

# 越流型水制工を有する流れの解析

Numerical Analysis of the Flow around Submerged Groins

福岡捷二\*・西村達也\*\*・川口昭人\*\*\*

By Shoji FUKUOKA, Tatsuya NISHIMURA and Akihito KAWAGUCHI

The structure and arrangement of groins in river have been mainly determined on the basis of hydraulic model experiments and engineering judgement. At the standpoint that the numerical model and the hydraulic model test are complementary to each other, we conducted experiments in a straight-channel flow with the submerged groins, and developed a three dimensional numerical flow model which determined proper arrangement of the submerged groins. This model includes the influence of groin shape and the forces exerted by groin on the flow. The result of calculation showed a good coincidence with that of the experiments of flow around submerged groins.

Key Words : three dimensional flow, external force, submerged groin, straight channel

## 1. はじめに

河道弯曲部は、水衝部となり、河岸侵食が起り易い場所であり、洪水時には河岸あるいは堤防の欠壊に至る場合さえある。このような弯曲部の河岸侵食を軽減するためには、河道の法線形の変更のほかに、護岸、水制工、ベン工等の河川構造物による侵食対策が考えられる。わが国のように沿川に数多くの民家が連担している河川においては、河道の法線形を変更することは、経済的、社会的に困難な状況にある。したがって、わが国の河川においては、護岸、水制工等によってこれに対処することが多かった。水制工を用いる場合、構造、配置を適切に決める必要があるが、これまでは模型実験を中心に検証し、決定してきた。しかし、模型実験によって水制工の構造、配置を決定する場合、個別の河道に対しては解を与えることができるが、この解を他の河道すなわち任意の河道形状に対して、そのまま適用することができない。模型実験で全てカバーしようとする費用、労力、時間等の面で負担が著しく大きくなる。このため、模型実験と数値解析を併用し、合理的に水制工の配置を決定する方法の確立が求められている。このためには、まず、複雑な数値解析モデルを用いずとも工学的見地から水制の水理的役割を説明できるモデルが求められる。

そこで本研究は、水制工周りの流れの構造を実験によって詳細に把握し、その流れを再現できる簡易な解析モデルを開発することを目的に、検討を行っている。このために、最も基本的な直線水路で固定床上に水

---

\* 正会員 Ph. D 工博 広島大学教授 工学部第四類（建設系）  
(〒724 東広島市鏡山1-4-1)

\*\* 正会員 工修 (株)建設技術研究所 技術第3部

\*\*\* 正会員 四国旅客鉄道株式会社

没型水制が連続して存在する流れ場を対象としている。これまで、連続する越流型水制は水制の存在を川底の形状変化として取扱い、近似的に数値計算の中に取り入れられてきた<sup>1)</sup>が、本計算モデルでは、個々の水制が流れに及ぼす流体力を基本式に取り込み、より一般的な方法で水制周りの流況を解いている。

## 2 解析方法

### (1) 基礎方程式

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  $z$  軸を定義する。 $z$  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、川底  $z_0$  から高さ  $z$  まで積分した連続式を  $s$ 、 $n$  軸方向の運動方程式に代入すると次の基本式が得られる<sup>1)</sup>。

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

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

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、 $\varepsilon$  は渦動粘性係数、 $\rho$  は水の密度、 $\delta$  はディラックの  $\delta$  関数である。 $F'_s$ 、 $F'_n$  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<sup>2)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} F'_s &= \frac{\partial F_s}{\partial z} = \frac{C_D}{2} \frac{\partial}{\partial z} (u |u|) \\ F'_n &= \frac{\partial F_n}{\partial z} = \frac{C_L}{2} \frac{\partial}{\partial z} (u |u|) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $C_D$ 、 $C_L$  は抗力係数及び揚力係数を示す。

連続式を河床から水面まで積分し、水面と河床における運動学的条件を用いると、次式が得られる。

$$\frac{\partial (u \cdot h)}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r v \cdot h)}{\partial n} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

### (2) 数値計算手法

基本式(1)~(4)、計算法とも基本的には、ペーン工の解析に用いた方法<sup>2)</sup>と同様である。 $s$ 、 $n$  方向流速  $u$ 、 $v$  の水深方向の分布を、式(5)で与え、その際の係数 ( $u_0$ 、 $u_1$ 、 $u_2$ 、 $v_0$ 、 $v_1$ 、 $v_2$ ) は、「 $\cos \ell \pi z'$  ( $\ell = 0, 1, 2$ )」を重み関数として式(1)、(2)に乘じ、水深方向に積分し離散化した運動方程式を差分化することによって求める。なお、式(3)に示す外力については、河床から水制の高さまで積分して、計算を行う。

$$\left. \begin{aligned} u(s, n, z) &= \sum_{i=0}^2 u_i(s, n) \cos i \pi z' \\ v(s, n, z) &= \sum_{i=0}^2 v_i(s, n) \cos i \pi z' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

また z 方向の拡散項の河床での値は、河床せん断力により次式で与える。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=z_0} &= C_B u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \\ \varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=z_0} &= C_B v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $u_b, v_b$  は  $s, n$  方向流速の河床面で値 ( $u_b = u_0 + u_1 + u_2, v_b = v_0 + v_1 + v_2$ ),  $C_B$  は河床の摩擦係数であり、次式を用いる。

$$C_B = \frac{g n^2}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $h$  は水深、 $n$  は粗度係数を示す。

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る。水制設置区間では、外力の他に水制の形状も正しく取り込むために水制設置位置に合わせて差分計算のメッシュ分割を行いその地点の河床高を水制の高さだけ上げ、水制の上面でせん断力を与えることにより水制の存在を計算の中に十分反映させている。

### 3. 水制を設置した直線水路の実験結果との比較

#### (1) 実験装置と実験方法

実験は、水路長25m、水路幅2.2m、水路床の粗度係数は0.012の直線水路を用いて行った。水路勾配を1/600に設定し、この水路の左岸側に写真-1に示すように越流型水制を上流端から1.0m間隔で20基設置した。水制の特性および実験条件は表-1に示す通りである。図-1に示す下流端から9mから11mの地点までの範囲について水深及び流速分布を詳細に測定した。流速の測定は電磁流速計を用いて行った。

#### (2) 実験結果と解析結果との比較

実験結果と解析結果の比較を行う。なお比較のため、水制工が流体に及ぼす外力は考慮せず ( $F'_s = 0, F'_n = 0$ )、水制設置地点の河床高を水制高さまで高くすることによって水制が流れに及ぼす影響を形状のみの効果として考慮した場合の解析結果も併せて示す。

図-2は水制近傍における縦断方向流速  $u$  の水深平均流速分布、図-3は横断方向流速  $v$  の水深平均流速分布

表-1 実験条件

流 量	119.2 ℓ / s
水 深	0.094 m
縦断河床勾配	1/600
水路幅	2.2 m
水路延長	25.0 m
水制長	0.5 m
水制幅	0.05 m
水制高	0.05 m
水制間隔	1.0 m
水制設置角度	流れに垂直
水制設置数	20 基



写真-1 実験水路

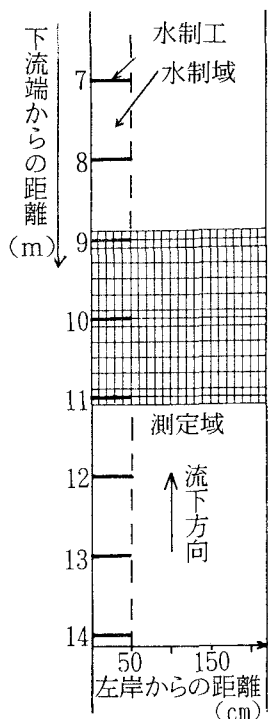


図-1 水制の配置と流れの測定位置

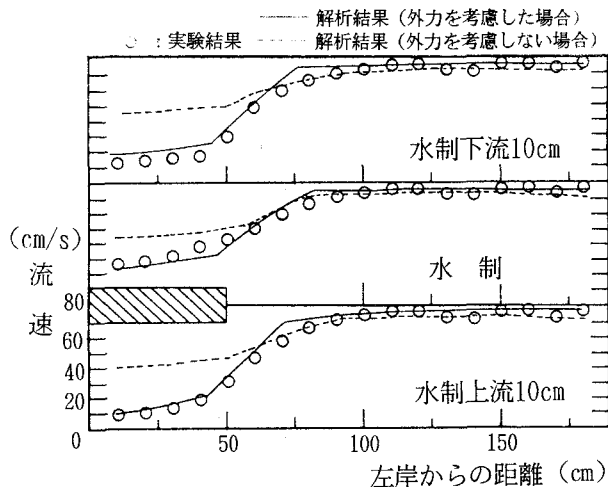


図-2 流下方向水深平均流速分布

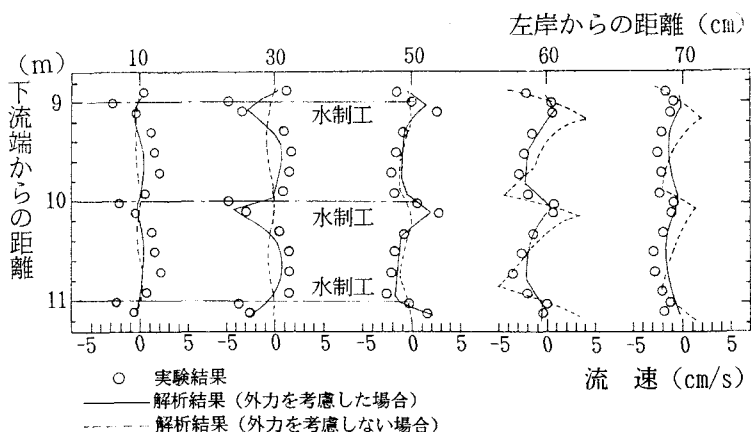


図-3 横断方向水深平均流速分布

の実験結果と解析による計算結果を比較したものである。なお、解析に用いる式(4)中の抗力係数 $C_D$ および揚力係数 $C_L$ は、水制の上下50cmの2断面間で観測した水量をもとに運動量保存則を適用して、抗力 $D = \frac{\rho}{2} C_D a u^2$ 、揚力 $L = \frac{\rho}{2} C_L a u^2$ から求めた値( $C_D = 3.8$ ,  $C_L = 0.3$ )を用いている。また解析では、水制域内の流れを細かく計算するため、縦断方向に0.1m間隔で250分割、横断方向にも0.1m間隔で22分割して行っている。

この図を見ると、2.で述べた解析方法による計算結果は、実験で得られた縦断方向流速と横断方向流速の水深平均流速分布を概ね表現出来ている。縦断方向流速 $u$ に関しては、水制を含むその上下流の水制域で流速が急激に減少している分布形をよく表現しているのに対し、水制が流れに及ぼす外力をモデルに取り入れない計算結果は、水制域外ではほとんど変わらないが、水制域内ではかなり大きくなっている。これは、水制による流速の減少を十分に表すことができないためであり、水制が流体に及ぼす外力を解析に取り込む必要があることを示している。また横断方向流速 $v$ については、外力を考慮した計算結果は、水制域内での分布形、及び水制直前で流れがはねられ( $v$ が+)、その直下流で水制域に向かう流速の発生( $v$ が-)が良く表現できているが、外力を考慮しない計算結果は、実験結果に比べて水制域内では小さく、水制先端ではかなり大きくなっている。

図-4は、水制前面における縦断方向流速 $u$ の水深方向の分布形を示したものである。2.で述べた解析方法による計算結果は、縦断方向流速 $u$ の水深方向の分布形についてもほぼ表現し得ている。

図-5は、左岸から0.3m離れた地点と左岸から0.8m離れた地点の水位 $H$ の縦断分布、図-6は水制上

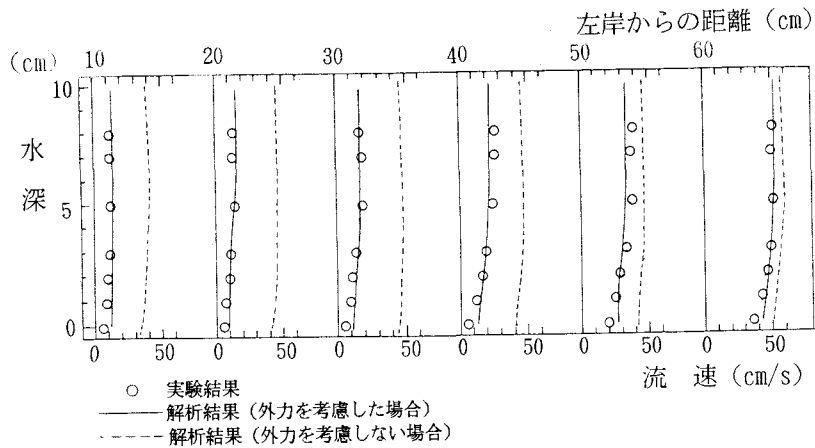


図-4 流下方向流速の鉛直分布形（水制直上流10cmの横断面）

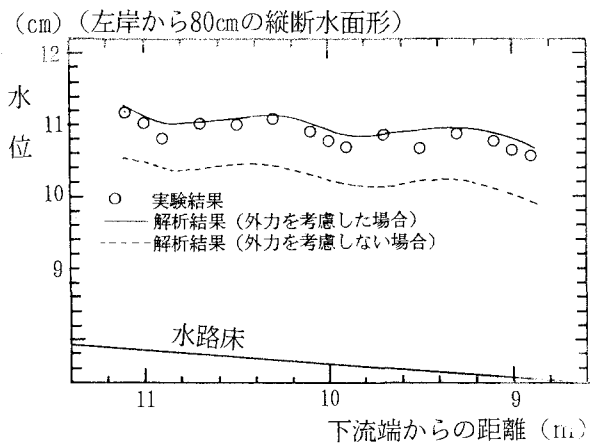
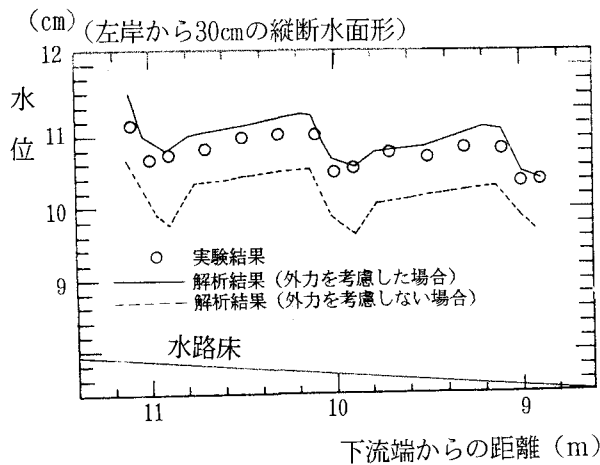


図-5 縦断水位分布

流 0.1m地点の水位Hの横断分布を示したものである。水制の長さは 0.5mであり、左岸から 0.8 m離れた水制の外側においても、水制による水位への影響が見られる。水制による外力を考慮した解析結果と実験結果は若干の差が見られるが、解析結果は水制の内と外における、実験で見られた水制前面の水位上昇と水制設置地点の水位低下を概ね再現できている。水制による外力を考慮しない場合には、流速を十分に抑制することができないため、水位の計算結果は実験結果よりかなり低くなる。

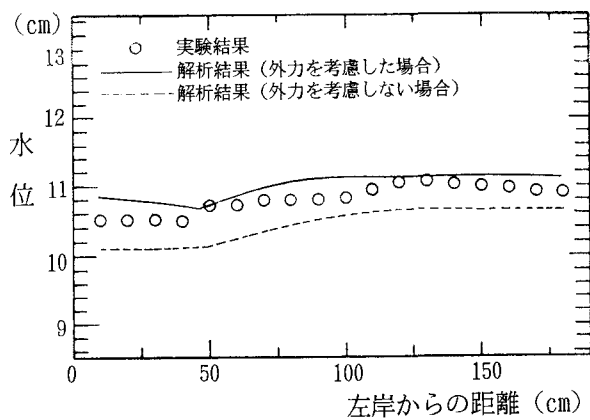


図-6 横断水位分布（水制直上流10cmの横断面）

#### 4. おわりに

水没型水制工周辺の流れを表現するためには、水制工の形状だけでなく、水制の存在が流体に及ぼす影響を外力として取り入れて流れを解くことが必要である。このことを考慮に入れた解析モデルは、水制工周辺の流況を十分に再現できることを示した。今後は、この流れの解析モデルを用いて水制の存在による河床形状の変化についても検討する。最終的には弯曲部の外岸侵食対策として水制工の適切な配置のための設計法を確立する。

本研究で用いた基本式とその数値解析法は、ベーン工など水制工のみならず、多くの水理構造物のまわりの流れを解析するための有効な方法を与える。本研究は流れに及ぼす構造物の外力が決まりさえすれば、任意の位置に設置された水理構造物の周りの流れの評価が可能であることを示すものである。

#### 参考文献

- 1) 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. 2
- 2) 福岡捷二, 渡辺明英: ベーン工の設置された弯曲部の流れと河床形状の解析, 土木学会論文集, No. 447, II-19, pp. 45-54, 1992. 5.