

水制工の適切な配置決定のための三次元モデルの開発

Three Dimensional Analysis for Determination of the Optimal Arrangement of the Groin

東京工業大学工学部	福岡捷二	Shoji FUKUOKA
建設省土木研究所	渡辺明英	Akihide WATANABE
㈱建設技術研究所	西村達也	Tatsuya NISHIMURA

The optimum arrangement of the groin has been determined mainly by hydraulic model experiments. This method has a weak point not to be able to determine groin arrangement to river courses with arbitrary alignment. At the standpoint that the numerical model and the hydraulic model test are complementary to each other, three dimensional numerical model was developed to decide the optimal arrangement of the groin. This model includes the influence of forces exerted by groins on the flow of rivers. The result of calculation corresponded so much to that of existing experiments with regard to the state of the three dimensional flow and the river bed change, and also this model enabled us to decide the optimum arrangement of the groin to the river with arbitrary alignment.

Keywords : three dimensional analysis , bend , external force , groin

1. はじめに

河道湾曲部は、洪水の流下に際しては水衝部となり、河岸侵食を引き起こし、時には河岸あるいは堤防の決壊に至る場合さえある。このような河岸侵食を軽減するために、河道の法線形の変更、護岸、水制工、ベーン工等の河川構造物による対策が行われている。特にわが国の河川のように河道周辺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、社会的に非常に困難であることから、従来より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してきた。水制工の適切な位置は、河道法線が変わるため、その配置を合理的に決めることは難しく、これまでは、もっぱら模型実験を中心に決定してきた。しかし、模型実験によって水制工の配置を決定する場合でも限界がある。個別の河道には解を与えることができて、他の河道すなわち任意の河道形状に対応することができないこと等の問題点がある。

そこで、本文では、河道の施設計画では模型実験とシミュレーションモデルは補完的であるという立場から、任意の河道に対して、適切な水制工の配置に対して解答を得るための一つの手段として、水制工を考慮した準三次元シミュレーションモデルを開発し、任意の河道形状において望ましい縦・横断河床形状を形づくる水制工の最適な配置を決定するための計算手法を提案する。

2. 計算手法

2.1 基礎方程式

本研究のモデルは、河道湾曲部の流れを取り扱うため、座標系は直交曲線座標系を用いるものとし、流れの基礎方程式は、次に示すように連続式と z 方向は静水圧分布を仮定し、水制工による外力項を取り込んだ三次元の運動方程式を用いる。

(連続式)

$$\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

(運動方程式)

$$\left. \begin{aligned}
 & u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} \\
 & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right) - F_s \\
 & u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} \\
 & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial z} \right) - F_n \\
 & \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u, v, w はそれぞれ s, n, z 方向の流速成分、 p は圧力、 r は曲率半径、 F_s, F_n はそれぞれ水制工によって s, n 方向の流れに作用する外力を示すものであり、これは、水制工に及ぼされる抗力及び揚力によって表されるものと仮定し、次式を用いる。

$$F_s = \rho C_D u^2 f, \quad F_n = \rho C_L u^2 f \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 C_D, C_L は抗力及び揚力係数、 f は水制工によって生じる外力が水制工から離れた地点へどのように影響を及ぼすかを表す分布関数で、この分布形は、水制工のまわりの流速分布、砂の動きから水制工が流れに与える影響を概略評価し、決めている。ここでは図-1及び次式に示す四角錐形の分布形を用いる。

$$f = \left(1 - \frac{|s-s_j|}{k_1} - \frac{|n-n_i|}{k_2} \right) \frac{3}{2k_1 k_2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 s_j, n_i は水制工の位置、 k_1, k_2 は s, n 方向の水制工による外力の影響域を示す。

次に、河床変動計算は、次式に示す流砂の連続式を用いるものとする。

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

ここに、 z_0 は河床高、 λ は河床材料の空隙率、 q_{Bs}, q_{Bn} は s, n 方向の掃流砂量を示すものであり、それぞれ、次式に示す Meyer-Peter-Muller の式及び長谷川の式¹⁾を用いる。

$$\left. \begin{aligned}
 q_{Bs} &= 8 \sqrt{(\rho_s/\rho)gd^3} (\tau_*' - \tau_{*c})^{1.5} \\
 q_{Bn} &= q_{Bs} \left(\frac{v_b}{u_b} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z_0}{\partial n} \right)
 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 τ_*' は無次元有効せん断力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力、 ρ_s は砂礫の密度、 d は河床材料の粒径、 u_b, v_b は s, n 方向の河床付近の流速、 μ_s, μ_k は静止及び動摩擦係数を示す。

2.2 数値計算手法

(1)及び(2)式に示した連続式及び三次元運動方程式をそのまま解くことは、非常に困難であることから、本研究のモデルでは、 z 方向の流速 w は s, n 方向の流速 u, v に比べて非常に小さいものと仮定し、 s, n 方向の流速 u, v を解くことにする。また、流速 u, v の解法については、次式に示すようにそれぞれ水深方向の分布形をフーリエ級数を用いて与え、その際のフーリエ係数 ($u_0, u_1, u_2, \dots, v_0, v_1, v_2, \dots$) は、 $1, \cos \pi z/h, \cos 2\pi z/h, \dots$ を重みとして水深方向に積分し、その結果、得られた方程式を差分化することによって求める。なお、差分計算については清水の方法¹⁾に準じる。

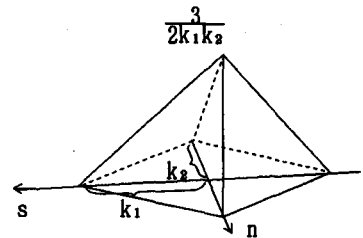


図-1 水制工による外力の分布形

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 + u_1 \cos \pi z/h + u_2 \cos 2\pi z/h + \dots \\ v &= v_0 + v_1 \cos \pi z/h + v_2 \cos 2\pi z/h + \dots \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

次に、河床変動の計算については、上記の方法によって算定された s 、 n 方向の流速 u 、 v から、河床付近のせん断力を算定し、(5)式の流砂の連続式、(6)式の流砂量式を用いることにより、河床高を算定する。そして、算出された河床高を用いて、再び流れの計算を行うという繰り返し計算を行うものとする。

3. 実験結果との比較

前節で記した計算手法を用いて、Rozovskii³⁾の実験結果及び土木研究所の水制工を設置した移動床模型実験結果との比較を行う。

3.1 Rozovskii³⁾の実験結果との比較

矩形断面の湾曲水路の実験例として、図-2に示すRozovskii³⁾の実験水路の実験結果との比較を行う。実験条件は表-1に示す通りである。

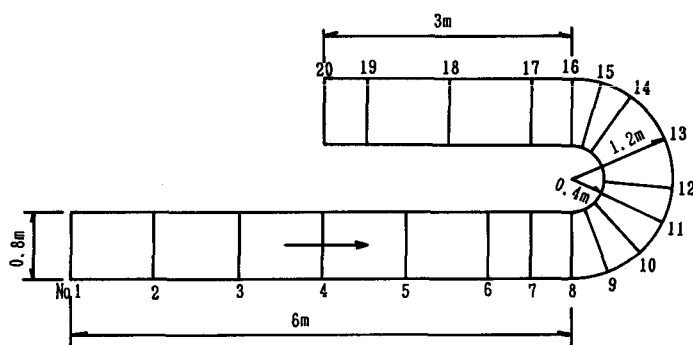


図-2 Rozovskiiの一様湾曲水路

表-1 Rozovskiiの実験条件

流 量 (ℓ/sec)	12.3
水 路 床 勾 配	水平
水 路 幅 (m)	0.8
湾曲部の 曲率半径 (m)	内 岸 0.4 中 央 0.8 外 岸 1.8
断 面 形 状	矩形
下 流 端 水 深 (m)	0.053

図-3は、計算された水深平均流速 u_0 の横断方向分布、図-4は、流下方向流速及び横断方向流速 v の断面内分布の実験結果との比較を示したものである。図-3の水深平均流速の分布を見ると、計算値は断面No.6の湾曲部入口で内岸側の流速が遅くなり、出口に向かうにしたがって外岸側が遅くなる実験結果を非常によく表していることがわかる。また、図-4の流下方向流速 u 及び横断方向流速 v の断面内分布を見ると、横断方向流速 v は実験結果と計算結果に若干の差が見られるものの、計算結果は、実験結果の特徴をよく表しており、本研究モデルは三次元流れを十分に表現することが可能であることがわかる。

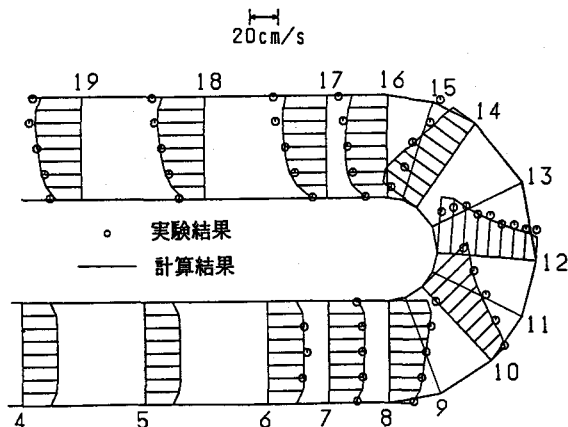


図-3 水深平均流速 u_0 の分布

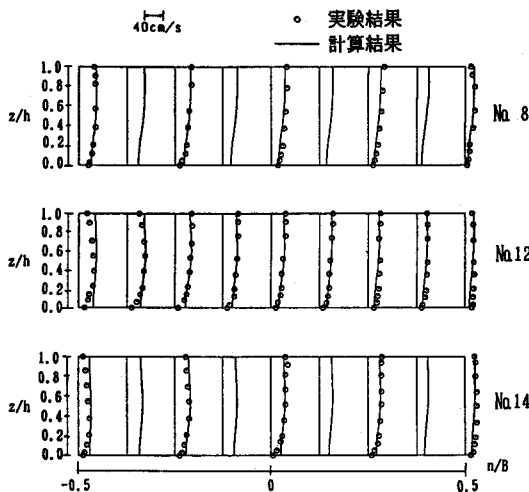


図-4(1) 流下方向流速 u の水深方向分布

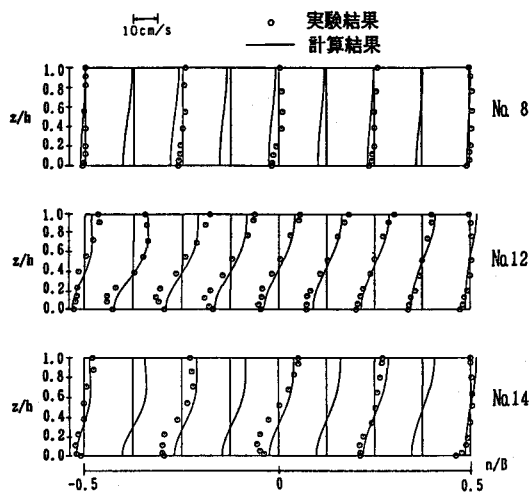


図-4(2) 横断方向流速 v の水深方向分布

3.2 土木研究所⁴⁾の実験結果との比較

水制工を設置し、その効果を評価した実験例として、図-5に示す土木研究所⁴⁾における湾曲水路の実験結果がある。実験条件は表-2に示す通りであり、水制工を設置しない場合（ケースⅠ-1）と設置した場合（ケースⅠ-5）について比較を行う。

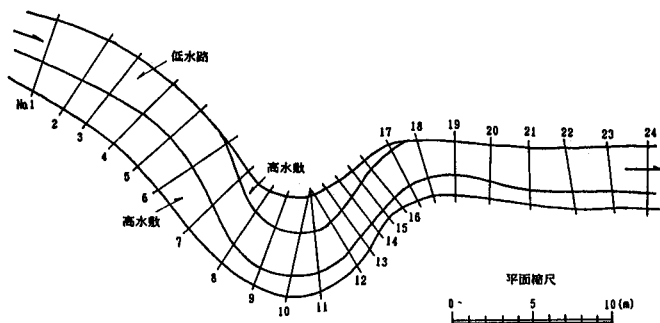


図-5 土木研究所の実験水路

表-2 土木研究所の実験条件

流 量 (ℓ/sec)	150.0
水 面 勾 配	1/1000
平 均 水 深 (m)	0.15
低 水 路 幅 (m)	2.0~3.0m
曲 率 半 径 (m)	5.2m
河 床 材 料 (mm)	0.8
砂 礫 密 度	2.65

(1) 水制工を設置した実験結果との比較（ケースⅠ-1）

図-6は、表-2の実験条件により通水後2時間経過した後の水深平均流速 u_0 の横断方向分布、図-7はその時の断面No.11とNo.17の河床変動の計算結果と実験結果とを比較したものである。なお、この場合の静止及び動摩擦係数は $\mu_s = 0.6$ 、 $\mu_k = 0.43$ とした。図-6の水深平均流速 u_0 の横断方向分布を見ると、計算結果は、湾曲部の入口である断面No.8の低水路左岸側の流速が速くなり、下流へ向かうにしたがって低水路右岸側の流速が速くなる実験結果の特徴を概ね表していることがわかる。また、図-7に示した横断面図を見ると、実験結果は、河床に砂州が発生し、局所的に深掘れが生じているのに対し、計算結果では、砂州の影響を表すことはできないが、外岸側に深掘れが生じ、内岸側に堆積している状況を概ね表していることがわかる。

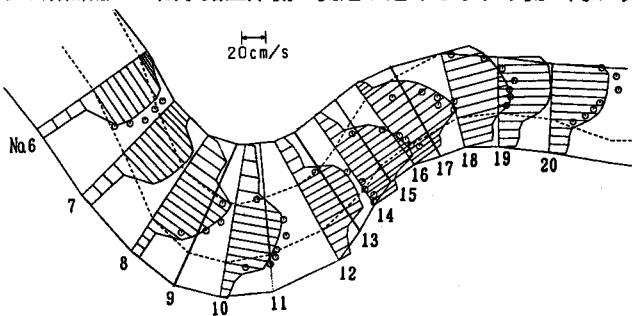


図-6 水深平均流速 u_0 の横断方向分布

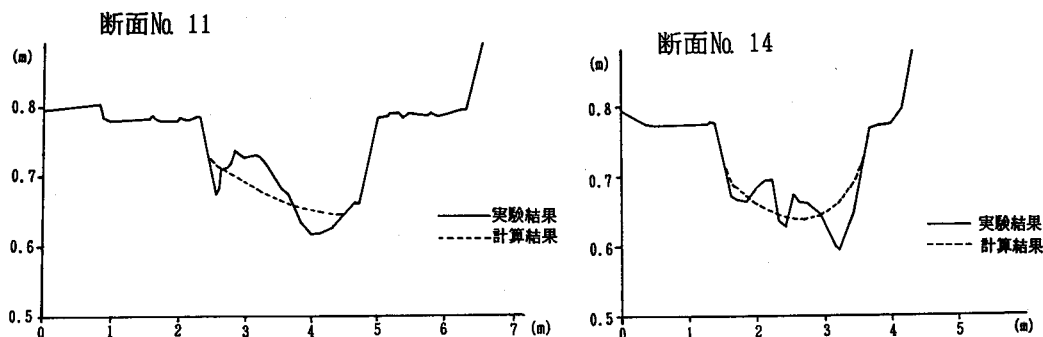


図-7 河床変動状況 (ケース I-1)

(2) 水制工を設置した実験結果との比較 (ケース I-5)

土木研究所では、水制工を縦断的に配置することによって、あたかも法線形を適切に修正したような影響の流れに与え、結果的に河床変動の小さな合理的な河道づくりを検討してきた。それらの検討のうち最適な水制工の配置の実験結果 (ケース I-5) との比較を行う。この場合の水制工は、図-8 に示したように、湾曲部の内岸側上流部と外岸側下流部に図-9 及び表-3 に示した18基の水没、透過型の水制工を設置している。

表-3 水制工の諸元 (ケース I-5)

左岸水制 (水制間隔40cm)

上流側からのNo	1	2	3	4	5
水制長 (cm)	15	20	25	30	35

右岸水制 (水制間隔40cm)

上流側からのNo	1	2	3	4	5	6	7
水制長 (cm)	35	35	35	30	25	20	20

上流側からのNo	8	9	10	11	12	13
水制長 (cm)	20	20	20	20	20	20

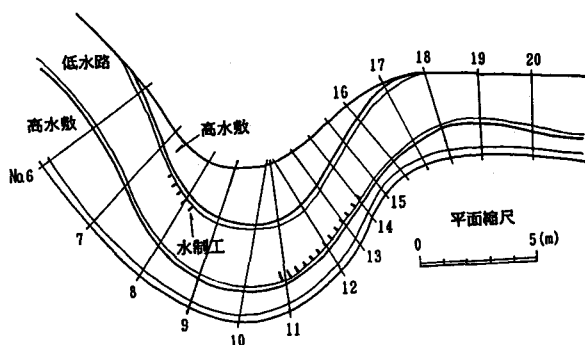


図-8 水制工の設置位置

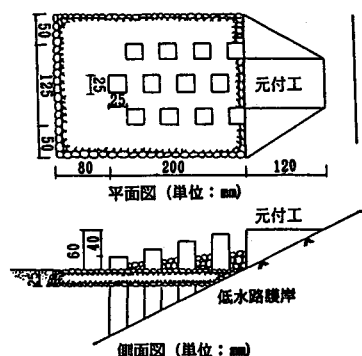


図-9 水制工形状図

図-10は、通水後2時間経過した後の水深平均流速 u_o の横断方向分布、図-11は、水制工を設置した断面No.11とNo.14の河床変動の計算結果と実験結果とを比較したものである。なお、この場合の s 、 n 方向の水制工による外力の影響域 k_1 、 k_2 は水制工のまわりの流速分布、砂の動きから両方とも 0.4m とした。図-11

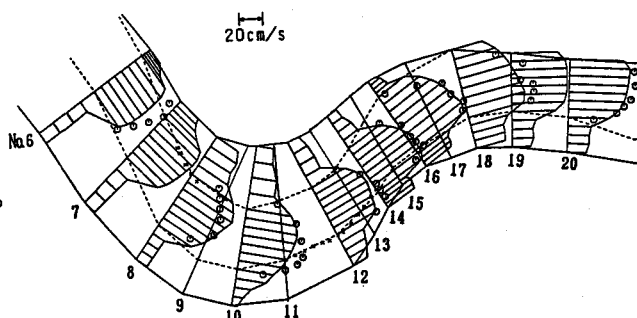


図-10 水深平均流速 u_o の横断方向分布の

の水深平均流速 u_0 の横断方向分布を見ると、断面No. 8において内岸側上流部に設置された水制工によって水がはねられたことにより流速が遅くなり、外岸側下流部においても水制工により流速が遅くなっている状況を計算結果は表していることがわかる。また、図-11に示した河床変動状況においても、水制工による影響を計算結果はよく表しており、水制工がない場合に比べて最大洗掘深が水路中央部に発生していることがわかる。

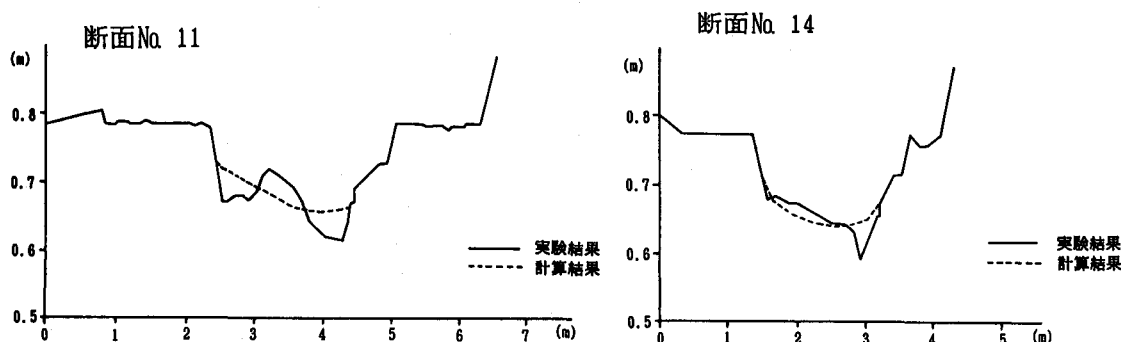


図-11 河床変動状況 (ケース I-5)

4. 結論

本研究は、任意の法線形状をもつ河道に対し水制工の適切な縦断配置を決定するための方法として、水制工の影響を十分取り込んだ準三次元モデルを開発し、既往の実験結果との比較検討を行い、モデルの妥当性について述べた。以下にその結論を示す。

- ① 本研究のモデルの計算結果とRozzovskiiの実験結果を比較した結果、計算結果と実験結果は主流、二次流についてよく一致しており、本研究モデルは湾曲部の三次元流れを十分表現することができる。
- ② 水制工を設置していない土木研究所の実験結果と本研究モデルの河床変動計算結果を比較した結果、実験結果で見られる砂州の影響は計算で表現することができないが、流れ及び湾曲部の外岸で生じる深掘れ、内岸の堆積を概略表現することが可能となった。
- ③ 水制工による流れへの影響を外力として取り込んだ本研究モデルは、水制工を設置した土木研究所の実験結果の流れ及び河床変動状況を概ね表現しており、水制工による流れ及び河床変動への影響を表すことができた。

参 考 文 献

- 1) 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，No.338，1989.10
- 2) 清水康行；蛇行河川における三次元流れと掃流砂，浮遊砂を考慮した河床変動の計算，北海道開発局土木研究所報告，1988.7
- 3) Rozzovskii, I.L. ; Flow of Water in Bends of Open Channels, Academy of Science of the Ukrainian S.S.R., Translated from Russian, Israel Program for Scientific Translations, 1957
- 4) 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，1988.4