

# 大型粗度群上の浅い流れの 平面二次元解析とその応用

内田龍彦<sup>1</sup>・福岡捷二<sup>2</sup>・福島琢二<sup>3</sup>・田中正敏<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程後期 環境工学専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

<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 (同上)

<sup>3</sup>学生会員 広島大学大学院 工学研究科博士課程前期 環境工学専攻 (同上)

<sup>4</sup>正会員 建設省中国地方建設局中国技術事務所 所長 (〒736-0082 広島市安芸区船越南 2-8-1)

自然界において水没大型粗度を有する流れは数多く見られる。このような流れの理解、特に大型粗度を有する構造物の設計のためには、これらの流れおよび流水抵抗を十分理解し、これらを精度よく見積もることが可能な数値解析モデルが必要である。本研究では、水没粗度に作用する抗力を直接計測し、その評価法を明らかにしている。そして、一般曲線座標系における二次元浅水流方程式を用い水没粗度群のある流れ場の計算法を提案し、実験値と比較している。二次元解析の応用として、粗度群最下流にある粗度要素が破壊されやすい機構を明らかにし、構造物下流に設置される粗度群最下流部の被害軽減対策を検討している。最後に、このモデルが水没・非水没粗度のある流れや水没・非水没家屋のある氾濫流に対しても適用可能であることを示している。

**Key Words:** *submersible large roughness elements, drag force, water surface profile, two-dimensional numerical model, design method against erosion, urban inundation*

## 1. 序論

底面に大きな抵抗要素が様々な形で分布している流れ場は、自然界でよく見られ、水理学、流体力学の基本問題を構成している。河川工学の分野においては、護岸の根固め工、堰・床止下流の護床工、魚道などの各種河川構造物、山地河道の河床礫、市街地氾濫流時の建物群などにみられる。これら大型粗度を有する構造物の設計や流れの状況を知るには、大型粗度を有する流れの抵抗を予測する必要がある。

粗度による流水抵抗を評価する方法は、相当粗度  $k_s$ <sup>1)~4)</sup>、Chezy 係数<sup>5)</sup>、Manning の粗度係数<sup>6)</sup>、摩擦損失係数  $f$ <sup>7)~9)</sup>などの一次的諸量を用いて評価されることが多い。しかし、これらの抵抗係数は、粗度配置や水理条件によって大きく変化するため、一般的な評価方法とは言い難い。福岡ら<sup>10)</sup>は、様々な大きさ、配置の非水没粗度に作用する抗力を直接測定した結果、

粗度に作用する圧力分布は静水圧分布と考えるとよく、非水没粗度に作用する抗力は、粗度配置、実験流量によらず、粗度前後の水深を用いて高い精度で算定が可能であることを示した。この抗力の算定式を計算モデルに取り入れ、非水没粗度群を有する流れの二次元解析を可能にしている。しかし、大型粗度群が水没する場合の流れや抗力については、検討は十分行われていない。

本研究では、様々な配置の大型水没粗度の抗力を直接測定し、その特性を明らかにするとともに、水没粗度の抗力の算定方法を示している。さらに、大型粗度群上の浅い流れの一次元解析法の限界を示し、二次元解析法を提示している。二次元解析の応用として、二つの例が検討されている。第一は、最下流に位置する水没粗度は被災の危険性が高いことを示し、被害を小さくする粗度の配置法を実験と解析により述べ、第二は、水没・非水没家屋が不規則に混在する市街地氾濫流の二次元数値解析結果を実験結果と比較し検討している。

注)本論文は、既発表の結果<sup>12),13)</sup>にその後の研究成果を加えてまとめ直したものである。

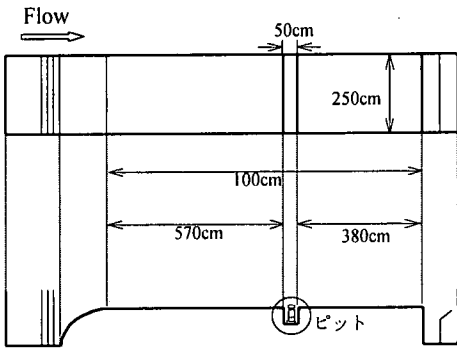


図-1 実験水路図

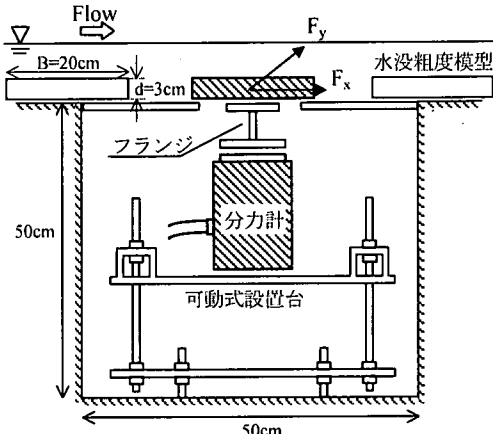
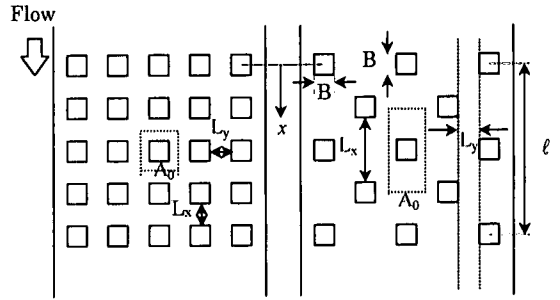


図-2 分力計設置図

## 2. 水没粗度群の抗力分布

実験には、全長 1000cm、幅 250cm、水路勾配 1/500、底面粗度係数  $n=0.020$  の水路(図-1)を用いた。水路上流端から 570cm、下流端から 380cm の位置に幅 50cm、深さ 50cm のピットを設けている。粗度模型は、底辺(粗度幅)  $B=20\text{cm}$ 、高さ  $d=3\text{cm}$  の正四角柱であり、図-2 に示すようにピット内のフランジを介して分力計に接続され、作用抗力が直接計測できるように工夫されている。設置台は、抗力測定粗度の高さを周辺の粗度と等しくし、分力計が水平に設置されるように微調整できる。図-2 に示すように、流体力の流下方向( $x$  方向)成分を抗力  $F_x$ 、横断方向成分を揚力  $F_y$  と定義する。 $F_y$  は  $F_x$  に比べて小さかったので、本論文では  $F_x$  のみを扱っている。

図-3 に示すように、Case1~3 は整列配置、Case4 は千鳥配置である。ここで、 $L_x$  を粗度の縦断間隔、 $L_y$  を粗度の横断間隔とする。 $A_0$  は、後述するように、粗度一個あたりの支配面積である。Case1、Case2 は横断間隔  $L_y$  をそれぞれ  $L_y/d=6.7$ 、 $L_y/d=20.0$  に固定し、縦断間隔  $L_x$  を変化させている。Case3 は  $L_x=L_y$  の整列配置、



整列配置(Case1~3)

千鳥配置(Case4)

図-3 粗度配置図

表-1 実験条件

	$L_x/d$	$L_y/d$	流量 $Q(\ell/s)$	相対水深 $h^*$
Case1 整列配置	3.3~20.0	6.7	8.9~78.5	1.2~3.0
Case2 整列配置	3.3~13.3	20.0	8.9~78.5	0.9~2.4
Case3 整列配置	3.3~8.0	$L_x/d$	78.5	2.8~3.1
Case4 千鳥配置	10.0~22.7	$(L_x-B)/2dB$	78.5	2.8~3.1

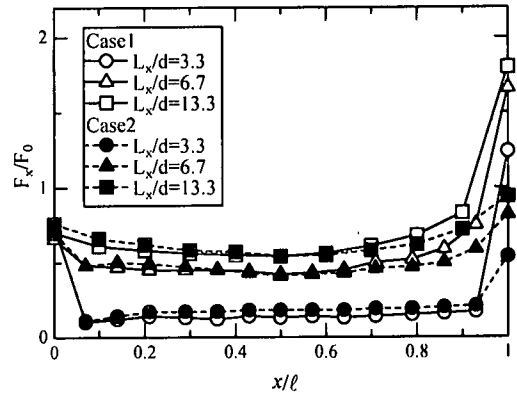


図-4 水没粗度群の抗力分布(Case1,Case2)

Case4 は  $L_x=2L_y+B$  の千鳥配置である。また、粗度群全長を  $\ell$ 、最上流粗度からの縦断距離を  $x$  とする。表-1 に実験条件を示す。ここで、相対水深  $h^*$  は、粗度高さ  $d$  に対する粗度群上流(水路上流端から 100cm)の水深  $h$  の比  $h^*=h/d$  で与えられる。

図-4 は水没粗度群の抗力の縦断分布を示す。横軸は粗度群内の縦断的相対位置を示す  $x/\ell$  である。縦軸は同一流量、同一形状の単体粗度の抗力  $F_0$  に対する群内のそれぞれの粗度の抗力  $F_x$  の比  $F_x/F_0$  である。粗度群内部の抗力の分布は、横断間隔  $L_y$  が Case1 ( $L_y/d=6.7$ ) と Case2 ( $L_y/d=20.0$ ) で異なるにもかかわらず、ほとんど差がみられない。このことは、横断間隔  $L_y$  よりむしろ

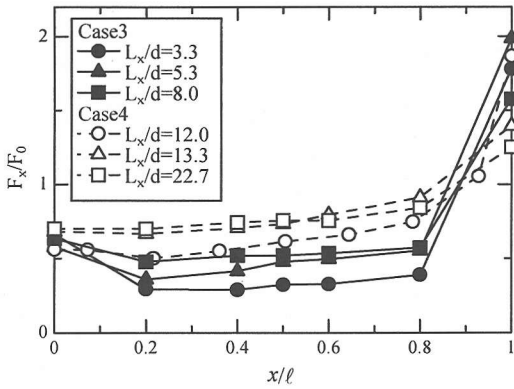


図-5 水没粗度群の抗力分布(Case3,Case4)

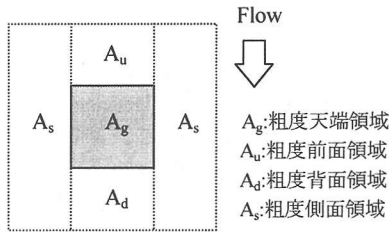


図-6 粗度一個あたりの支配面積  $A_0$  とその分割

ろ縦断間隔  $L_x$  が抗力の大きさを支配していることを示す。  $L_x/d=3.3$  では、粗度前面が上流粗度の剥離渦の領域に入り込むため、粗度前後面の圧力差が小さくなり、抗力は他の場合に比べて極端に小さくなる。  $L_x/d$  がそれ以上大きくなると、粗度への接近流速(河床から粗度高さまでの粗度前面流速)が徐々に回復し抗力は大きくなる。このため、粗度群内部の抗力は、縦断間隔  $L_x$  が増大するにつれて増加する。

最後列に位置する粗度では、粗度群中央の粗度と比べその前後で大きな水位差がつくため、抗力は著しく大きくなる。これは粗度が非水没の場合も同様であった<sup>10)</sup>。Case1 はCase2 に比べ最後列粗度に作用する抗力が大きい。これは、Case1 では、Case2 に比べて、流下断面に対する最後列粗度の投影面積  $A(=d \cdot B)$  の総和が大きくなるため、最後列の粗度前後で大きな水位差が生じるためである。

図-5 はCase3, Case4 について同様の検討を行ったものである。Case4 の千鳥配置はCase3 の整列配置に比べて、粗度群内の粗度に作用する抗力が大きく、最後列の粗度に作用する抗力が小さくなる。これは以下の理由による。千鳥配置は流れを障害しやすい配置であるため粗度群内部では粗度の抗力が大きくなり、一方最後列では、横断的に粗度が疎に配置されているため水位の堰上げが小さくなり、抗力が小さくなる。このことは、後述するように粗度群の弱点個所となる最

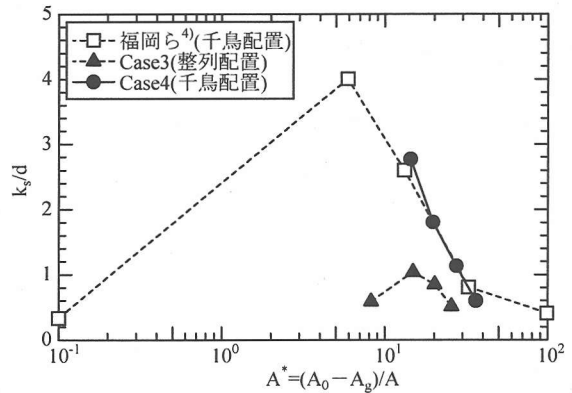


図-7 相当粗度  $k_s$  と面積比  $A^*$  の関係

後列の粗度に作用する抗力が小さく、一方粗度群内部の抵抗が大きくなる千鳥配置が望ましい粗度配置であることを示している。

### 3. 水没粗度群の抵抗評価

#### (1) 相当粗度 $k_s$ を用いた抵抗の一次元評価とその限界

水没粗度群の抵抗を粗度の抗力(図-4, 5)がほぼ一定値となる粗度群内部で相当粗度  $k_s$  を用いて検討する。ここでは粗度の支配面積  $A_0$  内での平均流速  $U(z)$  について考える。支配面積  $A_0$  を粗度の縦断間隔  $L_x$  と横断間隔  $L_y$  を用いて式(1)で表す。

$$A_0 = (L_x + B)(L_y + B) \quad (1)$$

$A_0$  内では平均流速  $U(z)$  の鉛直分布は式(2)の対数分布則が成立すると仮定する。

$$\frac{U(z)}{u_*} = 8.5 + 5.75 \log_{10} \left\{ \frac{(z - z_0)}{k_s} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $U(z)$  :  $z$  に対する  $A_0$  の平均流速、 $u_*$  : 各粗度配置の摩擦速度、 $z$  : 河床からの高さ、 $z_0$  : 対数則の原点位置である。

平均流速  $U(z)$  は以下の方法で求める。まず、支配面積  $A_0$  内を図-6 のように各領域( $A_g, A_u, A_d, A_s$ )に分割し、各領域内の数点で流速の鉛直分布を測定する。それぞれの点の流速分布形を対数分布で近似し、各領域で平均する。そして各領域の平均流速分布を、各領域の面積で重み付け平均し、支配面積  $A_0$  内の平均流速  $U(z)$  を求める。

粗度群内部で擬似等流状態を仮定し、粗度の抗力  $F_x$  が粗度一個あたりの支配面積  $A_0$  内の河床面に働くせん断力  $\tau_0$  に比べて遥かに大きいと仮定すると、 $u_*$  は、 $F_x$  と  $A_0$  を用いて次式で表現される<sup>4)</sup>。

$$u_* = \sqrt{F_x / \rho A_0} \quad (3)$$

ここに、 $\rho$  : 水の密度である。

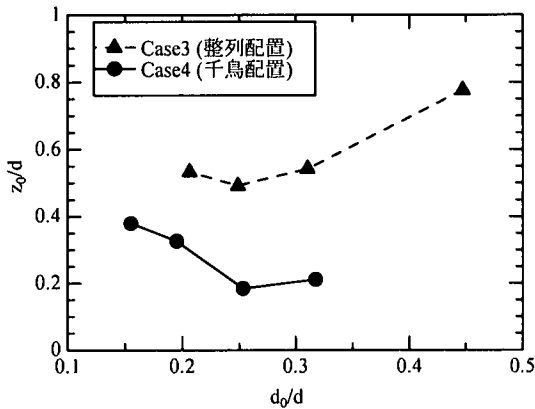


図-8 原点位置  $z_0$  と平均河床高  $d_0$  の関係

式(3)より算出した  $u_s$  を用い、式(2)の対数分布則の傾きが実験値と一致するように、対数則の原点位置  $z_0$  を求める。次に求めた  $z_0$  を用いて相当粗度  $k_s$  を算出する。

図-7 は面積比  $A^*$  と相当粗度  $k_s$  の関係である。ここで、面積比  $A^*$  は、支配面積  $A_0$ 、粗度天端の面積  $A_g$  および粗度の投影面積  $A(d \cdot B)$  を用いて、 $A^* = (A_0 - A_g) / A$  で与えられる<sup>4)</sup>。図-7 には比較のため、福岡ら<sup>4)</sup>の相当粗度  $k_s$  値(千鳥配置)も示している。Case4 では、 $A^*$  が小さくなるほど  $k_s$  が大きくなっているが、さらに  $A^*$  が小さくなると、Case3 や福岡らの結果と同様に、ある点でピークをもって減少すると考えられる。整列配置の Case3 では、千鳥配置の Case4 や福岡らの結果と比べ、 $k_s$  がピークとなる  $A^*$  の値が大きい。また同じ  $A^*$  では、Case3 は Case4 や福岡らの結果と比べ、 $k_s$  が小さい。このため、千鳥配置は流速を効率的に低減させ、図-5 で示したように最後列の粗度の抗力も大きくなりにくい配置であることが確認できる。

相対水深  $h^*$  の小さい流れ場では水深に対して原点位置  $z_0$  が相対的に大きくなるため、水没大型粗度群を有する浅い流れの抵抗評価には原点位置  $z_0$  の値も重要となる。図-8 は各粗度配置における原点位置  $z_0$  と平均河床高  $d_0$  の関係である。ここで、平均河床高  $d_0$  は、粗度の体積  $(A_g \cdot d)$  を支配面積  $A_0$  で除したものである。Case1, Case2 とともに、粗度高さ  $d$  に対する平均河床高  $d_0$  の比  $d_0/d$  が約 0.25 以上の場合、平均河床高  $d_0$  の減少に伴い原点位置  $z_0$  は減少する。 $z_0$  は平均流速場の底面境界を示すものであるため、平均河床高  $d_0$  と対応する水理量である。しかし、 $d_0/d$  が約 0.25 以下の場合、平均河床高  $d_0$  が減少しても、 $z_0$  が逆に増加するという物理的に説明不可能なことが起こる。これは、粗度密度が小さい場合、 $F_x$  に対して  $\tau_0$  が無視できない大きさになり、摩擦速度  $u_s$  を式(3)で表すことができないためと考えられる。この場合、式(3)では  $u_s$  が小さく見積もられ、原点位置  $z_0$  は大きく計算される。このため、

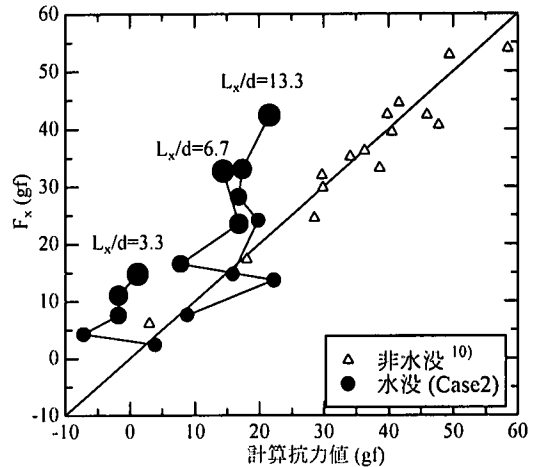


図-9 静水圧を仮定した抗力と実測抗力値の比較

$u_s$  を計算するためには、 $\tau_0$  を評価する必要がある。しかし、相対水深  $h^*$  が小さい流れ場においては、粗度の後流域と粗度間の領域において流速が大きく異なり、支配面積  $A_0$  内において流れ場の二次元性が強くなるため、一次的に  $\tau_0$  を評価することは困難である。また、二次元性が強い  $A_0$  内で一次元化された流速分布  $U(z)$  もそれほど意味をもたなくなる。このため、浅い流れにおける大型粗度群の流れを表すためには、少なくとも粗度による平面的な流況の変化と河床せん断力  $\tau_0$  を評価できる平面二次元解析法が必要である。

## (2) 水没粗度の抗力評価法

後述するように、流れの二次元解析を行うためには、粗度に作用する抗力  $F_x$  を評価する必要がある。そこで、抗力  $F_x$  の評価方法を検討する。非水没粗度に作用する抗力  $F_x$  は、前後の圧力分布を静水圧分布とした式(4)で算定可能であることが示されている<sup>10)</sup>。粗度が水没する場合も、静水圧分布で近似できるとすると、水没粗度の抗力  $F_x$  は式(5)で与えられる。

$$\text{非水没: } F_x = \rho g B (h_1^* - h_2^*) / 2 \quad (4)$$

$$\text{水没: } F_x = \rho g B d (h_1 - h_2) \quad (5)$$

ここに、 $g$ : 重力加速度、 $h_1$ : 粗度前面水深、 $h_2$ : 粗度背面水深である。

図-9 は様々な粗度配置、相対水深  $h^*$  において、粗度前後の水深を用いて式(4)、(5)で計算される抗力の計算値と分力計を用いて直接計測した抗力の実測値の関係を示す。図-9 の直線は計算値と実測値の一致点である。三角形の点は非水没粗度を表している。丸の点は、Case2 の粗度配置における水没粗度を表し、同じ縦断間隔  $L_x$  の点を線で結び流量(相対水深  $h^*$ )の増加に伴いプロットする点を大きくしている。

非水没粗度の場合は計算値と実験値がほぼ一致する

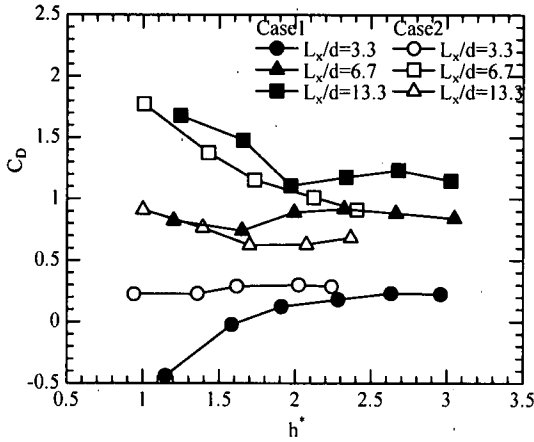


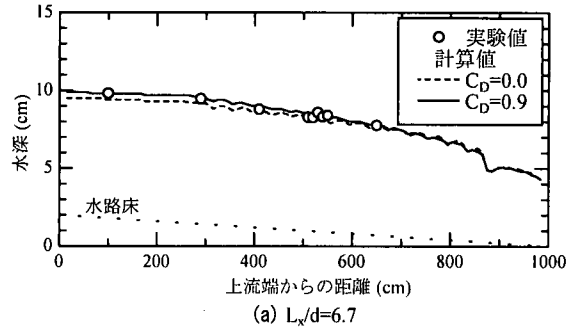
図-10 水没粗度要素の抗力係数  $C_D$  と相対水深  $h^*$  の関係

が、水没粗度の場合は相対水深  $h^*$  の増加に伴い、実測抗力値が静水圧分布から算出した抗力の計算値に比べて大きくなる。これは、相対水深  $h^*$  が大きくなると、粗度を越流する流れが発達することにより、粗度背面で鉛直下向き加速度成分が大きくなり、粗度背面に働く圧力分布が静水圧分布よりも小さくなるためである。このため、粗度が水没する場合、もはや抗力は静水圧分布の仮定を用いた式(5)では評価することができなくなる。そこで、水没粗度の抗力  $F_x$  を抗力係数  $C_D$  を用いた式(6)で評価する。

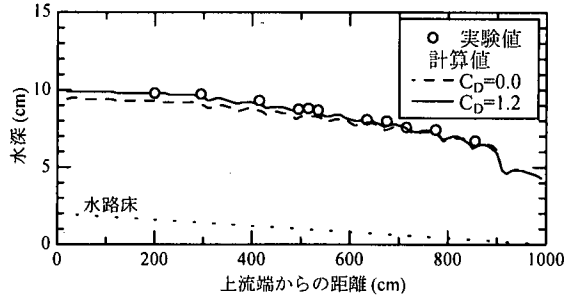
$$F_x = C_D \frac{\rho A U^2}{2} \quad (6)$$

代表流速  $U$  には様々な評価法が考えられる。ここでは、抗力係数  $C_D$  の特性を調べることに着目するため、評価が容易な粗度群上流の一樣流速(上流端から100cmの水深平均流速)を式(6)の  $U$  に選んでいる。

本研究で対象とする粗度形状はすべて正四角柱で、 $Re$  数は十分大きい範囲( $Re=UA^{0.5}/\nu=10^4\sim 10^5$ )にあるため、粗度の抗力に最も影響を与える流れ場のパラメータのひとつに相対水深  $h^*$  が考えられる。図-10は、Case1, Case2について、 $h^*$  と粗度群内部に位置する粗度の抗力係数  $C_D$  の関係を示す。Case1, Case2の抗力はほぼ同値である(図-4)が、粗度密度が小さいCase2の流速  $U$  が大きいため、Case2の抗力係数  $C_D$  はCase1に比べて小さくなる。式(6)は、抗力の近似的表現であり<sup>11)</sup>、抗力係数  $C_D$  には粗度周辺の水力情報が十分に取込まれていない。このため、抗力係数  $C_D$  は粗度の配置や  $h^*$  により様々な値を取る。しかし、抗力  $F_x$  がほとんど働かない  $L_x/d=3.3$  を除けば、抗力係数  $C_D$  は、水深が大きくなるにつれ徐々に小さくなり、 $h^* \geq 2.0$  で粗度配置ごとにほぼ一定値をとる。これは、相対水深  $h^*$  が大きくなることにより、粗度背面の剥離形状が水深の直接的影響を受けず安定した大きさとなったためと考えられる。このため、 $h^* \geq 2.0$



(a)  $L_x/d=6.7$



(b)  $L_x/d=13.3$

図-11 計算値と実験値の縦断面水面形の比較(Case1)

の水没粗度に作用する抗力は、抗力係数  $C_D$  を用いて、式(6)で評価可能である。

## 4. 二次元解析モデルの構築

### (1) 水没粗度を有する流れの計算法

解析は一般曲線座標系に変換した連続式と、 $\xi, \eta$  方向運動方程式で構成される二次元浅水方程式<sup>10)</sup>を用い、スタガード格子を用いて差分法で行っている。二次元解析では、粗度周辺の流れを厳密に解くことができないため、粗度に作用する流体力を基礎式に付加することによって、粗度の影響を計算に取り込む。本論文では、この項を流体力項と定義する。流体力項は、実験により算出した抗力係数  $C_D$  値を用い、粗度群上流の一樣流速を代表流速として式(6)を用いて計算し、各粗度の前面のメッシュで与えている。また、抗力係数  $C_D=0.0$ 、即ち流体力項を付加しない場合の計算も行い、抗力係数  $C_D$  値を用いる計算結果と比較する。計算メッシュは粗度配置、流れを考慮できる大きさと分割し、粗度に該当するメッシュでは粗度高さ分だけ水路床を上げている。境界条件は上流端で実験流量、下流端で段落ちによる限界水深、壁面ではSlip条件を与えている。時間前進で計算を進め、下流端流出量が実験流量に漸近し安定したときの流速と水深を計算結果としている。

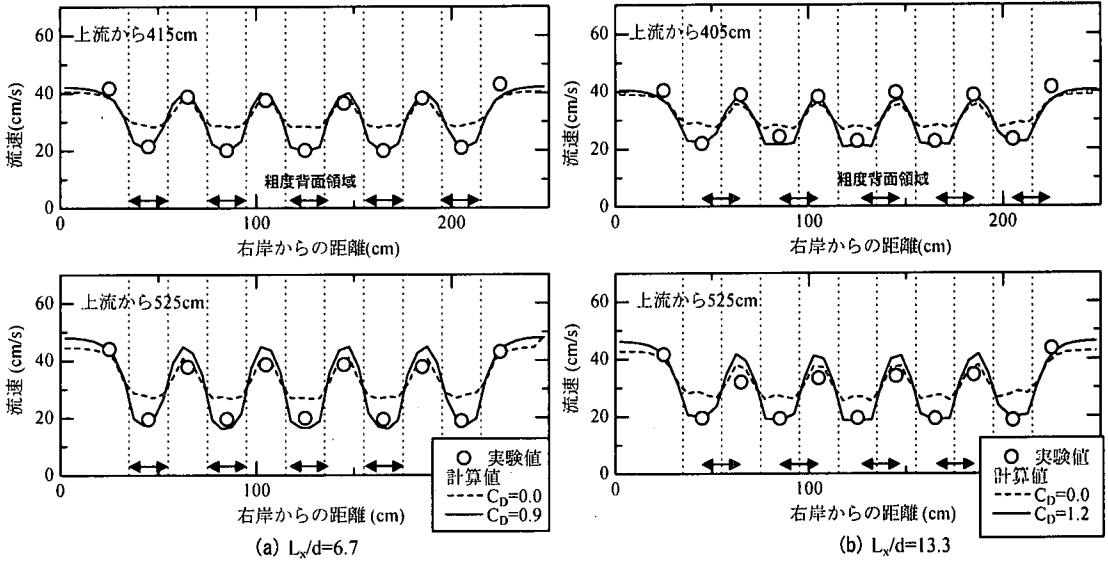


図-12 水深平均流速の実験値と計算値の比較(Case1)

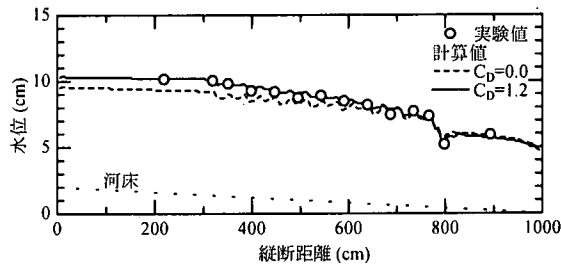


図-13 千鳥配置における縦断面水面形の実験値と計算値の比較(Case4)

## (2) 計算値と実験値の比較

解析モデルによる計算結果を実験値と比較する。対象とする粗度配置はCase1の $L_x/d=6.7, 13.3$ である。図-11は横断平均水位の縦断面形(以下、縦断面水面形と呼ぶ)における実験値と計算値の比較である。流体力項を付加しない場合は、粗度に作用する抗力を小さく評価するため、計算水位が実験値よりも低くなる。流体力項を付加した場合は、実験水面形を良好に再現している。図-12は実験と計算による水深平均流速の横断分布の比較である。流体力項を付加しない場合は、粗度背面で流れがほとんど減速されていない。これに対して、流体力項を付加した場合は、粗度背面で流速が低減されており、実験値とほぼ一致している。

図-13は千鳥配置であるCase4の $L_x/d=14.7$ における縦断面水面形の実験と計算の比較を示す。抗力係数 $C_D$ は、実験値より算出した $C_D=1.2$ を用いている。整列配置のCase1の場合と同様に、計算水面形は実験値とほぼ一致している。

以上より、大型水没粗度による抵抗を抗力係数 $C_D$ を用いて評価する本解析モデルの妥当性が確認される。

## 5. 二次元解析法の応用

### (1) 流況改善による護床工最下流部の被害軽減法

2章で示したように、最下流の粗度の前後では大きな水位差が生じるため、粗度群内部の粗度に比べてはるかに大きな抗力が作用し、流失被害を受け易い。このことは、水理構造物下流に設置される護床工などの維持管理上重要な問題を提起している。護床工下流部に見られる河床洗掘や河床低下は最下流粗度の抗力をさらに大きくすることになる。このため、護床工などの粗度群は流れのエネルギーの低減だけでなく、最下端粗度が流失被害を受けないような設計法が求められる。

本章では河床洗掘の増大を抑制し、水面勾配を滑らかにし、前後の水位差を小さくし、最下流粗度に作用する抗力を軽減する粗度の配置法を検討する。図-14は実験水路及び粗度配置である。粗度群下流の河床がひとたび洗掘を受けると、大きな局所洗掘に発展する。局所洗掘の規模を小さくするには、あらかじめ最下流粗度直下の河床を実際に起こり得る洗掘より小さめに見込んだ河床形状を設定しておく。これはあらかじめ

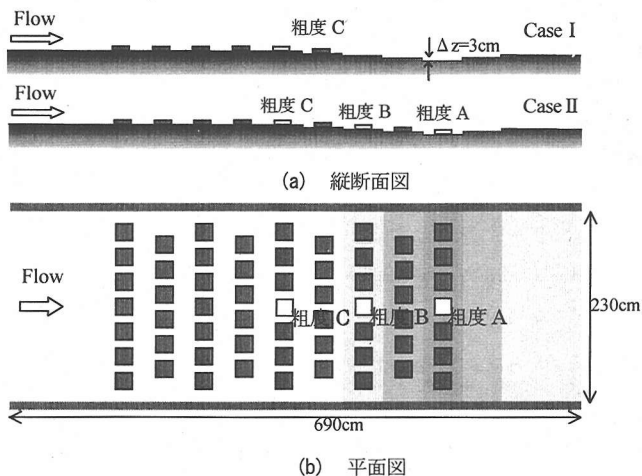


図-14 粗度群下流の洗掘による被害軽減を目的とした粗度配置

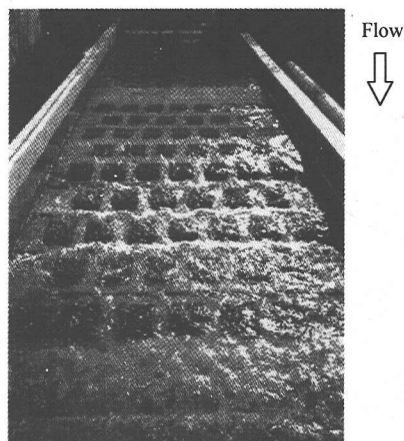


写真-1 実験状況(Case II)

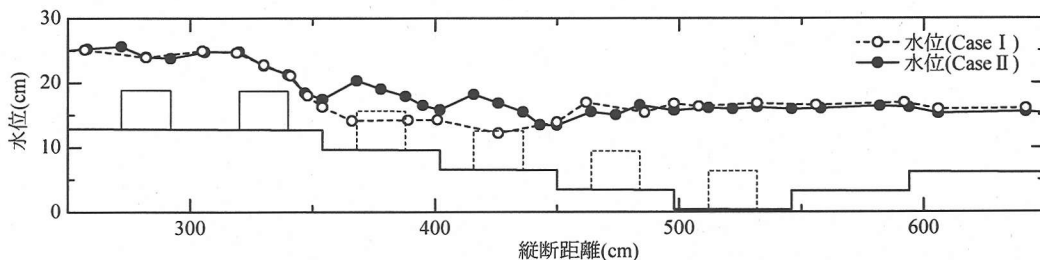


図-15 粗度群下流部の縦断水面形の比較(Case I, Case II)

め洗掘孔をもっている洗掘エネルギーを分散でき、それ以上の洗掘に進展することはほとんどないという工学的知見による。Case Iは、粗度群下流に河床洗掘を見込んだ形状を与え、Case IIは、Case Iの河床に新たに粗度を配置し、粗度下流水面形を滑らかにした場合である。図の白抜きの粗度 A, B, C では、作用する抗力を直接計測している。粗度模型の大きさは20cm 四方、高さ6cm、粗度配置は千鳥配置である。実験流量は105.2(l/s)である。写真-1はCase IIにおける粗度群下流部の流れの状況を示している。

図-15はCase IとCase IIについての粗度群下流部の縦断水面形、図-16は粗度A,B,Cに作用する抗力を示す。Case Iは、粗度群下流において水路床の勾配が相対的に大きいため、上流の粗度群によって遅くなった流れはそこで加速され、下流の水深の大きな流れと混合している。このため粗度群下流では、河床洗掘がさらに進行する危険性が高いと考えられる。また、下流の河床低下は最下流粗度前後の水位差を大きくし、作用する抗力をさらに増大させるため、最下流の粗度が滑動、転動による被害を受ける危険性も高い。これに対してCase IIでは、このような河床に粗度を配置したことによって、水位が堰き上げられ、洗掘部の流速が

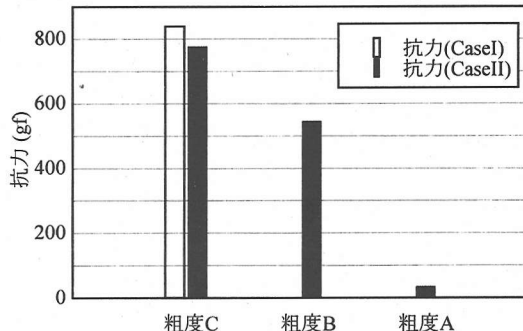


図-16 粗度に作用する抗力の比較(Case I, Case II)

小さくなり、下流側の水位に比較的滑らかに接続するように流況が改善されている。さらに、下流に配置された粗度によって水位が堰き上げられるため、下流部の粗度の抗力は減じられる。このことから、洗掘をあらかじめ見込んだ河床に粗度を配置することは、問題となる最下流端粗度の抗力を低減し、河床洗掘を進行しにくくできるなど、流況改善の有効な手段の一つであると考えられる。しかし、本実験条件では、Case IIの粗度Cに作用する抗力はCase Iの粗度Cの抗力からあまり低減していない。これは、粗度群下流に設定した河床勾配に対して粗度の縦断間隔が広がったためと考えられる。

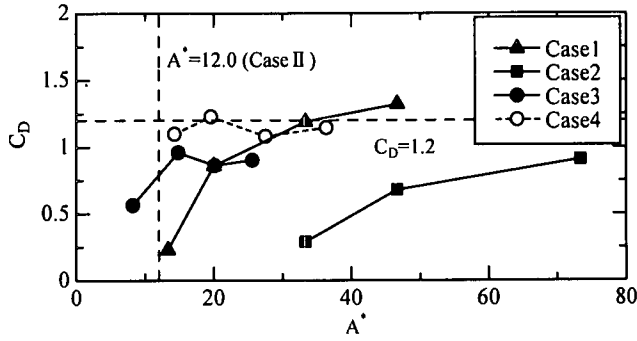


図-17 各粗度配置の  $h^* > 2.0$  における抗力係数  $C_D$

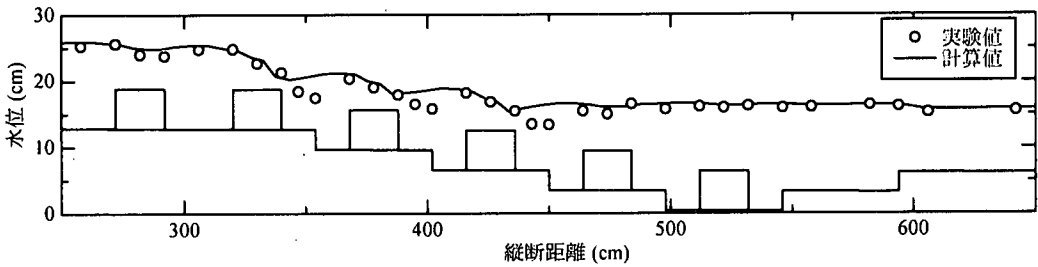


図-18 粗度群下流部の縦断水面形における実験値と計算値の比較(Case II)

このような設定河床勾配や粗度の縦断間隔を検討するためには、流れを精度良く見積られる解析モデルを用いた数値設計法が有効である。そこで、Case II における粗度群下流部の流れの二次元解析を行う。用いる抗力係数  $C_D$  について検討する。図-17 は  $h^* > 2.0$  における各 Case の  $C_D$  を示す。 $C_D$  値は配置によって様々であるが、本実験条件の範囲では、上限が  $C_D = 1.2$  程度である。また、千鳥配置の Case4 では、 $C_D$  値は  $A^*$  によらずほぼ  $C_D = 1.2$  程度である。以上より、本章では  $C_D = 1.2$  を与える。計算メッシュは、粗度の縦横断間隔の約 1/4 の大きさとしている。下流端条件は実験水位で与え、その他の条件は 4 章と同様に与えている。図-18 は Case II における計算結果と実験結果の縦断水面形の比較である。計算値は実験値を概ね説明する。

護床工の破壊は、上述のように最下流の粗度の流失から起こることが多い。河川構造物下流の護床工が大きな力を受けて流失しないような流れとなる粗度の配置や設置長さを、二次元数値解析によって決めることが可能であることが示された。

## (2) 水没・非水没家屋が混在する市街地氾濫流解析

これまで、市街地氾濫流の解析において、家屋がすべて非水没状態とした場合の平面二次元解析の適合性が確かめられている<sup>10)</sup>。しかし、破堤点付近や地盤高が低い場所では、家屋が水没する危険性があるため、水没家屋を考慮できる氾濫流解析が必要である(このような場所では家屋の崩壊や流失の危険性も考えられ

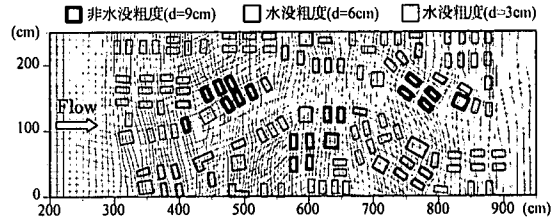


図-19 粗度配置と計算メッシュ

るが、本論文では、家屋は、氾濫流の流下を妨げる流下阻害物としてのみ取扱う)。この点に関して福岡ら<sup>12)</sup>は、水没・非水没粗度が混在する流れ場の解析を行っている。しかし、水没・非水没粗度が規則的に配置されており、また、水没粗度の影響が小さい場合を扱っており、水没・非水没家屋が混在する場合の解析法としては不十分であった。ここでは、水没する家屋が多い市街地氾濫流を想定し、高さなど大きさの異なる粗度が不規則に配置されている場について、本解析法の適用性を検討する。図-19 は市街地を想定した粗度配置と計算メッシュである。中央に曲がった幹線道路を想定し、その周囲に高さの異なる粗度を不規則に配置している。計算メッシュはできる限りすべて粗度を適切に取り込めるようにしているが、粗度配置上すべての粗度を取り込むことが困難である領域においては、流れへの影響が大きい非水没粗度を優先的に取り込んでいる。非水没粗度は粗度該当メッシュにおいて不透過の境界として与え、流体力項の大きさは式(4)を用いて計算し、粗度の上流側の面に垂直な方向に与える<sup>10)</sup>。



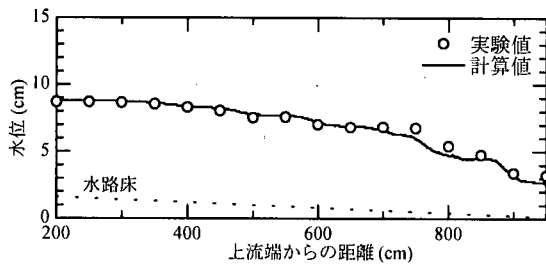


図-20 実験値と計算値の縦断水面形の比較

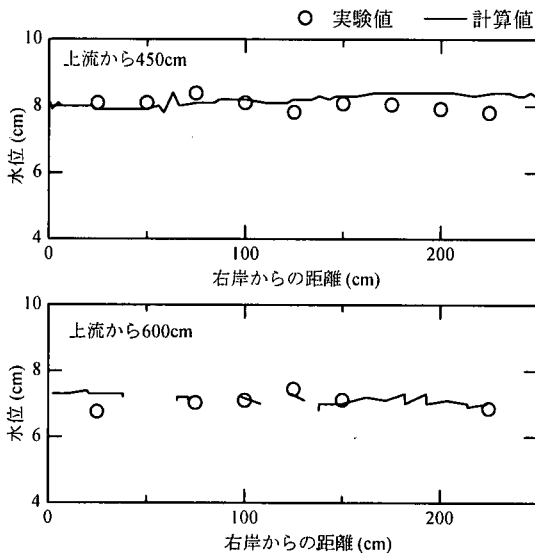


図-21 実験値と計算値の横断水面形の比較

水没粗度は、粗度該当メッシュの河床高を粗度高さ分底上げし、代表流速と抗力係数  $C_D$  を用いて計算する。

図-19 に示すような不規則な粗度配置では、流体力の方向を考える必要がある。そこで、水没粗度に作用する流体力は粗度前面の流速の方向と等しい方向に働くと仮定すると、水没粗度の単位面積あたりの流体力項は式(7)で与えられる。

$$f_x = \frac{1}{2} C_D \rho u_x \sqrt{(u_x)^2 + (u_y)^2} \frac{db' \sin \theta}{A'} \quad (7)$$

$$f_y = \frac{1}{2} C_D \rho u_y \sqrt{(u_x)^2 + (u_y)^2} \frac{db' \sin \theta}{A'}$$

ここに、 $f_x, f_y$ : 各評価点における単位面積あたりの流体力項の  $x, y$  方向成分、 $b'$ : 計算格子内の粗度幅、 $A'$ : 計算格子の面積、 $\theta$ : 粗度前面が流速( $u_x, u_y$ )に対してなす角( $0 \leq \theta \leq \pi$ )である。

計算に用いる  $C_D$  値について説明する。図-10 で示したように、 $C_D$  は  $h^*$  や粗度配置によって変化しているので、厳密に言うとは各粗度に異なる  $C_D$  を与える必要がある。しかし、各粗度の適切な  $C_D$  を求めることは非常に困難であるため、本章では  $C_D$  の代表値を定め、すべての水没粗度と同じ  $C_D$  を用いる。この仮定は、

表-2 代表流速  $U$  の評価点による抗力係数  $C_D$

	$L_x/d$	$C_{D6}$	$C_{D7}$
Case1 ( $L_y/B=1.0$ )	6.7	0.9	1.6
	13.3	1.2	1.8
Case2 ( $L_y/B=3.0$ )	6.7	0.6	2.2
	13.3	0.9	2.4

$C_{D6}$ : 粗度群上流の一樣流速を代表流速とする場合(式(6))

$C_{D7}$ : 粗度前面の接近流速を代表流速とする場合(式(7))

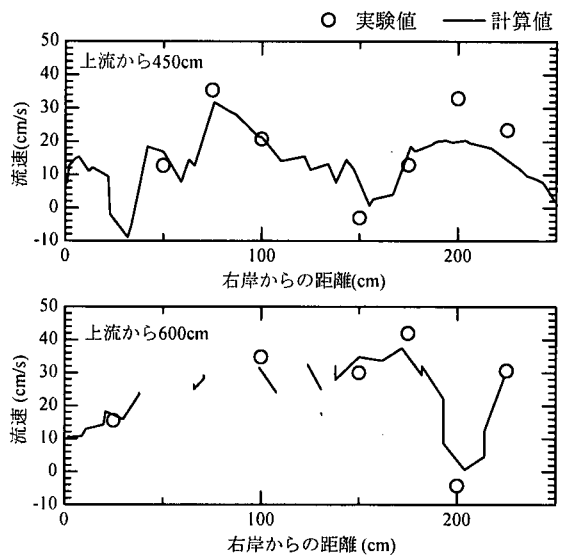


図-22 実験値と計算値の横断主流速分布の比較

後述する実験値と計算値の比較から、大きな問題とされないと考えられる。表-2 は、Case1, Case2 の  $h^* > 2.0$  において、式(6)を用いた場合の計算結果から、式(7)を用いた場合の抗力係数  $C_D$  値を求めたものである。ここで、抗力がほとんど働かない  $L_x/d=3.3$  の条件は除いている。粗度前面の流速を代表流速とする式(7)のほうが、 $C_D$  は大きくなる。本章では、表-2 の式(7)の値を参考にし、 $C_D=2.0$  を用いる。

図-20 は縦断水面形における実験値と計算値の比較である。計算水面形は上流端から 750cm~800cm 付近で誤差を含んでいる。これは、この付近において、幹線道路と粗度配置および水路壁面による境界の存在より、計算格子の歪が必然的に大きくなるためと、粗度配置を完全に評価できていないためであるが、全体的には計算値は実験値を説明している。実際の市街地では、水路壁のような流れ場の制約条件を受けない。したがって、本解析モデルは家屋の抵抗を精度良く評価できると考えてよい。図-21, 22 はそれぞれ、横断水面形、横断主流速分布における実験値と計算値の比較である。水位は横断方向にほとんど変化していないが、主流速は横断方向に大きく変化しており、計算結果は

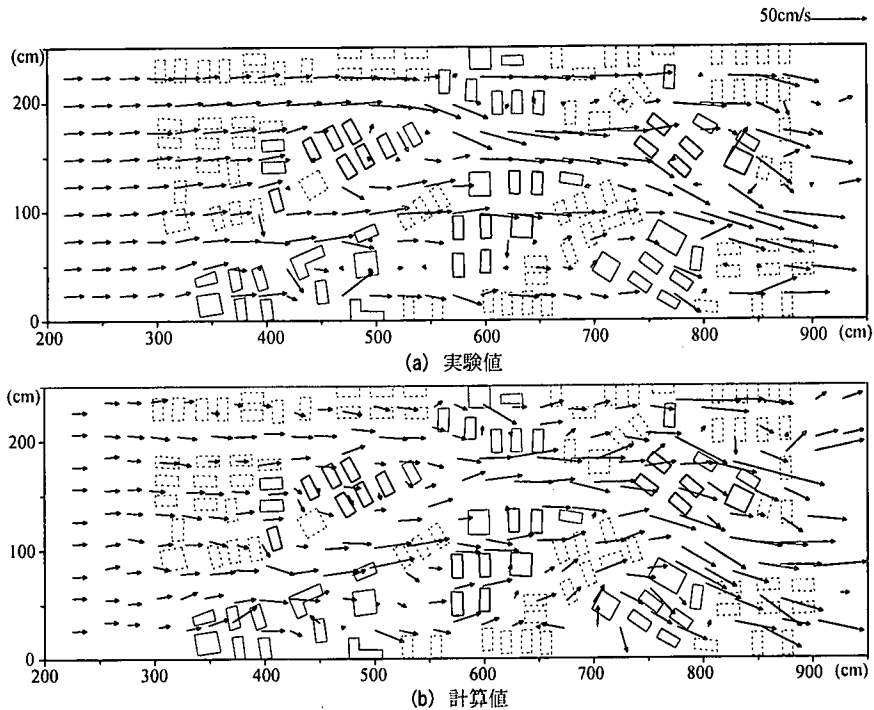


図-23 実験値と計算値の水深平均流速ベクトルの比較

実験結果を良好に再現している。図-23は、流速ベクトルの実験値と計算値の比較である。実験値と計算値が若干異なる点はあるものの、幹線道路に流れが集中し、粗度領域で死水域となる実験値を計算値は概ね再現している。

以上より、本二次元解析モデルは水没・非水没家屋が不規則に混在する市街地氾濫流にも適用可能であることが示された。

## 6. 結論

(1) 粗度群内部では、水没粗度に作用する抗力は横断間隔よりもむしろ縦断間隔の影響を強く受ける。最下流に位置する粗度は、その前後で大きな水位差がつき、粗度群内部の粗度と比べて大きな抗力が作用する。整列配置は粗度群の抵抗が大きくなるほど最後列に位置する粗度に作用する抗力が大きくなる。千鳥配置は複数列で流れを阻害する配置であるため、整列配置に比べて粗度群内部で抵抗が大きく、弱点箇所となる最後列粗度の抗力が小さくなる。このことが護床工などの粗度配列には、千鳥配置がよいと結論できる理由である。

(2) 水没粗度に作用する抗力は、水深が大きくなると粗度上の流れが卓越するため、静水圧分布の仮定を用いて抗力を評価することができなくなる。この場合、

$h^* \geq 2.0$  では、抗力係数  $C_D$  が  $h^*$  の影響をほとんど受けず、粗度配置による変化が小さくなるため、抗力係数  $C_D$  を用いて粗度に作用する抗力を算定することが可能となる。

(3) 大型粗度を有する浅い流れにおいて、粗度密度が疎である場合、一次元的抵抗評価は困難である。流体力項を付加することで粗度の抵抗を考慮した二次元解析モデルでは、大型水没粗度による抵抗を適切に評価でき、流れを精度よく計算できる。

(4) 粗度群を用いた護床工は流速の低減だけでなく、最下端粗度が大きな力を受け流失被害を受けないことが求められる。粗度群下流部に河床洗掘をあらかじめ想定した上で、粗度を配置することによって流況を改善することが可能であり、提案したモデルがこのような護床工の設計に利用可能であることを示した。また、水没・非水没粗度が不規則に混在する市街地氾濫流解析にも二次元解析モデルが適用可能であることを示した。

## 参考文献

- 1) 足立昭平：開水路における棧型人工粗度の実験的研究，京都防災研究所年報第3号，pp.17-33，1949
- 2) 足立昭平：人工粗度の実験的研究—棧型粗度と溝型粗度，京都防災研究所年報第4号，pp.185-193，1951
- 3) 足立昭平：人工粗度の実験的研究—I ポ型粗度，京都防

- 災研究所年報第5号, pp.252-259, 1952
- 4) 福岡捷二, 藤田光一, 森田克史: 護岸法覆工の水理特性に関する研究, 土木技術資料, 第30巻, 第3号, pp.115-120, 1988
  - 5) Sayre, J.B. and Albertson, M.L.: Roughness spacing in rigid open channels, *Proc. of ASCE*, Vol.87, HY3, pp.121-150, 1964
  - 6) Herbich, J.B. and Shulits, S.: Large-scale roughness in open-channel flow, *Proc. of ASCE*, Vol.90, HY6, pp.203-230, 1964
  - 7) 服部敦, 吉川秀夫: 底面上の棧による後流に関する実験的研究, 水工学論文集, 第37巻, pp.543-547, 1993
  - 8) 楊永荻, 大同淳之: 粗滑遷移領域における棧粗度の抵抗特性について, 土木学会論文集, 第429号, pp.41-49, 1993
  - 9) 神田徹, 鈴木勝士: 球状粗度の床面における浅い流れの抵抗特性, 土木学会論文集, 第357号, pp.65-74, 1985
  - 10) 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教: 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究, 土木学会論文集, 第600号, pp.23-36, 1998
  - 11) 例えば, 吉川秀夫: 水理学, 技報堂出版, pp.86-87, 1976
  - 12) 福岡捷二, 水口雅教, 内田龍彦, 横山洋: 水没・非水没粗度が混在する浅い流れに関する基礎的研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.293-298, 1999
  - 13) 福岡捷二, 内田龍彦, 福島琢二, 水口雅教: 水没大型粗度を有する浅い流れの一次元解析と二次元解析, 水工学論文集, 第44巻, pp.533-538, 2000
- (2000. 12. 27 受付)

## TWO-DIMENSIONAL SHALLOW WATER ANALYSIS OVER LARGE ROUGHNESS ELEMENTS AND ITS APPLICATION

Tatsuhiko UCHIDA, Shoji FUKUOKA, Takuji FUKUSHIMA and Masatoshi TANAKA

There are many flows with submersible large roughness elements in nature. In order to understand these flows, it is important to clarify resistance of the large roughness elements and flow around them. For this purpose, a numerical model together with physical model tests, which can estimate the resistance and the flow, is necessary. In this paper, drag forces acting on submersible large roughness elements were measured directly through experiments. A numerical computation method using a two-dimensional shallow water model which employs the general curvilinear coordinate system is developed and made possible to evaluate the resistance of submersible large roughness elements. The model is applied to simulate flows with a group of submersible large roughness elements and in an urban district, where submersible and non-submersible houses are arbitrarily arranged.