

水制による流れの制御と護岸・護床機能の予測手法

大槻 英樹¹・芦田 和男²・阿部 宗平³・和田 浩⁴・藤田 晓⁵

¹正会員 工博 (株) ニュージェック 大阪本社 河川・海岸部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

²正会員 工博 (財) 河川環境管理財団 河川環境総合研究所 大阪研究所

³農博 (財) 砂防・地すべり技術センター 砂防部

⁴川鉄建材 (株) 土木事業部 土木技術部 土木商品開発室

⁵正会員 工修 (株) ニュージェック 大阪本社 河川・海岸部

河道湾曲部に設置された水制工が水の流れに対してどのような制御効果をもち、また、水制周辺ではどのような水理現象が生じるのか、水理模型実験と数値シミュレーションにより検討した。数値シミュレーションについては、流れおよび河床変動の解析を幅広く汎用的に行うことができるよう、既往の平面2次元浅水流モデルを基本とする簡易で実用的なシミュレーションモデルを提案している。また、水制工の護岸・護床機能を予測してその適切な設置を検討するために、シミュレーションモデルをいかに適用すればよいか、考察した。水制工の形式としては、不透過型水制の例として出し型水制を、透過型水制の例としてスクリーン枠を対象とした。

Key Words :groin, bank erosion, bed variation, curved channel flow, 2D numerical simulation

1. はじめに

我が国では従来多くの種類の水制工が考案され、さまざまな河道条件の下に種々の形式のものが設置されてきた。高度経済成長以降はコンクリート護岸の普及により水制工が用いられることが少なくなったが、近年、多自然型護岸の採用が盛んになるに至って、その役割が見直されつつある。その理由として、多自然型護岸はコンクリート護岸に比べ強度的に不利であるため、河岸の安全を確保する手段として、水制工を併用して流水による外力を制御することが有効である場合があるということが挙げられる。水制工はまた、多様で変化に富んだ河岸を形成し、水生生物にとって良好な生息空間を創出することも期待され、河川環境の観点からもその機能が注目されている。

水制工が所期の機能を発揮できるよう、水制工の工種、形状、配置は合理的に決定されなければならない。このためには、水制工が対象河川区間の水理特性に及ぼす全体的な影響、および水制工周辺の流れや河床形状に及ぼす局所的な影響を、事前に予測することが必要である。このうち、対象河川区間への全体的な影響を検討することは、その区間での流況や、河岸、河床への外力分布特性を把握し、上下流区間も含めた河川全体の河道計

画を考える上で重要である。一方、水制工周辺の局所的な影響を検討することは、水制工自体の安定性、ひいては水制工の流況制御効果を評価することのみならず、水制工がつくり出す変化に富んだ流れと河床の状態を生物の生息環境として評価する上で必要不可欠である。

水制の設置による河道への水理的影響を予測する方法として、まず、従来の基礎研究や事例研究に基づく知見を総合し、それらを対象地点に応用しておよその評価を行うということが考えられる。しかし、対象地点固有の河道条件を反映し、より的確な予測を行うためには、模型実験や数値シミュレーションによる検討が有用である。模型実験は、水制周辺の複雑な流れを再現し、局所的な現象を比較的精度よく予測できるが、その準備や計測およびデータ処理に通常多くの労力が必要である。一方、数値シミュレーションは、従来平面2次元モデルや3次元モデルによる水制周辺の流れの再現が試みられているが、前者は水制近傍の鉛直流れを評価できること等から現象の忠実な再現が難しく、後者は解析にかかる労力が大きくモデルの再現性の問題に加えて実用上の問題が残る。このため、未だ十分な計算手法は提案されるに至っていない。

以上のような状況に鑑み、著者らは、水制を設計する際にその水理機能を簡易に予測できるような実用的手

法を開発することを目的として、実験的・数値解析的な検討を行った。本稿はその中でも特に数値シミュレーションによる水制水理機能予測の手法を中心に、得られた成果をまとめたものである。

以下では、まず水制に関する既往のおもな調査を概観した後、水制の水理機能予測のための実用的・汎用的な数値シミュレーションモデルを構築し、移動床模型実験の結果を用いて検証計算を行う。そして、それに基づいて、水制の設置を合理的に設計するための水制機能予測手法を提案する。なお、本研究の実験、計算では越流不透過型水制の一種である出し型水制、および、透過型水制の一種であるスクリーン枠を検討対象として、これらを河道湾曲部に設置した場合の外岸流速低減効果および河床変動特性を中心に検討を進めた。

2. 既往調査研究の整理

本章では、水制の水理機能に関する既往研究を主として現地調査と実験による研究、および水理計算に関する研究に分類し、これまでの研究実施状況を概観する。また、それに基づき、今後の水制設計に際しての問題点と研究すべき課題について述べる。

(1) 主として現地調査と実験による研究

水制の水理機能に関して、主として現地調査や実験によって現象を把握しようとする研究は、これまでに多くの研究者によって行われてきており、そこで着目される事項は概ね次のようにまとめられる。

- ① 水制による流速制御効果
- ② 水制による河床形状への影響
- ③ 水制周辺の流れと洗掘、堆積特性
- ④ 既設水制工の工種、諸元、配置、河道条件等に関する統計的整理および考察

これらの事項は単独で調査対象となっていることもあれば、複数の事項を開連付けて調査研究がされている場合もある。そして、これらの成果は、研究手法等から概ね以下のように分類することができる。

- ① 実際の河川において特定の水制区間とその周辺区間に着目し、流量条件とその条件下における流れや河床形状、粒度分布等に及ぼす水制の影響を観察、計測したもの¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。
- ② 現地条件をモデル化した模型を製作し、種々の実験変数を設定して様々な条件下での水理現象を把握するための水理模型実験が行われたもの⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。
- ③ 特定の現象に着目し、簡略化した条件の基礎実験により、その機構を明らかにしようとしたもの¹⁰⁾¹¹⁾。また、全般的な調査として、従来の水制工設置事例

や研究事例を幅広く調べ、それらより得られる経験的知見を整理し、これから水制設置のあり方について言及した興味深い業績も見られる¹²⁾。

(2) 水理計算に関する研究

わが国における水制の水理計算は昭和30年代建設省土木研究所¹³⁾にはじまり、最近では湾曲部の流れや河床変動を解析する2次元浅水流モデル、さらに準3次元モデルが開発され、実際の現象をかなりのところまで説明できるようになってきた。これらの手法を水制の設置された河道に適用して水制の水理機能を定量的に評価しようとする研究が数多く行われている¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。

水制周辺での3次元モデルの適用は比較的単純な場での流れの解析に用いられてはいる¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾が、複雑な条件でかつ河床変動も同時に考慮した場合についてはほとんど行われておらず、今後の発展が期待される。

2次元浅水流モデル、あるいは準3次元モデルは水制周辺の局所的な現象の予測には必ずしも十分ではないが、水制による流向、流速分布や河床形状の変化を全般的に予測する上では適用することが可能であり、水制の適切な配置を決定する上で有力な道具となる。しかし、個々の設計現場において常にこの手法を用いることにも自ら限度があるので、種々の河道条件や水理条件の下でシミュレーションを実施し、その結果から水制を設計する上で参考となる有用な知見を整理しておくことは大切であろう。また、これらのシミュレーションや実験結果を整理して、水制による河岸沿いの流速低減効果や洗掘深を推定できる簡便な手法を開発することも必要である。

(3) 問題点と課題

以上のような、水制の水理機能に関する代表的な既往研究成果から研究の現状を概観すると、今後、合理的な水制工設計を行っていくために、次のような問題点と課題が残されているといえる。

- ① 水制の水理機能について、比較的単純な条件下での実験やシミュレーションにより基礎的な知見はある程度得られているが、より実河川に近い条件での水制の働きについては、未解明な点が多い。特に、移動床における水制の機能については、個別の対象地点に着目した研究により、個々の現地特性に応じた水制効果の把握が行われてきたが、一般的な知見が得られるには至っておらず、模型実験等による系統的な検討が必要である。
- ② 水制機能を予測する手法として、種々の数値シミュレーションモデルが開発されてきたが、現状では、種々の水制形式や河道条件に対して汎用的に適用可能な予測モデルが確立されておらず、特に移動床に対しては、一般的な予測手法の確立を目的とし

た研究はほとんどなされていない。したがって、模型実験等の結果を十分説明し得る汎用的な数値シミュレーション手法を開発し、水制機能の予測手法の確立を図ることが必要である。

本稿は、上記②に述べた課題に対するひとつの試みとして、簡易なモデリングによる実用的な予測手法を提案するものである。

3. 水制のモデル化手法

本稿で提案するシミュレーションモデルは、流れと河床変動に関する平面2次元モデルを基礎とし、そのモデルに簡単な水制モデルを付加することによって水制とともにう河道の水理予測を行うものである。本研究で用いた平面2次元モデルの概要は以下のとおりである。

まず、直交曲線座標系を用いた2次元浅水流モデル²¹⁾で流れの計算を行い、そこで計算された流れに基づいて掃流砂量を求め、流砂の連続条件により河床変動の計算を行う。この手順を繰り返すことによって河床変動の様子をシミュレートする。2次元浅水流モデルでは、計算方法としてPatankarのSIMPLER法を用いている。また、掃流砂量の算定には、底面流速の流向と河床の縦・横断勾配を考慮したモデル²²⁾を用いる。流砂の移動を計算するための底面流速は、主流方向については対数則分布を仮定して相当粗度高さの流速を用い、2次流は式(1)で定義されるEngelundの発達した螺旋流による底面流速式で評価する²³⁾。すなわち、流砂の移動方向を、2次流を考慮して算定し、河床変動計算に反映させる。

$$u_{bh} = -N \cdot \frac{h}{r} u_{hp} \quad (1)$$

ここに、 u_{bh} : 底面における2次流速、 h : 水深、 r : 流線の曲率半径（ただし、本研究における計算では、 r を流線の曲率半径とするよりも、各地点の水路の曲率半径とした方が計算の安定性が高かったため、 r として各地点の水路の曲率半径を用いている）、 u_{hp} : 主流方向の底面流速、 N : 螺旋流の強度を表す係数である。河床材料は混合砂として扱い、河床からの深さによって粒度分布の違う状態を考慮できるよう、河床の交換層の下に遷移層と堆積層を導入した多層モデル²⁴⁾を用いる。計算手法の詳細は参考文献^{24), 25)}を参照されたい。

なお、湾曲部における2次流を、前述のように発達した螺旋流の式で評価する際には、2次流強度係数 N を適切に与える必要がある。Engelund²³⁾は、一様湾曲流における発達した螺旋流に対しては $N=7.0$ が適するとしているが、後述するように、本研究で対象とする90°単湾曲河道で、かつ水制が設置されて2次流が抑制される可能性がある河道条件の下で、どの程度の値を与える

べきかについては、検討が必要である。また、水制の水理機能を支配する重要なパラメータとして、抗力係数 C_D があげられるが、本研究において透過型水制の一例として対象とするスクリーン枠（5章参照）のような新しい構造の水制については C_D の値が不明であり、これについても検討が必要である。本研究は、水制のモデリングとともに、これらの課題についても検討を深め、より適用性の高い予測手法の確立に努めるものである。

(1) モデリングの基本方針^{26), 27)}

水制をモデリングするにあたり、流れに対する水制の効果として、通水面積の減少による水制ね効果、および水制周辺の渦領域におけるエネルギー散逸による流れへの抵抗効果、の2つを考える。前者の評価のために、水制位置では真の河床位よりも高く設定した疑似河床位を用いて流れを計算し、後者の評価のために、水制の影響領域において、水制を考慮した付加抵抗係数を河床に与える。これらの考え方について以下に述べる。

(2) 疑似河床の概念と設定方法

疑似河床位の概念は、透過・不透過型水制の設置領域、およびその水制の上下流の局所的な渦領域に適用する。

まず、透過型水制の水制領域に与える疑似河床位について考える。

計算メッシュ上に図-1のように透過型の水制が設置してある場合を考える。なお、同図では5章で述べるスクリーン枠の設置をイメージしている。図中、ハッチングのメッシュを水制領域と定義し、水制による流れへの遮蔽面積に応じて疑似河床位を与える（図-2）。また、図-3に示すように、水制直上流では、コーナーを短絡する流れの発生によって分離された領域ができる、および直下流では剥離渦が生じることを考慮し、これらによる実質的な通水面積の減少効果を評価するため、その対象とすべき領域にも同様に疑似河床を設定する（図-4）。水制領域では、水の流れの方向から見た水制の遮蔽面積 a を水制設置域の幅 b で割って水制の疑似的な高さ Δz_g を求める、それを水制領域の平均河床位に加えることで疑似河床位とする（図-2、図-5）。このとき、 a 、 b は各計算時間ステップごとに水制直上流における流れの平均流向を求めて、それに基づいて逐次算出する。

出し型水制のような不透過型の水制をモデリングする場合には、水制の平面形状を計算メッシュで表現し、水制の天端高を河床位として与えることにより、水制を直接図-2のような形で表すこととする。

段落ち部や堰の背後に生じる渦領域の長さ L については、これまでいくつかの実験研究²⁸⁾が行われている。 L は段落ち高さの関数であり、一般的にその数倍である

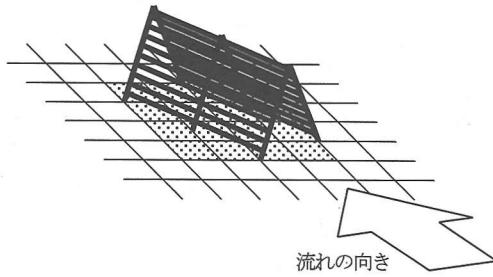


図-1 水制と計算メッシュ

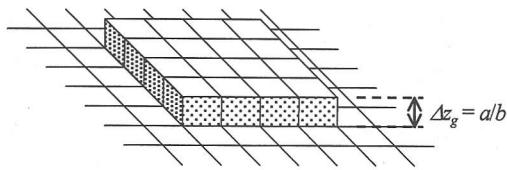


図-2 水制による遮蔽面積を考慮した疑似河床

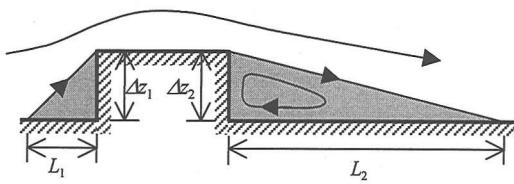


図-3 水制により流れが分離する領域の考慮

といわれている。ここでは便宜上、水制下流側の渦領域の長さ L_2 は昭和 60 年版水理公式集に示された図²⁹を参考に、水制背後の段落ち Δz_2 の 5 倍とし、上流側の分離される領域の長さ L_1 は、とくにそれに関する研究成果がみあたらため、試算的な設定として水制前面の段上がり Δz_1 の 1 倍とする(図-4)。その妥当性や一般性については今後検討する余地があるが、本研究においてはこのような考え方による簡易なモデルの適用性を検討することを主眼としている。

水制領域の疑似河床位(不透過型水制の場合はその天端高)を z_g とすると、水制の直上流、直下流の疑似河床位の与え方は次のとおりである。

$$z_f = \begin{cases} z_g - (z_g - z_{L1})l/L_1 & 0 \leq l \leq L_1 \text{(上流側)} \\ z_g - (z_g - z_{L2})l/L_2 & 0 \leq l \leq L_2 \text{(下流側)} \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 z_f は疑似河床位、 z_{L1} は水制上流端から距離 L_1 の地点の河床位、 z_{L2} は水制下流端から距離 L_2 の地点の河床位、 l は水制上流端(下流端)からの距離である。各計算メッシュの中心点に対して式(2)で求まる z_f を当

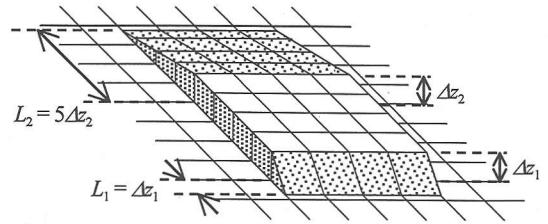


図-4 縦渦領域を考慮した疑似河床

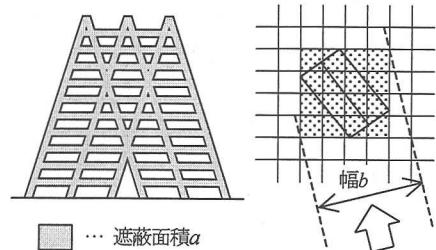


図-5 水制の遮蔽面積 a と水制設置域の b

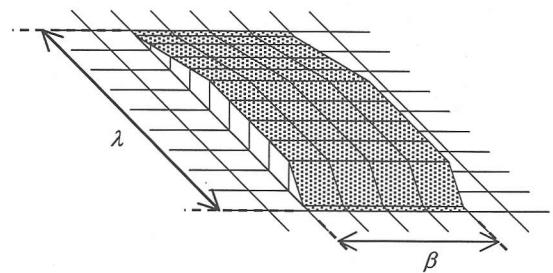


図-6 水制影響領域

該メッシュの代表高さとする。ただし、式(2)で求まる疑似河床位が真の河床位よりも低くなる場合には、それ以後のメッシュには疑似河床位を与えない。

(3) 水制による付加抵抗の評価

前述した水制領域と渦領域(疑似河床位を与えたメッシュ)を水制影響領域とする(図-6)。この水制影響領域に対し、水制の効果を以下のように考慮した付加抵抗係数 C_f' を与える。

まず、抵抗係数の概念を用いて、水制による付加抵抗を底面せん断力の表現で表示すると次のとおりである。

$$\vec{\tau}' = -\rho C_f' |\vec{u}| \vec{u} \quad (3)$$

ここに、 $\vec{\tau}'$ は底面に働く付加せん断力、 ρ は水の密度、 C_f' は付加抵抗係数、 \vec{u} は水深平均流速である。

一方、従来の抵抗力の概念を用いれば、水制によって生じる流れへの抵抗力を次のように表せる。

$$D = \frac{\rho}{2} C_D \int_0^b u_0^2 h_g dy \quad (4)$$

ここに, D は水制による抵抗力, C_D は抵抗力係数, u_0 は水制影響領域の上流側での水深平均流速, h_g は水制による流れへの遮蔽高, b_l は流れの方向から見た水制の横幅, y は流れの方向に直交する座標である(図-5参照). 流れへの遮蔽高 h_g は、水制上流側の各メッシュにおける真の河床位と水制の疑似河床位との差とする.

近似的に、水制が流れに及ぼす抵抗力は水制影響領域の疑似河床面に働く付加せん断力の総和に等しいとおくことができる。よって水制影響領域の付加抵抗係数が一様であると仮定すれば、式(3), (4)より、付加抵抗係数 C_f' を次式で求めることができる。

$$C_f' = \frac{C_D \int_0^b u_0^2 h_g dy}{2 \int_0^b \int_0^l u^2 d\xi d\eta} \quad (5)$$

ここに、 ξ はメッシュに沿った流下方向座標、 η はメッシュに沿った横断方向座標、 l はメッシュに沿った水制影響領域の流下方向の長さ、 β はメッシュに沿った水制影響領域の横幅である。流れの計算の中で付加せん断力を求める際には、式(5)を離散化した式に、前の時間ステップの流速を代入して C_f' を算出する。この方法によると、式(4)で評価された付加せん断力の総和に基づいて、水制影響領域の流速分布に応じた C_f' が一定値として決まり、付加せん断力 τ が流速に対応した分布をもつことになる。水制影響領域内で C_f' を一定とすることについては今後議論の余地が残るが、ここでは既存の流れ場の計算プログラムを改良する場合を考慮し、できるだけ労力の少ない方法でモデル構築が可能となるよう、このような仮定を設けている。

以上の定義による C_f' を用いると、水制影響領域における抵抗係数 C_f は、次式により求められる。

$$C_f = C_{f0} + C_f' \quad (6)$$

ここに、 C_{f0} は水制のない場合の抵抗係数である。

以上は流れの計算における水制のモデルの考え方であるが、河床変動の計算においてはつきのように水制影響領域を取り扱う。すなわち、水制影響領域では、疑似河床位ではなく、真の河床位を対象として河床変動の計算を行う。また、前述の水制モデルを考慮した流速計算結果、および水制のない場合の抵抗係数 C_{f0} に基づいて水制影響領域における底面摩擦速度を評価し、各メッシュの掃流砂量を求める。

4. 出し型水制の実験による検証

ここでは、越流不透過型の出し型水制を湾曲河道の河岸部に設置して、その護岸・護床の効果を評価する水理

表-1 出し型水制の実験条件

水路平面形状	: 90° 単湾曲水路 (図-7のとおり)
水制の配置	: 図-8(1)のとおり (Case1) 図-8(2)のとおり (Case2)
水路横断形状	: 台形断面 (図-9のとおり)
法面勾配	: 1:2
河床勾配	: 1/500
流量	: 低水路満杯流量 40.4ℓ/s
河床材料粒径	: 0.70mm
法覆工粒径	: 5.30mm
水制の諸元	: 図-10のとおり

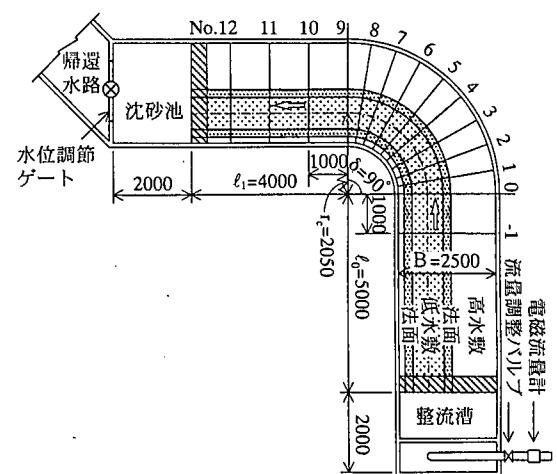


図-7 水路の平面形状

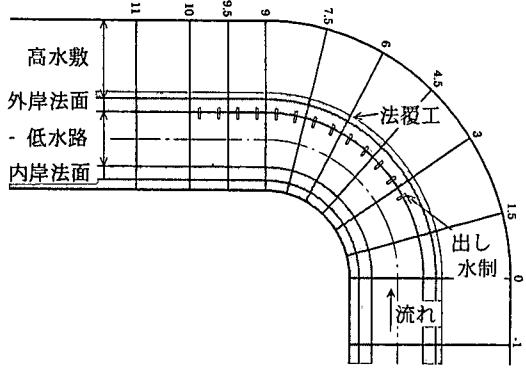
模型実験を行い、前章の水制モデリング手法を用いて再現計算を行うことにより、モデルの妥当性を検証する。

(1) 実験の概要

実験では、空石張りの法覆工を施した台形断面の低水路をもつ90°単湾曲移動床河道模型に出し型水制を設置した。低水路満杯流量を定的に与えて水理現象の観察を行うとともに、河床がほぼ平衡状態になった時点での河床形状、水面形、および流速分布を計測し、水制による外岸水衡部の流速低減効果や河床変動特性を調べている。湾曲部外岸に水制を13基設置したケース(Case1)、および湾曲入口部内岸にもさらに水制4基を設置したケース(Case2)の2ケースを再現計算の対象とし、これらの実験条件を表-1に示す。

(2) 実験におけるNの評価

底面における2次流の流速を見積もる際に用いる2次流強度係数 N については、実験における流速分布を用いて式(1)によって N を逆算した結果を整理し、それに基づいて代表値を設定することとした。



(1) Case1

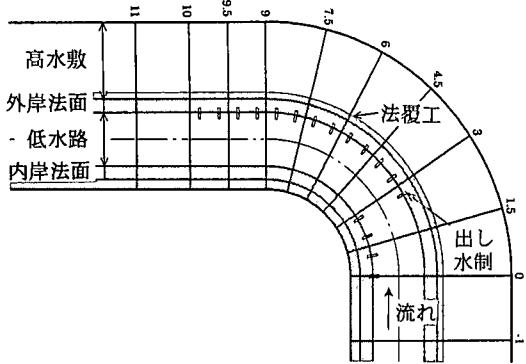


図-8 出し水制の配置

用いた資料は、(1)に示した出し型水制に関する移動床水理模型実験と、それに対応する水制なしの場合の実験における流速測定結果である。

図-11は、実験で計測された各測点の底面流速の主流方向成分と2次流成分、および水深、曲率から $N.$ を逆算した結果をまとめたものである。なお、曲率は水路のものを用いている。

これらの図を見ると、データはバラツキがあるものの、 $N.=7.0$ で評価される値よりは小さめの2次流が生じていることが分かる。また、 $N.$ は場所的に変化する傾向があることがうかがえるとともに、水制があるときは、水制のない場合に比べて2次流が弱まっていることが分かる。したがって、計算での $N.$ はこれらの要素を取り込んで設定することが望ましいが、現段階ではそれを定式化するには至らないため、平均的な評価として適切な値を設定することにする。図を見る限り、当該条件においては、 $N.=3.0$ 程度が適切な2次流強度を与えるようと思われる。

(3) 計算条件

上に示した実験を対象に、3章で示した水制モデルで

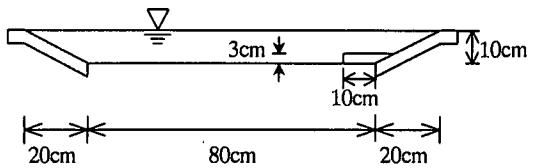


図-9 水路の横断形状（出し型水制の実験）

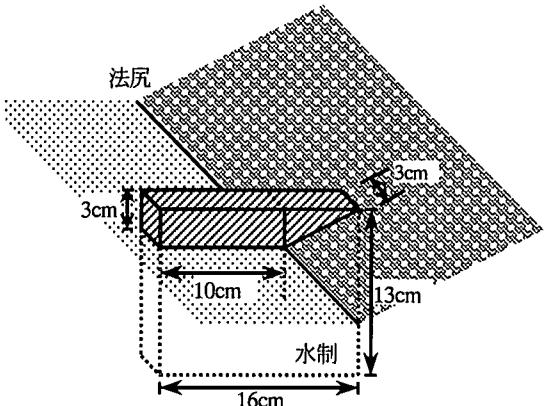
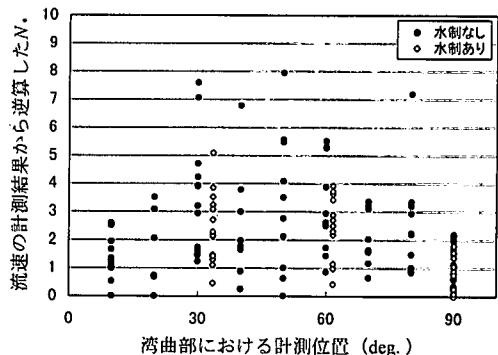


図-10 出し型水制の諸元

図-11 実験結果による2次流強度係数 $N.$ の評価

流れと河床変動の再現計算を行う。

計算メッシュは図-12に一例を示すとおり、横断方向43メッシュ、縦断方向192メッシュに分割しており、とくに水制設置箇所では水制スケールに適合するようメッシュ間隔を小さくしている。

計算において、水制影響領域では河床の抵抗係数 C_f を式(6)により求めるが、 C_{f0} は、マニングの平均流速公式に基づいて式(7)で与えるものとし、粗度係数 n の値については、所定の流量で上流直線区間が低水路満杯となる平均的な値を求めて $n = 0.025 (\text{m}^{1/3} \text{s})$ とした。

$$C_{f0} = g \cdot n^2 / h^{1/3} \quad (7)$$

なお、実験では河床波の発生によって河床部分の粗度

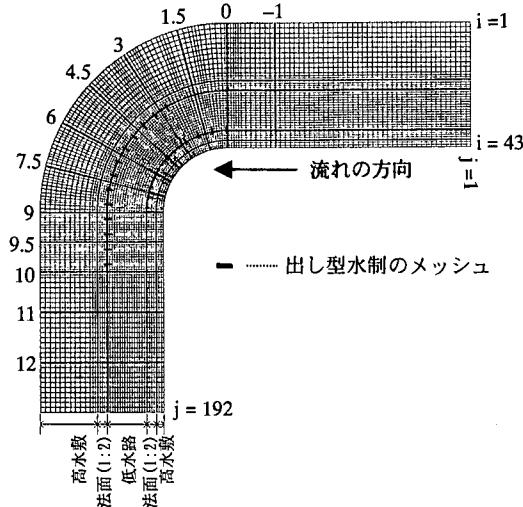


図-12 計算に用いたメッシュ (Case2)

が大きくなり、法面粗度との違いは流れの特性を大きく左右するほどの差異ではないものと考えられる。

水制の抗力係数 C_d については、汎用化に向けての検討が必要であるが、ここでは水路実験による基礎データが豊富に得られている秋草らによる円柱型水制に対する研究結果¹⁰を参考に、 $C_d=2.0$ として検討を進める。

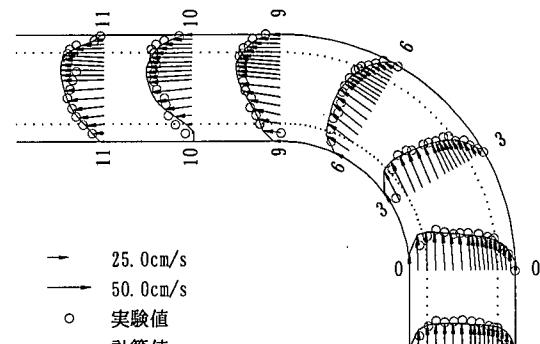
さらに、実験では、側岸付近の河床侵食にともなって法覆工の粗い粒子が崩落し、河床を覆って侵食を抑制する現象がみられた。計測によると、このときの崩落部表面勾配は、今回の実験では粒子の動摩擦角程度が上限となっている。よってこの計算では、この効果を表現するため、深掘れの河床横断勾配が粒子の動摩擦角を越えないように各時間ステップごとに、各メッシュの侵食量の上限値を設ける。

また、水制領域では初期の状態よりも河床高が低くならないよう侵食制限を与える。

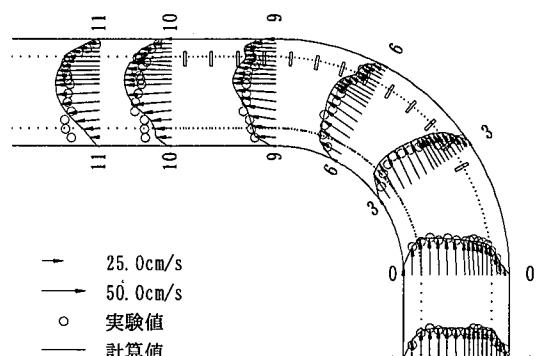
(4) 計算結果と実験結果の比較

図-13(1)～(3)は、ほぼ平衡と見なせる時点の水深平均流速の分布について、計算結果と実験値を比較して示したものである。また、図-14(1)～(3)は水位と河床位の横断分布の比較を行ったものである。各図の(1)は、水制なしの場合のモデルの再現性を確認するため実験および計算結果を示している。ただし、図-13(1)の流速の測定結果については、低水路河床の外岸法尻部に幅10cm 厚さ5cm にわたって粒径の大きい材料を置き、根固工を施したケースを用いており、計算条件も同様としている。これらの結果に基づき、次のようなことがいえる。

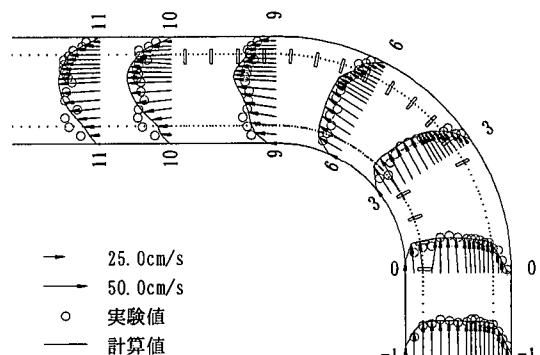
- ① 図-14(1)によると、水制の無いケースでは、断面No.6で若干の差があるものの、実験における河床変



(1) 水制なし



(2) Case1



(3) Case2

図-13 水深平均流速の実験値および計算値
(出し型水制の実験)

動の結果が計算によりよく再現されている。図-13(1)の水深平均流速の分布も再現性がよい。

- ② 水制を設置した Case1 と Case2 について、まず水深平均流速の横断分布の再現性を見てみると、両ケースが同じ特徴を示している。すなわち、湾曲部の入口付近（断面 No.-1, No.0, および No.3）にお

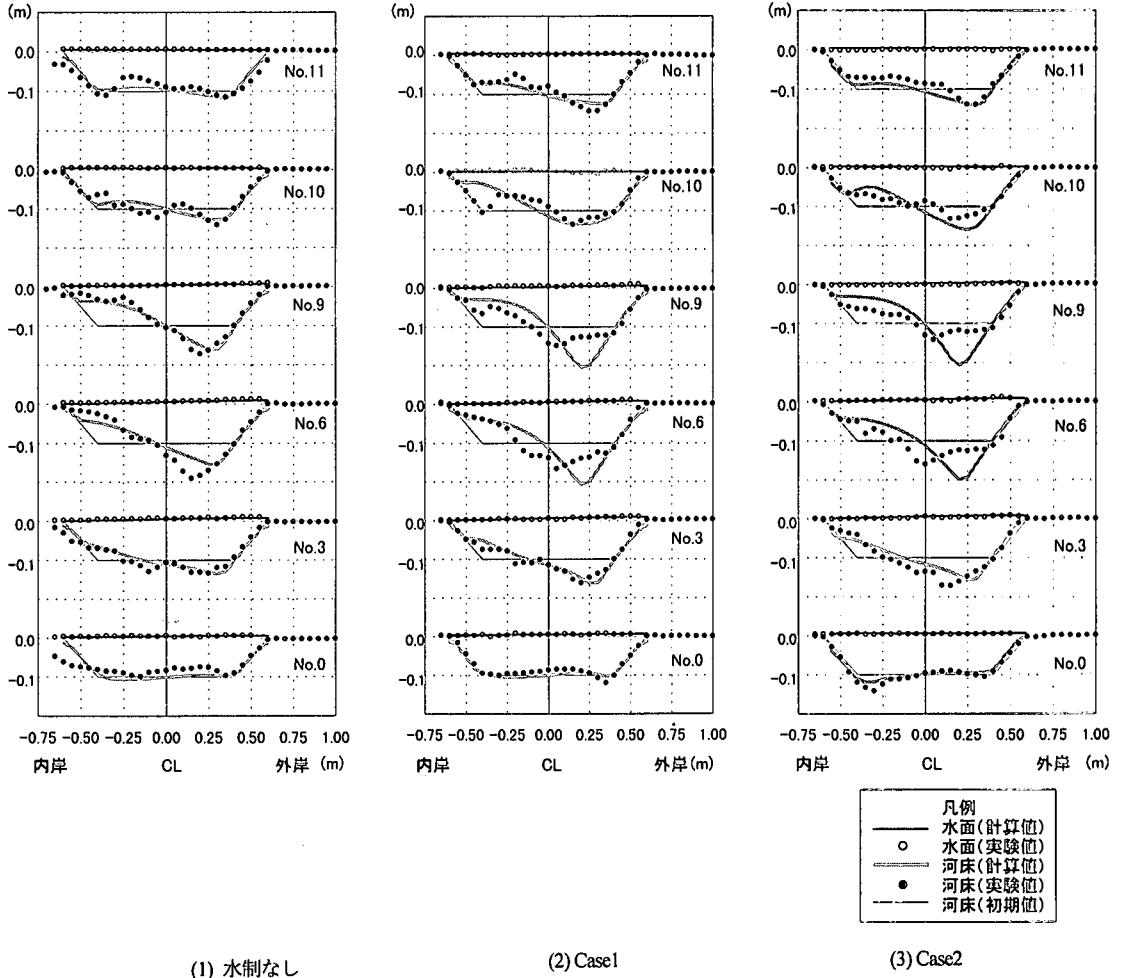


図-14 水位と河床位の実験値および計算値（出し型水制の実験）

いては、計算結果と実験結果はかなりよく一致している。その下流域の断面においては、水制近傍での流速低減効果はある程度良好に再現されているが、それ以外の領域では部分的に再現性がよくない領域もみられる。

- ③ Case1, Case2 の水位に関しては、両ケースとも計算結果と実験結果とがよく一致している。
- ④ 河床形状に関しては、局所的には堆積高および洗掘深の規模の不一致がみられ、特に、測線 No.6 付近から下流部における外岸部の侵食と内岸部の堆積が、計算では大きくなる傾向にあるが、両ケースとも、洗掘・堆積パターンの傾向は概ね良好に再現できている。
- ⑤ 水制を湾曲入口部内岸にも設置した Case2 では、流れおよび河床変動への影響に関して Case1 との間に大きな差異が認められない。このことは、実験結果においても同様であった。

⑥ 実験結果にみられるように、水制によって深掘れが流路中央寄りへ移動する効果が、計算結果においてもある程度現れている。

このように、水制による水制近傍の流速低減効果や深掘れ位置のシフト効果などが上記の2次元シミュレーションモデルによってある程度評価することができたが、部分的には計算結果と実験結果の定量的な差異がみられる。この原因としては、おもに次のようなことが考えられる。

- ① 計算は低水路だけを対象とし、各断面の通過流量が同じであるとした。しかし実験では、湾曲部外岸の水位上昇にともない一部の流量が高水敷に溢れていたため、低水路の流量は断面ごとに異なっている。高水敷への流量の損失は、計測結果によると断面 No.6~9 の区間において上流端流量の1~2割に達する。そのため平均流速が小さくなり、2次流も弱められるものと考えられる。計算条件

と実験条件におけるこの違いが流速分布と河床形状の不一致をもたらす一要因と考えられる。

- ② また、実験においては、水制近傍の局所的な流れによって、法面の法覆工材料が崩れ落ちて、一部が底水路の最深部付近まで達する状況であった。それによって、低水路床の河床材料の移動が抑制され、結果的に外岸の侵食と内岸の堆積が抑制されることになる。一方、計算では、この法面の崩れ現象については法尻部の侵食抑制効果を考慮しているものの、河床の面的な被覆効果は評価できていない。このことが、上記の計算結果と実験結果の差異を引き起こすもう一つの要因と考えられる。

このように、実験と計算の条件設定の相違や局所現象のモデル化の問題が残ったが、これらの問題はいい方を変えれば、流水が低水路内に限って流れ、かつ法覆工の崩壊がないような条件であれば、実際の現象も計算と同様な流れおよび河床変動が起こる可能性も十分あると推測され、モデルの本質的な欠陥ではないといえる。

上述の結果および考察により、特殊な境界条件にともなう現象を除けば、 C_d や N 等の水理パラメータを適切に設定することによって、ここで提案したような考え方のモデルを、水制のある場合の流れと河床変動の予測に適用することが実用上可能と思われる。

5. スクリーン枠の実験による検証

ここでは透過型水制（スクリーン枠）を湾曲河道の河岸水衡部に設置し、その護岸・護床効果を調査した水理模型実験³⁰⁾について、前章の出し型水制と同様に再現計算を行う。

スクリーン枠^{31), 32)}は、（財）砂防・地すべり技術センターと川鉄建材（株）が共同開発した工法であり、我が国の伝統的な工法である牛や枠に類似した構造物である。牛や枠は杭を主体とする構造の水制が設置しにくい礫床河川に多く用いられる透過型水制であり、スクリーン枠も同様な適用が可能である。なお、スクリーン枠は現在、建設省北陸地方建設局湯沢砂防工事事務所において試験設置が行われている例がある³³⁾。

スクリーン枠の構造は、図-15 に一例を示すように三角柱の骨組みと透過性のスクリーン部で構成されている。また、鋼製フトン管の自重で固定するため、河床低下にともなう沈下等の変位に追随できる。さらに、従来工法が木製あるいはコンクリート製であるのに対し、鋼製としているため製作・設置が容易なこと、水制機能は従来工法と同様の効果が期待されることから、適用性の広い工法と考えられる。

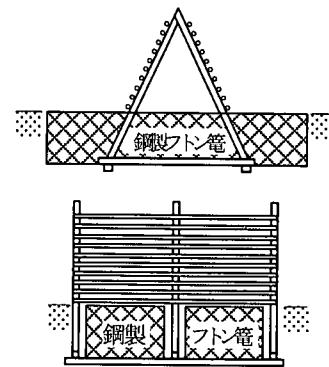


図-15 スクリーン枠の形状

（1）実験の概要

緩傾斜河岸を有する 90° 単湾曲河道模型を用い、その湾曲の外岸側にスクリーン枠の模型を設置し、スクリーン枠の水理特性を水理模型実験により定量評価する。緩傾斜河岸には空石張り護岸を施し、スクリーン枠水制が湾曲部の護岸の安定性保持に果たす役割について注目しながら、実験を進めるものとする。

まず、河床を固定床とし、スクリーン枠の配置方法を比較検討する実験を行った。それぞれの配置方法における流速分布を測定することにより、外岸に働く外力の軽減割合を比較するものである（固定床実験）。

次に、その中から比較的効果が良好な配置方法を選び、移動床河道での実験を行い、洗掘、堆積といった河床変動特性に与える影響を調査し、スクリーン枠の護岸・護床効果を確認した（移動床実験）。なお、ここでは、固定床実験において良好な効果をもつと判断されたケース（ケース A-7）を中心に記述を行う。

固定床実験および移動床実験の実験条件を表-2 に示す。移動床実験は固定床実験に比べて河床材料の粒径を小さくすると同時に河床勾配を若干急にし、河床材料の移動が生じる条件に設定している。

また、移動床実験の実験条件は、事前にスクリーン枠を設置しない場合には湾曲外岸で側岸侵食が発生することが確認されているものである。この条件に対してスクリーン枠を設置した場合に側岸侵食が発生しなければ、スクリーン枠が護岸効果を有することを実験上確認することができる。なお、モデルの検証に用いた実験では、まず、スクリーン枠を設置して河床が定常となるまで通水し、その後スクリーン枠を除去して、さらに再び河床が定常となるまで通水した。すなわち、スクリーン枠が除去されることによる影響を調べたかたちとなっている。

（2）計算条件

計算方法、計算条件は、前章の出し型水制の計算と同

表-2 スクリーン枠の実験条件

- 固定床水路

水路平面形状 : 90° 単湾曲水路 (図-7のとおり)
 水制の配置 : 図-16 (ケースA-7) 他
 水路横断形状 : 図-17のとおり
 河床勾配 : 1/1000
 流量 : 低水路満杯流量 38.0ℓ/s
 河床材料粒径 : 2.86mm (移動を生じない)
 水制の諸元 : 図-18のとおり
- 移動床水路

水路平面形状 : 90° 単湾曲水路 (図-7のとおり)
 水制の配置 : 図-16のとおり
 水路横断形状 : 図-17のとおり
 河床勾配 : 1/500
 流量 : 低水路満杯流量 40.4ℓ/s
 河床材料粒径 : 2.86mm (法覆工)
 0.70mm (法覆工以外)
 水制の諸元 : 図-18のとおり

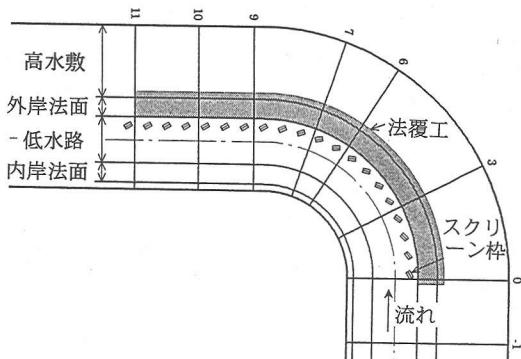


図-16 スクリーン枠の配置 (ケースA-7)

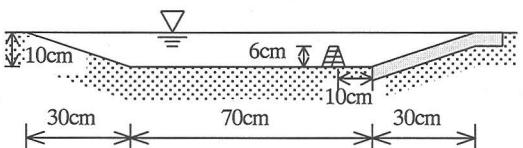


図-17 水路の横断形状 (スクリーン枠の実験)

様である。計算に用いるメッシュは、図-12に準ずるが、スクリーン枠領域と格子が適合するようにさらにメッシュを部分的に細分化して図-19に示すように作成した。メッシュは水路法線に平行に配列されているため、ケースA-7の特徴であるスクリーン枠の30°の傾きは表現されていないが、このことは、計算結果にそれほど大きな影響を及ぼすことはないと考えられる。

なお、水制の抗力係数 C_d については、次節(3)に示すように、スクリーン枠の抗力係数を評価する水理模型実験を別途実施した。再現計算ではその実験結果に基

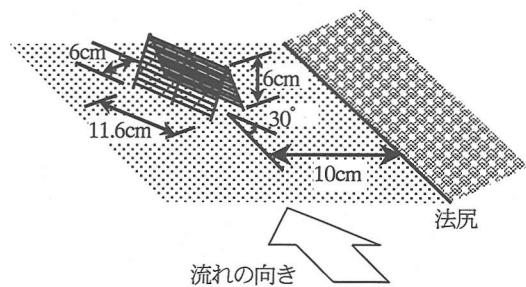


図-18 スクリーン枠の諸元

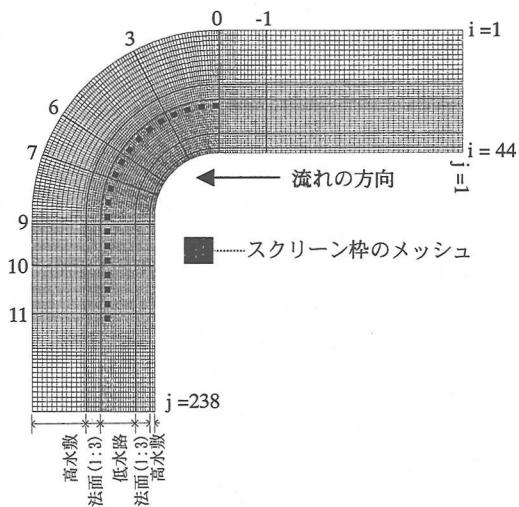


図-19 スクリーン枠の実験の計算メッシュ

づいて抗力係数の値を与える。

(3) スクリーン枠の抗力係数の評価について

スクリーン枠の抗力係数を評価するため、以下に示す基礎的な実験を行った。

a) 実験方法

いま、スクリーン枠によるエネルギー損失が、式(4)で表される抗力に対する反力がなす仕事に相当するものとし、また、水路の断面平均流速とスクリーン枠への接近流速とがほぼ等しいものとすれば、図-20に示す記号により、水路床にスクリーン枠がおかれた場合の不等流の差分方程式を次式で示すことができる。

$$z_1 + h_1 + \frac{v_{m1}^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{v_{m2}^2}{2g} + h_f + C_D \frac{a}{A_1} \frac{v_{a1}^2}{2g} \quad (8)$$

ここに、 v_m は断面平均流速、 h_f は摩擦損失水頭、 a はスクリーン枠部材の流下方向の投影面積、 A は流積、 C_D は抗力係数、 v_a はスクリーン枠に対する接近流速の代表値である。損失水頭 h_f は、マニングの粗度係数 n を用い

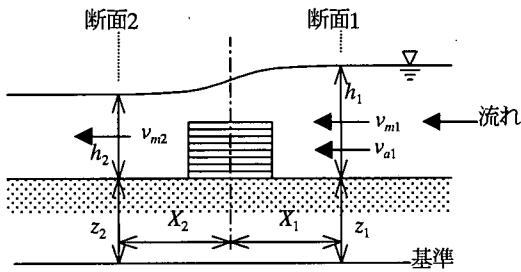


図-20 スクリーン枠をともなう不等流（記号説明）

て次式で評価するものとする。

$$h_f = \frac{n^2 v_1^2}{R_1^{4/3}} X_1 + \frac{n^2 v_2^2}{R_2^{4/3}} X_2 \quad (9)$$

一様水路における水理模型実験で式(8)および式(9)中の各水理パラメータを計測することにより、両式に基づいて抗力係数を算定することができる。

実験は、幅 52.4cm、長さ 5.5m、河床勾配 1/500 の矩形断面水路の中央にスクリーン枠を設置し、上流端から一定流量を定常的に通水し、スクリーン枠の上下流の断面で水位、流速を計測する。河床には、粗度として平均粒径 5.34mm のほぼ一様な珪砂を敷き詰め、一様勾配の固定床実験とした。

水位は、スクリーン枠の上下流端から 10cm 離れた断面で、横断方向に 5 点、すなわち水路中心、両岸側壁から 1cm、およびこれらの中間点で計測し、その平均を用いる。

また、流速は、水位と同じ断面で横断方向に中央寄りの 3 点において、水深方向に 2cm ピッチで計測し、平均流速を求めた。ただし、平均流速のとり方として次の 2 種類、すなわち、河床～水面の平均流速、および河床～水面の平均流速を求めた。後者の平均流速は、平面 2 次元シミュレーションへの適用を考慮したものである。

実験ケースは、スクリーン枠下部のフトン籠が河床に埋没した状態と、河床上に露出した状態に対して、流れに対する設置角度および水深を変化させて、表-3 に示す 10 ケースを実施した。

なお、表中の「水深」は、スクリーン枠上流水路でのおよその目標値であり、 C_d の算定に際しては前述の水位計測断面における実験値を用いている。

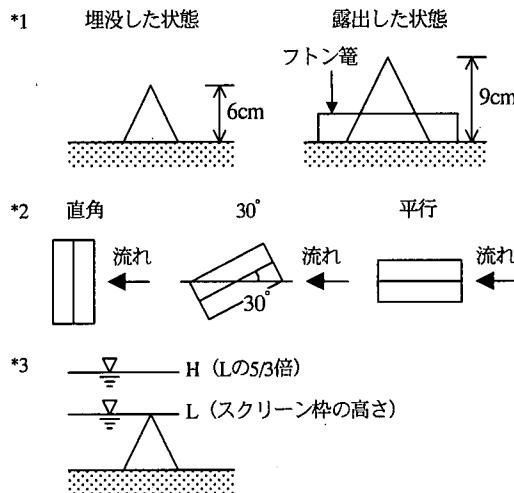
b) 実験結果

実験により求まった抗力係数 C_d の値を表-4 および図-21 に示す。

これらの結果より、全般的に抗力係数はフトン籠が露出している場合に大きくなること、設置角度が 0° または 90° で大きくなること、水深の違いにより有意な差

表-3 スクリーン枠に関する実験ケース

フトン籠の状態 ¹	流れに対する設置角度 ²	水深(cm) ³	ケース名	流量(l/s)
埋没した状態	直角	6 (L)	BRL	10.5
		10 (H)	BRH	22.5
	30°	10 (H)	BTH	22.5
	平行	6 (L)	BPL	10.5
露出した状態		10 (H)	BPH	22.5
	直角	9 (L)	ERL	19.5
		15 (H)	ERH	38.0
	30°	15 (H)	ETH	38.0
平行	9 (L)	EPL	19.5	
	15 (H)	EPH	38.0	



は現れないことなどが分かる。なお、接近流速の定義方法の違いに着目すると、スクリーン枠部分の領域にできるだけ限定した範囲での平均流速とした場合よりも、水深方向に水面まで拡張した領域の平均流速とした場合の方が、 C_d の値がやや小さくなる。これは後者の評価による接近流速がやや大きいためであり、適用する流速値の定義に応じて留意すればよいものと思われる。

全体的に抗力係数は 1~3 程度の値をとると考えてよいようであるが、ここでの成果は一応の目安として考え、今後さらに種々の条件下での検討を総合して値の設定方法を確立する必要がある。

(4) 固定床水路における流速の計算結果と実験値の比較

図-22 および図-23(1)~(3) は、それぞれケース A-0 (スクリーン枠なし) およびケース A-7 に対する水深平均流速の平面分布について、計算結果と実験結果を比較して示したものである。なお、スクリーン枠の抗力係数 C_d は、1.0, 2.0, 3.0 の 3 通りを設定し、その影響を調べ

表-4 実験から求まる抗力係数

設置角度 水深	直角 (R)	30° (T)	平行 (P)	レイノルズ 数*
フトン管が埋没した 状態 (B)	6cm (L)	3.15	—	1.17×10^3
	10cm (H)	3.35 (2.74)	1.28 (1.06)	1.50×10^3
フトン管が露出した 状態 (E)	9cm (L)	3.80	—	1.45×10^3
	15cm (H)	2.84 (2.53)	2.61 (2.32)	1.69×10^3

*断面平均流速 \times 主部材厚 3.5mm /動粘性係数 $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$

() 内数値：接近流速 v_a の定義を水深方向に水面まで拡張した領域の平均流速とした場合

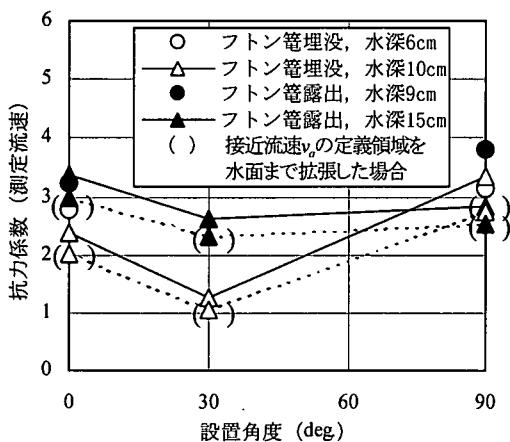


図-21 スクリーン枠設置角度と抗力係数の関係

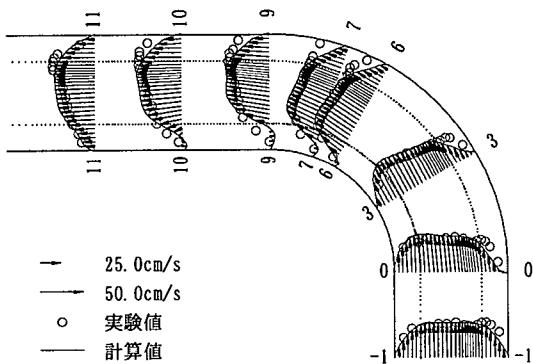
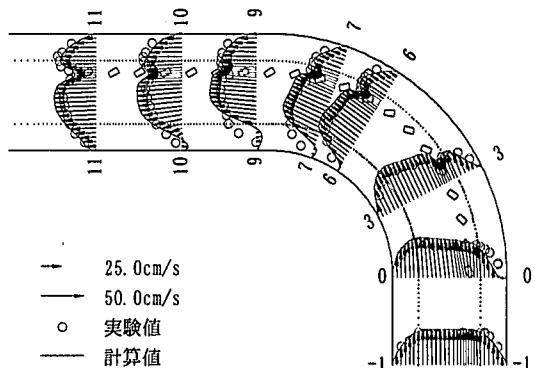


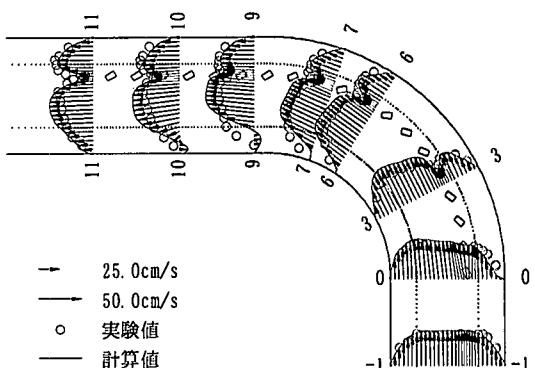
図-22 水深平均流速の実験値および計算値
(固定床における実験, ケースA-0)

るための計算を行っている。

さらに、水位の計算結果と実験結果を $C_d=1.0$ のケースを例に、図-24 に比較して示した。これらの図より、数値シミュレーションの再現性について以下のことがい



・ (1) $C_d=1.0$ とした場合



・ (2) $C_d=2.0$ とした場合

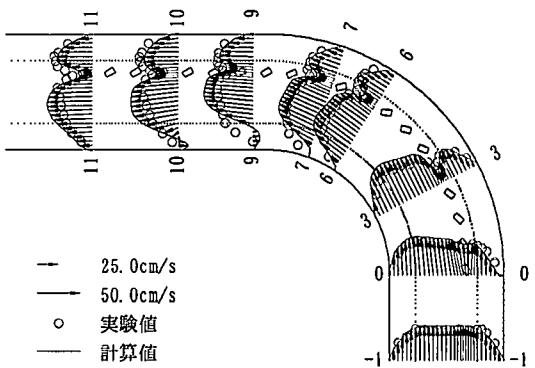


図-23 水深平均流速の実験値および計算値
(固定床における実験, ケースA-7)

える。

- ① 水制のない場合 (ケースA-0) の流速分布をみると、計算結果は湾曲入口部内岸側および湾曲出口付近外岸側の流速が大きいという湾曲部流れ特有のパターンになっており、実験結果を概ね良好に再現できている。

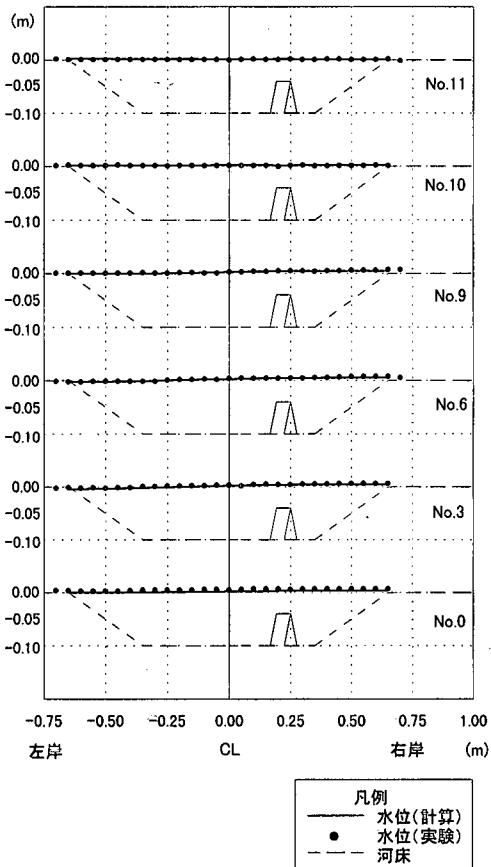


図-24 水位の実験結果および計算値
(固定床における実験, ケースA-7)

- ② 水制のある場合(ケースA-7)の流速分布をみると、計算結果はスクリーン棒周辺の流速低減の様子を概ね再現できている。抗力係数 C_D の違いについては、 $C_D=1.0$ あるいは $C_D=2.0$ の値を用いたときに計算結果が実験結果とよく適合しており、 $C_D=3.0$ とした場合はスクリーン棒の減速効果がやや過大評価となっている。

ここでの検証結果および前節に示した抗力係数に関する実験結果より、フトン籠が埋没した状態で水深10cm、かつ流れ方向に対する設置角度30°の場合の抗力係数は、1.0をやや上回る値をとるものと推察される。しかしながら、抗力係数は水深や水制諸元等、種々の要因によって支配され、また、その計測評価が困難なこともあります、一般的な表示を行うためには今後さらに検討する必要がある。

本研究においては主としてシミュレーション手法の開発に主眼をおいているため、抗力係数としては、便宜上ここでの条件下では $C_D=1.0\sim2.0$ 程度

の値において適合性がよいという知見を述べるにとどめ、今後の研究に期待することとしたい。

- ③ 湾曲部内岸では流れの剥離がみられるが、計算結果は実験結果に比べて剥離の規模が大きくなっている。また、計算結果は全般的に法面上での流速が実験結果よりも小さくなり、低水路床部の流速が実験結果よりも若干大きくなる傾向がある。
- ④ $C_D=1.0$ のとき、水位に関しては、計算結果は実験結果を良好に再現している。なお、 $C_D=2.0$ および3.0の場合の計算結果も水位に関してはほとんど差違がみられなかった。すなわち、スクリーン棒の抗力係数 C_D は、水位に顕著な影響を及ぼさないことが分かった。

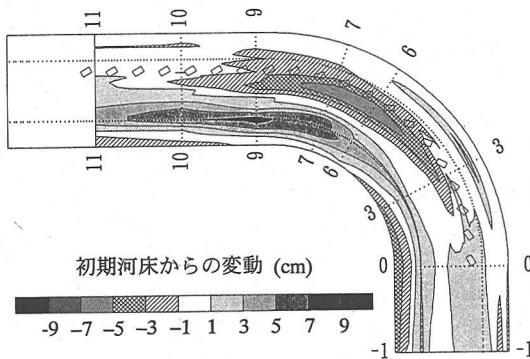
以上の考察より、ここで示した簡易なモデルに基づく2次元数値シミュレーションによって、平坦河床の湾曲河道での流れの様子やスクリーン棒による流れの減速効果を概ね再現できたと評価できるが、上に挙げたように計算結果と実験結果の流速分布には若干の差違もみられる。これは前述した不透過型水制を対象とした実験と同様、高水敷上に溢水することによる低水路流量の減少がひとつの要因であると考えられ、試算的にシミュレーションの通水流量を実験状況から推定される低水路流量(1割減程度)とし、水位は低水路満杯に相当するよう若干大きめの粗度係数を用いて計算を行ったところ、湾曲部内岸の剥離の規模は小さくなり、より実験結果に近い流速分布を得ることを確認している。

このように、前述の不透過型水制に対する検討と同様に、実験と計算の条件設定の相違に起因する予測結果の不一致がみられるものの、諸モデル係数を適切に設定することによって、本2次元シミュレーションモデルが、透過型水制のある場合の流れの予測に、実用上適用可能なものと思われる。

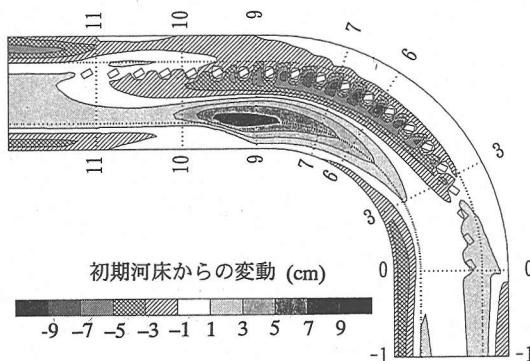
(5) 移動床水路における河床変動の計算結果と実験値の比較

移動床実験の再現対象ケースは、(1)で述べたとおりスクリーン棒を設置しなければ河岸が侵食される条件として、表-2に示した河道条件の下で、ケースA-7と同じ配置でスクリーン棒を設置して行った実験である。実験は以下のように行われた。

- ① ケースA-7と同様にスクリーン棒を配置し、低水路満杯流量を通水して流れや河床変動の状況を見る。
- ② ほぼ平衡状態に達した後通水終了し、スクリーン棒を除去して再び通水し、河床や河岸の状況を見る。
- 数値シミュレーションでは、以下の2段階の計算を行い、①および②のそれぞれについて比較検討を行う。ただし、実験では流速分布が計測されていないため、河床形状と水面形状の再現性のみ検討する。計算メッシュは

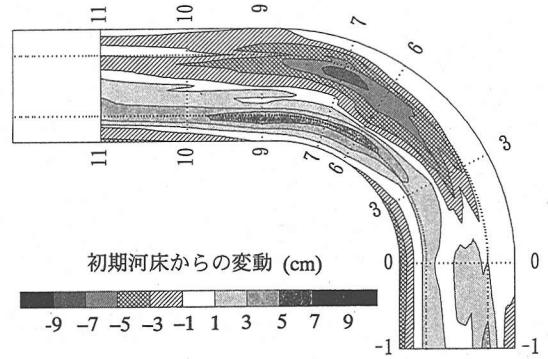


(1) 実験結果（通水5時間後）

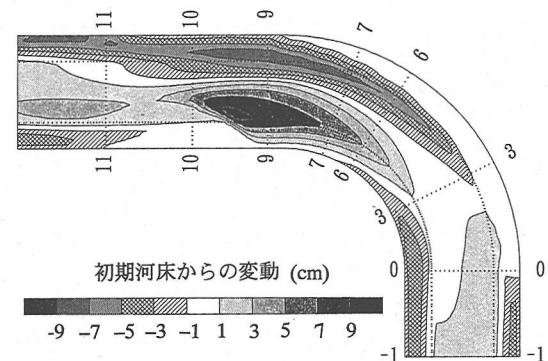


(2) 計算結果 ($C_D=1.0, N_r=3.0$)

図-25 スクリーン枠を設置した場合の
河床変動量の実験値および計算値



(1) 実験結果（スクリーン枠除去1時間後）



(2) 計算結果（スクリーン枠なし, $N_r=3.0$ ）

図-26 スクリーン枠を除去した場合の
河床変動量の実験値および計算値

図-19 に示したもの用い、スクリーン枠の抗力係数 C_D は 1.0 として検討を進める。また、水制領域では、鋼製フトン籠が初期河床の高さにあるため、侵食が生じないものとする。

- ① スクリーン枠を設置し、通水後ほぼ平衡状態に達するまで、流れと河床変動の計算を続ける。
- ② ①の計算終了後の河床状態でスクリーン枠を除去し、再度通水して河床がほぼ平衡状態に達するまで、流れと河床変動の計算を続ける。

図-25(1), (2) は、それぞれ実験および計算において、スクリーン枠を設置して通水し、ほぼ平衡状態となった時点における、初期河床からの河床変動量平面分布を示したものである。また、図-26(1), (2) は、スクリーン枠を除去した後通水を継続し、再び平衡状態となった時点での河床変動量を同様の表示で示している。

これらの図より、数値シミュレーションモデルの再現性に関して以下のことがいえる。

- ① スクリーン枠を設置した状態では、最も洗掘が発達するのは測線 No.6～7 付近であり、計算でもその

ような傾向がみられる。また、堆積についても、湾曲入口から出口付近にかけての内岸側で発達している様子が計算でも表されている。

- ② 実験結果によると、スクリーン枠を設置した場合は、法面の侵食は抑制されていたが、スクリーン枠を除去した場合、測線 No.6 から No.10 の上流の区間で外岸の法面が崩れている。これらの現象も傾向としては計算結果においても再現されている。
- ③ 実験での湾曲部内岸の堆積は、スクリーン枠の有無に関わらず湾曲の中ほどから湾曲区間下流の直線部（測線 No.11 付近まで）にかけて比較的細長い形状で生じているが、計算では湾曲区間内の堆積が発達する傾向にあり、下流直線区間までの連続的な堆積の規模は実験ほど大きくは現れない。また、計算での堆積形状は、実験でのものに比べてやや幅が広く堆積高も大きめである。
- ④ 平面センター図で洗掘の状況をみると、スクリーン枠のあるケースにおいて、スクリーン枠近傍の平面スケールの小さな洗掘の形状の違いが目立つ。こ

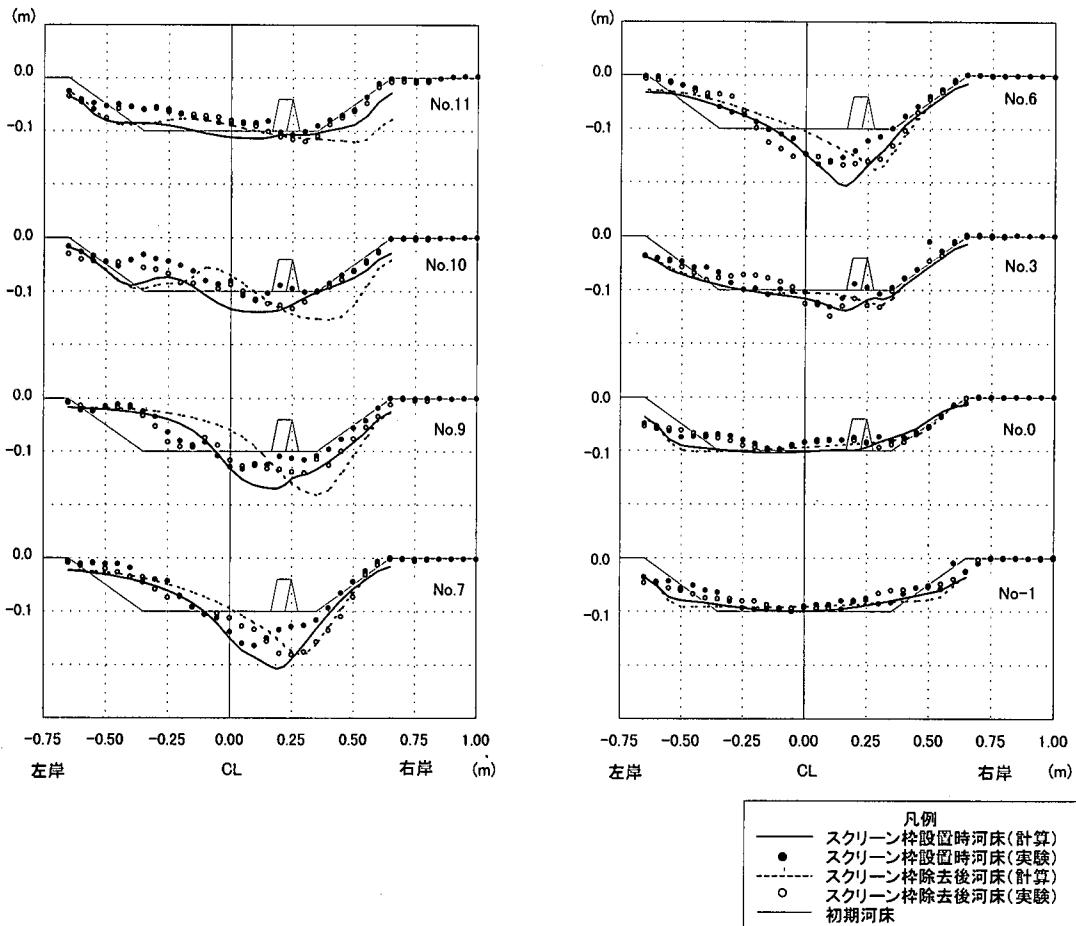


図-27 水位、河床位横断形状の実験値および計算値 ($C_d=1.0$, $N_s=3.0$)

れは、実験結果のセンター図を測線 No.1～No.11 の計 8 本の測線上での河床高だけから作成しているため、スクリーン枠近傍の詳細な河床形状を表わすことができていないことが、要因として挙げられる。

次に、図-27 (1), (2) は、スクリーン枠設置時および除去時における、水位と河床位の横断形状について、実験結果と計算結果を比較して示したものである。これらより、横断図で比較した場合、以下のことが分かる。

- ① 計算での河床横断形状は、概ね実験結果と一致しているが、実験ではスクリーン枠の近傍（法尻から 10cm 程度）では洗掘がある程度抑制されているのに対し、計算では深掘れの位置が実験に比べて外岸側にあって、スクリーン枠の付近もある程度洗掘されている。
- ② ただし、スクリーン枠のある場合とない場合の計算結果を比較すると、深掘れの位置はスクリーン枠の設置によって内岸側にシフトしており、そのシフトの度合いは実験結果と同程度である。

③ 水位については、スクリーン枠のある場合、計算結果は全体的に実験結果より低くなっている。これは、計算では河床位が実験結果に比べて低くなっていることが直接の原因である。スクリーン枠のない場合は実験値と計算値は良く一致している。

上記の、計算結果と実験結果の不一致の原因としては、前述の固定床シミュレーションの場合と同様に、高水敷への溢水にともなう条件設定に関する問題が考えられる。

以上に示すように、局所的に計算値と実験値との違いがみられるものの、全体的にみればスクリーン枠による洗掘位置の河道中央側へのシフト効果等、おもな特徴が良好に再現されたといえる。

この結果と、前述の固定床実験の再現計算におけるスクリーン枠近傍の流速低減効果や、流れを河道中央側へシフトする効果等がうまく表現されていることを考えあわせると、ここで提案した透過型水制の簡易モデルを基本とした数値シミュレーションモデルによって、水制設計に関する有用な情報としての現象予測が可能となる。

ものと思われる。

今後、より適切な予測を行うためには、スクリーン枠近傍の河床変動の取り扱い、および2次流強度係数や抗力係数の合理的な評価等においてさらなる検討が必要と考えられる。

6. 水制の水理機能に関する考察

以上の水理模型実験および数値シミュレーションにより、水制の水理機能についてある程度定量的な評価が行える段階に至ったと考えられる。以下では本研究の水理模型実験および数値シミュレーションで得られた水制の水理機能に関する知見をとりまとめ、水制が果たし得る役割や水制設置における留意点について考察する。

(1) 不透過型水制の水理機能

不透過型の出し型水制の水理機能に関して、90°単湾曲河道に対する水理模型実験および数値シミュレーションより得られた知見を要約すると以下のようである。

a) 出し型水制が河床形状に及ぼす影響

湾曲部外岸に出し型水制を配置することにより、水制がない場合に湾曲外岸（偏角60°付近）で発生していた深掘れの位置は河道中央側に寄るとともに、洗掘深が抑制される。ただし、水制がない場合にはあまり洗掘を受けなかった偏角30°～40°付近の河道中央部付近で、やや洗掘が大きくなる。

また、水制周辺では局所的な流れに起因する掃流力の増大が生じ、実験観察によると特に水制先端付近で局所洗掘が発生し、水制間の護岸法尻部も水制がないときと比べて局所的に大きな洗掘を受けやすくなる。

このように、水制設置による河床形状への影響は、河道の全体的な堆積・侵食の傾向として、湾曲河道での洗掘域を外岸部から河道中央側に移動させること、および水制周辺の局所的な侵食と堆積を発生させることに特徴付けられる。

b) 出し型水制が流れに及ぼす影響

出し型水制を設置することにより、水制周辺の局所的な流向変化や流速変化、水制間領域の渦をともなった流れが発生する。これら水制周辺流れは局所洗掘にともなう治水的問題の原因となるが、生物の生息環境の観点からは、流れの多様性を創出する意味で、これから環境に配慮した川づくりにおいて重要な機能を果たすものと考えられる。

また、出し型水制の設置によって、水制域における流速の低減効果が認められる。その程度は、最も流れが集中しやすい湾曲出口下流の測線No.10付近の法尻部水深平均流速で比較すると、水制がない場合には上流直線

区間の断面平均流速の2割増し程度であったのに対して、水制を設置した場合には断面平均流速と同じかやや小さいものとなる。この効果により、河岸に作用する摩擦速度も断面平均摩擦速度と比較して同程度の低減が見込まれることから、護岸構成材料の侵食抵抗を小さく設定することが可能となり、法覆工粒径や法面勾配の選択範囲が広がることになる。

この流速低減率は、水制の諸元や河道の平面形状等によって異なるものと考えられ、今後それらの要因との関係を定量的に評価し、個々の対象地点における効果的な水制諸元を合理的に設定するための指針の確立が望まれるが、本研究で対象とした、既設水制の平均的な諸元による実験において上記のような結果を得たことは、今後の水制設計において有用な知見となろう。

c) 水制の配置法について

湾曲外岸側に加えて湾曲入口部内岸にも水制を設置して実験を行い、その結果を比較したが、洗掘の程度、流速の低減効果等において特に有意な差異は認められなかつた。また、別途水制の向きを10°上流に向けての実験も行ったが、これも有意な差異は認められなかつた。このことは、湾曲入口部内岸の水制は、堆積領域に設置された場合にはあまり流速制御効果を発揮しないこと、また、湾曲部外岸に設置された水制の向きは、10°程度の違いにおいてはそれほど顕著な水理機能の相違につながらないことを示唆している。

(2) 透過型水制の水理機能

透過型水制のスクリーン枠の水理機能に関して、水理模型実験および数値シミュレーションより得られた知見を要約すると以下のようである。

a) スクリーン枠が河床形状に及ぼす影響

スクリーン枠設置時の平衡河床と除去後の河岸侵食が生じた後の河床形状を比較すると、設置時には法尻部の洗掘が抑制され、また、外岸部の深掘れ位置が河道中央側に寄っている傾向が認められた。このことから、スクリーン枠は根固工と同様の河床変動制御機能を有するといえる。

また、スクリーン枠は透過性のある構造物であるため、同形状の不透過性のものに比べるとスクリーン枠自体に起因する局所洗掘は小さいことが予測されるが、スクリーン枠を固定するためのフトン籠を河床面と同じ高さで施工した場合、その周辺が局所的な洗掘を受け、凹凸のある河床面が形成される。

b) スクリーン枠が流れに及ぼす影響

台形断面の固定床実験によると、スクリーン枠の設置によって外岸法面部の流速の低減のほか、本稿では具体的に示していないが、2次流の抑制、および水面勾配の緩和等の効果が認められ、護岸構造物の負担を軽減す

る意味で、護岸効果が高まるものと判断される。

外岸法面部の流速低減効果の程度は、法面部の水深平均流速の最大値で評価すると、スクリーン枠を施さない場合の流速に対して1割程度の低減となる。これより、摩擦速度の大きさが水深平均流速にはほぼ比例するものと仮定すると、掃流力は2割程度の減少となる。

このことは、護岸構造物の形式や部材寸法の選択の範囲が広がることにつながるが、スクリーン枠諸元および河道条件と流速低減効果の関係を定量的に評価して合理的な設計を行うための指針の確立が望まれる。このことは、不透過型水制についてもいえることであり、今後実験や数値シミュレーションによる検討を進展させることが有効であるが、現時点においては既往の研究成果や本研究で得た知見が重要な参考データとなる。

c) スクリーン枠の配置法について

実験においてスクリーン枠の設置角度を各種試みたが、水路法線に対して30°の角度をつけた配置方法が流況等から最も適した配置と判断される。このとき、スクリーン枠は抵抗としての効果と、流れを河道中央側に向ける効果を発揮する。この結果が一般的なものかどうかについては今後さらに検討が必要であるが、ひとつの目安として考慮すべき事項である。

d) スクリーン枠の護岸機能について

移動床実験により、スクリーン枠を設置しない場合には護岸が破壊される条件に対しても、スクリーン枠を適切に設置した場合には護岸が安定することが確認された。これは、スクリーン枠が湾曲部外岸に働く外力を低減する役割と、根固工としての役割とを合わせもつことによるものである。

なお、ここで得た知見は、スクリーン枠のみならず、類似の透過型水制に対してもある程度拡張して適用できるものと考えられ、各対象地点の特性に応じた工法に対して、設計時の参考となろう。

7. 数値シミュレーション手法の適用方法

数値シミュレーションを行う目的は、種々の要因を変数とした基礎的な条件の下でのモデル計算によって、支配要因の影響を把握するためのパラメータ・スタディを行い、今後の検討対象地点における水制機能の予測のための基礎データとすること、あるいは具体的な対象地点を念頭に置き、当該地点の諸条件を反映させて詳細な検討を行うことの2種類の場合が想定される。

本章では、本稿で示した数値シミュレーション手法の適用方法についてとりまとめる。以下に示すシミュレーション適用方法の内容は、上記いずれの場合にも共通するものである。

- ① 流れと河床変動に関する平面2次元浅水流シミュレーションモデルを整備する。これは、水制を考慮しない場合の再現性が検証されたモデルであれば、3章に示したモデルとの細部の相違は特に問題ないと思われる。流砂量式は通常掃流砂のみ、または掃流砂・浮遊砂を考慮すればよく、既往の適切な公式を導入する。また、目的によっては、河床変動モデルが組み込まれていなくても、流れの解析が精度よくできれば、ある程度水制効果が予測できるものと思われる。
- ② シミュレーションプログラムに水制モデルを付加する。ここでは、水制上流の平均的な流向を評価し、水制の遮蔽面積や遮蔽高および疑似河床位を求め、水制領域および渦領域に付加抵抗係数 C_f' を与えるプログラミングを行う。基礎式は3章に示している。
- ③ 計算対象区間を設定する。河道湾曲部の土砂水理現象は、上流のアプローチ区間の流れの影響を受けるので、このことを考慮して計算上流端を決定する。計算下流端は、湾曲による外岸側への偏流状況を把握できるよう、湾曲出口下流区間の区間長を設定する。この区間長をどの程度とるかについては、河道平面形状等を考慮して決める必要があるが、たとえば建設省土木研究所の提案¹⁹⁾の中で移動床河道における強制渦による流速割り増しを湾曲出口下流で川幅の2倍程度の範囲に適用することが示されているので、これらの研究成果を目安に決定すればよいであろう。
- ④ 河道地形のメッシュデータを作成する。このとき、検討対象とする水制諸元を考慮し、3章に示した水制領域や渦領域を、比較検討ケースの諸元も含めて適切に表現できるよう格子分割を行う必要がある。
- ⑤ 流れの抵抗係数 C_f 、水制の抗力係数 C_D 、2次流強度係数 N 、河床材料条件等、計算に必要な諸条件を与える。ただし、本稿で検討した流れ解析モデルは、マニングの粗度係数 n をあらかじめ与え、平均流速公式に基づいて C_f に換算する手法をとっている。これは、慣例的になじみの深い係数を用いることによって、データが扱いやすくなることや、過去の検討データを用いた地点間の相互比較がしやすくなること等を考慮したためであり、水理学的裏付けに基づいた C_f を直接与える方法でもさしつかえはない。
- ⑥ 検討対象とする流量条件や、上下流端の境界条件を設定した上で、シミュレーションを実施する。

8. 数値シミュレーション適用上の留意点

前述した方法によって、数値シミュレーションによ

る水制機能予測を行うわけであるが、本研究で得た知見より、条件設定や計算結果の解釈において留意すべき点がいくつか挙げられる。これについて、現時点を考えられる事項を以下に記す。

- ① 河道湾曲部において発生する2次流の強度を決める係数 N については、一様湾曲流路における発達した螺旋流に対して7.0程度が適するとされる。

しかしながら、一般流路において N は本来場所的に一定ではなく、螺旋流の発達程度によって異なる値を与えるべきものである。また、水制を設置することによる影響も考慮すべき事項であろう。このような観点から4章(3)において、著者らが行った実験の結果を分析して N の値を逆算により推定したこと、図-11に示したように $N=7.0$ よりは小さめの値に相当する2次流が発生していることが明らかとなり、本稿における水制をともなう流れと河床変動の計算では $N=3.0$ とすることにより適合性のよい結果を得た。

このように、 N は河道条件ごとに適切な設定を行うことが望まれるが、これについては今後さらに検討を進める必要がある。現時点では、検証計算によって値の設定方針を決めるのが最も現象を忠実に再現できるものと考えられるが、設計のための参考データとしての扱いとしては、洗掘や堆積傾向が大きめにでる $N=7.0$ 程度を採用する方が安全側となることも考慮し、目的に応じて設定方法を決めるべきであろう。

- ② スクリーン枠の抗力係数 C_d は、5章(3)に示した基礎実験より、 $C_d=1\sim3$ 程度の値をとることが明らかとなった。ただし、これは実験の条件と接近流速の定義によって評価が定まるものであるため、一般的に適用する際には注意が必要であり、5章(3)で示した再現シミュレーションにおいても $C_d=1\sim2$ 程度で適合性が良いという結果を得た。

これは、具体的には本稿での検討の場合、5章(3)の定義で求めた C_d を3章(3)の式(3)で定義した C_d として適用しようとするところに若干の論理の不連続があるためであり、シミュレーション上における C_d の適切な値を設定するためには、前述の N の問題も含めて、各モデルによって再現性のよい C_d を別途検討しておくことが必要となる。

しかしながら、適切な C_d を見いだすための検証材料は、現時点では著者らの実験以外にはあまり見あたらず、さまざまな条件に対するシミュレーション予測を精度よく行うための C_d の設定としては必ずしも十分な検証材料は得られていない。これについては今後の研究の進展が望まれるが、現時点では、スクリーン枠の水理機能を過大評価しない範囲で C_d を

設定すべきことや、限られた条件ではあるがその再現性が確認されていることを考慮すれば、5章

(5)で適用した $C_d=1$ 程度の値が参考になると思われる。

- ③ 本稿で提案したモデルでは、水制の存在を図-2に示すように不連続な疑似河床位を与えることによって表現しているが、実際の計算では隣接する周辺メッシュとの間で物理量が連続的に変化するという扱いになる。このような問題は、基礎式を離散化して解く一般の河床変動シミュレーションにも共通するものであり、水制周辺の微地形に対してできるだけ忠実にモデル化するためには、メッシュ間隔を可能な限り小さくすることが有効であるが、今後、この問題に関する計算結果への影響等について調べることも必要と思われる。
- ④ 2章でも述べたように、数値シミュレーションによる水制の水理機能予測は、対象河道区間全体スケールの流れについて予測可能な水準に達しているが、水制周辺の局所的な流れや河床変動を定量的に評価できるまでには至っていないといえる。これは本稿で提案した手法にも当てはまることであり、局所的な現象については水制諸元に対する定性的比較にとどめるべきである。よって、局所的な流れや河床変動については、既往の現地調査や模型実験に基づく知見を参考に予測する必要があるが、水制施工後には土砂水理現象の追跡調査を行って、数値シミュレーションとの比較検討を行うことにより関連データを蓄積していくことが強く望まれる。

9. 結論

水制の合理的な設計を行う際には、水制の水理機能を定量的に予測評価することが必要であり、このためには、数値シミュレーションによる検討が有効である。そこで本研究では、水制機能に関する適切な予測手法の確立と汎用化を図るため、2次元モデルに限定した簡単なモデルに基づく数値シミュレーションモデルを開発した。

本シミュレーションモデルは、2次元平面浅水流モデルに基づく流れと河床変動に関するシミュレーションモデルに、水制の水理機能として、通水面積の減少による水削ね効果と水制周辺の渦領域におけるエネルギー散逸による流れへの抵抗効果を考慮したものであり、既存のモデルに簡単な改良を加えるだけで水制をともなう流れと河床変動の予測が可能となった。

前者の機能に対しては、水制諸元に応じて実際よりも高く河床位を設定する、疑似河床位の概念で表現し、後者の機能については、水制領域の河床に抗力係数と等

価な付加抵抗係数を与えることで表現するものである。これによって、不透過型および透過型水制を統一的に表現できるモデルとなっている。また、水制が設置された湾曲河道の水理現象をシミュレートする上で重要な、2次流強度係数 N_s や、スクリーン棒の坑力係数 C_d についての検討を行い、水理模型実験を精度よく再現するための適切な値を見いだすことによって、これら諸係数の設定に際しての留意点を明らかにするとともに、本モデルの適用性を検証した。これにより、本モデルは、今後の水制設計に際して実用性・汎用性のある予測手法として適用可能であることが確認された。

さらに、実用上の観点から、上記数値シミュレーションによって水制の水理機能を予測する場合の適用手法についてとりまとめるとともに、適用上の留意点と現時点での考え方を示し、今後の合理的な水制設計に向けてのひとつの手法としての提案を行った。

謝辞：本研究を進めるに当たって、多くの有益なご意見を賜った立命館大学江頭進治教授に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 秋草 熊、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、建設省土木研究所報告、第 107 号、pp.61-153、1960.
- 2) 井出賢正、大本照憲、鶴岡哲也：没水型水制周りの局所洗掘および二次流、土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 2 部、pp.354-355、1996.
- 3) 崇田徳彦、渡邊康玄、清水康行：水制周辺の流速分布について、水工学論文集、第 39 卷、pp.577-582、1995.
- 4) 崇田徳彦、清水康行、板倉忠興：出水による水制周辺の粒度分布及び河床変化について、水工学論文集、第 40 卷、pp.799-804、1996.
- 5) 加治昌秀、三浦敦頼、北条紘次：洪水時における水制工の水理機能、河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、土木学会水理委員会基礎水理部会、pp.95-102、1993.
- 6) 福岡捷二、西村達也、岡信昌利、村上悦生：直線水路における水制周辺の流れと河床変動の実験と解析、土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 2 部、pp.628-629、1996.
- 7) 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、建設省土木研究所資料、第 2640 号、1988.
- 8) 大串弘哉、福岡捷二、加村大輔：複断面蛇行河道の低水路における水制配置法、土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 2 部、pp.622-623、1996.
- 9) 黒川有一、富永晃宏：透過型の水制周辺の流れ構造について、土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 2 部、pp.356-357、1996.
- 10) 岩佐義朗、今本博健、名合宏之：枠型透過水制の水理機能について、京都大学防災研究所年報、第 18 号 B、pp.637-655、1975.
- 11) 荒牧 浩、西川修司、阿部宗平：湾曲部に設置するスクリーン棒の機能・効果に関する実験的考察、平成 7 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.325-326、1995.
- 12) 山本晃一：日本の水制、(株)山海堂、1996.
- 13) 西本直史、清水康行：水制による河床変化の数値計算、河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、土木学会水理委員会基礎水理部会、pp.23-30、1993.
- 14) 崇田徳彦、清水康行：水制を含む流れの準 3 次元数値モデルの開発、土木学会論文集、No.497 / II -28、pp.31-39、1994.
- 15) 福岡捷二、渡辺明英、西村達也：水制工の適切な配置決定のための三次元モデルの開発、水工学論文集、第 34 卷、pp.337-342、1990.
- 16) Przedwojski : Bed Topography and Local Scour in Rivers with Banks Protected by Groynes, *Jour.of Hydr.Research*, Vol.33, No.2, pp.257-273, 1995.
- 17) Tawatchai Tingsanchali and Selvaratnan Maheswaran : 2-D Depth Averaged Flow Computation Near Groyne, *Jour. of Hydr.Engineering*, Vol.116, No.1, pp.71-86, 1990.
- 18) 河原能久、彭 静：越流型水制周りの流れ場の 3 次元数値解析、土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 2 部、pp.360-361、1996.
- 19) Mayerle, R., Toro, F.M. and Wang, S.S.Y. : Verification of a Three-Dimensional Numerical Model Simulation of the Flow in the Vicinity of Spur Dikes, *Jour. of Hydr.Research*, Vol.33, No.2, pp.243-256, 1995.
- 20) 道上正規、檜谷 治：水制周辺の平面 2 次元河床変動計算に関する研究、水工学論文集、第 36 卷、pp.61-66、1992.
- 21) 芦田和男、江頭進治、劉 炳義：二層モデルによる複断面河道の流れ及び河床変動の数値解析、京都大学防災研究所年報、第 35 号 B-2, pp.41-62, 1992.
- 22) 芦田和男、江頭信治、劉 炳義：蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析、水工学論文集、第 35 卷、pp.383-390, 1991.
- 23) Engelund, F. : Flow and bed topography in channel bends, *Jour.of Hydr.Div.*, ASCE, Vol.100, No.Hyll, pp.1631-1648, 1974.
- 24) 劉 炳義：複断面河道における流砂と河床変動に関する研究、京都大学学位論文、1991.
- 25) 芦田和男、大槻英樹、劉 炳義、大本雄二、藤田 晓：複断面湾曲部の流速分布と河床変動数値シミュレーション、(財)河川環境管理財団 河川環境総合研究所報告第 2 号、pp.107-127, 1996.
- 26) 芦田和男、大槻英樹、荒牧 浩、劉 炳義、大本雄二、藤田 晓：水制を伴う流れと河床変動の数値シミュレーション

- ン, (財) 河川環境管理財団 河川環境総合研究所報告第4号, pp.73-86, 1998.
- 27) 大槻英樹, 芦田和男, 荒牧 浩, 劇 炙義, 藤田 啓: 河道弯曲部における水制機能の予測手法, 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, 土木学会水理委員会河川部会, pp.35-40, 1998.
- 28) Allen, J.R.L : *Sedimentary Structures, Their Character and Physical Basis*, Vol.1&2, Elsevier, 1982.
- 29) (社) 土木学会: 昭和 60 年版水理公式集, (株) 技報堂 p.41, 1985.
- 30) 芦田和男, 大槻英樹, 荒牧 浩, 大本雄二: スクリーン水制の水理機能, (財) 河川環境管理財団 河川環境総合研究所報告第3号, pp.147-155, 1997.
- 31) 阿部宗平, 田島秀俊: 多機能型スクリーン枠工法の開発, S A B O 第 49 号, (財) 砂防・地すべり技術センター, pp.12-23, 1995.
- 32) 井良沢道也, 板鼻昭夫, 阿部宗平, 荒牧 浩, 田島秀俊: 現地調査による多機能型スクリーン枠工の機能と効果に関する考察, 平成 10 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.292-293, 1998.
- 33) 宇多高明, 望月達也, 藤田光一, 平林 桂, 佐々木克也, 服部 敦, 藤井政人, 深谷 渉, 平館 治: 洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動, 建設省土木研究所資料, 第 3489 号, pp.301-369, 1997.

(1999. 7. 26 受付)

HYDRAULIC PERFORMANCE OF GROINS AND THEIR EFFECTS ON THE BANK AND BED PROTECTION

Hideki OTSUKI, Kazuo ASHIDA, Sohei ABE, Hiroshi WADA and Akira FUJITA

A 2D numerical simulation model of flow and bed evolution was developed which can evaluate the influence of groins to channel flows, as well as the shift effect of deep scouring separating from the banks in bend channels. In the present method, a hypothetical bed level concept is conducted to express the decrease of flow area due to groins, instead of the true bed level. And energy loss in the influenced region around groins is expressed by an added bed friction coefficient. The validity of the method is verified by the comparison of calculated results with experimental data. Furthermore, from the practical point of views, some discussions and considerations are made on the prediction of groin's effect, associated with the proper size and arrangement of groins in river engineering works.