

# 設置角度の異なる越流型水制周辺の 流れと流体力分布特性

## FLOW AND HYDRODYNAMIC FORCE DISTRIBUTIONS OF SUBMERSED GROINS FOR DIFFERENT GROIN ANGLES

川口広司<sup>1</sup>・福岡捷二<sup>2</sup>・渡邊明英<sup>3</sup>

Hiroshi KAWAGUCHI, Shoji FUKUOKA and Akihide WATANABE

<sup>1</sup>正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 研究官(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 Ph.D 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻 (同上)

Groins are mainly used in curved channels to protect river bank against erosion. Arrangement of the groins has been investigated through laboratory experiments, numerical analysis and field observation in river. The groins are often set up at right angle or toward upstream from bank, because scouring is prevented in the downstream and sediment deposition occurs between the groins in these arrangements. On the other, it is important that the weight of groin materials is enough not so as to be washed away.

In this paper, flow and hydrodynamic force distributions for different groin angles accessed by experiments and 3-D numerical flow model and suitable groin angle is discussed.

**Key Words :** *Submersible groins, Hydrodynamic force distribution, groin angle, Experiments, 3-D numerical flow model*

### 1. 序論

水制工は河岸侵食対策を主たる目的として設置される河川構造物である。これまで現地観測や模型実験、数値解析により様々な水制配置・設計法に関する研究が行われてきた<sup>1)~9)</sup>。

水制の設置角度は、周辺の流れ場や河床変動に与える影響が大きいため、配置及び設計を検討する上で重要な諸元である。水制工は流れに対して直角あるいは上流に向けて設置されることが多い。下流に向けた水制群と比べ水制元付け部下流の洗掘が抑えられ、水制間の土砂堆積量が多くなるためである<sup>5)6)</sup>。

一方、コンクリートブロックなどで構成される水制の材料は洪水時の流体力により滑動及び転動により流失しない重量が求められる。しかし、水制が設置された場の流れは三次元的となるため、作用する抗力・揚力を用いた二次元的評価法は有用であるが、幾つかの解決すべき課題がある<sup>7)</sup>。

本研究は、水制周辺の流れの三次元数値解析と実験により設置角度の異なる水制群に作用する流体力の分布特性を明らかにし、これまでの水制群の設置角度の議論に

水制に作用する流体力分布特性の視点からの検討を加えるとともに、二次元的解析法の課題を明らかにする。

### 2. 水制周辺流れの三次元数値解析

#### (1) 流れの基礎式と計算条件

流れの基礎式はデカルト座標系における運動方程式と連続式である。渦動粘性係数はSmagolinsky定数モデルにより算出した。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = gI_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (i=1\sim 3) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\tau_{ji} / \rho = 2(\nu + \varepsilon) S_{ij}, \quad \varepsilon = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad \Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

ここで、 $x_1 (=x)$ は流下方向、 $x_2 (=y)$ は横断方向、 $x_3 (=z)$ は水路底面と垂直な方向であり、 $x_i$ 方向の格子空間平均流速を $u_i$  ( $u_1=u$ ,  $u_2=v$ ,  $u_3=w$ )とする。座標原点は水路上流端、右岸の水路底面とする。 $I_1$ は河床勾配、 $I_2$ は0、 $I_3$ は1

である。  $\tau_{ij}$  は  $x_j$  面に作用する  $x_i$  方向のせん断力を表す応力テンソルであり、渦動粘性係数  $\varepsilon$  は Smagolinsky 定数  $C_s$ 、フィルター幅  $\Delta$ 、平均ひずみ速度  $S_{ij}$  により算出される。  $g$  は重力加速度、 $\rho$  は密度、 $p$  は圧力、 $\nu$  は動粘性係数である。

境界条件として、境界面の法線方向流速成分は0、境界面のせん断力は対数則から求まるとした。水制角部の異なる面のせん断力は別々に求めた。境界面のせん断力と渦動粘性係数から流速勾配を算出し移流項に用いた。水路側面の水面勾配と圧力勾配は0、水路底面の圧力勾配は静水圧勾配、水制を構成する  $x, y$  面の圧力勾配は水位勾配とした。計算対象領域は水路全体としたため上流端で流量、下流端で一定水位を与えた。上流端では初期条件（流速0、水深一定）から重力と  $\tau_{xx}$  の釣り合いにより徐々に流れを変化させ一定流量にした。

計算のアルゴリズムはSMAC法を用いた。運動方程式の離散化は、移流項に三次精度風上差分、圧力項には二次精度中央差分を用いた。境界近傍計算点の移流項の風上差分は一次精度とした。上流及び下流向き水制はデカルト座標で階段状にモデル化して計算した。対象とする越流型水制群周辺の流れは流下方向の運動量輸送が大きいので、境界適合座標を用いてなくてもメッシュ数が十分であれば  $x$  面が斜めに配置されることで水制をモデル化できる。計算条件は  $\Delta x = 2.5\text{cm}$ 、 $\Delta y = 2\text{cm}$ 、 $\Delta z = 0.5\text{cm}$  であった。実験の水面形と合うように、粗度係数は  $z$  面で  $k_{zw} = 0.8\text{cm}$ 、 $x, y$  面で  $k_{xx} = k_{yy} = 0.25\text{cm}$  を与え、 $C_s = 0.3$  を用いた。計算領域は後述の圧力の境界条件を考慮して縦断距離を15mとし、メッシュ数は流体以外のメッシュも含めて  $702 \times 77 \times 15$  とした。

## (2) 圧力・水位の計算法

自由水面のある流れ場において、SMAC法などの半陰解法は、流速ベクトルを運動方程式により陽的に算出した後、次のステップの連続式を満たすように水位及び圧力を連続式により同時に収束させなければならない。流れの三次元数値解析は水位と圧力の収束計算に多大な時間を要する。ここでは、図-1に示す鉛直二次元デカルト座標系における連続式の離散式と圧力・水位の計算法の高速化について示す。

スタッガード格子上に流速  $u, w$ 、水位  $\zeta$ 、圧力  $p$  の評価点を配置すると連続式は次のように離散化される。

$$\frac{u_{(i+1),k} - u_{i,k}}{\Delta x} + \frac{w_{i,(k+1)} - w_{i,k}}{\Delta z} = 0 \quad (5)$$

一方、水深積分された連続式を離散化すると、

$$\frac{\Delta(\zeta_i - z_B)}{\Delta t} + \frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta x} = 0 \quad (6)$$

例えば、 $i=3$ だと

$$q_i = \sum_{k=1}^5 u_{i,k} \Delta z + u_{i,6} \left( \frac{\zeta_i + \zeta_{i-1}}{2} - 4\Delta z - z_B \right) \quad (7)$$

となる。これらの式により次のステップの連続式を満たす

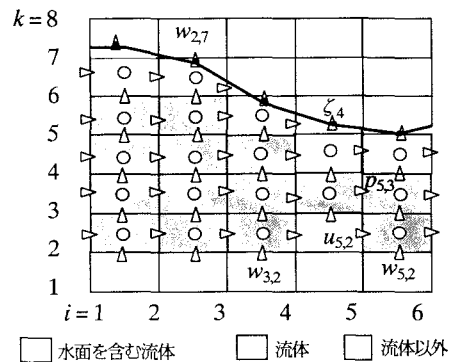


図-1 自由水面のある流れのデカルト座標系物理量評価点

表-1 実験条件<sup>7)</sup>

流量 $Q$ (l/s)	30.67
水路延長(m)	10
水路幅(m)	1.5
水路床勾配 $i$	1/500
水制長 $l$ (cm)	50
水制幅 $b$ (cm)	5
水制高 $h_g$ (cm)	3
水制間隔 $s$ (m)	1.0
水制間隔/水制長 $s/l$	2
水制角度	上流向き $15^\circ$ 、直角、 下流向き $15^\circ$

ように圧力と水位の収束計算を行った。鉛直の流体及び水面を含む流体メッシュの位置は、時間ステップごとに水面の移動に合わせて変化させた。境界条件として水面を含む流体メッシュ及び上下流端での圧力は静水圧を仮定した。水面での鉛直流速は圧力・水位の収束計算の後、例えば次の運動学的境界条件の離散式から求めた。

$$w_{2,7} = \frac{\Delta \zeta_2}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( u_{3,6} \frac{\zeta_3 - \zeta_2}{\Delta x} + u_{2,6} \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\Delta x} \right) \quad (8)$$

構築した数値解析モデルはこれらを三次元に拡張して圧力と水位、水面での鉛直流速を計算した。

圧力の反復計算は各物理量三次元配列の一次元列ベクトル化、残差切除法<sup>10)</sup>により高速化を行った。流体メッシュの判定用に変数配列をつくり、流体以外のメッシュも含めて一次元列ベクトルに変換して収束計算を行った。残差切除法は圧力方程式の残差が0になるように圧力の修正ベクトルを求めた後、その大きさを増減させて次ステップにおけるの圧力方程式の残差を最小にする解法である。構築した数値解析モデルでは圧力の修正ベクトルをRed-Black法により解いた。また、記憶容量を節約して十分な精度で圧力を計算できるように、圧力は静水圧とそこからの偏差に分けて収束計算を行った。

## 3. 設置角度の異なる水制周辺の流れの比較検討

流れの三次元数値解析の結果を著者らによる既往の実

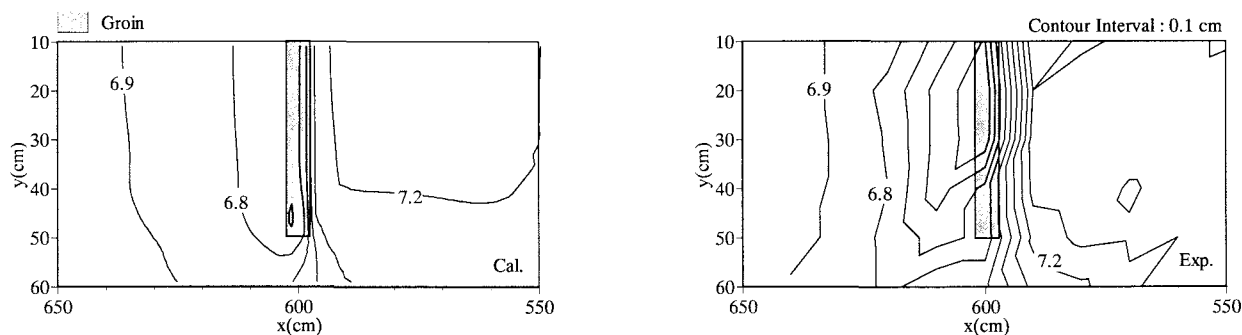


図-2 直角水制周辺の水位コンターの計算値と実測値の比較

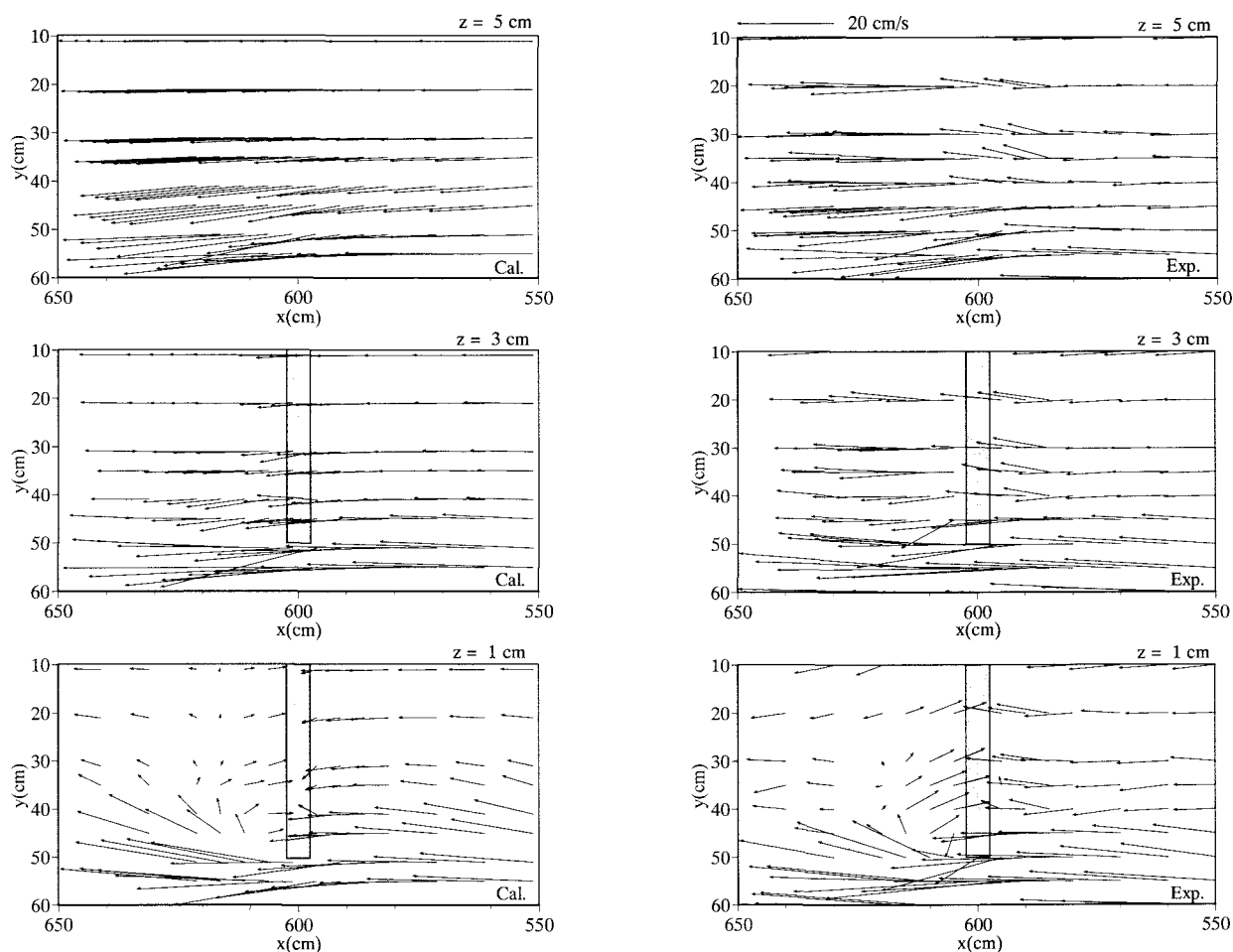


図-3 直角水制周辺のx-y平面流速ベクトル (z=1,3,5)の計算値と実測値の比較

験<sup>7)</sup>と比較することにより、設置角度の異なる水制周辺の流れを検討する。実験は長さ10m、水路幅1.5mの直線水路に9基の水制を設置して行った。実験水路と水制の諸元は表-1の通りであり、水制間隔と長さの比が2.0において水制を流れに上流、直角、下流向けた3ケースを検討の対象とした。実験では上流から6mの水制周辺の水位及び流速分布と水制1基に作用する流体力を測定した。

図-2は直角水制周辺の水位コンター、図-3はx-y平面流速ベクトルの解析結果と実験結果を並べて示している。水位は基準面からの高さで表わしている。z=1cmは河床面付近、z=3cmは水制高、z=5cmは水面付近のx-y平面流速ベクトルである。解析結果の流速ベクトルは同縮尺であり、実験結果とほぼ同地点のものを抽出している。直角水制周辺の流れは先端付近を除き、水制上流では水

制により圧力が上昇して水位が高くなり、下流では横断方向の運動量輸送が小さいために鉛直二次元的な剥離流れが生じて水面が低下する。一方、水制先端付近では水制上流面での圧力上昇により水路中央向かって流水が刎ねられる。先端付近の下流では刎ねられた流れによる剥離のために圧力低下が大きく、流れは水制先端から側壁に向かう。解析結果はこのような現象を再現している。また、構築した流れの三次元数値解析は水制直下流の剥離流れ、水制近傍の圧力分布を十分に説明し得ているため、著者ら水制周辺の流れの二次元数値解析結果<sup>7)</sup>と比べて水制上及びその下流の水面低下を良く再現している。

図-4,5は上流向き水制周辺の水位コンターとx-y平面流速ベクトルである。上流向き水制はデカルト座標でモデル化して計算に取り込んだため、実験に用いた水制のよ

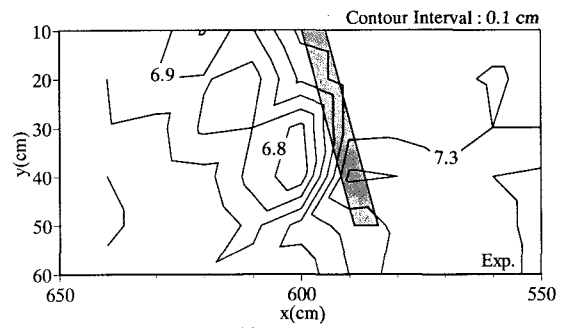
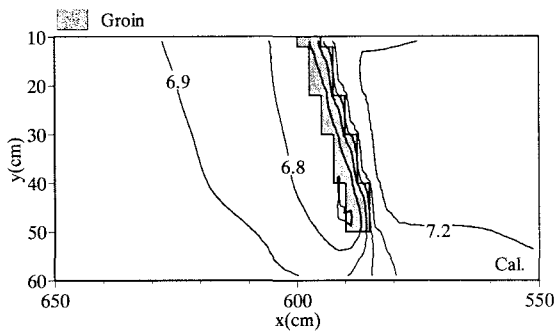


図4 上流向き水制周辺の水位コンターの計算値と実測値の比較

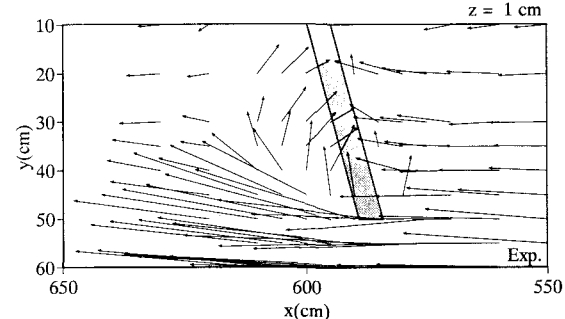
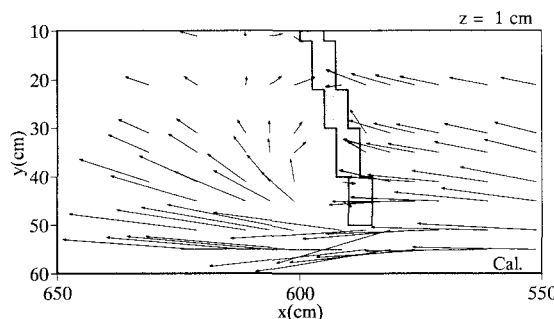
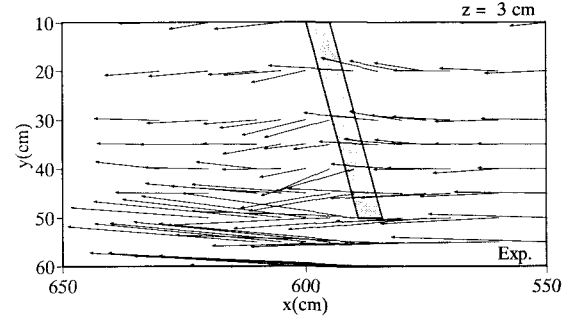
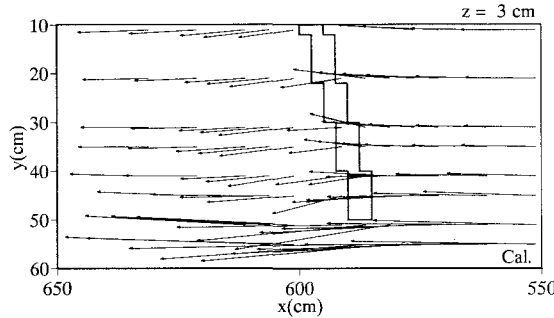
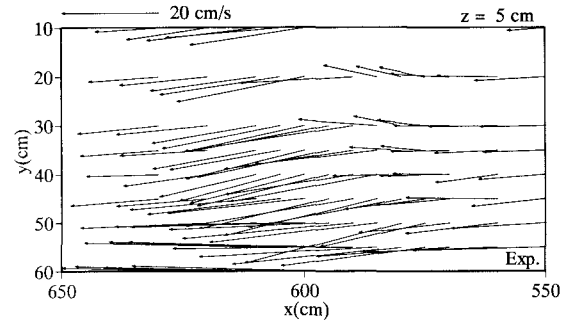
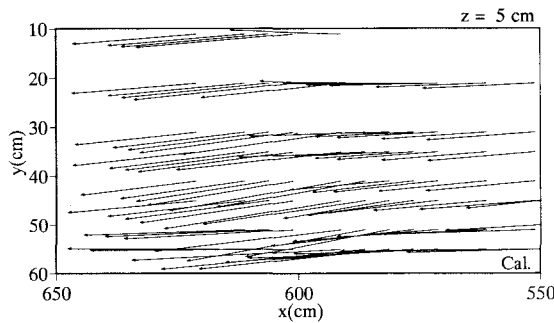


図5 上流向き水制周辺のx-y平面流速ベクトル (z=1,3,5) の計算値と実測値の比較

うに直線的ではなく階段状となる。上流向き水制周辺の流れは、上流面で圧力が上昇して圧力勾配が水制と垂直な方向に最も大きくなるため、水制を越える流れは水制上から水路中央に向かう流れとなる。また、河床付近において上流側は水制による圧力上昇に伴い側壁方向へ流れ、下流側は水制先端付近の剥離による圧力低下と水制を越える流れによる二次流のため水制下流を先端付近から側壁に向かって流れる。解析はこのような流れを再現するだけでなく、実験結果と同様に水位が水制先端付近の下流で側壁付近に比べて低くなっており、先端付近の圧力低下が比較的大きいことを示している。

図-6,7は下流向き水制周辺の水位コンター、x-y平面流速ベクトルである。下流向き水制周辺の流れは、上流向き水制と同様に圧力勾配が水制と垂直な方向に最も大き

くなるため、水制を越える流れが水制上から側壁に向かう。実験及び解析結果とも、水制上流で側壁に向かう流れ、水制下流の再付着点近傍で側壁から水制先端に向かう流れ、剥離域での逆流、水制直下流の先端から側壁に向かう流れがみられる。また、水制直下流の側壁付近における水位は先端付近より小さい。解析結果は実験の流れ及び水面形をおおむね再現している。

河道に設置された構造物周辺の流れを解き、作用する流体力を求める場合、効率的なメッシュの配置が計算負荷の点で重要である。対象とした流れにおける上流、下流向き水制のモデル化はメッシュ数が少ないにもかかわらず、流体力分布を決める水制周辺の流れを十分に説明し得ている。

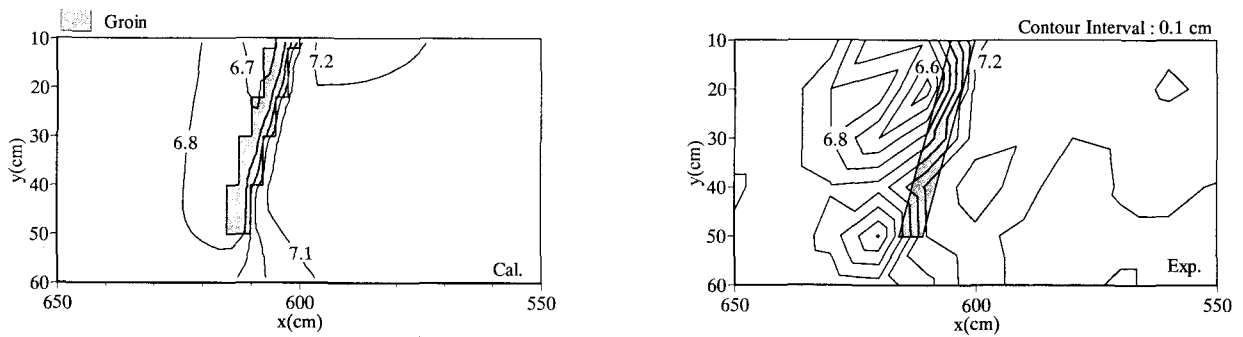


図-6 下向水制周辺の水位コンターの計算値と実測値の比較

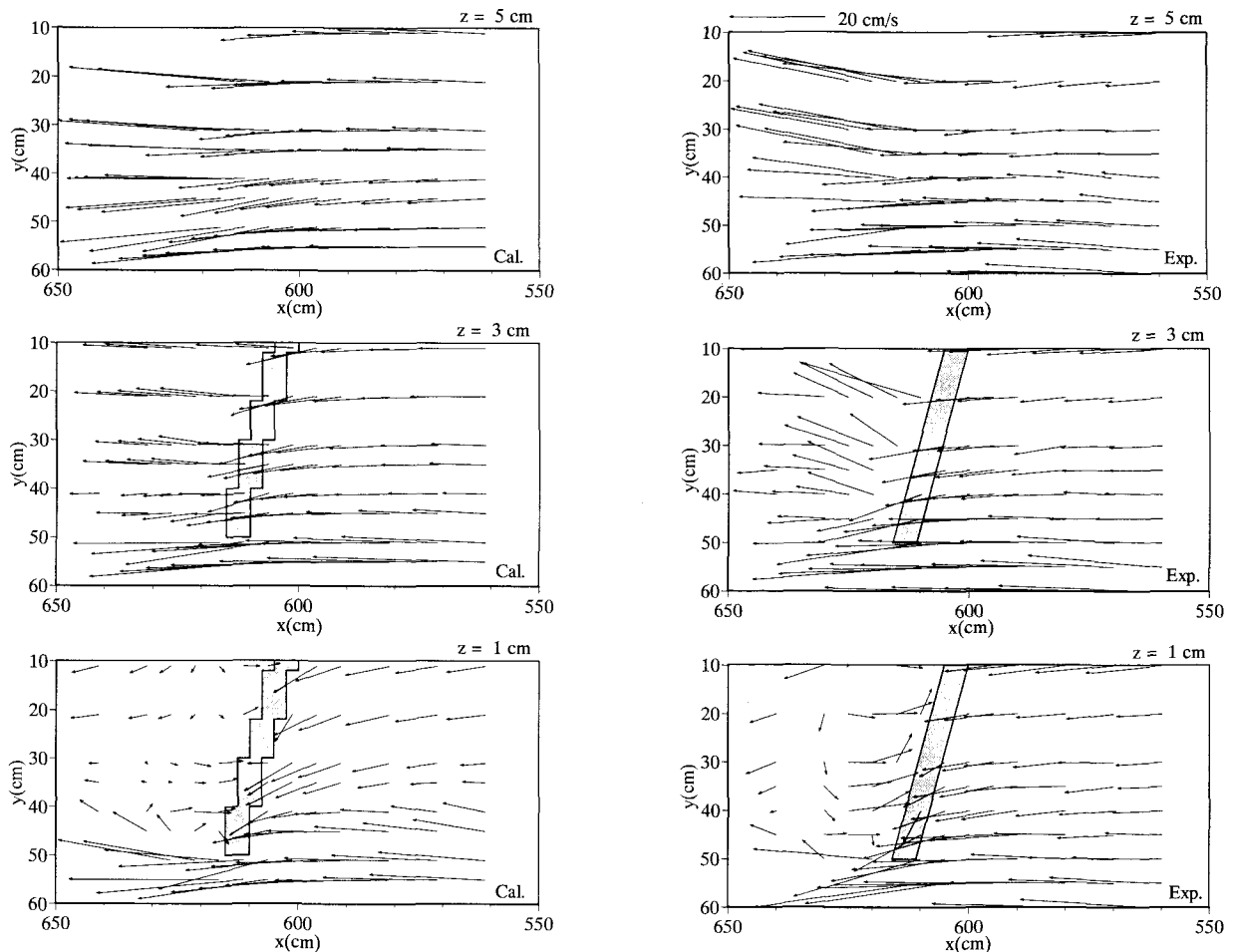


図-7 下向水制周辺のx-y平面流速ベクトル (z=1,3,5) の計算値と実測値の比較

#### 4. 水制群の流体力分布特性と水制設置角度

図-8,9,10は直角、上流向き、下流向き水制群9基において、水制一基に作用する流体力の平均値 $F_x$ 、 $F_y$ とそれぞれの水制先端部、中央部、元付け部の単位体積あたりの流体力 $f_x$ 、 $f_y$ の解析値と実測値の比較を示している。流体力は水制に作用する圧力、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 面それぞれに作用するせん断力の和から算出した。 $f_x$ は $x$ - $z$ 面 $y=9, 27, 47$ cm、上流向き水制の $f_y$ は水制計算モデル上流端からの距離 $x'=1.25, 8.75, 16.25$ cm、下流向きは $x'=16.25, 8.75, 1.25$ cmの平均値をそれぞれ水制先端部、中央部、元付け部の値とした。直角水制の $f_y$ は $x'=1.25, 3.75$ の平均値を上流部及び下流部の値とした。横軸Groin No.は上流からの水制群

の順序である。Groin No. 6の水制一基に作用する流体力は実験により直接測定されている。

Groin No.6の直角水制一基に作用する揚力 $F_y$ は小さく、上流向き水制の揚力は左岸側に向き、下流向き水制は右岸側に向く。抗力 $F_x$ と揚力 $F_y$ の合力ベクトルは水制とほぼ直角となる。構築した流れの三次元数値解析は水制周辺の水位、流速、圧力場の特徴だけでなく作用する流体力もおおむね再現しており、流体力の解析値 $F_x$ 、 $F_y$ は設置角度の違う3種類の水制全てにおいて実測値の7割程度となっている。水制一基に作用する流体力の解析結果は水制群内の最低値と比べて最上流の水制が2倍程度、最下流の水制は1.5倍程度の結果となっている。

一方、単位体積あたりに作用する流体力の解析結果 $f_x$ をみると、直角水制群の流体力は水制先端で中央部、元

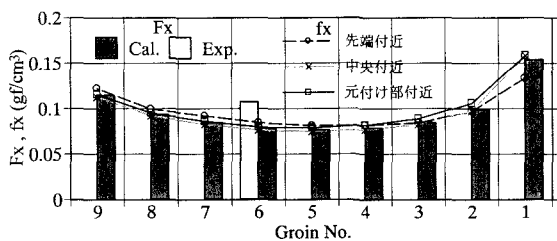


図8 直角水制群に作用する流体力分布

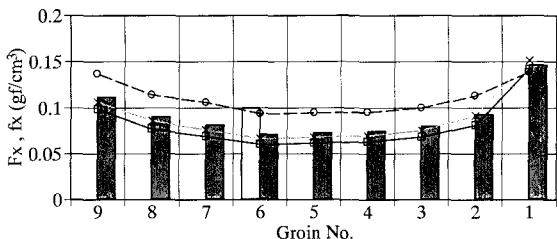
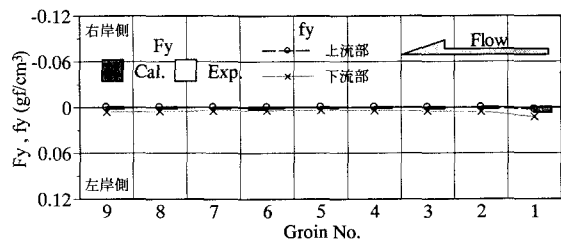


図9 上流向き水制群に作用する流体力分布

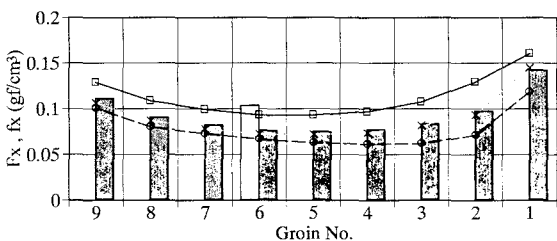
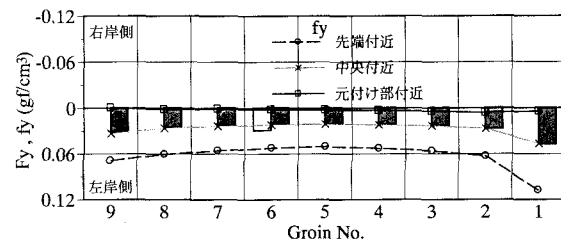
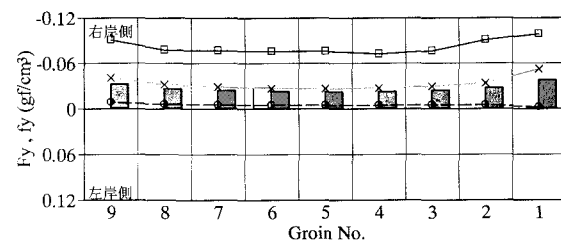


図10 下流向き水制群に作用する流体力分布



付け部と比較して1割程度大きくなっている。上流向き水制群は水制先端部で元付け部の2倍の大きさ、下流向き水制群は元付け部に先端部より1.7倍大きな流体力が作用している。上流及び下流向きの解析結果fyもfxと同様に元付け部と先端部の値に差がある。元付け部の水制構成材料の流失は河岸侵食を引き起こす。水制群に作用する流体力分布の視点からも、水制は流れに対して直角もしくは上流向きに設置することが望ましい。

本文で得られたfx, fyの分布を著者らの二次元解析<sup>7)</sup>に考慮すれば、上流・下流向き水制周辺流れの再現性は向上する。しかし、流体力の分布の小さな直角水制周辺流れの再現性はほとんど向上しない。これは水制下流の剥離流れを十分に再現できないからであり、河道に設置された越流型水制群の配置や流体力の評価にあたっては水制直下流の剥離流れを再現できる解析法が有効である。

## 5. 結論

水制周辺流れの三次元数値解析と既存の実験結果から水制群に作用する流体力の設置角度による分布特性と水制群設置上の適切な角度の検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 構築した三次元数値解析モデルは水制周辺の水面形、三次元的な流れ場を説明でき、水制に作用する流体力を再現可能である。
- 2) 水制に作用する流体力は水制を上流向きに設置すると水制先端付近で、下流向きに設置すると河岸際の

水制元付け部付近で大きくなることから、水制は流れに対して直角もしくは上流向きに設置することが望ましい。

- 3) 流れの二次元数値解析は水制直下流の剥離流れを十分再現することはできないことから、越流型水制群の流れ場及び流体力の評価にあたっては、剥離流れを再現できる三次元数値解析法が有効である。

## 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,1960.
- 2) 福岡捷二・高橋晃・渡辺明英:水制工の配置と洗掘防止効果に関する研究,土木研究所資料,第264号,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) 山本晃一:日本の水制,山海堂,1996.
- 5) 福岡捷二・西村達也・岡信昌利・川口広司:越流型水制周辺の流れと河床変動,水工学論文集,第42巻, pp.997-1002, 1998.
- 6) 大本照憲・平川隆一・井手賢正:越流型水制群に対する2次流と流砂の応答について,水工学論文集,第42巻, pp.1003-1008, 1998.
- 7) 川口広司・渡辺明英・福岡捷二:異なる角度の越流型水制周辺流れの二次元数値解析,水工学論文集,第45巻, pp.385-390, 2001.
- 8) 木村一郎・北村忠紀・鷺見哲也・武田誠・鬼束幸樹・庄建治朗・大塚康司:木曾川感潮域に設置された水制群周辺のワド形成過程と河川環境に関する共同研究,河川技術論文集,第8巻, pp.365-370, 2002.
- 9) 竹内義幸・山本晃一・杉本利英・川島幹雄:扇状地河川での「護岸の力学的設計法」の適用性に関する実践的研究,河川技術論文集,第8巻, pp.25-30, 2002.
- 10) 田村敦宏・菊池一雄・高橋匡康:だ円形境界値問題の数値解法-残差切除法について(ポアソン方程式への適用),日本機械学会論文集(B編),第62巻,604号, pp.62-69, 1996.

(2003. 9. 30受付)