

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

ONE-DIMENSIONAL AND TWO-DIMENSIONAL CALCULATION OF
SHALLOW WATER FLOW OVER SUBMERGED LARGE ROUGHNESS

福岡捷二¹・内田龍彦²・福島琢二²・水口雅教³

Shoji FUKUOKA, Tatsuhiko UCHIDA, Takuji FUKUSHIMA and Masanori MIZUGUCHI

¹ フェロー会員 工博 Ph.D. 広島大学教授 工学部第四類建設系 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1)

² 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)

³ 正会員 工修 三井共同建設コンサルタント(株) (〒169-0075 東京都新宿区高田馬場1丁目4番15号)

In the design of bank protection and calculation of flood inundation, it is important to clarify the resistance of large roughness and the structure of flow in the shallow water flow. We have developed a two-dimensional numerical model that considers the shape and arrangement of large roughness. In this paper, measured hydrodynamic forces acting on submersible large roughness and averaged velocity distribution around roughness element are presented. The resistance of shallow water flow over submerged large roughness is examined using the equivalent roughness k_s . Additionally, this paper compares one-dimensional numerical simulation using the equivalent roughness k_s with two-dimensional numerical simulation.

Key Word: shallow water flows, submersible large roughness, equivalent roughness k_s , one-dimensional numerical simulation, two-dimensional numerical simulation

1. 序論

堰・床止めなど横断構造物の水叩き, 水制, 護岸・護床工の設計, 市街地氾濫流の挙動解析, 山地河川, 魚道など大きな抵抗力を有する流れ場を明らかにするためには, 大型粗度群の抵抗特性を評価することが重要である。

大型粗度による流水抵抗は, Chezy 係数¹⁾, 等価粗度係数²⁾, 相当粗度 k_s ³⁻⁶⁾ および摩擦係数⁷⁻⁹⁾ などを用いて評価するのが一般的である。等価粗度係数 n はその算出が容易であるため, 市街地氾濫流解析などに用いられている^{10,11)}。また, 粗度単体に作用する抗力を算定し, 抗力係数を用いて流れ場の抵抗を評価する方法^{11,12)}もある。しかし, 相対水深や粗度配置により抵抗係数が変化するため, 抵抗係数を用いる方法は普遍的な評価方法とはなり得ていない。著者ら¹²⁾は水没, 非水没粗度に作用する

抗力を直接測定することにより, 非水没の場合, 粗度周囲の水深を用い, 粗度が水没する場合, 抗力係数を用いて粗度に作用する抗力を算定できる事を示し, 二次元解析によってこれらの粗度がある場合の流れを解くことを可能にした。しかし, 従来から用いられている様々な抵抗算出法や流れの計算法との比較は十分とは言えない。

相当粗度 k_s を用いる解析は, 水没粗度高さに対する水深(以下相対水深)が小さい流れ場では, その適用が困難とされている^{12),7)}。本研究では, 浅い水深における水没大型粗度の抵抗を相当粗度 k_s を用いて評価する。相当粗度 k_s を用いた一次元計算結果と二次元解析による計算結果を比較し, 両者の適用範囲を明らかにする。さらに, 水没, 非水没粗度が混在する流れ場の二次元解析法を検討する。

表-1 実験条件 流量 78.5 (ℓ/s)

粗度配置	L_y/d	L_x/d	粗度密度 d_0/d	相対水深 h'
Case1 (千鳥配置)	1.7	10.0	0.32	2.76
	2.7	12.0	0.25	2.74
	4.0	14.7	0.20	2.61
	5.3	17.3	0.15	2.59
Case2 (整列配置)	3.3	3.3	0.45	2.62
	5.3	5.3	0.31	2.67
	6.7	6.7	0.25	2.52
	8.0	8.0	0.21	2.54
Case3 (整列配置)	6.7	3.3	0.33	-
	6.7	6.7	0.25	-
	6.7	13.3	0.17	-
	6.7	20.0	0.13	-

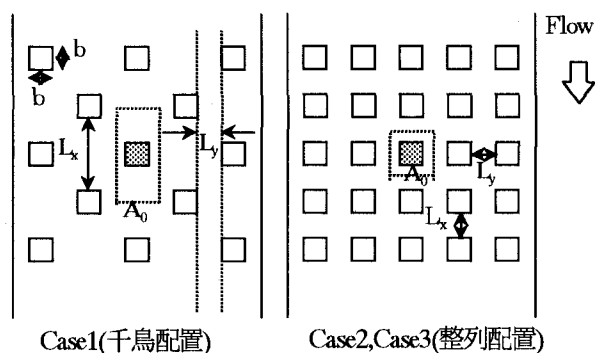


図-1 粗度配置図

2. 水没粗度群の抗力

水没大型粗度を有する浅い流れ場の解析法の検討に先立ち、様々な粗度配置を持つ粗度の抗力を直接測定し、その特性について検討する。水路は、全長 10m、幅 2.5m、水路末勾配 1/500、底面の粗度係数 $n=0.016$ の直線水路である。粗度模型は幅と長さが $B=20\text{cm}$ 、高さ $d=3\text{cm}$ の直方体を用いている。図-1 に示すように Case1 が千鳥配置、Case2 が整列配置である。また、 L_x を粗度の縦断間隔、 L_y を粗度の横断間隔、 A_0 を粗度一個当たりの支配面積とし、 F_0 は同じ水理条件における粗度単体の場合の抗力である。各 Case の実験条件を表-1 に示す。ここで、平均河床高 d_0 は粗度の体積を支配面積 A_0 で除したものである。本実験では粗度高さ d が一定であるため、 d_0/d は粗度密度 θ となる。また、相対水深 h' は、粗度群中央の水深 h と粗度高さ d の比 h/d である。

図-2 に各粗度配置の平均河床高 d_0 と粗度群の中央に位置する粗度の抗力の関係を示す。それぞれの Case において、粗度密度が疎になるほど抗力は大きくなる。しかし、同じ粗度密度であっても粗度配置ごとに粗度周辺の流れが異なるため、抗力の値は異なる。図-3 は、図-2 で示す粗度の抗力とそれぞれの粗度の縦断間隔 L_x の関係である。粗度配置が異なる場合であっても、抗力は縦断間隔が同じであればほとんど変化しないことが分かる。

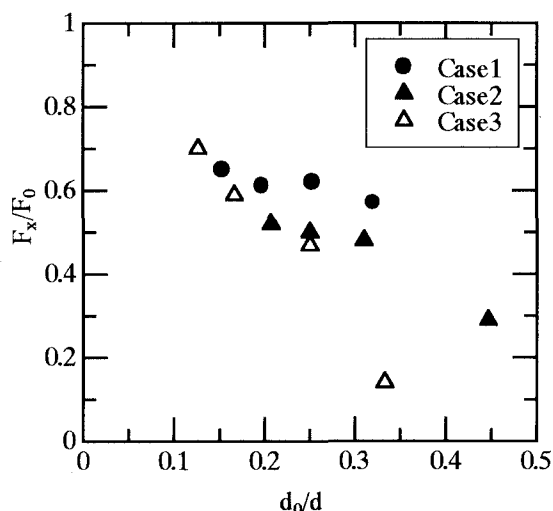


図-2 平均河床高 d_0 と粗度群中央の抗力の関係

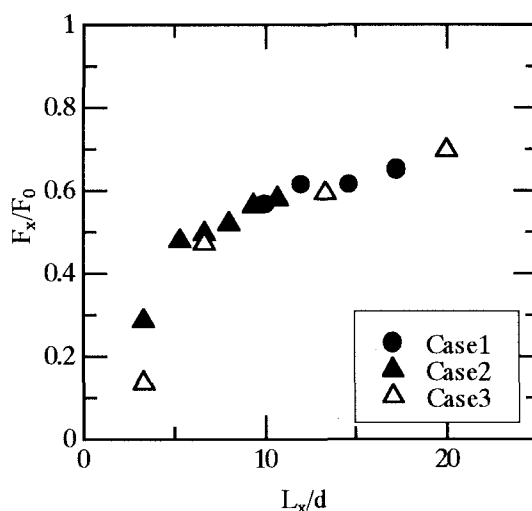


図-3 縦断間隔と粗度群中央の抗力の関係

以下に、粗度配置が抗力におよぼす影響について考察する。

水没粗度群内の抗力は、粗度前面の粗度高さまでの接近流速に大きく関係し¹²⁾、接近流速の大きさは、周囲の流れによる上流側粗度背面と粗度前面の間への運動量の供給量に関する。 L_x/d が 3~5 倍程度¹²⁾ の範囲では、粗度背後の下降流により大きな運動量が供給される。本実験結果では、 $L_x/d < 5.3$ の範囲で抗力は急増している。 $L_x/d > 5.3$ の範囲では、粗度高さより下部の流体に上部の速い流体の運動量が輸送されるため、接近流速は下流方向に徐々に大きくなる。このため、抗力は L_x/d が増加するにつれて徐々に大きくなる。一方、粗度の横断間隔 L_y は主に粗度横断間の流れに影響する。横断間隔が大きくなると粗度横断間の流速が大きくなり、接近流速は増加すると考えられる。しかし、本実験で用いた粗度の形状は、粗度高さ d に対する粗度幅 B が大きい ($B/d=6.7$) ため、粗度間の流れが接近流速に与える影響が小さい。このように、本実験条件では横断間隔 L_y ($1.7 < L_y/d < 8.0$) は粗度の抗力にほとんど影響しない。同様に、粗度群中央の

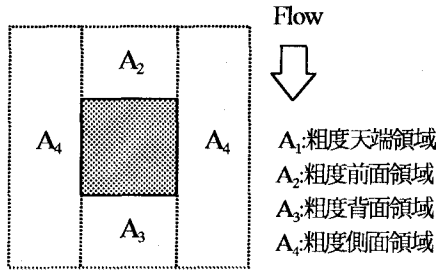


図-4 支配面積の分割

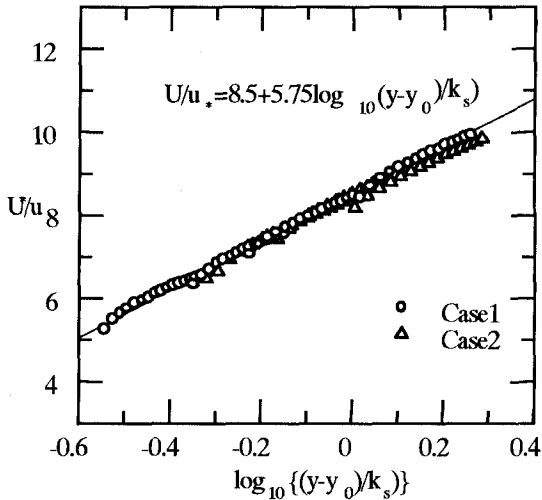


図-5 平均流速鉛直分布

粗度の抗力は、側方にある粗度の位置の影響をほとんど受けない。

3. 水没粗度群の相当粗度 k_s

粗度の抗力が縦断的に変化しない粗度群中央付近の流れを等流とみなし、粗度群中央で各粗度配置の相当粗度 k_s を算出する。大型粗度を有する流れ場では、粗度による抵抗が流れ場の抵抗を支配していると考え、摩擦速度 u_s を粗度の抗力と粗度一個当たりの支配面積 A_0 を用いて表す⁹⁾。

$$u_s = \sqrt{F_x / \rho A_0} \quad (1)$$

F_x : 粗度の抗力, ρ : 密度

A_0 : 粗度一個当たりの支配面積($= (L_x + b)(L_y + b)$)

次に、図-1 に示す粗度の支配領域 A_0 内の平均流速鉛直分布は式(2)の対数分布則が成立すると仮定する。

$$\frac{U}{u_s} = 8.5 + 5.75 \log_{10} \left\{ \frac{(y - y_0)}{k_s} \right\} \quad (2)$$

U : 粗度一個当たりの支配面積内の平均流速,

y : 河床からの高さ, y_0 : 対数則の原点位置

平均流速鉛直分布は以下の方法で求める。粗度の支配領域 A_0 内を図-4 のように各領域 $A_1 \sim A_4$ に分割し、各領域ごとに数点で流速の鉛直分布を計測する。それぞれの点

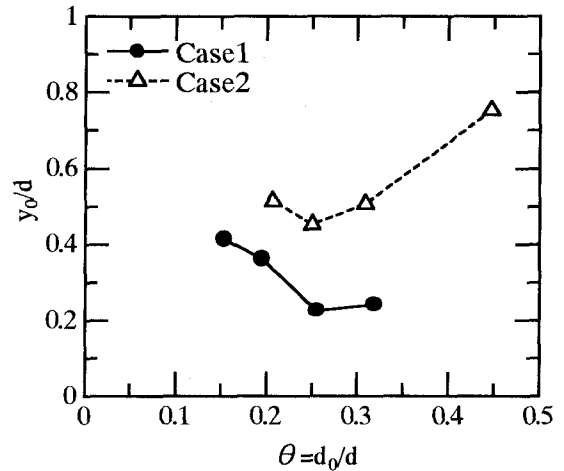


図-6 平均河床高 d_0 と原点位置 y_0 の関係

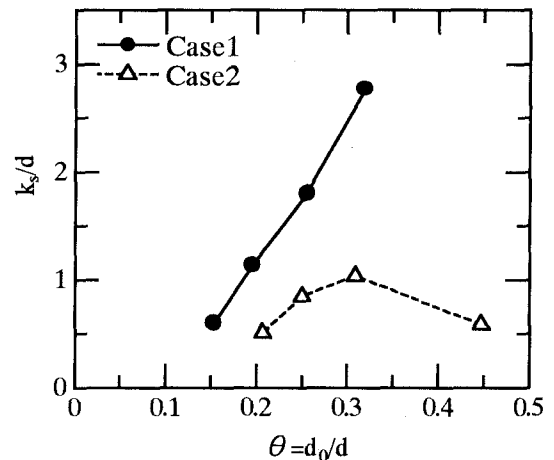


図-7 平均河床高 d_0 と相当粗度 k_s の関係

の流速の鉛直分布形を対数近似し、各領域で平均する。各領域の平均流速分布を、各領域の面積により重み付け平均し、支配面積 A_0 内の平均流速 U を求める。そして式(1)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 y_0 を求める。次に求めた y_0 を用いて、相当粗度 k_s を算出する。相当粗度 k_s は Case1, Case2 で算出している。図-5 は相当粗度 k_s の算出に用いた支配面積 A_0 内の平均流速鉛直分布である。三次元性をもつ粗度周辺の浅い流れを、以上の方法で平均することによって、相当粗度 k_s と対数則の原点位置 y_0 の算出が可能となる。図-6 に各粗度配置について、平均河床高 d_0 と原点位置 y_0 の関係を示す。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 y_0 は減少する。しかし、 d_0/d が約 0.25 以下の場合、平均河床高 d_0 の減少に対して、原点位置 y_0 は逆に増加する。この理由を以下に考察する。粗度密度が小さくなるにつれ、粗度の抗力 F_x に対する支配面積 A_0 内の河床せん断力 τ_0 は相対的に大きくなる。粗度密度が小さい場合、式(1)では摩擦速度 u_s が小さく見積もられ、このため原点位置 y_0 が大きく計算される。この場合の原点位置 y_0 の値は、本

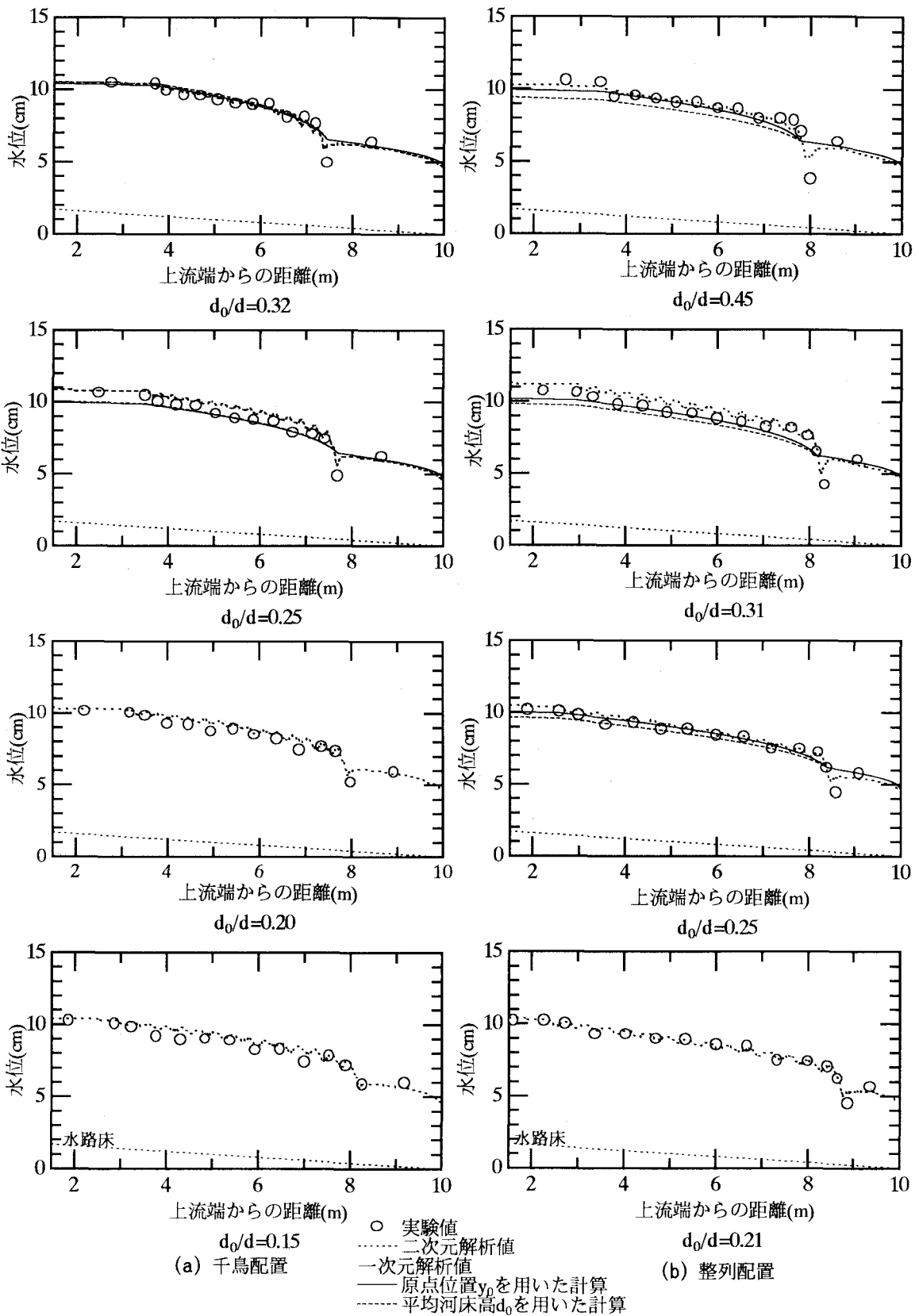


図-8 一次元解析と二次元解析の比較

来 y_0 が持つべき物理的意味を失っている。

図-7 は、平均河床高 d_0 と相当粗度 k_s の関係である。Case2 において、相当粗度 k_s は粗度密度 $d_0/d=0.31$ でピークとなり、これより粗度密度が大きくなると減少する。これは粗度間で死水域が生じ、突起物としての粗度の役割をほとんど果たさなくなるためである。Case1 の場合、本実験条件の範囲では、 d_0/d が大きくなるにつれ相当粗度 k_s は大きくなるが、さらに粗度密度が大きい条件では、Case2 と同様に k_s は減少することが予想される。また、同じ粗度密度の場合、横断間隔 L_y が小さい Case1 の方が相当粗度 k_s は大きくなる。

4. 流れ場の解析法の検討

(1) 相当粗度 k_s を用いた一次元解析

算出した相当粗度 k_s 値を用いた一次元解析結果と二次元結果¹²⁾を実験水面形と比較し、検討する。一次元解析は、原点位置 y_0 がその物理的意味を失わずに相当粗度 k_s を算出できる $d_0/d > 0.25$ の粗度配置で行う。一次元水面形計算には式(3)を用いる。下流端条件は実験と同様に限界水深で与えられる。粗度の設置範囲では式(2)を水深積分した式(4)を用いて摩擦速度 u_* を求める。粗度の設置範囲外では水路底面のマンニングの粗度係数($n=0.016$)を用いて計算する。

i_0 : 河床勾配, g : 重力加速度, V : 水深平均流速

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_0 - u_*^2/gh}{1 - Fr^2} \quad (3)$$

$$u_*^2 = V^2 / \left[6.0 + 5.75 \log_{10} \left\{ \left(\frac{h - y_0}{k_s} \right)^2 \right\} \right] \quad (4)$$

$$Fr = V / \sqrt{gh}$$

ここで、相当粗度 k_s 、原点位置 y_0 は粗度設置範囲に一樣に与える。相当粗度 k_s は前章の粗度群中央部で算出した値を用いる。原点位置 y_0 は実験に頼らずに決めることが難しい物理量であることから、原点位置 y_0 と平均河床高 d_0 の関係がつけば一般的な方法として、一次元解析を行うことが可能である。このため、実験により求めた原点位置 y_0 値を用いる場合と平均河床高 d_0 で代表させた場合の計算結果を比較する。

二次元解析は二次元浅水方程式¹²⁾を用いて行った。水没粗度は、河床の底上げと粗度の抗力を抗力係数を用いて基礎式に付加する¹²⁾ことで取り込んでいる。抗力係数 C_D は、 $53 \leq L_y/d$ で $C_D=0.8$ 、粗度の抗力が極端に小さい $L_y/d < 53$ で $C_D=0.2$ を与える。

図-8(a), (b) はそれぞれ Case1 (千鳥配置), Case2 (整列配置) における計算値と実験値の比較である。原点位置 y_0 と平均河床高 d_0 を用いた $d_0/d > 0.25$ では、原点位置 y_0 、平均河床高 d_0 のいずれを用いても、計算値は実験水面形を概ね再現している。これは、原点位置 y_0 を平均河床高 d_0 で代表させ、 d_0 と相当粗度 k_s を用いた一次元解析が大型突起粗度上の浅い流れに適用可能であることを示す。

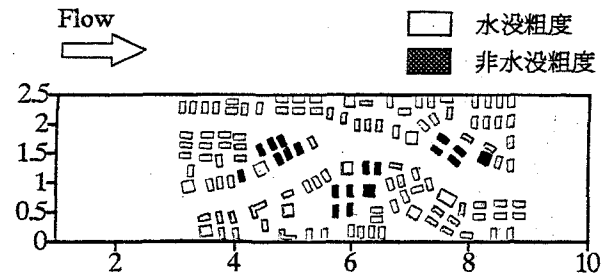


図-9 不規則な家屋配置

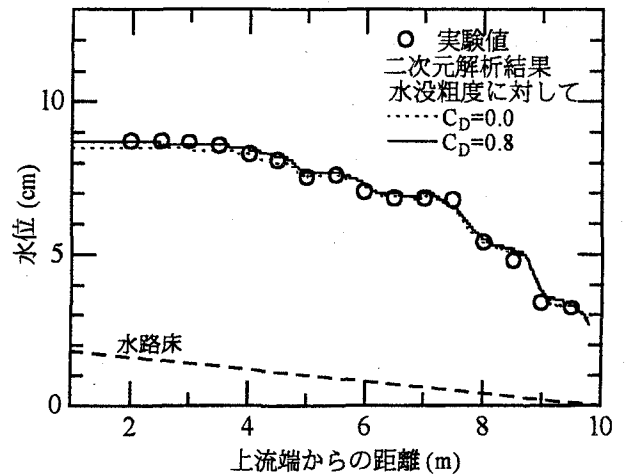


図-10 不規則粗度配置の流れ場の二次元解析

粗度密度が小さく一次元解析の適用ができない $d_0/d < 0.25$ では、粗度の形状を取り込むことができ、各点の底面せん断力を評価できる二次元解析手法を適用してはならない。二次元解析結果と Case1 と Case2 のすべての実験値を比較すると、図-8 に示すように、いずれの粗度配置においても実験の水面形を良好に再現することが可能であることが分かる。また、高さの異なる粗度が不規則に配置される場合は、相当粗度 k_s を算定することは難しく、このため、相当粗度 k_s を用いた一次元解析の適用性は著しく低くなる。このような場合も二次元解析が必要となる。これらの例に水没・非水没粗度が不規則に存在する市街地の氾濫流が挙げられる。

(2) 水没・非水没粗度が不規則に存在する流れ場の二次元解析法の検討

著者ら¹²⁾の先に行った市街地氾濫流の研究では、非水没粗度群の上流に水没粗度群が規則的に配置されていた。このため、非水没粗度群の堰上げにより水没粗度が流れ場に与える影響が小さかった。種々の高さの粗度が不規則に配置されている流れの評価方法を検討するにはこの例は不十分であった。そこで、水没する家屋が多い市街地氾濫流を想定し、二次元解析を行い水没・非水没粗度が混在する場合の流れの評価法を検討する。家屋配置を図-9 に示す。中央の幹線道路が曲がり、高さの異なる家屋が不規則に配置されている。これらの家屋形状を適切に

取り込むため、一般曲線座標系に変換した二次元浅水
 方程式¹⁹⁾を用いる。粗度該当メッシュにおいて、非水没
 粗度は不透過の境界として与え、水没粗度は河床高を上
 げることで表現する。粗度の抵抗は、粗度の抗力(F_x' 、
 F_y')を一般曲線座標系に座標変換し、基礎式に付加する。
 非水没粗度の抗力は、福岡ら¹⁹⁾の水深モデルを用いて算
 出する。水没粗度の抗力は、抗力係数 C_D を用いて式(6)
 で表す。

$$F_x' = -\frac{1}{2} C_D u_x \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \frac{db' \sin \theta}{A'} \quad (5)$$

$$F_y' = -\frac{1}{2} C_D u_y \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \frac{db' \sin \theta}{A'}$$

ここで、 u_x 、 u_y : x 、 y 方向流速成分、 d : 粗度高さ、 b' :
 計算格子内の粗度幅、 A' : 計算格子の面積、 θ : 粗度前
 面が接近流速に対してなす角($0 \leq \theta \leq \pi$)である。

図-10 に縦断水面形の計算結果と実験結果を示す。計
 算水面形は実験の水面形を概ね再現している。このこと
 から、本二次元解析手法は種々の高さを持つ粗度が不規
 則に配置された場合でも、適用可能であると言える。ま
 た、水没粗度に対し、抗力係数を与えた計算結果と $C_D=0$
 とする計算結果の差はほとんど見られない。これにより、
 水没・非水没粗度が混在する流れ場では、非水没粗度の抵
 抗が支配的である¹⁹⁾ことが確認される。したがって、市
 街地氾濫流のような相対水深が小さく非水没粗度が多い
 流れ場において、水没粗度はその形状だけを取り込むこ
 とで十分であると言える。

5. 結論

水没粗度の抗力に着目し、粗度の抗力で流れの抵抗を代
 表し、相当粗度 k_s の評価を行った。また、相当粗度 k_s
 の特性と水没大型粗度を有する流れの解析手法とその適
 用性について検討した。その結果得られた本研究の主な
 結論を以下に示す。

- (1) 水没する大型粗度の抗力は縦断間隔による影響を強
 く受ける。縦断間隔の増加による粗度の抗力の増加特
 性は、粗度周辺の流況により異なる。 $L_v/d < 5.3$ では、粗
 度背後の下降流により接近流速が増大するため、縦断
 間隔の増加に対して抗力は急増する。 $5.3 < L_v/d$ では、接
 近流速が徐々に大きくなり抗力も徐々に増加する。
- (2) 支配面積 A_0 内の抵抗を粗度に作用する抗力で代表し、
 流速を A_0 内で平均化し対数則が成立するよう原点位
 置 y_0 を決定することで、相対水深が小さく三次元特性
 を持つ浅い流れの一次元化が可能となる場合がある。
- (3) $d_0/d > 0.25$ では、平均河床高 d_0 の減少に伴い原点位置 y_0
 は小さくなる。 $d_0/d < 0.25$ では、平均河床高 d_0 の減少に

対して原点位置 y_0 は逆に増加する。同じ粗度密度 d_0/d
 の場合、Case2 に比べて横断間隔 L_y が小さい Case1 の
 方が、相当粗度 k_s は大きい。

- (4) $d_0/d > 0.25$ では、原点位置 y_0 を平均河床高 d_0 で代表さ
 せることができ、 d_0 と k_s を用いた一次元解析が可能で
 ある。 $d_0/d < 0.25$ では、一次元解析手法を適用するこ
 には物理的に無理がある。この場合は、二次元解析手
 法を適用しなくてはならない。
- (5) 水没・非水没粗度が混在する流れ場では、相当粗度 k_s
 の算定が困難である。この場合、二次元解析が有効で
 ある。本二次元解析手法によって、市街地氾濫流のよ
 うな水没・非水没粗度が不規則に混在する流れ場の解
 析が可能である。また、水没・非水没粗度が混在する流
 れ場では、水没粗度はその形状を計算に取り込むだけ
 で流れの構造を評価できる。

参考文献

- 1) Sayre, J.B. and Albertson, M.L.: Roughness spacing in rigid open
 channels, Proc.of ASCE, Vol.87, HY3, pp121-150, 1961
- 2) Herbich, J.B. and Shulits, S.: Large-scale roughness in open-channel
 flow, Proc.of ASCE, Vol.90, HY6, pp203-230, 1964
- 3) 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, pp17-33, 1949
- 4) 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, pp185-193, 1951
- 5) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究-イボ型粗度-, 京都防災研
 究所年報第5号, pp252-259, 1952
- 6) 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 303, pp115-120, 1988
- 7) 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, pp65-74, 第357号, 1985
- 8) 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, pp543-547, 1993
- 9) 楊永荪, 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, pp41-49, 1993
- 10) 中川一: 洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究,
 京都大学博士論文, 1989
- 11) 末次忠司, 栗城稔: 改良した氾濫モデルによる氾濫流の再現
 と防災への応用に関する研究, 土木学会論文集 No.593,
 pp41-50, 1998
- 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, pp293-298, 1999
- 13) 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 No.0 0600, pp23-36, 1998

(1999.9.30 受付)