

越流型水制周辺の流れと河床変動

FLOW AND BED TOPOGRAPHY AROUND GROINS INSTALLED IN A STRAIGHT CHANNEL

福岡捷二¹・西村達也²・岡信昌利³・川口広司³

Shoji FUKUOKA, Tatsuya NISHIMURA,
Masatoshi OKANOBU and Hiroshi KAWAGUCHI

¹正会員 Ph. D 工博 広島大学教授 工学部第4類(建設系) (〒739 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 (株)建設技術研究所 技術第5部 (〒103 東京都中央区日本橋堀留町1-7-7)

³学生会員 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程前期

The fundamental effect of groins is to prevent from bank erosion by lowering velocity near the bank compared to the other part of the channel. The structure and arrangement of groins in river have been mainly determined by channel alignment, destructive history, and hydraulic model experiment. At present, the numerical model have been developed, which can determine the structure and arrangement of groin correspond to the arbitrary channel alignment. The groins were set in the straight reach of channel because of environmental consideration. In this paper, we studied the flow and bed topography around groin from the three experiments in a straight channel and developed the quasi three-dimensional numerical model which represents the mechanism of flow and bed deformation around groins.

Key Words: submerged groin arrangement, straight channel, flow and bed profile, quasi three-dimensional numerical analysis

1. 序論

従来、水制の配置方法や構造諸元は、河道の法線形や被災履歴を考慮しながら机上検討や模型実験によって決められてきた。現在では、この方法に加えて合理的な水制工の設置方法を目的として、湾曲部に設置された水制周辺の解析モデルの開発が行われている。²⁾³⁾⁴⁾

水制工は、環境面からもその設置を要請されるようになり、望ましい河川環境を創り出すために単調な直線河道にも水制工が利用されるようになってきている。すなわち、水制が作り出す凹凸に富んだ河床形状を利用して多様な生態系を形成しようとするものである。このような河川環境の改善をも目的とした水制の研究は諸についたばかりであることから、本研究では直線水路に越流型水制を設置し、水制周辺の流れと河床変動を詳細に測定して、水制周辺の流れの基本的な構造を把握する。これまで直線水路における水制については、比較的小規模な平

坦固定床水路に単一の水制を設置し、水制周辺の流れの構造を調べた基礎的な研究が多い。移動床での水制に関する実験も見られるが、系統だった研究とはなっていない。

本研究は、大型移動床水路に種々の配置形態で連続的に越流型水制を設置し系統的に実験を行い、水制周りの流れと河床変動について精度の高いデータを得る。このために、流れの構造を支配する水制に関する項目として、水制間隔と水制角度を変化させ、河岸に対して水制を直角に設置した2ケースと、水制を15°上流向きに設置したケースの計3ケースについて検討している。さらに、準三次元モデルを用いて、実験によって求められた流れと河床変動について解析を行い実験結果と比較を行った。用いた解析モデル⁵⁾は個々の水制が流れに及ぼす流体力を基本式に取り込んだ実用的な方法であり、河川環境の改善を目的とした合理的な水制の設計法を目指すものである。

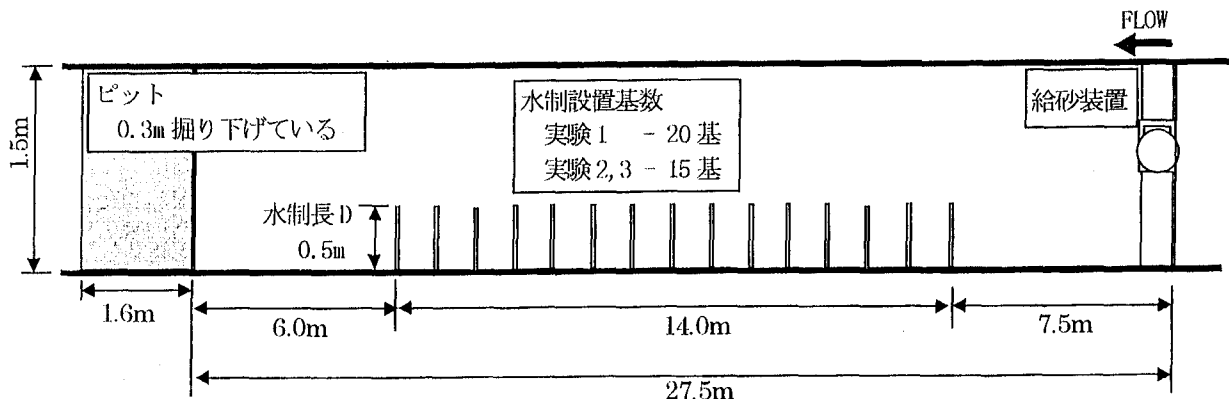


図-1 実験水路

表-1 実験条件及び水制諸元

	実験 1	実験 2	実験 3
流量 Q (l/s)	36.4		
水路長 (m)	27.5		
水路幅 B (m)	1.5		
初期河床勾配	1/600		
給砂量 (l/s)	0.004		
水制長 D (m)	0.5		
水制幅 (m)	0.05		
水制高 (m)	0.03		
水制間隔 L (m)	0.75	1.0	1.0
水制設置基数	20	15	15
水制角度	直角	直角	15° 上流向き
水制間隔/水制長 L/D	1.5	2.0	2.0

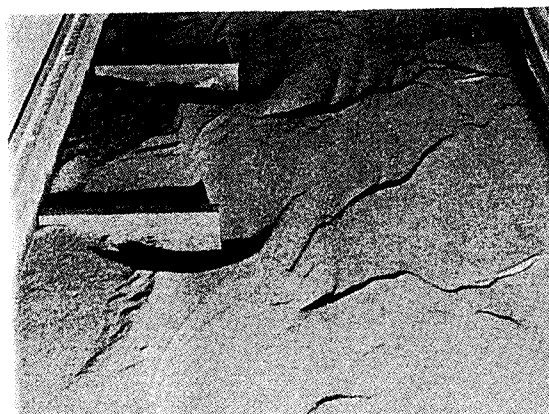


写真-1 直線水路に設置された越流型水制

2. 越流型水制を用いた移動床実験

(1) 実験条件及び実験方法

実験水路は図-1 に示す水路長 27.5m、水路幅 1.5m のコンクリート製直線水路であり、水路の下流端には流砂量を測定するために水路床を 0.3m 掘り下げてピットを設けている。河床材料は比重 2.6、粒径 0.8×10^{-3} m のほぼ一様な砂であり、水路床から 0.2m ほどの高さに初期河床勾配 1/600 で敷き詰めている。

写真 1 に示す木製の水制を水路床に固定し、初期河床面から 0.03m の高さに設置した。流量は水制高と水深の比が 0.4 程度になるように 36.4l/s に設定した。給砂量は、下流端で測定した流砂量に相当する量を上流端で給砂している。通水から 10 時間後に流砂量は一定となり河床形状はほぼ平衡状態になった。流速は河床形状が平衡状態に達してから電磁流速計を用いて測定を行なった。

(2) 水制の諸元

実験は表-1 に示す 3 ケースについて行なった。

用いた水制は水路幅 $B=1.5$ m に対して水制長 $D=0.5$ m である。水制の周りの流れと河床変動を詳細に調べることができるように、水路幅 B

と水制長 L の比は通常用いられている諸元よりも大きくした。¹⁾ 水制間隔 L は 0.75m、1.0m の 2 種類であり、配置や構造の違いによる機能を評価するために、3 ケースとも水制の設置区間及び水理条件を同じにしている。実験 1 及び実験 2 は水制を流れに直角に設置している。実験 3 は、水制が流れに対して上流に 15° 傾いており、流れ方向に投影された水制長は直角に設置した場合と同様に 0.5m であるようにつくられている。

3. 越流型水制工周辺の流れと河床変動の計算

(1) 流れの基礎方程式

解析の一般性を持たせるため座標系は直交曲線座標を用い、流下方向に s 軸、これと直交する横断方向に n 軸、鉛直方向に z 軸をとる。 z 軸方向の運動方程式については静水圧分布が成り立つものと仮定し、水路中心の曲率半径に比べて半川幅は十分に小さい ($r_0 \gg B/2$) ものとする。

川底 z_0 から高さ z まで積分し、これを s 、 n 方向の運動方程式に代入すると次の基本式が得られる。³⁾ ここに、 u 、 v は s 、 n 方向の流速、 H は水位、 r は曲率半径、 g は重力加速度、 ε は渦動粘性係数、 ρ は水の密度、 δ はディラックの δ 関数である。

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} - \left(\int_{z_0}^z \frac{\partial u}{\partial s} dz + \int_{z_0}^z \frac{\partial v}{\partial n} dz + \int_{z_0}^z \frac{v}{r} dz \right) \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} = -g \frac{\partial H}{\partial s} + 2\varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{F'_s}{\rho} \delta(s - s_i) \delta(n - n_i) \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \left(\int_{z_0}^z \frac{\partial u}{\partial s} dz + \int_{z_0}^z \frac{\partial v}{\partial n} dz + \int_{z_0}^z \frac{v}{r} dz \right) \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} = -g \frac{\partial H}{\partial n} + \varepsilon \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + 2\varepsilon \frac{\partial^2 v}{\partial n^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{F'_n}{\rho} \delta(s - s_i) \delta(n - n_i) \quad (2)$$

F'_s , F'_n はそれぞれ水制が流れに及ぼす抗力及び揚力であり次式で表す。この外力を運動方程式(1),(2)に導入することによって水制工が流れに及ぼす影響を取り入れる。

$$\left. \begin{aligned} F'_s &= \frac{\partial(F_{sD} + F_{nL})}{\partial z} = \frac{C_D}{2} \frac{\partial}{\partial z} (u|u|) + \frac{C_L}{2} \frac{\partial}{\partial z} (v|v|) \\ F'_n &= \frac{\partial(F_{sL} + F_{sD})}{\partial z} = \frac{C_L}{2} \frac{\partial}{\partial z} (u|u|) + \frac{C_D}{2} \frac{\partial}{\partial z} (v|v|) \end{aligned} \right\} (3)$$

ここに、 C_D, C_L はそれぞれ抗力係数及び揚力係数を示す。式(3)において、水制の向きが流向と直交する場合には、 $F_{nL} = F_{nD} = 0$ となり、縦断方向流速による抗力と揚力 F_{sD} , F_{sL} だけが値を有することになる。また、直線水路の水制の計算では基本式で $1/r=0$ とする。

(2) 流れと河床変動の計算法

s, n 方向流速 u, v の計算法は、前報³⁾と同じ手法を用いている。ここで、水制工が流れに及ぼす外力は、河床高 z_0 から水制工の高さ H_s 間で値を有し、水制上面から水面までは「0」であることから、水制が流れに及ぼす抗力及び揚力の体積積分は、以下のように簡略化することができる。

$$\left. \begin{aligned} &\int_V \frac{F'_s}{\rho} \delta(s - s_i) \delta(n - n_i) \cos \ell \pi z' dz \\ &= \ell_s \int_{z_0}^{z_0+H_s} \frac{F'_s}{\rho} \delta(s - s_i) \delta(n - n_i) \cos \ell \pi z' dz \\ &\int_V \frac{F'_n}{\rho} \delta(s - s_i) \delta(n - n_i) \cos \ell \pi z' dz \\ &= \ell_s \int_{z_0}^{z_0+H_s} \frac{F'_n}{\rho} \delta(s - s_i) \delta(n - n_i) \cos \ell \pi z' dz \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに、 ℓ_s は差分メッシュ内の水制工の長さ、 H_s は水制工の高さを示す。流速 u, v の計算地点に、(4)式で与えた抗力及び揚力 F'_s, F'_n を与えることによって、水制が流れに与える影響を計算に

取り入れる。また、 z 方向の拡散項の河床での値は、河床せん断力で与える。計算領域は実験水路の全長、全幅であり、境界条件は上流端において流量、下流端において水位を与えて計算を行う。河床高の変化は、掃流砂を対象とした次の流砂の連続式を用いる。

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bs}}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial (q_{Bn})}{\partial n} \right) = 0 \quad (5)$$

ここに、 t は時間、 λ は河床材料の空隙率、 q_{Bs} , q_{Bn} は s, n 方向の単位幅当たりの掃流砂量を示し、各々Meyer-Peter & Mullerの式、長谷川の式を用いる。

境界条件は上流端で流速計算結果をもとに s 方向の流砂量式によって算定された平衡流砂量を与え、下流端で河床高を与える。

(3) 水制工設置地点の計算方法

水制工設置地点の流れの計算では、水制工設置地点の河床高を水制工の高さ分上昇させ、水制工の上面を河床として取り扱い、流速の計算地点に(3)式で与えた抗力及び揚力 F'_s, F'_n を与えることによって計算を行う。水制の方向が流向に対して直角方向ではなく、ある一定の角度で上流または下流側に向いている場合には、水制工の設置位置とメッシュ分割との関係から、図-2に示すようにモデル化して水制による外力を与える。

河床高の計算では、著者らの前報の計算法³⁾と同様に、水制工の上面ではせん断力は働いているが、河床変動は起こらないものとする。

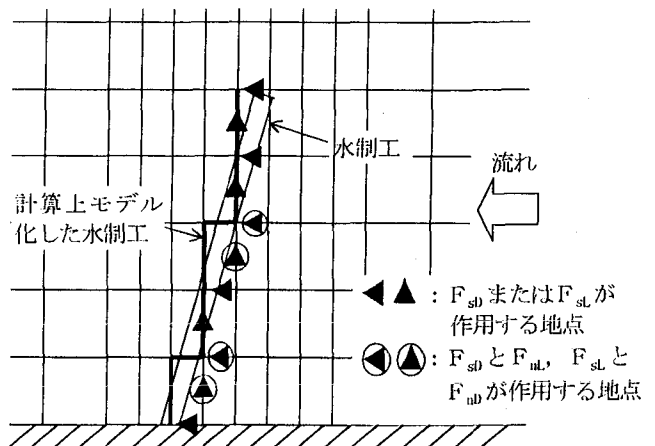


図-2 斜め水制工のモデル化

4. 実験結果と解析結果の比較

(1) 水位・河床高

図-3は河床高が平衡状態に達した時の横断平均水位・河床高の縦断図である。各実験とも水制が設置されたことによって、水制域の流れの抵抗が

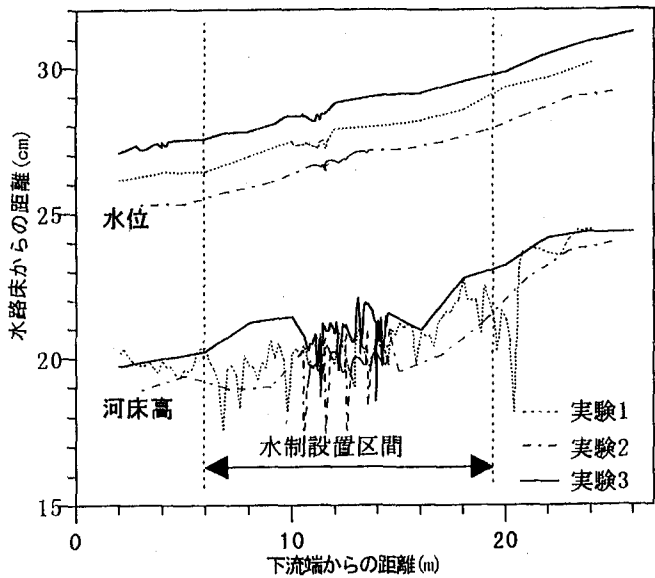


図-3 縦断水位・河床高

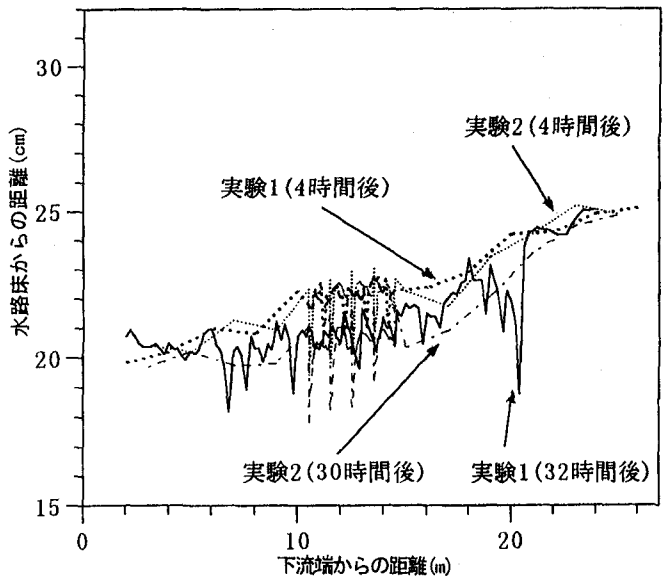


図-4 河床高の時間変化

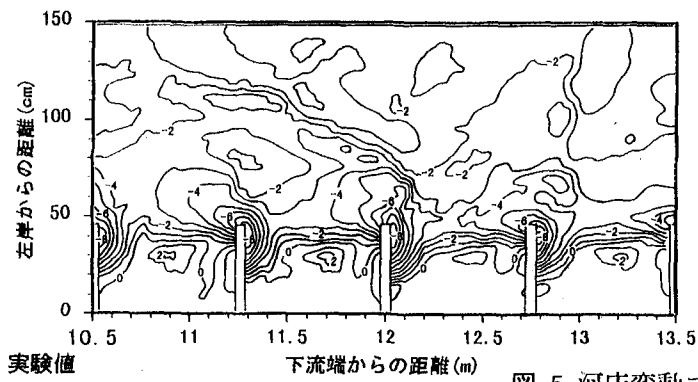
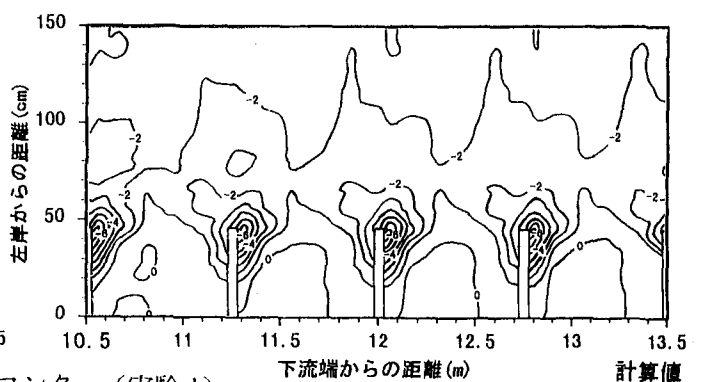


図-5 河床変動コンター (実験 1)



計算値

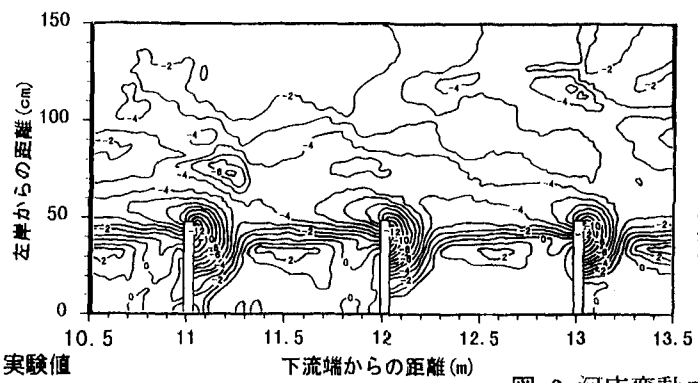
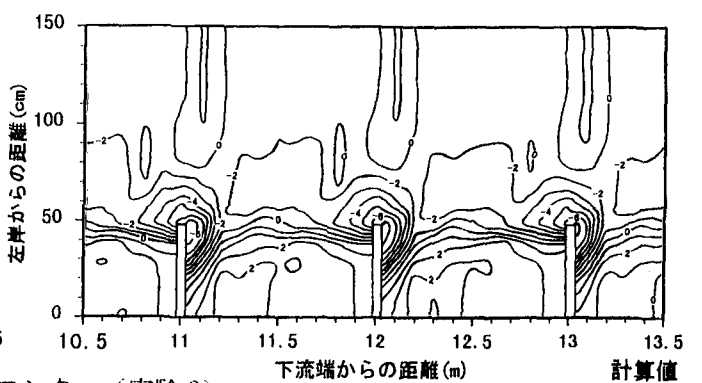


図-6 河床変動コンター (実験 2)



計算値

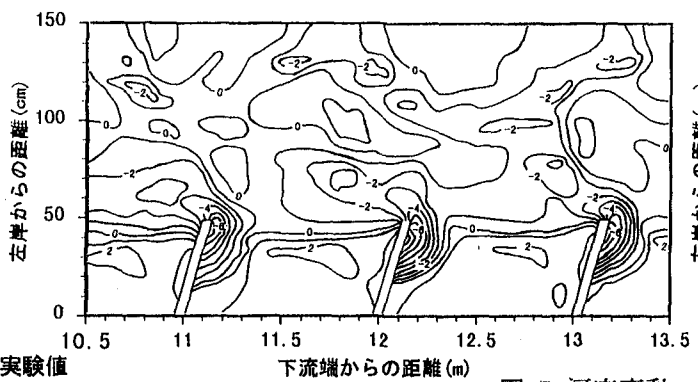
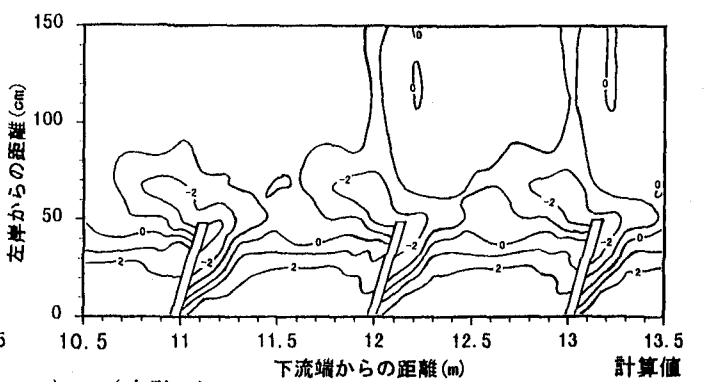


図-7 河床変動コンター (実験 3)



計算値

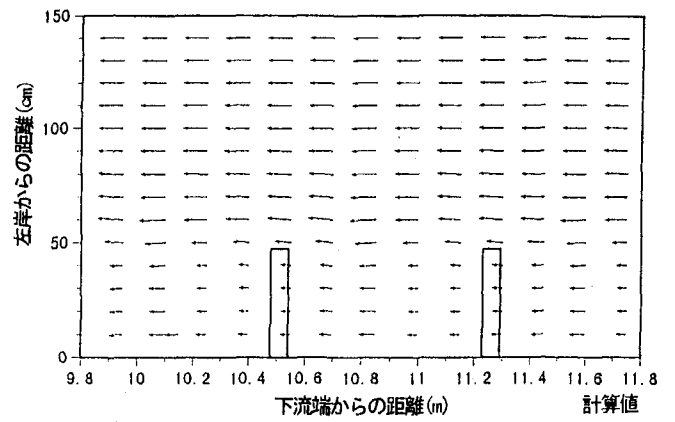
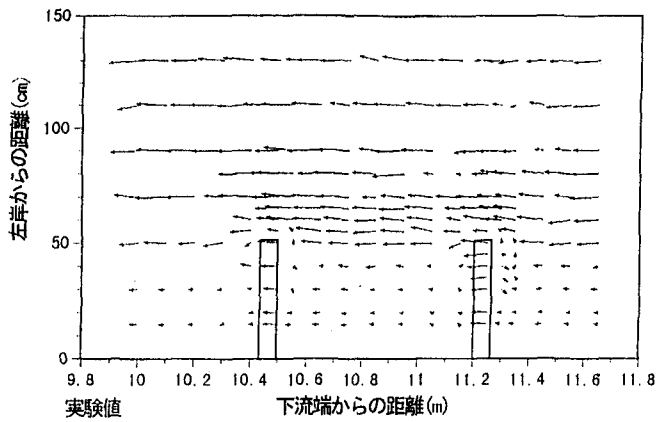


図-8 流速ベクトル (実験 1)

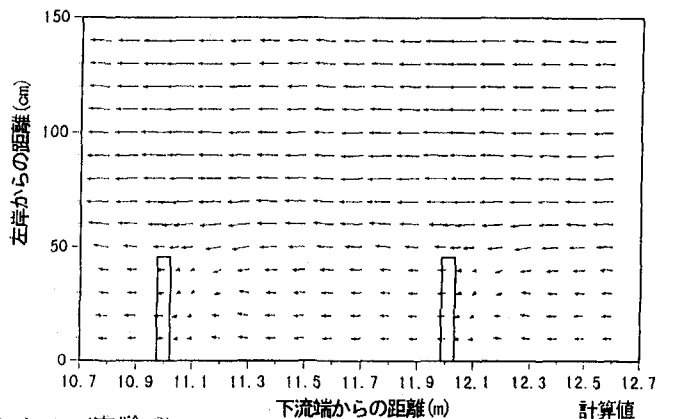
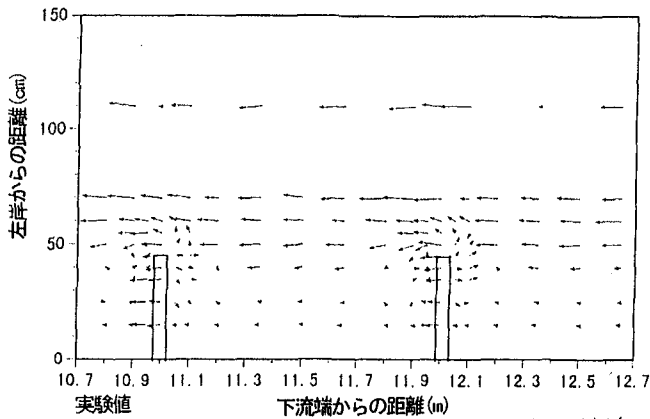


図-9 流速ベクトル (実験 2)

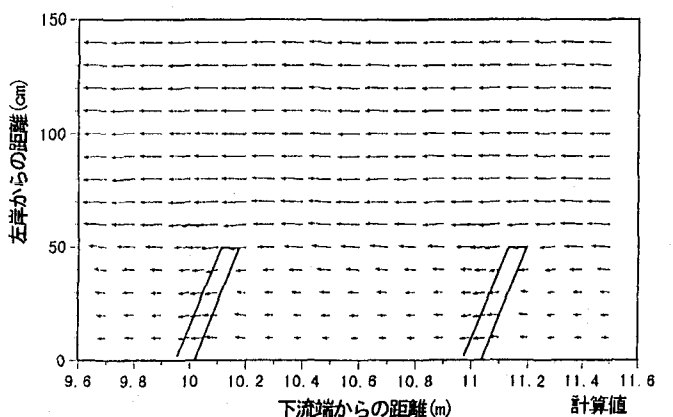
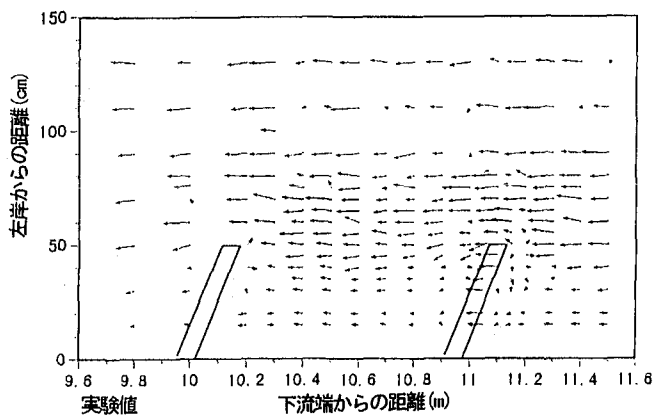


図-10 流速ベクトル (実験 3)

増加するため、水制域で流速が減じ、主流域で流速が上昇する。このため、水制設置区間ではその区間の上下流部に比較して全体として 2.0cm 程度の河床低下がみられる。しかし、水路幅が十分広く、また水制設置区間が十分長くとられているため水制設置区間はほぼ等流とみなしてよい。

図-4 は河床高の時間変化を表している。実験 2 の水制の配置が実験 1 の配置よりも流れに及ぼす水制の抵抗が大きいいため、時間が経過するとともに局所洗掘および河床低下が大きくなっていく。水制設置区間における平衡状態の平均水深は実験 1, 2, 3 のそれぞれで 7.41cm、7.73cm、6.56cm である。

(2) 河床変動

図-5 は実験 1 の河床変動の実験結果と 3 (2) で示した方法による計算結果を示している。計算に用いた抗力係数及び揚力係数は $C_D=5.0, C_L=0.1$ である。水制の先端部では大きな洗掘が起こり、水制背後で堆積が現れている。計算結果は水制先端の洗掘領域の大きさ、洗掘深とも実験結果をよく表現できている。

図-6 は実験 2 の結果を示している。実験 1 と比較すると、水制先端の洗掘深が増加している。水制の先端部の局所洗掘が大きくなった結果、水制域での堆積量も増加している。実験 2 の計算結果は実験結果に比べると水制先端での洗掘深が小さ

く計算されている。水制近傍の大きな深掘れを伴う流れについては静水圧近似を用いた計算法では、水制周辺の局所洗掘の特徴は表現し得ても洗掘深は正しく表現できない。

図-7は実験3の結果を示している。水制を15°上流向きに設置した実験3では実験2に比べて水制先端の洗掘深が小さくなり水制域での堆積量も減少している。実験1と比べると、洗掘深はほぼ同じだが洗掘孔は大きく、洗掘孔から水制背後に運ばれる土砂が多くなり、堆積量が増加する。計算結果は水制先端の洗掘深がやや小さくなっているが、斜め水制周辺で起こる特徴的な洗掘現象を概ね表現できている。全体的に見て計算結果は河床波を計算できないために主流域では河床が平坦化されているが、水制周辺における河床変動の機構は概ね表現できている。

(3) 流速分布

図-8は実験1の河床から1cm上の流速ベクトルの実験結果と計算結果を示している。水制の抵抗によって水制域の流速が減少する。また、水制の先端部では水制域に回り込む流れが見られる。この流れは水制域へ土砂を運び込む働きをすることから、水制先端の洗掘孔の大きさが水制域の堆積量を定める主な要因であることがわかる。

図-9は実験2の結果を示している。実験1と比較して水制域の流速が小さく、水制の先端から水制域に向かう顕著な流れが現れている。これに対し、計算結果は実験結果と比べて水制域の流速がやや大きく計算されている。これは、先に示した局所洗掘深が小さめに計算されていることと対応し、水制の流れの評価が不十分であることを示している。

図-10は実験3の結果を示している。実験1、2と比較して水制背後で主流域から水制域へ入り込む流れが大きくなっている。このため、水制の背後で起こる剥離による渦が小さくなり、水制による抵抗は小さくなる。計算結果は実験結果に比べて流れの直線性が大きくなっているため、水制周辺の洗掘・堆積量がやや小さめに計算されている。

(4) 水制群のある移動床流れの抵抗システム

$L/D=2.0$ (実験2)のケースでは $L/D=1.5$ (実験1)よりも水深が大きい。これは $L/D=2.0$ の水制配置のほうが流れに及ぼす抵抗が大きいことを示している。水制群による抵抗増大は次の2つの機構が重なって生じていると考えられる。

- a) 水制によって水制域の抵抗が増大するため、水制域の流速が減少し、主流域の流速が増大する。このために、水制設置区間の主流域の河床は低下する。図-3、図-4に示すように、 $L/D=2.0$ の方が $L/D=1.5$ に比べて河床の低下量は大きくなる。両者で河床低下に差が生じる主な原因は、

水制周りの局所洗掘とそれによって生じる水制域の堆積、それらの規模である。

- b) 河床低下の起きている主流域と堆積が生じている。水制域間の河床高の差は、両者の境界に大きな流速差を生じさせ、これが付加的な境界抵抗となって現れる。 $L/D=2.0$ の方が $L/D=1.5$ より河床高の差が大きいため、付加抵抗が大きくなる。

5. まとめと結論

近年、水制の水理的、環境的役割に大きな関心が集まっている。しかし、水制周りの流れと河床変動については、精度の高い実験及び現地データが不足している。本研究では大型直線水路において従来の水制の配置に比較して水制長/水路幅が大きい($D/B=1/3$)場合について、越流型水制群まわりの流れと河床変動について詳細に測定し、信頼度の高いデータを得るとともに、それらの機構について検討し以下の結論を得た。

- (1) 河岸に対し直角に設置された水制では、水制間隔 L と水制長 D の比が $L/D=2.0$ のほうが $L/D=1.5$ の場合よりも流れに及ぼす水制の抵抗が大きく、水制先端の局所洗掘深及び、水制域での堆積の規模は大きくなる。
- (2) 水制を15°上流向きに設置した場合($L/D=2.0$)には、水制を直角に設置した場合($L/D=2.0$)に比べて水制先端部から水制域へ流入する流れが増大する。これによって、水制背後の剥離域が減少し、流れの抵抗は小さくなる。
- (3) 水制の外力を取り込んだ準三次元モデルは各実験において水制周辺の流れと河床変動の特徴的な機構を説明することができる。しかし、水制先端の洗掘孔が大きくなると流れの非静水圧分布の程度が著しくなる。そのため、静水圧近似を用いた解析では流れ場の解析精度が悪くなり、洗掘孔が小さく計算される。

参考文献

- 1) 秋草勲・吉川秀夫・坂上義次郎・芦田和男・土屋昭彦：水制に関する研究，土木研究所報告，第107号，pp.63-153,1960。
- 2) 福岡捷二・高橋晃・森田克史：信濃川小千谷、越路地区河道計画模型実験報告書，土木研究所資料，第2610号,309p,1988。
- 3) 福岡捷二・渡辺明英・西村達也：水制工の配置法の研究，土木学会論文集，No.443,II-18,pp.27-36,1992。
- 4) 崇田徳彦・清水康行：水制を含む流れの準三次元数値計算モデルの開発，土木学会論文集，No.497,II-28,pp.31-39,1994。

(1997. 9. 30 受付)