

# 越流型水制群に作用する流体力の特性

## CHARACTERISTICS OF HYDRODYNAMIC FORCES ON SUBMERGIBLE GROINS IN SERIES

川口広司<sup>1</sup>・岡信昌利<sup>2</sup>・福岡捷二<sup>3</sup>

Hiroshi KAWAGUCHI, Masatoshi OKANOBU, Shoji FUKUOKA

<sup>1</sup>学生会員 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程後期<sup>2</sup>正会員 広島県加計土木工事事務所 (〒731-3501 広島県山県郡加計町加計3798-1)<sup>3</sup>フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学教授 工学部第四類 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

Groins are used as structures against bank erosion in curved channels. The arrangement of groins has been studied by the statistical, experimental, and numerical methods. Recently they are also focused as structures making favorable environment in rivers. The arrangement of groins should be thought by the function of groins. For this purpose, the numerical model, which represents accurate flow and bed deformation around groins, is needed.

Considering the practical use, we have studied on quasi three-dimensional numerical model. We introduced groin arrangement and hydrodynamic forces in this model to estimate the effects of groin. The result shows the general features of the flow and bed deformation. Drag coefficient  $C_D$  and lift coefficient  $C_L$  of hydrodynamic force were determined without measuring these forces. In this paper, we made clear the characteristics of hydrodynamic force on the submergible groin in series about the various groin arrangements by measuring forces directly and flow around the groin, and obtained drag coefficient  $C_D$  and lift coefficient  $C_L$ .

**Key Words :** *Submergible groin, numerical model, hydrodynamic forces  
drag coefficient, lift coefficient*

### 1. 序論

水制は河道湾曲部の河岸侵食対策工として、また舟運などの航路維持の工法に用いられ、実河川での施工や実験及び解析を通して技術的検討がなされてきた<sup>1)~9)</sup>。近年、このような水制の機能に加えて、流れや河床形状を変化に富ませ、豊かな水辺の環境を創るための構造物としても期待されるようになってきている。

このように多様な役割が期待される水制がその効果を発揮するためには個々の目的に応じた水制配置の技術的根拠が求められる。すなわち、河道縦横断形状、水理条件に対し水制配置が作り出す流れ場及び河床形状を把握しなければならない。模型実験により各々のケースについて最適な水制配置法を求めて行く方法はあるが、費用、労力、時間などの点で負担は多大である。このため、模型実験を補完する数値解析手法を用いた設計法の確立が求められてきた。

このような方向の研究として、福岡・渡辺・西村<sup>9)</sup>は、準3次元解析モデルを用いて、水制工が流れに及ぼす影

響を河床高の変化としてモデルに取り入れ、河道湾曲部において外岸側の河床洗掘を効果的に軽減できる越流型水制工の配置法を提案した。その後、福岡・西村ら<sup>9)</sup>は水制に作用する流体力を外力として運動方程式に取り入れることで設計法の精度を向上させた。さらに、このモデルは河道直線部で様々な配置形態をとる水制についても流れや河床形状を解析する上で有効な方法であることを示した<sup>9)</sup>。

しかし、この準3次元解析では、水制に作用する流体力の抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$  は直接測定された結果を用いるのではなく  $C_D=5.0$ 、 $C_L=0.1$  を与えたもの<sup>9)</sup>で、係数値の妥当性は検証されていない。したがって、様々な水制配置での流体力を計測し、その特性を把握して流体力と水制周辺の流れ場を関係づけた値を解析に用いる必要がある。

本研究では、固定床直線水路を用いて主流に対する水制の角度及び間隔を種々に変化させ、水制に作用する流体力、水制周辺の流れ場を直接測定し、流体力と流れ場との関係を明らかにする。そして、抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$  を決定することを目的としている。

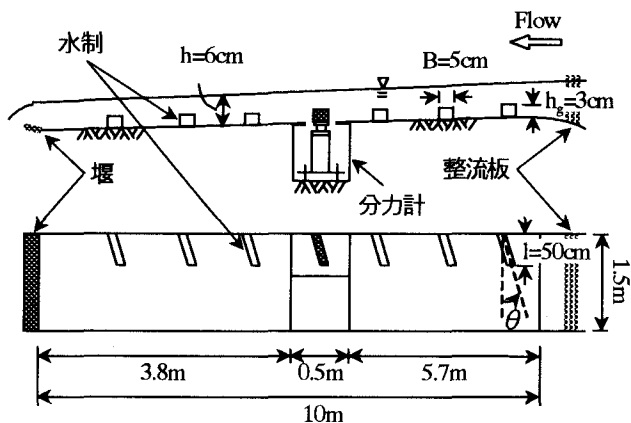


図-1 実験水路

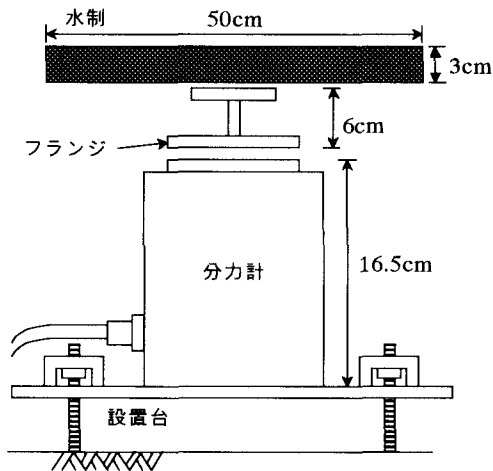


図-2 分力計と水制の取り付け方法

表-1 実験諸元

流量 (l/s)	30.67
平均水深 h (cm)	6
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)	0.5, 0.75, 1.0, 1.5
水制間隔/水制長 s/l	1, 1.5, 2, 3
水制角度 $\theta$	-15, 0, 15

## 2. 実験方法

図-1に実験に用いた全長 10m、水路幅 1.5m、勾配 1/500の固定床直線水路を示す。水路の中央に 0.5m×1.5m、深さ 0.5mのピットを設け、ピット内に分力計を設置している。図-2のように分力計に水制を直接取り付け水制に作用する流体力を測定する。ただし、分力計が水平に維持できるように、設置台は水平調節が可能となっている。

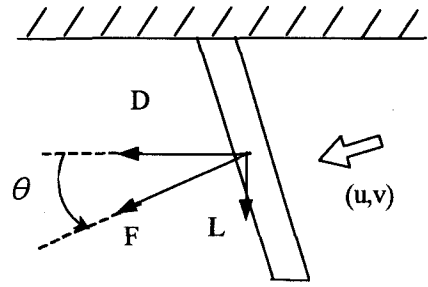


図-3 DとLの定義

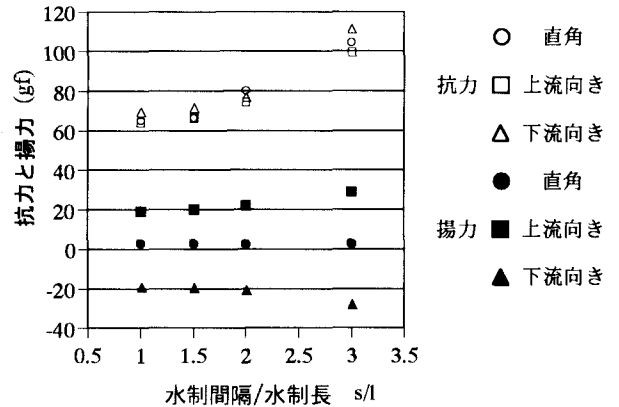


図-4 流体力

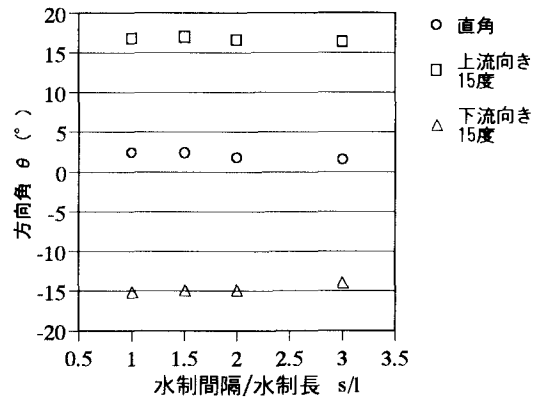


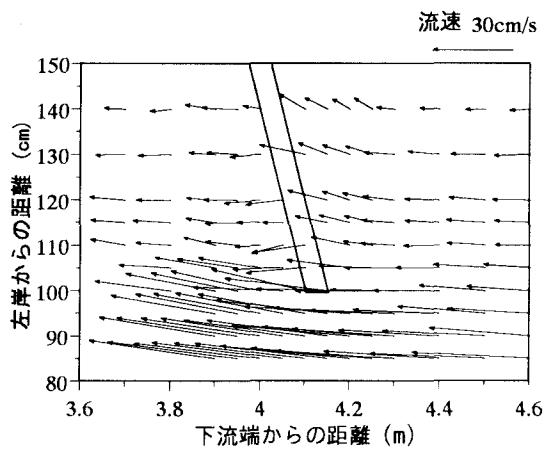
図-5 流体力の方向角

表-1は実験諸元である。水制間隔 sと水制角度 $\theta$ を変化させ、他の条件は一定で実験を行った。統計的調査結果<sup>2)</sup>を考慮して水制間隔は  $s/l=1, 1.5, 2, 3$ 、角度は主流に対して直角、15°上流向き、15°下流向きの12ケースについて検討した。また、水制の効果が大きいとされる  $s/l=2.0$ の場合における水制周辺の流速を電磁流速計で、水深分布をポイントゲージにて詳細に計測し、流体力の検討に用いた。

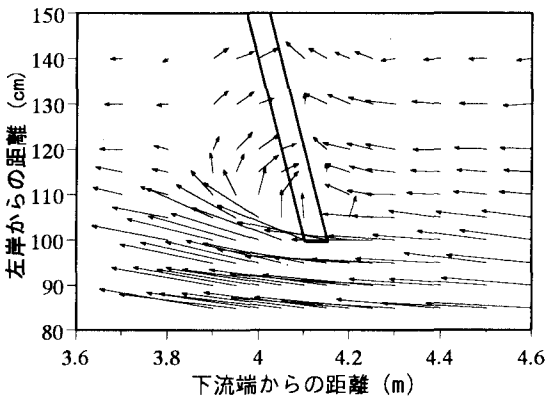
## 3. 実験結果及び考察

### (1) 流体力測定結果

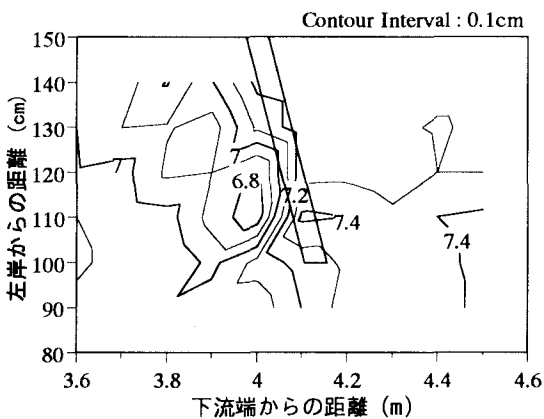
図-3は、水制に作用する流体力 F、抵抗力 D、揚力 L、



(a)水制高さ付近の平面流速ベクトル

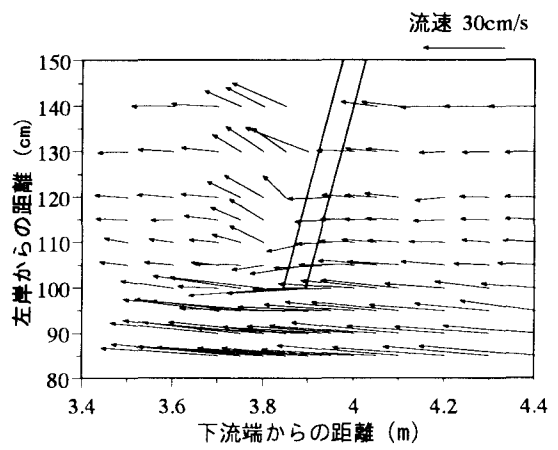


(b)河床付近の平面流速ベクトル

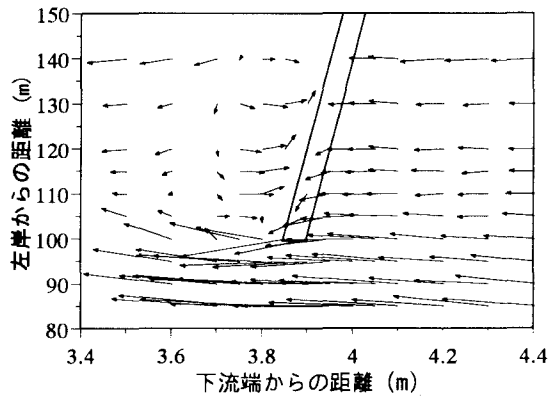


(c)水位コンター

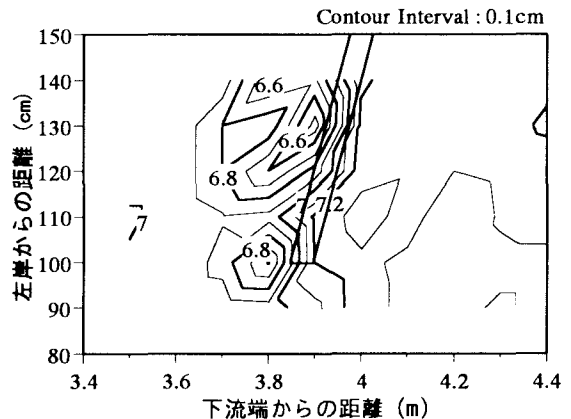
図-6 上流向き水制周辺の流れ場 ( $L/D=2.0$ )



(a)水制高さ付近の平面流速ベクトル



(b)河床付近の平面流速ベクトル



(c)水位コンター

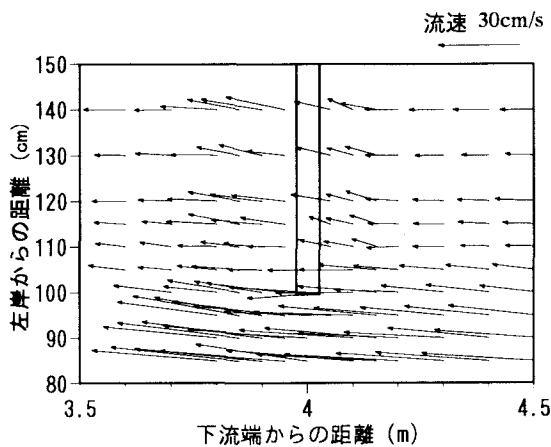
図-7 下流向き水制周辺の流れ場 ( $s/l=2.0$ )

流体力の方向角 $\theta$ を示している。抗力は流体力の流下方向成分、揚力は流体力の横断方向成分と定義し、流体力の方向角は流下方向から反時計回りを正とする角度で表わす。

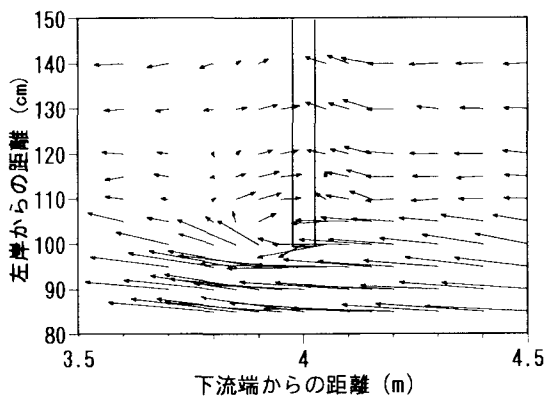
図-4に水制間隔/水制長 ( $s/l$ ) に対する抗力と揚力の測定結果を示す。抗力は流下方向を正、揚力は右岸から左岸方向を正の向きとする。抗力は水制間隔/水制長が大きくなるにつれ大きくなり、この条件下ではその値は60~110gfである。しかし、水制角度によらずおおむね一定の値をとる。一方、揚力については水制間隔/水制長

が大きくなるにつれその絶対値は大きくなるものの、抗力に比べるとその変化は小さい。揚力は直角水制では3gfほどで抗力に比して無視できるが、上流向き水制では左岸方向に約20~30gf、下流向き水制では右岸方向に約20~30gfと上流向き水制と下流向き水制の揚力はほぼ逆向きに働いている。その値は抗力の1/3~1/4程度の大きさである。

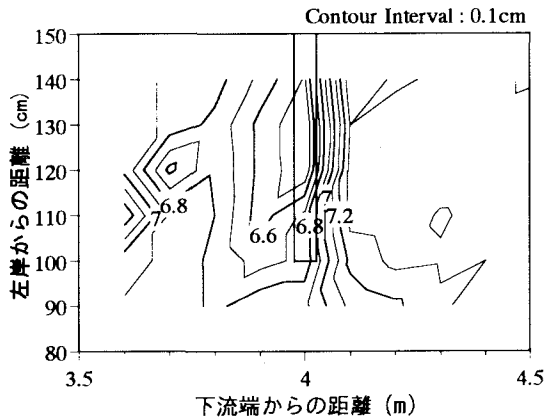
図-5は水制に作用する流体力の方向を示している。流体力の角度は直角、上向き、下向き水制それぞれについて平均で $2.0^\circ$ 、 $16.7^\circ$ 、 $14.7^\circ$ となり水制に作用する流体



(a)水制高さ付近の平面流速ベクトル



(b)河床付近の平面流速ベクトル



(c)水位コンター

図-8 直角水制周辺の流れ場 ( $s/l=2.0$ )

力はほぼ水制に垂直に作用していることがわかる。

## (2) 水制周辺の流れ場

図-6は  $s/l=2$  の上流向き水制周辺の流れ場を表している。上から順に水面から3cm,5cmの平面流速ベクトル、水位コンターを示している。平面流速ベクトルはそれぞれ水制の高さ付近、河床付近の流れを表している。

水制周辺の平面流速ベクトルを見ると、水制背後に大きな剥離域が見られ、この剥離域の圧力低下が流体力の

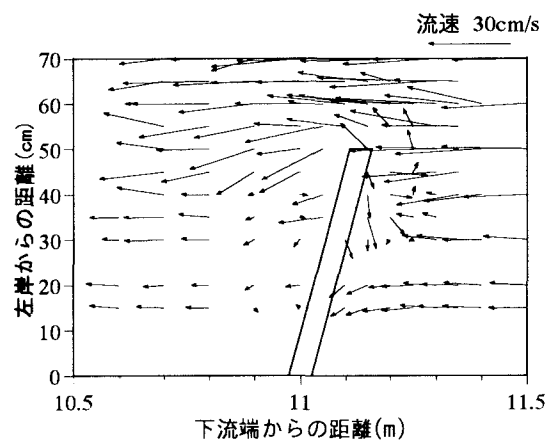


図-9 移動床流速 ( $15^\circ$  上流向き,  $s/l=2.0$ )

発生原因となっている。流体力の反作用として流体は水制から力を受ける。そのため、水制前面、水制先端の流れ、水制背後の剥離域の流れは右岸方向に向かう。さらに、水位コンターを見ると水制が流れに及ぼす力により水制前面の水位が堰上げられ水制とほぼ垂直な方向に水面勾配がついており、水制に作用する流体力と流れ場との関係が理解できる。

図-7, 8は同様に、 $s/l=2$  の下流向きと直角水制について周辺の流れ場を示している。

下流向き水制の場合、水制からの力により水制前面の流れはやや左岸方向に寄り、水制先端では左岸に大きく勿ねる流れが見られる。この水勿ねのために剥離域でも一部流れは左岸方向に向く。そのため水制高さ付近の水制背後では剥離域に向かう流れが見られる。

直角水制の流れは流下方向とほぼ平行に流れる。したがって、水制先端の水勿ねは弱く、水制背後の剥離域の流れもほぼ流下方向と平行になる。水面勾配も水制とほぼ垂直についている。

以上の固定床実験の結果から、水制の流れに及ぼす力が水制周辺の流れ場を支配していることがわかる。一方、移動床で行われたほぼ同条件の上流向き  $15^\circ$  の水制実験では<sup>9)</sup>、図-9に示すように河床付近の流線は水制先端の洗掘孔により曲げられる。このため、水制周りの応力分布は固定床の場合と異なり、流体力、特に揚力は固定床での実験値より小さくなるものと考えられる。

## 4. 抗力係数 $C_D$ 、揚力係数 $C_L$

ここでは水制の接近流速と水制に作用する流体力の関係を2通りの方法で示し  $C_D$ 、 $C_L$  について考察する。計算の接近流速 ( $u, v$ ) には側壁から水制先端までの水制上流5cmの流速を水深方向、横断方向に平均したものを使用した。

第1の方法は水制が非越流の時や主流に対して上流、下流方向に大きく角度を持つ場合など、接近流速の横断

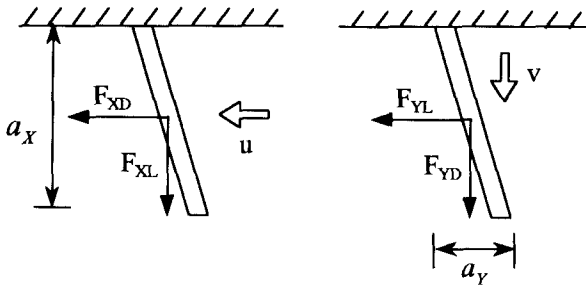


図-10 接近流速の成分による流体力

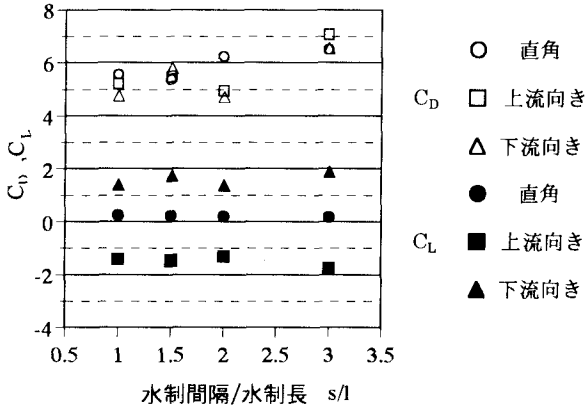


図-11  $C_D, C_L$

方向成分 $v$ が大きくなる場合を考慮した方法である。流体力と同様に接近流速も流下方向成分 $u$ ，横断方向成分 $v$ に分けて考え，水制に作用する抗力  $D$ ，揚力  $L$  は図-10のように流下方向流速，横断方向流速によるそれぞれの流体力の足し合わせにより決まると考える<sup>6)</sup>。

$$\begin{pmatrix} D \\ L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{XD} \\ F_{XL} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{YL} \\ F_{YD} \end{pmatrix} \quad (1)$$

流下方向流速 $u$ により生じる抗力を $F_{XD}$ ，揚力を $F_{XL}$ ，横断方向流速による抗力，揚力をそれぞれ $F_{YD}$ ， $F_{YL}$ とする。ただし，横断方向流速 $v$ により生じる流体力は横断方向成分を抗力，流下方向成分を揚力とする。接近流速 $(u, v)$  の2乗は流体力に正負の向きを合わせるために $u|u|$ ， $v|v|$ と表す。

$$\begin{pmatrix} F_{XD} \\ F_{XL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_D \\ C_L \end{pmatrix} a_x \frac{\rho(u|u|)}{2} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} F_{YD} \\ F_{YL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_D \\ C_L \end{pmatrix} a_y \frac{\rho(v|v|)}{2} \quad (3)$$

式 (1), (2), (3) により抗力係数  $C_D$ ，揚力係数  $C_L$  は以下の式で表される。

$$C_D = \frac{2\{a_x(u|u|)D/\rho - a_y(v|v|)L/\rho\}}{a_x^2(u|u|)^2 - a_y^2(v|v|)^2} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{2\{a_x(u|u|)L/\rho - a_y(v|v|)D/\rho\}}{a_x^2(u|u|)^2 - a_y^2(v|v|)^2} \quad (6)$$

図-11は式(7), (8)により算出した抗力係数 $C_D$ ，揚力係

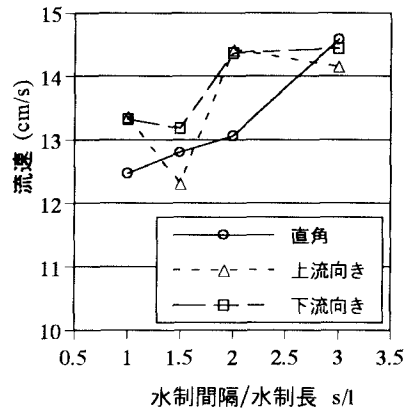


図-12 水制上流の接近流速

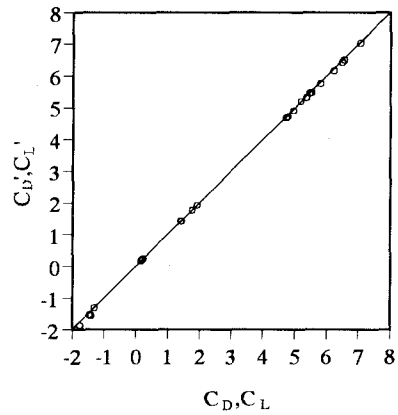


図-13 接近流速の流下方向成分 $u$ による $C_D'$ ， $C_L'$

数 $C_L$ を示している。流体力は水制間隔/水制長とともに大きくなるが(図-4)，図-12のように接近流速も同じ傾向を示すため，抗力係数，揚力係数は水制間隔/水制長の影響をほとんど受けない。抗力係数に対する水制角度の影響は小さく，ほぼ一定となり，平均値で $C_D=5.6$ となる。揚力係数は流体力と同様に水制角度の影響を受け直角，上流向き，下流向きの順に $C_L=0.2, 1.6, -1.6$ となる。

一般に，式(5)，(6)の接近流速の横断方向成分 $v$ は流下方向成分 $u$ に比べると小さいため，抗力，揚力は近似的に接近流速の流下方向成分 $u$ を用いて次のように定義できる。

$$\begin{pmatrix} D \\ L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_D' \\ C_L' \end{pmatrix} a_x \frac{\rho u|u|}{2} \quad (7)$$

図-13は式(7)を用いて算出した抗力係数  $C_D'$ ，揚力係数  $C_L'$  を式(5)，(6)の $C_D$ ， $C_L$ の結果と比較したものである。これにより，本実験の条件下では接近流速の横断方向成分 $v$ の影響はほとんどないことがわかる。

第2の方法として，図-14のように接近流速の方向を基準に水制に作用する流体力を考える。接近流速と同方向に $s$ 軸，それと垂直な方向に $n$ 軸をとり， $s$ 軸方向の流体力成分を $F_s$ ，水制の投影面積を $a_s$ ， $n$ 軸方向の流体力成分を $F_n$ ，水制の投影面積を $a_n$ とする。流体力と接近流速の関係を $C_{Fs}$ ， $C_{Fn}$ 係数を用いて次式のように表す。

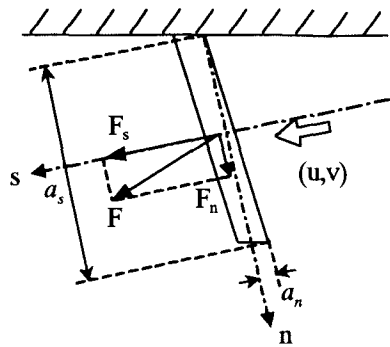


図-14 接近流速の方向を基準にした流体力

$$F_s = C_{Fs} a_s \frac{\rho(u^2 + v^2)}{2} \quad (8)$$

$$F_n = C_{Fn} a_n \frac{\rho(u^2 + v^2)}{2} \quad (9)$$

図-15は式(8), (9)により算出した $C_{Fs}$ ,  $C_{Fn}$ の結果を示している。ただし,  $F_s$ ,  $F_n$ は抗力Dと揚力Lより求めた。 $s$ 方向の流体力の係数 $C_{Fs}$ はほぼ一定となる。しかし,  $n$ 方向の係数 $C_{Fn}$ は接近流速と流体力の方向のずれが大きいため, 水制間隔/水制長, 水制角度に対して大きく変化し, 一定値をとらない。

この方法は家屋群内の流れのように流れが構造物に規定されるような場合は有利と考えられるが, 本実験条件のように水路軸により流れがおおむね規定される場合には, 式(7)のように流下方向を基準として流体力を考える方法が適当である。

以上のことから, 準3次元解析で用いてきた抗力係数 $C_D=5.0$ , 直角水制における揚力係数 $C_L=0.1$ は本実験の結果( $C_D=5.6$ ,  $C_L=0.2$ )と移動床の流れの形態(図-9)により妥当な値であることが確かめられた。また, これらの値の妥当性は信濃川の河床変動対策工としての水制の効果を調べた現地河川の検討結果においても確かめられており<sup>7)</sup>, 一般性を有する値であると考えてよい。

## 5. 結論

近年, 水制の役割は再び注目を集めるようになってきている。水制は様々な目的で用いられ, これに呼応して水制配置法の検討が必要となっている。目的に応じた適切な水制設計法を確立するには水制周辺の流れ場を十分に把握しなければならず, このためには水制に作用する流体力を適切に見積もることが不可欠である。本研究では直接測定した水制に作用する流体力と水制周辺の流れ場との関係を明らかにし, 抗力係数, 揚力係数の値を得た。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 抗力は設置角度の影響を受けずほぼ一定である。揚力は上流に傾けて設置すると側壁から水制先端, 下流に傾けた場合は水制先端から側壁方向に働き, 水制に作用する流体力は水制に垂直に働く。直角水制の場合, 平均的な揚力は働かない。

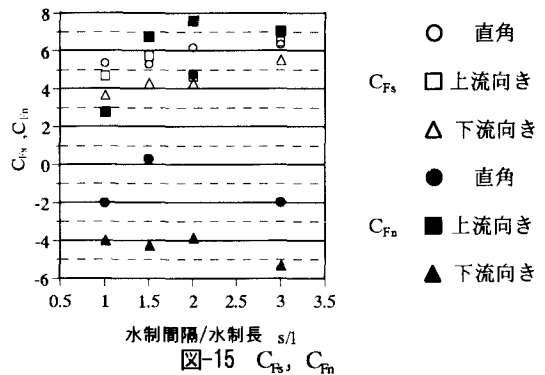


図-15  $C_{Fs}$ ,  $C_{Fn}$

- (2) 水制周辺の流れは水制に発生する力に規定される。
- (3) 水制前面の接近流速と水制に作用する流体力との関係は共に流下方向と横断方向に分けて定式化することによって抗力と揚力は定まった抗力係数と揚力係数をもつ。抗力係数 $C_D$ は水制間隔/水制長 $s/l$ , 水制角度 $\theta$ によらず平均値は $C_D=5.6$ となる。揚力係数 $C_L$ は水制間隔/水制長 $s/l$ の影響は受けないものの水制角度により変化し, 直角, 上流向き, 下流向き水制の順に平均で0.2, 1.6, -1.6となる。
- (4) 移動床では洗掘孔の存在により水制背後の剥離域が小さくなること, 固定床での本実験の結果( $C_D=5.6$ ,  $C_L=0.2$ )を考慮すると, 準3次元解析に用いてきた抗力係数 $C_D=5.0$ , 直角水制における揚力係数 $C_L=0.1$ は妥当な値である。

上流向き, 下流向き水制の揚力係数は, 前述のとおり固定床における本実験の結果(順に,  $C_L=1.6, -1.6$ )よりその絶対値は小さくなるものと考えられる。移動床での値については今後検討する予定である。

**謝辞:** 本研究を行うにあたり, 建設省中国技術事務所の多大な協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

## 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2640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・高橋晃・川口昭人・岡信昌利: 越流型水制工の設計法の研究, 土木学会論文集, No.593, II-43, pp.51-68, 1998.
- 6) 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.
- 7) 福岡捷二・阿部友則・西村達也: 信濃川小千谷越路地区の河床変動対策—現地観測, 模型実験, 数値解析結果の比較—, 水工学論文集, 第44巻, 2000.

(1999.9.30受付)