が生じ、ベーン工の外岸側で円柱の4倍程度の深さの洗掘が生じる。

4. ベーン工の設計法に関する考察

本章では横断河床形状予測法を用いた設計法について述べる。

4.1 水理設計法の考え方について

2.2.3 節で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 r およびベーン工設置位置 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 r 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4.1.1、4.1.2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ーン工の周りの局所洗掘を大きくしないためには、外岸の河床高が初期河床高（断面平均河床高）に近くなる

1) $r = 0.5 \sim 0.6$

に設定し、またベーン工周辺の局所洗掘が外岸に及ばないように

2) $b/B = 0.2 \sim 0.25$ (1列)

$b/B = 0.2 \sim 0.25, 0.4 \sim 0.5$ (複列)

とすればよいことがわかる。

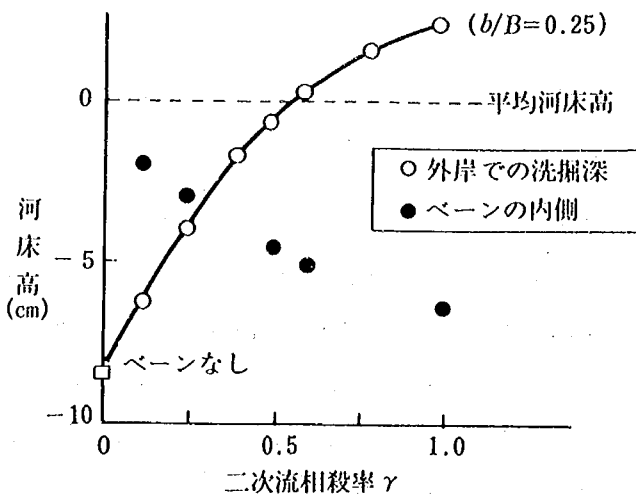


図4.1.1 r と外岸の河床高の関係（計算値）

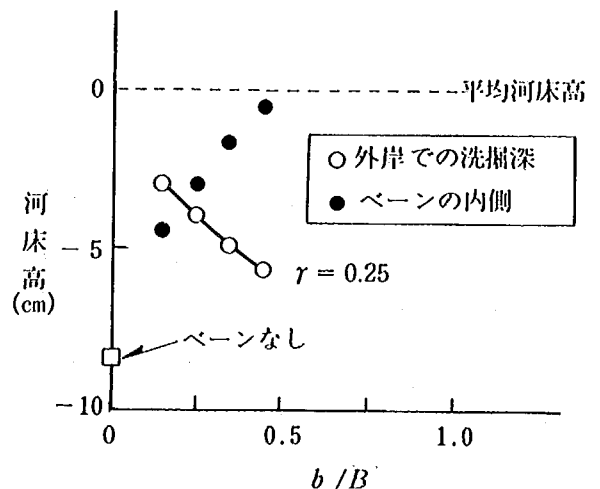


図4.1.2 b/B と外岸の河床高の関係（計算値）

Odgaardによればベーン工による回転力と遠心力による回転力を断面全体で相殺するようにベーン工の設計をすることになるが、これはこの解析法では $r=1$ にすることを意味する。また r はベーン工の数に比例するが、ベーン工はその数が多くなるに従って洗掘軽減に対するベーン工1基当たりの効率が下がる傾向がある。したがってこのように設計する方が経済的である。

4.2 ベーン工諸元の考え方

設計諸元と配置について考察する。 r は以下に示されるように、

$$\gamma = f \frac{(\phi - 2/\kappa)^2}{(\phi - 0.5/\kappa)} \frac{\kappa r}{6B} \cdot \frac{\beta_0 \pi l_0 \sin \alpha}{\Delta s} \times \text{列数}$$

水理条件 (B, r, ϕ, h_a) とベーン工の構造に関する条件によって定まる。したがって、与えられる流量や水位に対して、4.1節で示したように、 γ の値が 0.5 ~ 0.6 となるように、ベーン工に関する値 $\beta, l, \sin \alpha, \Delta s$ 及び列数または N を決定する。

仰角 α は揚力を最大にする^{8) 9)}

$$\alpha = 20^\circ$$

とする。

ベーン工の長さ l と高さ H_i (平均河床高からの突出高) は、従来の研究より妥当とされているように^{8) 9)} 与えられた断面平均水深 h_a に対して、通常の場合 (B/h が極端に小さくない場合) については、

$$l = (0.5 \sim 2) h_a, H_i = (1/4 \sim 1/3) h_a$$

とする。ただし、平水時においてベーン工がそれほど突出しないようにすることが望ましい。

また、補正係数 β については、一様流中に置かれた翼に対する揚力補正係数を用いることにする。これは、揚力線理論 (Prandtl の積分方程式)¹⁰⁾ より、その平均値 β_a はベーン工の平均アスペクト比 H^2/A を用いて、

$$\beta_a = 1 / (1 + A/H^2)$$

A : ベーン工の面積, H : 河床からのベーン工の高さ

とほぼ表すことができ、図 4.2.1 に示されるように通常のアスペクト比の範囲 (0.5 ~ 2 程度) では 0.3 ~ 0.6 である。実験ケース 1 ~ 7 の結果についてベーン工周辺の平均的な洗掘深 (流れに対して有効なベーン工の周りの洗掘深) を 2 cm と仮定して、 l と H を与えて β を計算し、 $f=1$ とおいて γ とその時の河床高をプロットし直すと図 4.2.2 の様になる。これを見ると、ケース 2 のアイオワ式ベーン工では、 γ が 3 割程度大きくなっており、洗掘が 1 cm 程度大きくなっている。また、 γ において $f \cdot \beta$ 以外の値はほぼ確定した値であるので、 γ の値の違いは主に $f \cdot \beta$ によると考えられる。ただし、ベーン工なしでは外岸付近の流速の増大が影響して一様湾曲の場合よりも過大に洗掘されたと考えられ、ベーン工設置時においては流速の縦断変化が小さくなるもののこの影響も若干あると考えられる。これに対して、ケース 3, 4 の台形型では円柱のあり・なしどちらも実験結果から得られる河床高に対して、 γ が 1 割程度大きくなっている程度である。また、これと縦断的な間隔が同じケース 6, 7 についても、やはり $\gamma(\beta)$ で 1 割程度値が大きくなり、5 mm 程度洗掘が大きい。ケース 4, 6, 7 に対して、ベーン工の縦断間隔が 1/2 となるケース 5 については、実験での平均河床高に対し、 $\gamma(\beta)$ で 3 割程度大きくなっていることがわかる。このことより、 β の値の違いによる γ の値の違いは、ベーン工の形状とベーン工の縦断間隔に起因するものであることがわかる。形状については、アイオワ式よりも台形型ベーン工の方が、解析法による予測に近くなっており、この結果からも、台形型の方がより

効率的に機能していることがわかる。縦断間隔に関しては、同じ台形型ベン工で、本実験の水理条件(ϕ, h, u)に対し、 $\Delta\phi=6^\circ$ で1割、 $\Delta\phi=3^\circ$ で3割程度、実際の β の値が低下しているようである。以上の結果はまた、 β の値を大きくするためにベン工の長さを半分にして、1列のままベン工の数を倍にしても実際には β は低下し、元の値とほぼ同じになるために、洗掘抑制効果はそれほど変化しないことを示唆している。

これは3章でも述べたように、前のベン工によって引き起こされた流れが流下と共に減衰できずに、その後ろのベン工に影響を及ぼすためであり、主にベン工に対する流れの仰角が変化することによる β の補正(2.1.2参照)を考慮していないことから誤差が生じていると考えることができる。このことより、正確に β を評価するためには、ベン工に対する正確な仰角を求める必要がある。しかし、ベン工周辺の洗掘深の取り方にもよるが、平均的には本実験で得られたように、この β の誤差は、ベンの縦断間隔を十分取れば高々1~2割程度であるので、実際の設計にあたっては、ベン工の縦断間隔を十分とるような配置とし、安全率を考慮して β の値を2割程度小さく見積れば良い。すなわち、縦断間隔が狭い場合には、 f を0.8~0.9程度とすれば良い。

したがって最終的には、与えられた水理条件とその水理条件によってこのように決定されたベン工の構造諸元に対して、 $r=0.5\sim0.6$ となるようにベン工の設置数 N を決定すれば良い。ただし、 $r=0.5\sim0.6$ 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 が必然的に増えることになる。

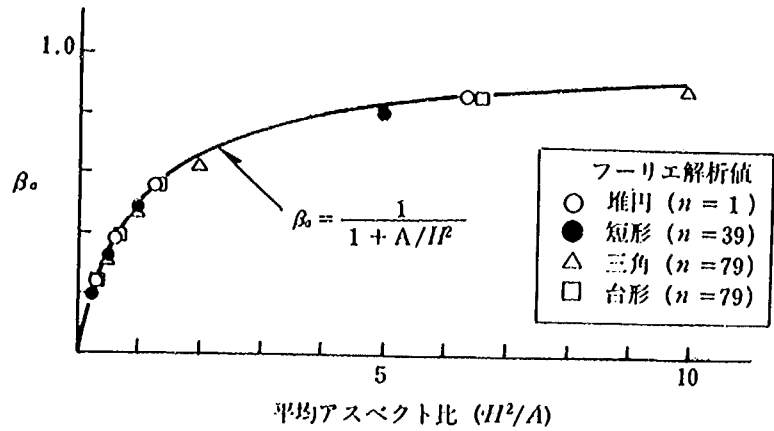


図 4.2.1 アスペクト比と β_0 の関係

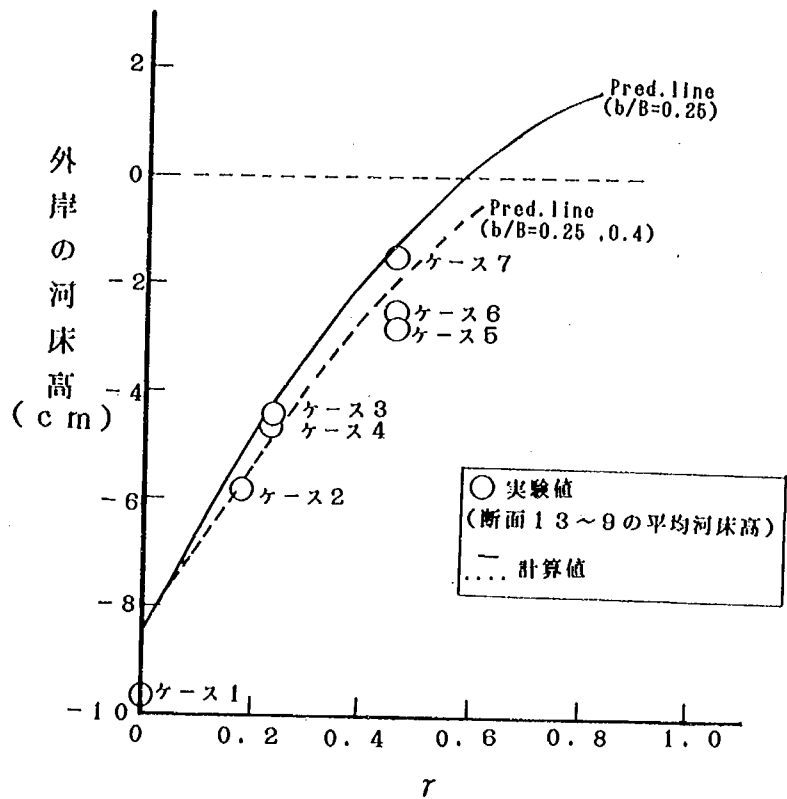


図 4.2.2 計算値と実験値の比較

この場合には、 B/h ($l = (0.5 \sim 2) h_a$) に応じてベーン工の列数を増やし、ベーン工の効率を保つために縦断間隔が狭くならないように注意しなければならない。列数を増やす場合には、実験結果から示されるように、並列型よりも千鳥型配置の方が個々のベーン工が有効に働き、外岸の洗掘を軽減できるので、ベーン工の列数に関わらず千鳥型配置が推奨される。また、1本の軸線上のベーン工の縦断間隔としては、実験結果から判断して、ベーン工の長さが水深程度の場合には、その6～9倍程度（例えばケース4の $N = 15$ の時、 $[r\phi/N]/h \cong 9$ ）を1つの目安とすれば良いようである。

4.3. 土研型ベーン工の根入れ深さについて

ベーン工の根入れ深さについて、以下のように考える。今、ベーン工が図4.3.1の様に設置されるとすると、ベーン工の高さ H は

$$H = H_i + H_s$$

H_i : 平均(計画)河床高からの高さ、 H_s : ベーン工設置位置の平均(計画)河床高からの洗掘深と表される。土研型ベーン工の周りでは、図4.3.2に示すように前面で円柱の直径2倍、外岸側で円柱の直径4倍の洗掘が生じる。この2つの状態における土圧に対する安定条件より、必要な根入れ深さをもとめ、これに安全率をかけて根入れ深さを決める。

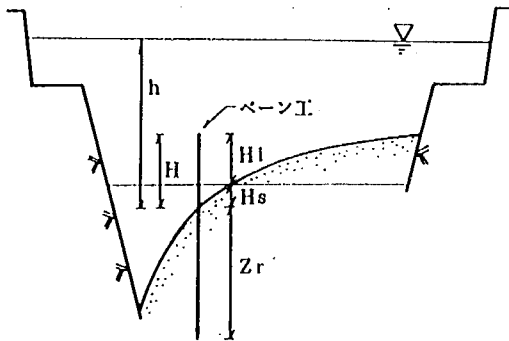


図4.3.1 記号の説明

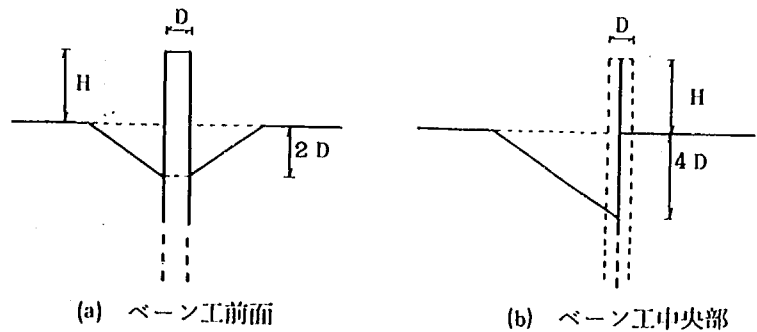


図4.3.2 ベーン工まわりの洗掘

4.3.1 転倒に対する安定条件

まず、ベーン工に力がかかる場合とかけられない場合について根入れ深さを計算し、それより根入れを決定する。

ただし、ここでは計算を簡単に行うためにベーン工は1個の剛体として扱い、ベーン工の変形及び土圧の再配分は考慮せず、安定計算は砂地盤の浅い根入れの条件に対するモーメントについて行い、力のつりあいについては根入れの下端付近で反力がかかるものとする。また安全率を1.5とした。

なお、これは一つの計算例であり、将来的には矢板等の場合のようにベーン工の部材の種類や剛性及び降伏応力並びに土圧の再配分等まで考慮して、ベーン工の各部材の接合の有無や断面形まで含めた構造設計をする必要があると思われる。しかし、実際問題として、ベーン工周辺の洗掘深が縦断的に、砂れき堆

の移動により時間的に変化し、正確には与えられず、移動床上でベーン工にかかる力（水中及び土中の水圧並びに土圧）の鉛直及び横断分布が正確には知られていないので、これらの詳細については今後の研究で検討することとし、取り合えずは1つの目安として以下の様に算定する。

1) 平水時等（流速が小さくベーン工に水平力がかからない場合）

この場合、図 4. 3. 2 (a) の状態は安定なので (b) に対して安定となる根入れ深さを求める。

各変数を図 4. 3. 3 の様にとり、反力を消去するためにベーン工の下端でモーメントをとると、これが安定であるためには、

$$\frac{\rho_s - \rho}{1 + e} g \cdot K_p \frac{(Z_r - dz)^3}{6} \geq \frac{\rho_s - \rho}{1 + e} g \cdot K_a \frac{Z_r^3}{6} \quad (4.1)$$

ρ_s : 土砂の密度, e : 間隙比, K_p : 受動土圧係数, K_a : 主動土圧係数

より、設置時の河床高に対する根入れ深さ Z_r は、 $K_p/K_a = 9$ とすれば、

$$Z_r \geq 2 dz \cong 8 D$$

が、最低必要になる。

2) 洪水時（ベーン工に力がかかる場合）

まず、(b) の場合について計算する。記号は図 4. 3. 4 に示される通りであり、平均水平力 F は

$$F = \beta_a \pi \sin \alpha H \rho u^2$$

u : ベーン工設置位置の平均流速 ($u = \phi \sqrt{g h I}$)

で表される。ここで先と同様にベーン工の下端でモーメントをとる。ただし、受動土圧は I の範囲で受けるとする。したがって、安定条件は

$$\frac{\rho_s / \rho - 1}{1 + e} (K_p - K_a) \frac{(Z_r - dz)^3}{6} \geq \left(\frac{H}{2} + Z_r \right) H \left[\beta_a \pi \sin \alpha \frac{u^2}{g} \right] \quad (4.2)$$

と表され、まとめ直すと

$$(\hat{Z}_r - 1)^3 \geq \chi (\hat{H}/2 + \hat{Z}_r) \hat{H} \cdot \hat{u}^2 \quad (4.3)$$

$$\chi = \beta_a \pi \sin \alpha \frac{6}{(K_p - K_a)} \frac{1 + e}{\rho_s / \rho - 1}, \quad \hat{Z}_r = \frac{Z_r}{dz}, \quad \hat{H} = \frac{H}{dz}, \quad \hat{u}^2 = \frac{u^2}{g dz}$$

と表される。例えば、 $\chi \cong 1.21$ 程度であるとすれば、これより、根入れ深さ Z_r/dz は $u^2/g dz$ および H/dz を用いて図 4. 3. 5 のように定まる。また、受動土圧を II の範囲でとる場合は、この値に対し、この計算条件で $-1.2 \sim -1.3$ とすれば良い。

なお、(a) の場合も同様に計算し、 dz を変えればこの図において表すことができる。

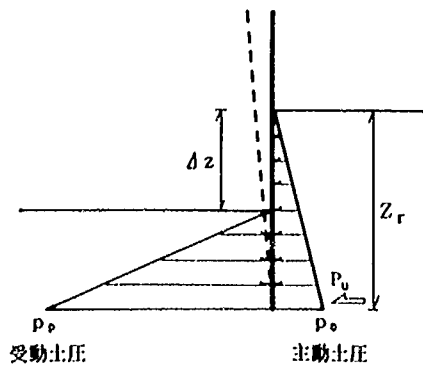


図 4.3.3 記号の定義と土圧分布の仮定（水平時）

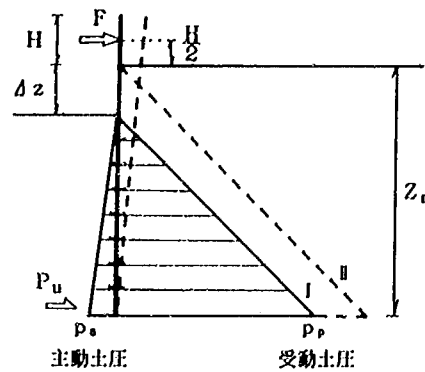


図 4.3.4 土圧分布の仮定（洪水時）

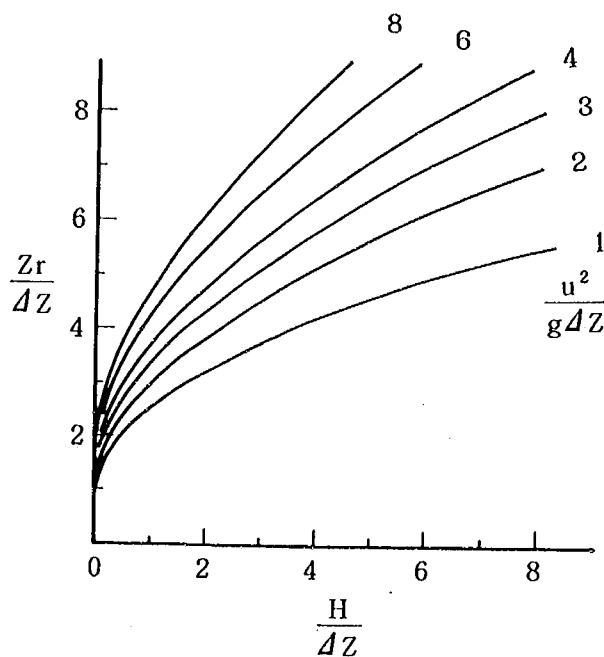


図 4.3.5 根入れ深さ

4.3.2 根入れ深さの決定例について

べー工の根入れ深さは、平水時または洪水時のべー工前面付近及び側面付近で、最も根入れを必要とする長さとする。

例えば、べー工側面で、 $\Delta z = 4D$ 、 $H/\Delta z = 1$ 、 $u^2/g\Delta z = 2$ であれば、 $Z_r/\Delta z = 1.8 \sim 3$ である。これに対し、べー工前面付近では、 $\Delta z = 2D$ 、 $H/\Delta z = 2$ 、 $u^2/g\Delta z = 4$ となるので、 $Z_r/\Delta z = 4.8$ である。

したがって、この場合、それぞれのケースについては根入れは

- ① 平水時 べー工側面付近 $Z_r \geq 8D$
- ② 洪水時 べー工側面付近 $Z_r \geq (7.2 \sim 12)D$

③ 洪水時 ベーン工前面付近 $Z_r \geq 9.6 D$

となる。したがって、必要な根入れはこの内最大のものをとって、 $Z_r = 12 D$ となる。たとえば、 $D = 50$ cm, $H = 2$ m, $u = 6$ m/s に対し、根入れは最低約 6 m 必要となる。しかし、これは転倒に対する限界状態であるので、たとえばこれに安全率（例えば 1.5）をかけて、 $Z_r = 9$ m とする。

このように、ベーン工側面付近の洗掘に対して、受動土圧を I のように取れば、このとき必要な根入れはベーン工前面付近よりも大きくなるので、ベーン工側面 (I) で計算すれば良い。ただし、これはベーン工に力が一様にかかることに相当する場合（ベーン工の部材が全体的に接合されているような場合）を仮定しているので注意を要する。これより一般的には、まず洪水時においてベーン工側面付近でベーン工が安定となる根入れを求め、それが平水時のものに対して大きい場合はその根入れに安全率（1.5）をかけたものとし、平水時の方が大きい場合には $Z_r = 12 D$ とする。すなわち、 $\lambda z = 4 D$ とし、安全率を考慮すると必要な根入れ深さは、図 4.3.6 の様に表される。ただし、式 (4.3) の解は次式で与えられる。

$$\hat{Z}_r \geq (x \cdot y)^{1/3} \{ (1 + \sqrt{1 - 8x/27y})^{1/3} + (1 - \sqrt{1 - 8x/27y})^{1/3} \} + 1$$

$$x = \lambda u^2 \hat{H}/2, \quad y = \hat{H}/2 + 1$$

これより、河道湾曲部のベーン工施工区間におけるベーン工設置位置における平均（計画）河床高からの最大洗掘深 $H_{s \max}$ 及び H_i を用いて、洗掘位置からの根入れ $Z_{r \max}$ を求め、平均（計画）河床高からの根入れ $Z_{\max}$ を

$$Z_{\max} = Z_{r \max} + H_{s \max}$$

とすることにする。ただし、これについては実河道における検討例があまりないので、安全となるように十分考慮して設計する必要がある。

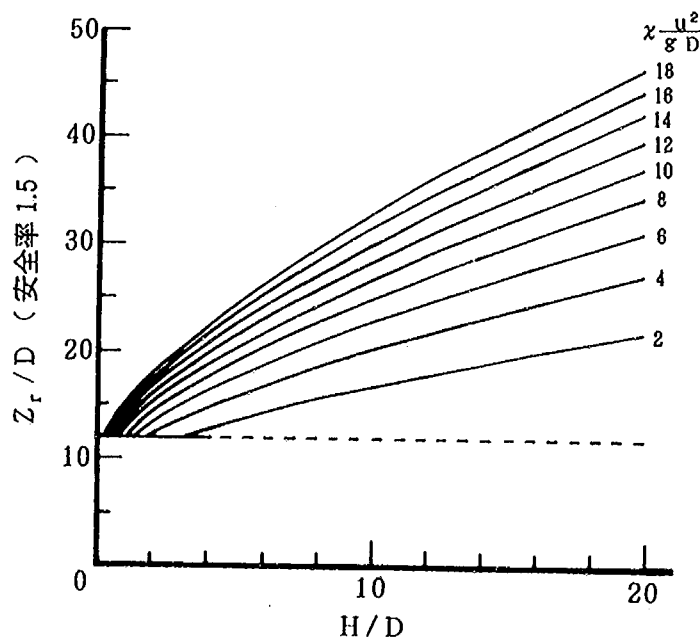


図 4.3.6 ベーン工の根入れ深さ

5. 結 論

主要な結論をまとめると以下の通りである。

- 1) 河道湾曲部における洗掘と堆積、及び河岸侵食を軽減するためのベーン工の配置や構造などの設計諸元を合理的に求めることが可能となった。
- 2) ベーン工の構造及び配置諸元と河床形状との関係が、実験的にまた解析的に示された。
- 3) 提案した河床横断形状予測法によって、河岸付近の局所洗掘深をよく説明する事ができる。
- 4) 土研型ベーン工（円柱付台形型ベーン工）は、河岸付近の河床の洗掘深と河床高の縦断的な変化を軽減させ、また適切に配置すれば、河床形状を制御することにより主流の流れ場を変形させることができるので、有力な河岸侵食対策工となり得る。
- 5) ベーン工の設置位置としては、ベーン工周辺の洗掘の影響が河岸に及ばないように、外岸から河幅の1/4程度の距離の場所に設置するのが良く、配置法としては、千鳥型が良い。
- 6) 既に洗掘が生じている湾曲部にベーン工を設置すると比較的短時間である程度まで、埋め戻しが行えるので、ベーン工は洗掘対策として有力である。
- 7) 土研型ベーン工周辺で生じる洗掘深は、ベーン工前面で円柱の径の2倍、ベーン工側面で4倍程度である。また、この洗掘の特性及びベーン工周辺の流速を用いて、根入れ深さを求めることができた。

あ　と　が　き

ベーン工の主要な役割は、湾曲部の局所的洗掘深軽減のための対策工である。しかし、配置などを工夫すれば主流の流れをも変形でき、外岸付近の流速を低減するなど、水制的な役割も併せ持つことが可能であり、一層効果的に河床の洗掘と河岸の侵食を軽減できることが明らかとなった。ベーン工を設置するとベーン工の周囲は洗掘を受けることになる。これについては、十分な根入れ深をとることによって安全な構造とする必要がある。また、ベーン工にかかる力をより正確に把握し、ベーン工の部材、断面形や強度等を含めた構造設計法についても今後さらに検討する必要があると思われる。

現在、河岸侵食対策として一般に護岸工・根固工が施工されているが、湾曲部外岸においては洗掘が生じ、水あたりが強くなるので、護岸の十分な根入れや根固めが相当な範囲にわたって必要となり、施工費が高くなる場合がある。このような場合、ベーン工を設置し、これまで述べてきたように外岸の河床の洗掘と外岸沿いの流速を軽減すれば、護岸工の根入れは浅くてすみ、根固工の必要範囲も狭くてすみ。また、ベーン工は水制工や根固工と比べて安価であるという利点をもっており、施工費も低くすむので、湾曲部での有力な河岸侵食対策工となり得ると思われる。

本資料の結果は、流砂形態が掃流砂で、掃流力が比較的小さい場合の一例である。今後に残された課題は、現地での試験施工を通して、ここで開発された技術の改良と一般化を図っていくことである。

謝　　辞

本実験の実施・資料整理・図面作成にあたっては、芝浦工業大学土木工学科卒論実習生小田伸太郎君（現 芝浦工業大学大学院）に全面的な協力を願った。ここに記して感謝の意を表するものである。

昭和 63 年 4 月

参 考 文 献

- 1) A. J. Odgaard and J. F. Kennedy : " Analysis of Sacramento River Bend flows and Development of a New Method for Bank Protection " IIHR Report, No241, 1982
- 2) A. J. Odgaard and J. F. Kennedy : " River Bend Protection by Submerged Vanes " ASCE, Vol. 109, HY8, pp. 1164 - 1173, 1983
- 3) T. Asano, A. J. Odgaard and J. F. Kennedy : " Prevention of Local Scouring at River Bend by Iowa Vanes: " JSCE, JHHE, Vol. 2, No 1, pp. 1 - 13, 1984
- 4) 浅野富夫, ヤコブ・オッドガード, ジョン・ケネディ : 「わん曲部局所洗掘防止対策としてのアイオワ式ベーン工法」, 土木技術資料, Vol. 26, No 2, pp. 4 - 8, 1984
- 5) 阿部宗平, 鈴木浩之 : 「流路工における湾曲部の局所洗掘防止対策に関する実験的考察 — ベーン工の効果 — 」, 土木技術資料, Vol. 25, No 12, pp. 34 - 39, 1983
- 6) 阿部宗平, 鈴木浩之 : 「流路工湾曲部におけるベーンの配置と形状に関する実験的考察」, 土木資料, Vol. 27, No 2, pp. 9 - 14, 1985
- 7) 吉川秀夫編 : 「流砂の水理学」丸善, 1985
- 8) 橋本 宏, 浅野富夫, 坂野 章 : 「アイオワ式ベーン工の仰角に関する実験的検討」, 土木技術資料, Vol. 27, No8, pp. 32 - 37, 1985
- 9) 橋本 宏, 浅野富夫, 坂野 章 : 「アイオワ式ベー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水講論文集, pp. 603 - 608, 1985
- 10) 坂野 章, 福岡捷二, 浅野富夫 : 「わん曲部局所洗掘対策工としてのベーン工に関する実験的検討」第41回年次学術講演会講演概要集, pp. 387 - 388, 1986
- 11) 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
- 12) 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. 30, No 3, pp. 127 - 132, 1988
- 13) 福岡捷二, 山坂昌成 : 「直線流路の交互砂州」土木学会, 第27回水理講演会論文集, pp. 703 - 708, 1983
- 14) 福岡捷二, 山坂昌成, 清水義彦 : 「平衡形状に着目した中規模河床形態の卓越波数と形成領域区分」土木学会論文報告書, Vol. 363, pp. 115 - 124, 1985
- 15) 池田駿介 : 「移動床河川の湾曲部における二次流と動的横断平衡河床について」, 土木学会論文報告集, Vol. 229, pp. 55 - 65, 1974
- 16) 長谷川和義 : 「蛇曲流路における流れと平衡底面形状に関する研究」, 土木学会論文報告集, Vol. 338, pp. 105 - 114, 1983

- 17) 村本嘉雄：「開水路湾曲流の内部機構(II)」，京都大学防災研究所年報9号，pp. 525-537，1966
- 18) 池田駿介，西村達也：「砂床蛇行河川の三次元流れと河床形状」，土木学会論文報告集，Vol. 369，pp. 99 - 108，1986
- 19) 例えば，今井・功：「流体力学(前編)」裳華房
- 20) F. Engelund：" Flow and Bed Topography in Channel bed " ASCE. Vol. 100, HY 11, pp. 1631 - 1648, 1974
- 21) 須賀堯三：「河川のわん曲部における洗掘について」，土木技術資料，vol. 5, No. 4

Appendix

(1) 運動方程式

河道湾曲部にベーン工が設置された場合の運動方程式を以下のように表す。

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \epsilon \nabla^2 u - \frac{u v}{r} + F_s(z) \delta(s-s_i) \delta(n-n_j) / \rho$$

$$\nabla^2 \cong \frac{\partial^2}{\partial n^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (\text{a.1})$$

$$u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \epsilon \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + \epsilon \nabla^2 v + \frac{u^2}{r} + \underbrace{F_n(z) \delta(s-s_i) \delta(n-n_j)}_{\text{外力項}} / \rho$$

(a.2)

$$u \frac{\partial w}{\partial s} + v \frac{\partial w}{\partial n} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \epsilon \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} + \epsilon \nabla^2 w - g$$

$$\text{または } p = \rho g (\xi - z), \quad \xi : \text{水面の高さ} \quad (\text{a.3})$$

(2) 二次流速算定式

渦度は

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial n}$$

と表されるので、式 (a.2) と式 (a.3) の rotation をとると、

$$\text{右辺} = \epsilon \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial n} \right) + \epsilon \nabla^2 \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial n} \right) + \frac{\partial F_n}{\partial z} \delta(s-s_i) \delta(n-n_j)$$

$$= \epsilon \frac{\partial^2 \omega}{\partial s^2} + \epsilon \nabla^2 \omega - \frac{1}{r} \frac{\partial u^2}{\partial z} + \frac{\partial F_n}{\partial z} \delta(s-s_i) \delta(n-n_j)$$

$$\text{左辺} = \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial s} + u \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial v}{\partial s} \frac{\partial v}{\partial n} + v \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} + w \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$- \frac{\partial u}{\partial n} \frac{\partial w}{\partial s} - u \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial w}{\partial n} \right) - \frac{\partial v}{\partial n} \frac{\partial w}{\partial n} - v \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial w}{\partial n} \right) - \frac{\partial w}{\partial n} \frac{\partial w}{\partial z} - w \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial n} \right)$$

ここで,

$$\frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial u}{\partial s}, \quad \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial s} - \frac{\partial u}{\partial n} \frac{\partial w}{\partial s} = \left(\frac{\partial v}{\partial s} - \frac{\partial u}{\partial n} \right) \frac{\partial u}{\partial z} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial s} \right) \frac{\partial u}{\partial n}$$

より,

$$\begin{aligned} \text{左辺} &= u \frac{\partial \omega}{\partial s} + v \frac{\partial \omega}{\partial n} + w \frac{\partial \omega}{\partial z} - \omega \frac{\partial u}{\partial s} - \omega_n \frac{\partial u}{\partial n} - \omega_z \frac{\partial u}{\partial z} \\ &\cong u \frac{\partial \omega}{\partial s} + v \frac{\partial \omega}{\partial n} \end{aligned}$$

となる。ただし、一様湾曲流路で流れの集中が生じていないならば、 $\partial u / \partial s = 0$, $\int v dz = 0$ となり、 $\partial^2 \omega / \partial s^2 \cong 0$ とすれば、上式は

$$u \frac{\partial \omega}{\partial s} = \epsilon \nabla^2 \omega - \frac{1}{r} \frac{\partial u^2}{\partial z} + \frac{\partial F_n}{\partial z} \delta(s - s_i) \delta(n - n_j) \quad (\text{a.4})$$

とおくことができ、式(2.2)を得る。

また、連続式は、一様湾曲の条件より

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} (r v) + \frac{\partial w}{\partial z} \cong \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{a.5})$$

とする。ここで、 v , w を

$$v = -v_b \cdot \cos(\pi z / h)$$

$$w = w_c \cdot \sin(\pi z / h)$$

とおく。これらを式(a.5)に代入すれば、

$$w_c = \frac{h}{\pi} \frac{\partial v_b}{\partial n}$$

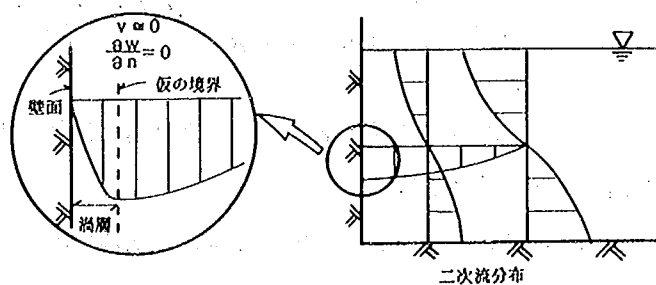


図 a.1 境界条件

が得られ、

$$\frac{\partial w}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{h}{\pi} \frac{\partial v}{\partial n} \right) \cong \frac{h}{\pi} \frac{\partial^2 v}{\partial n^2}$$

と表される。したがって、

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial n} = v_b \frac{\pi}{h} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) - \frac{h}{\pi} \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \quad (\text{a.6})$$

となる。ここで、二次流分布が水深のオーダーで急変する場所（壁面及びベーン工近傍）以外では、 $\partial w / \partial n$ が小さいとして、

$$\omega \cong \frac{\partial v}{\partial z} = v_b \frac{\pi}{h} \sin \left(\frac{\pi z}{h} \right)$$

とおき、式 (a.4) に代入すれば式 (2.4) が、式 (a.6) をそのまま式 (a.4) に代入すれば、次式

$$\frac{1}{r} (u_s^2 - u_b^2) - \frac{F_o}{\rho \Delta s} \delta (n - n_j) = 2 \epsilon \left[\left(\frac{\pi}{h} \right)^2 v_b - 2 \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} + \left(\frac{h}{\pi} \right)^2 \frac{\partial^4 v_b}{\partial n^4} \right] \quad (a.7)$$

が得られる。この場合の境界条件は、以下のように表される。

$$v_b = 0, \quad \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} = 0 \quad \text{at Boundary}$$

これは、壁面上で $\omega = 0$ となることを示す。実際には、壁面上では渦層が存在しており、渦なしではない。しかし、この渦層を考慮することは、煩わしい。ここでは、便宜上この渦層の上で、境界条件を与え、そこで流体がスリップするものと見なす。また、流速及び外力を与えてこれに代入すれば、

$$\begin{aligned} \frac{18}{\kappa^2 \pi^2} \left(\phi - \frac{1}{2\kappa} \right) \frac{h}{r} u_* \left[1 - r_j \delta (n - n_j) B \right] \\ = \left[v_b - 2 \left(\frac{h}{\pi} \right)^2 \frac{\partial^2 v_b}{\partial n^2} + \left(\frac{h}{\pi} \right)^4 \frac{\partial^4 v_b}{\partial n^4} \right] \end{aligned} \quad (a.8)$$

$$r_j = \frac{(\phi - 2/\kappa)^2}{(\phi - 0.5/\kappa)} \frac{\kappa r}{6B} \left(\frac{\beta_a \pi l_o \sin \alpha}{\Delta s} \right)_j, \quad (r_j : n = n_j \text{ における } r)$$

となる。この式の解は式 (2.4) の解よりも拡散性が強く、主流の横断分布が同じならば、二次流分布はより滑らかに変化するようになる。

また、上式で外力項がない場合では、二次流の底面流向は、

$$\frac{v_b}{u_b} = \frac{18}{\kappa^2 \pi^2} \frac{(\phi - 0.5/\kappa)}{(\phi - 2/\kappa)} \frac{h}{r} = \frac{18}{\kappa^2 \pi^2} \frac{(\sqrt{2/f} - 0.5/\kappa)}{(\sqrt{2/f} - 2/\kappa)} \frac{h}{r}$$

f : 抵抗係数

で与えられる。同様にして、平均主流速に対する底面における二次流の偏角は、

$$v_b/u \cong 7.3 (1 - 1/\phi)$$

となり、従来の研究に対して、ほぼ妥当な値をとる。

(3) 主流速算定式

一様湾曲流路において、流れが流下方向に平衡であるとする、 $\partial/\partial s = 0$ という条件より、式(a.1) は以下のように変形される。

$$v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} + \frac{\partial \tau_{sz}}{\partial z} + \frac{F_s}{\rho \Delta s} \delta(n - n_j) \quad (\text{a.9})$$

ここで、主流速の鉛直流速分布は、Engelund の二次曲線を用いて、

$$u = (\phi + 1/\kappa) u_* - 3/\kappa \cdot u_* (1 - z/h)^2$$

と与えられているが、

$$1 - (1 - z/h)^2 \cong \sin(\pi z/2h)$$

と近似し、

$$u = (\phi - 2/\kappa) u_* + 3/\kappa \cdot u_* \sin(\pi z/2h)$$

と表しておく。式(a.9)を鉛直方向に積分すると

$$\begin{aligned} \text{左辺} &= \int \left(v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz = \int \left(\frac{\partial u v}{\partial n} + \frac{\partial u w}{\partial z} \right) dz \\ &= \frac{\partial}{\partial n} \int u v dz - (u v)_\xi \frac{\partial \xi}{\partial n} + (u v)_{z_b} \frac{\partial z_b}{\partial n} + (u w)_\xi - (u w)_{z_b} \\ &= \frac{\partial}{\partial n} \int u v dz = \frac{4}{\kappa \pi} \frac{\partial}{\partial n} (u_* v_b h) \end{aligned}$$

$$\text{右辺第一項} = \int -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} dz = g h I$$

$$\text{右辺第二項} = \int \epsilon \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} dz \cong \frac{\partial}{\partial n} \int \tau_{sn} dz - \tau_{sn} \frac{\partial h}{\partial n} = h \frac{\partial \tau_{sn}}{\partial n} \cong \epsilon h \phi \frac{\partial^2 u_*}{\partial n^2}$$

$$\text{右辺第三項} = \int \frac{\partial \tau_{sz}}{\partial z} dz = -\tau = -u_*^2$$

$$\text{右辺第四項} = \int \frac{F_s}{\rho \Delta s} \delta(n - n_j) dz = -\frac{C_D}{2} H l \sin \alpha 4^2 U_*^2 / \Delta s \cdot \delta(n - n_j)$$

となる。ただし、 $u_a(n) = \phi u_*(n)$ とした。すなわち、鉛直流速分布形の相似性は依然として仮定されている。したがって、鉛直流速分布形が仮定したものと異なる場所では精度はそれほど高くない。

以上より、主流速の横断分布について次式

$$u_*^2 - \underbrace{\varepsilon h \phi \frac{\partial^2 u_*}{\partial n^2}}_{\text{拡散項}} + \underbrace{\frac{4}{\kappa \pi} \frac{\partial}{\partial n} (u_* v_b h)}_{\text{二次流による運動量輸送}} + \underbrace{\frac{C_D}{2} \frac{H I \sin \alpha 4^2 U_*^2}{ds} \delta(n - n_j)}_{\text{ベーン工の抗力}} = g h I$$

(a.10)

が得られる。

上式において、拡散項と二次流による運動量輸及びベーン工の抗力を無視すれば

$$u_*^2 = g h I$$

となり、平均流速の横断分布は、第二章で述べた様になる。($u_a(n) = \phi u_* = \phi \sqrt{g h(n) I}$)

より正確に流速場を算定するためには、式 (a.8) 及び式 (a.10) を連立して解けば良い。しかし、これにより微分方程式の階数が上がり、河床形状の算定もあわせれば非線型三元連立方程式となるため、難易度が増す。またこれにより、全ての現象を表せ得るわけでもなく、この式のオーダーでは流下方向の変化を無視しえなくなると考えられる。したがって、本資料ではでき得る限り簡潔にするために2章に示すような簡略化を行った。なお、流れに関する式系を簡略化しても、外岸の河床高が比較的良好に表せるのは、流れ場が元々保存形で表記されていることと、河床形状を求める際に流れ場の情報を横断方向に積分していることに依る。

ベーン工の洗掘軽減効果
と設計法に関する研究

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第2644号
昭和63年4月(1988年)
福岡捷二, 渡辺明英
黒川信俊

要旨

本資料は、河道湾曲部における外岸側の河床の洗掘と内岸側での土砂の堆積を軽減する河床変動対策として、ベーン工法を取り上げ、従来のものとは異なる土研型ベーン工の開発を行い、その配置法と設置後の河床形状の変化特性について定量的な考察を理論的及び実験的に行い、この結果を用いた設計法についての検討結果を述べたものである。

キーワード：ベーン工，湾曲部，河床変動，局所洗掘，二次流，河岸侵食

郵便はがき

305-□□

40円切手
をはいて
下さい

建設省土木研究所

茨城県つくば市大字旭一番地

御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 2644 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名

印

土木研究所資料第2644号

