

水没・非水没大型粗度が混在する 浅い流れに関する基礎的研究

STUDY OF SHALLOW WATER FLOW WITH SUBMERSIBLE AND
NON-SUBMERSIBLE LARGE-ROUGHNESS

福岡捷二¹・水口雅教²・内田龍彦²・横山洋³

Shoji FUKUOKA, Masanori MIZUGUCHI, Tatsuhiko UCHIDA and Hiroshi YOKOYAMA

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 東広島市鏡山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 北海道開発局開発土木研究所 環境水工部 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

There are many submersible and non-submersible structures having large-roughness for the purpose of bank protection, fish way and so on. It is very important to clarify the resistance of large-roughness and the structure of flow. The resistance estimation by large-roughness has been made by equivalent roughness and Manning's roughness coefficient. But it is difficult to estimate hydrodynamic forces acting on the individual large-roughness and local velocity distribution near by these methods.

The water flow near non-submersible large-roughness was clarified in previous study¹⁰⁾. In this paper, we measured hydrodynamic forces acting on submersible large-roughness directly. The purpose of this study is to develop two-dimensional numerical method that can reproduce water flow with submersible and non-submersible large-roughness.

Key Words : submersible and non-submersible large-roughness, hydrodynamic force , two dimensional numerical method

1. 序論

大型粗度は山地河道の河床, 市街地建物群, 護岸, 堰・床止めなど横断構造物の水叩き, 魚道などにみられる。これらの大型粗度を有する構造物を設計する場合, 大型粗度が流れに及ぼす抵抗や流れの構造を予測する必要がある。さらに底面に大きな抵抗体が様々な分布で存在する流れ場を明らかにすることは関連する水理学, 流体力学の基礎問題を構成しており重要である。

大型粗度による流水抵抗を評価する方法のひとつとして相当粗度 k_s などが用いられている^{1)~4)}。また浅い水深の流れ場における大型粗度の抵抗は, Chezy 係数⁵⁾, Manning の粗度係数⁶⁾, 抵抗係数 f ^{7)~9)}などで評価され, 様々な水深, 粗度配置に対して検討されている。しかし, 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, 流速分布が非常に複雑かつ水面が不安定となるため

一般に流速の対数分布側の適合性が小さくなり, この場合において相当粗度はそれほど物理的意味を持たなくなる⁵⁾⁶⁾。さらにこれらの評価方法では, 個々の粗度に作用する抗力や流れの場所的分布を評価することは困難である。粗度単体に作用する抗力を抗力係数を用いて検討している例⁴⁾⁹⁾があるが, 相対水深や粗度配置により抵抗が変化するため抗力係数の一般的な評価方法の確立には至っていない。福岡ら¹⁰⁾は非水没粗度に作用する抗力を直接測定することにより, 粗度に作用する圧力分布は静水圧分布とみなすことができることを示し, 大型粗度群のある流れ場の2次元解析を可能にしている。しかし, 浅い水深の中に水没する大型粗度の抗力および流れの評価方法については検討が不十分である。自然界には氾濫水域の家屋群, 魚道内の粗度群など水没・非水没粗度の混在する流れ場は数多い。このような流れ場の解析には物体に作用する流体力を精度良く見積もることが重

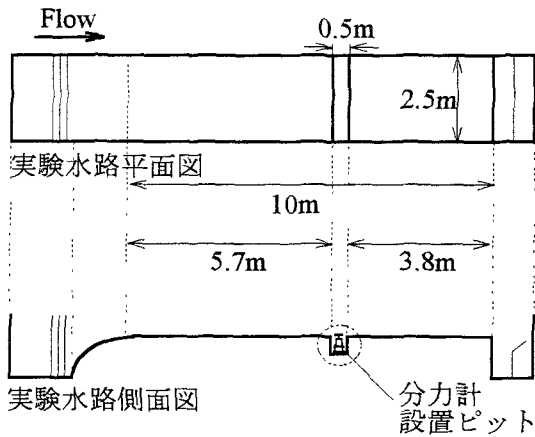


図-1 実験水路

表-1 図-3の実験条件

Case	L_y/B	L_x/B	$Q(\ell/s)$	h^*
Case1	1.0	0.5	58.7	2.63
	1.0	1.0	58.7	2.66
	1.0	2.0	58.7	2.68
Case2	3.0	0.5	58.7	2.24
	3.0	1.0	58.7	2.37
	3.0	2.0	58.7	2.41

要である。

本研究では最初に浅い流れの中に水没する大型粗度に作用する抗力を測定し、その特性と算定方法を明らかにする。次に水没・非水没大型粗度の混在する流れ場を再現できる2次元数値解析法を構築し、このような流れ場の予測を可能にすることを目的としている。

2. 水没粗度の抗力測定

種々の異なる配置をもつ粗度に作用する抗力を直接測定し抵抗を評価する。実験に用いた水路(図-1)は全長10m、幅2.5m、水路勾配1/500、底面粗度係数 $\epsilon=0.020$ である。水没粗度模型は、20cm×10cm、高さ3cmの市販のレンガを2つ重ねて20cm四方の粗度模型としている。上流端から5.7mの位置に幅0.5mのピットを設け、その中に3分力計を設置し抗力を測定している¹⁰⁾。

粗度配置は図-2に示すCase1, Case2の2ケースについて行っている。Case1とCase2はそれぞれ横断間隔20cm($L_y/B=1.0$)、60cm($L_y/B=3.0$)の整列配置である。各ケースについて粗度の縦断間隔と流量を変化させ、抗力および粗度近傍の流速と水位を詳細に計測することによって、粗度配置の変化に伴う粗度周辺の流況と抗力の関係

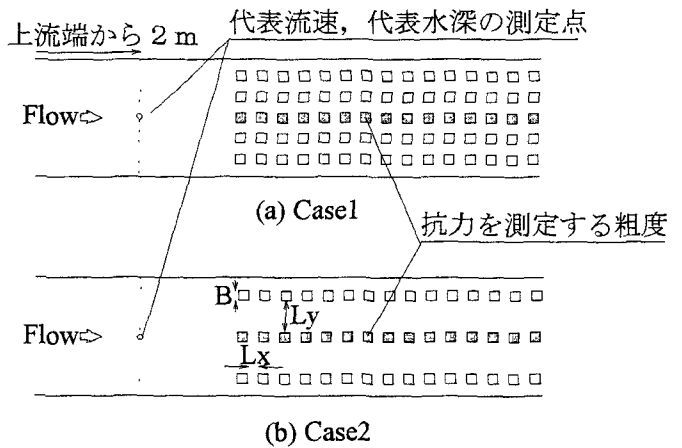


図-2 抗力測定粗度配置

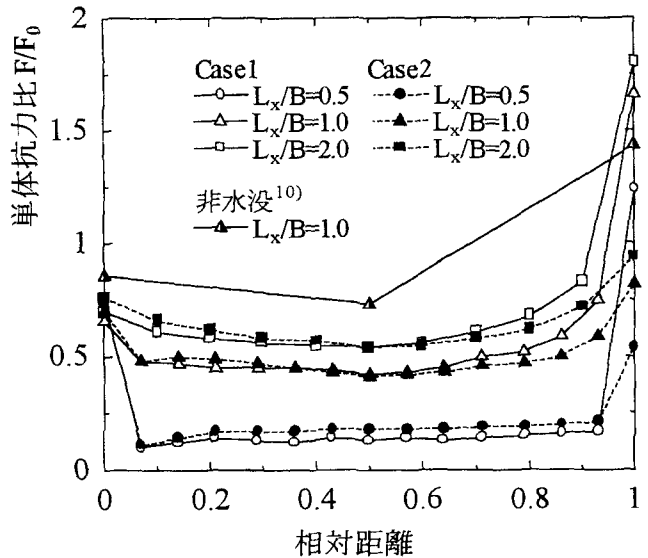


図-3 相対距離と抗力の関係

を検討している。

図-3はCase1, Case2について相対距離と粗度に作用する抗力の関係を示している。横軸に示す相対距離とは粗度群全体の長さを1としたときの粗度群上流端から抗力を測定する対象粗度までの縦断距離である。また縦軸は群内のそれぞれの粗度の抗力 F と単体として測定された粗度の抗力 F_0 との比である。実験条件は表-1に示すように流量一定で縦断間隔を変化させている。また相対水深 h^* とは上流端から2mの水深を粗度高さで除したものである。粗度による抵抗のため粗度群内では水位が上昇する。このため最後列に位置する粗度ではその前後で大きな水位差がつき、粗度群中央の粗度と比べ抗力は大きくなる。これは非水没粗度に作用する抗力の発生機構¹⁰⁾と同様である。Case1($L_y/B=1.0$)はCase2($L_y/B=3.0$)に比べ横断間隔が小さいため流れの障害率が大きくなり、粗度群内の水位は上昇する。このためCase1の粗度群最後列に位置する粗度に作用する抗力は著しく大きく、単体の約

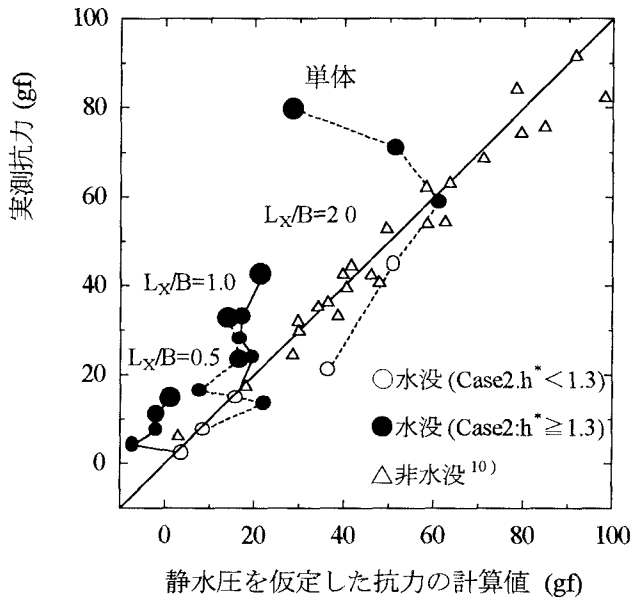


図4 計算抗力と実測抗力の比較

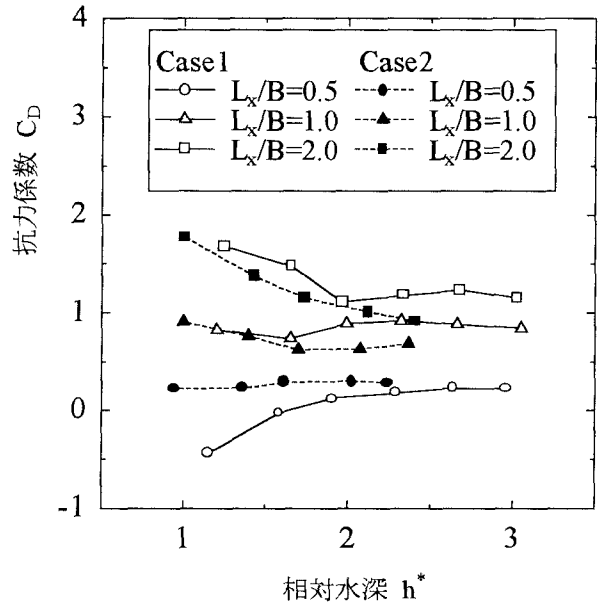


図5 相対水深 h^* と抗力係数 C_D の関係

2 倍にもなる。粗度群中央では水没粗度の背面で剥離渦による圧力低下、粗度前面では接近流速による圧力上昇が生じる。ここで粗度天端に働くせん断力は Manning の抵抗則から算出すると実測値の約 5~10%であるため、抗力は粗度前後の圧力差が主要要因であるといえる。粗度背面の剥離渦の全長は $1.0 < L_x/B < 2.0$ でほとんど変化せず、おおよそ粗度高さの 3 倍の大きさである。このことから粗度に作用する抗力の大きさには接近流速が強く影響すると考えられる。また剥離渦の長さは最大で 10cm 程度(粗度高さの 3~4 倍)であり、棧粗度の場合(粗度高さの 7~10 倍⁷⁾)に比べ小さい。これは粗度側面の流れの影響である。縦断間隔 10cm ($L_x/B=0.5$)では粗度前面が上流側粗度背面の剥離渦の領域に入り込むため、粗度前後面の圧力差がほとんど生じず抗力は他の場合に比べて極端に小さくなる。粗度間隔がそれ以上広がると、接近流速は徐々に回復し抗力は大きくなる。そのため粗度群中央に位置する粗度に作用する抗力は Case1, Case2 においてほとんど差がなく、むしろ縦断間隔によって変化している。

3. 水没粗度の抵抗の評価方法

図4に様々な粗度配置について静水圧分布を仮定した抗力と実測抗力の関係を示す。図4の直線は計算値と実測値との一致点である。三角形の点が非水没粗度を表している。水没粗度の場合は丸の点で表し、同じ配置の点を線で結び流量の増加に伴い点を大きくしている。

著者らの研究¹⁰⁾から非水没粗度に作用する抗力は圧力分布を静水圧分布として式(1)で算定可能であること

を明らかにしている。

$$D = b \frac{\rho g (h_1^2 - h_2^2)}{2} \quad (1)$$

D: 抗力, b: 粗度幅, ρ : 水の密度,

g: 重力加速度, h_1 : 前面水深, h_2 : 背面水深

しかし、水没粗度の場合は相対水深 $h^* \geq 1.3$ (図4中では黒丸に相当)になると、静水圧分布から算出した抗力の計算値は実測値からずれている。単体粗度では流量の増加に伴って抗力の計算値と実測抗力値がともに増加するが、ある程度相対水深が大きくなると計算値は減少する。これは流量の増加に伴う水位上昇により粗度の影響が減り、粗度前後面の水位差が小さくなったため、静水圧分布の仮定による計算値は小さく見積もられる。群内の粗度では下流側粗度によって背面の水位が堰き上げられるため、水位差が小さくなる。このため流量が上昇しても抗力の計算値はほとんど変化せず、実測抗力値のみ増加する。

以上より、水深が大きくなると粗度上の流れが卓越し流れが3次元的になり、粗度背面では鉛直下向き加速度成分が大きくなり圧力は静水圧分布よりも小さくなる。このため水没粗度では静水圧分布を仮定した抗力の計算値は実測値よりも小さくなり、もはや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。そこで水没粗度による抵抗を抗力係数を用いて評価を試みる。

水没粗度に作用する抗力は流速と相対水深に大きく影響される¹⁰⁾。図5に Case1, Case2 について相対水深 h^* と粗度群中央に位置する粗度の抗力係数 C_D の関係を示す。

抗力係数 C_D は式(2)で表される。

$$D = C_D \frac{\rho a U^2}{2} \quad (2)$$

D : 抗力, C_D : 抗力係数, ρ : 水の密度, a : 投影面積, U : 代表流速(上流端から 2m の水深平均流速)

Case1, Case2 において抗力はほぼ同値であるが, 抗力係数 C_D は一様流速が大きい Case2 のほうが小さくなる。抗力係数には粗度周辺の水理情報が十分に取込まれていないため粗度配置, 相対水深により様々な値を取る。しかし, 抗力係数は相対水深 h^* が大きくなるにつれ徐々に小さくなり, 相対水深 $h^* \geq 2.0$ で h^* の直接的影響を受けず各粗度配置ごとにほぼ一定の抗力係数値をとる。これは水没粗度上の流れに対し下流側粗度の影響が十分に及ぶようになり, 粗度背面の剥離形状が安定したためと考えられる。以上より水没粗度に作用する抗力は粗度配置ごとに一定の C_D を用いて式(2)によって評価する。

4. 水没・非水没粗度による抵抗を考慮した

解析モデルと実験によるモデルの検証

水没・非水没粗度の抵抗算定方法を水没・非水没粗度が混在する流れについて実験と解析から考察する。解析には式(3)~(5)に示す2次元浅水方程式を用いている¹⁰⁾。水没粗度はメッシュ自体の地盤高を高くし, 非水没粗度は鏡像条件を用いて不透過の流下阻害物として表現している。粗度の抵抗は非水没粗度の場合式(1)により, 水没粗度の場合式(2)により算定し基礎式に付加している。境界条件は流入条件として上流端より実験流量をフラックスで流入させ, 下流端は流下方向に流速が変化しない条件($\partial u / \partial x = 0$)を設定している。なお実験より粗度に作用する横断方向の揚力は, 流下方向の抗力に比べ十分小さかったため, 計算では粗度による流下方向の力のみを考え, 横断方向の力は考えていない。

連続式)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

x, y 方向の運動方程式)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial u_0 M}{\partial x} + \frac{\partial v_0 M}{\partial y} \\ & = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) + F_x \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial u_0 N}{\partial x} + \frac{\partial v_0 N}{\partial y} \\ & = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

u_0, v_0 : x, y 方向の水深平均流速

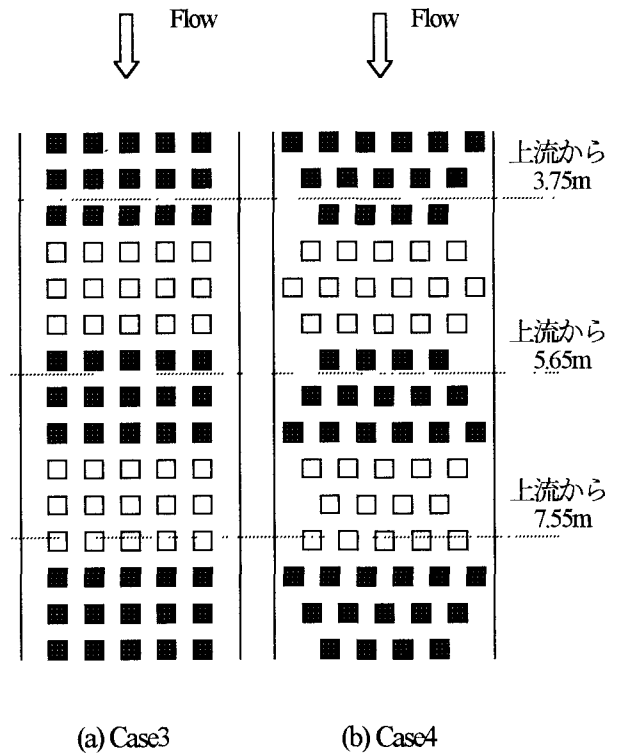


図-6 水没・非水没粗度の配置

M, N : x, y 方向の流量フラックス ($M = u_0 h, N = v_0 h$)

h : 水深, H : 水位 ($H = h + z, z$: 河床高)

ε : 水平渦動粘性係数 ($= \kappa u_* h / 6, \kappa = 0.4$)

g : 重力加速度 ($= 9.8 \text{ m/s}^2$) ρ : 水の密度

τ_{bx}, τ_{by} : x, y 方向の底面せん断力

$$\tau_{bx} / \rho = gn^2 u_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2} / h^{1/3}$$

$$\tau_{by} / \rho = gn^2 v_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2} / h^{1/3}$$

n : Manning の粗度係数

F_x : x 方向の流体力項

実験に用いた水路は先に水没粗度の抗力実験で用いた水路と同じものである。粗度配置は図-6に示す水没・非水没粗度が混在する理想化された配置の2ケースについて行っている。Case3は整列に配置した場合, Case4は千鳥に配置した場合である。Case3, Case4は水没粗度(20cm×20cm, 高さ3cm)・非水没粗度(20cm×20cm, 高さ9cm)ともに同数に配置し, 粗度密度は同じである。実験流量はCase3, Case4ともに29.0(l/s)である。計算においてメッシュは流下方向10cm, 横断方向5cmに分割し, 抗力係数は実験から得た平均値 $C_D = 1.0$ を用いている。

図-7に平均横断水位の縦断分布を, 図-8に横断水位を示す。横断水位はCase3, Case4ともにどの断面において

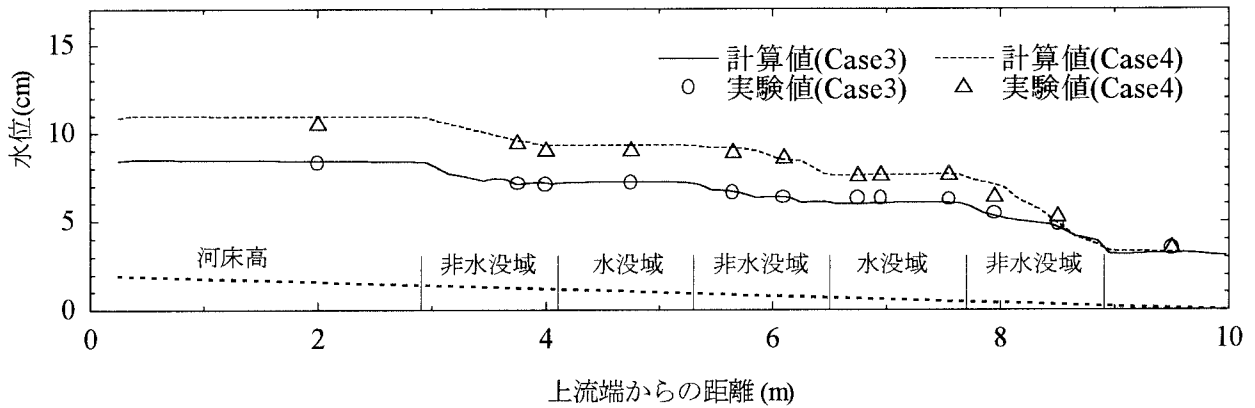


図-7 平均横断水位の縦断分布の比較

も横断的に大きな変化はほとんど見られず、水位については縦断分布がその断面での横断水位を表しているといえる。水没粗度域での相対水深は Case3 が約 2.0~2.5, Case4 が約 2.5~3.0 である。図-7 をみると千鳥配置の Case4 は整列配置の Case3 よりも全体的に水位が高く、流れに対する抵抗が大きいことを示している。そして両ケースとも非水没粗度域で水位が減少し、水没粗度域では水位がほぼ一定である。このことは非水没粗度による堰上げのため、水没粗度の抵抗が相対的に無視できる大きさになっていることを示している。また同じ非水没粗度域でも Case4 の方が水位の減少が大きいことも分かる。これらのことから粗度配置の違いが、流れに対する抵抗に大きく影響することが分かる。

図-9 に主流速分布を示す。Case3 において非水没域での流れは粗度間に集中し、非水没粗度の背面でほとんど死水域のようになり水の流れる領域がはっきりしている。また水没域では粗度上でも流速がある程度大きくなっている。一方、Case4 の場合は千鳥配置で流れが粗度に阻害されている。流速の実験値は均一化して見えるが、渦が発達し時間変化が大きい。非水没域の粗度背面で渦領域が存在し粗度前面では流れが速く、局所的に流れが大きく変化している。また水没域においても底面の粗度付近では、渦が発生し複雑な流れになっている。そのことが Case4 において抵抗の増加になっている。

以上のことから水没・非水没粗度が混在する本実験(相対水深が約 2.0~3.0) では千鳥配置の Case4 の方が抵抗は大きく、また流れに及ぼす抵抗は非水没粗度の方が大きい。水位の計算結果をみると粗度配置の違いによる抵抗を両ケースとも良好に再現している。主流速の計算結果は Case3 では実験結果を再現することができている。しかし Case4 のように流れが局所的に変化している場合において断面平均流速は再現可能であるが、局所的な流れは完全には再現できていない。

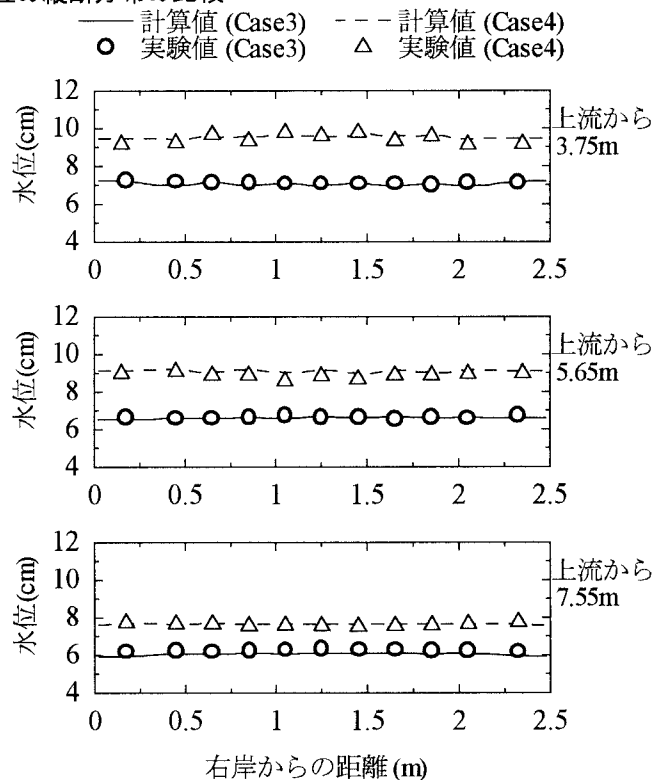


図-8 横断水位の比較

5. 結論

水没粗度に作用する抗力は、主に粗度前面の接近流速による圧力上昇と粗度背面の剥離渦による圧力低下との差によって生じる。整列配置の場合、抗力は粗度背後の流速の回復度合を支配する縦断間隔の影響を強く受け、横断間隔の影響をほとんど受けない。また、最後列に位置する粗度に作用する抗力は、水没・非水没粗度に関わらず粗度群内のものと比べて大きく、単体に匹敵するかそれ以上の値を取る。

相対水深 $h^* < 1.3$ の場合、粗度に作用する抗力は、粗度が非水没の場合と同様に、粗度前後の圧力分布を静水

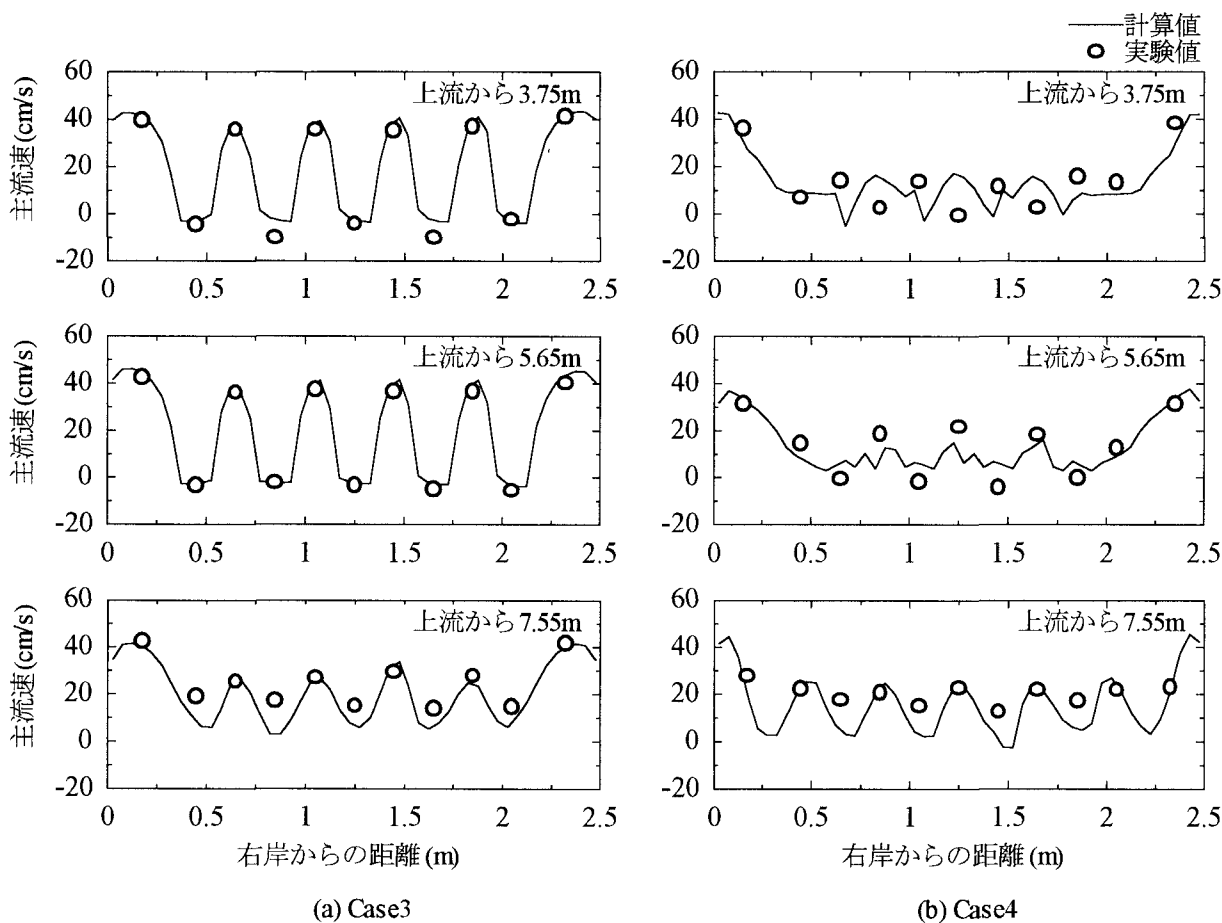


図-9 主流速の比較

圧分布と近似して算定することが可能である。 $h^* \geq 1.3$ となると、流れは粗度背面の剥離渦によって非静水圧分布となる。この場合は、相対水深が抗力係数に与える影響が小さいことから、抗力係数を用いて粗度の抗力を算定する方法が可能である。

粗度による抵抗を水没粗度は抗力係数により、非水没粗度は粗度周辺の水深を用いて算定できる。そして、水没・非水没粗度の混在する流れについて粗度配置に関わらず水位に関しては精度良く再現することができることが分かった。しかし、千鳥配置の流れでは詳細な流速分布までは再現しきれなかった。このことについてはさらに検討する必要がある。また Case3, Case4 のように水没粗度が非水没粗度に挟まれている配置では、非水没粗度の方が流れに及ぼす影響が大きくなり、水没粗度による抵抗がほとんどきかなかったといえる。しかし、水深がさらに小さくなった場合、また異なる粗度配置では水没粗度による抵抗の影響が大きくなると考えられる。今後は水没・非水没粗度が混在する流れにおいて水深、粗度配置を変えた実験等を行い、様々な条件で適用できるよう解析モデルを向上させる必要がある。

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, pp17-33, 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, pp185-193, 1951.
- 3) 足立昭平：人工粗度の実験的研究-Iボ型粗度-, 京都防災研究所年報第5号, pp252-259, 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 30.3, pp115-120, 1988.
- 5) Sayre, J.B. and Albertson, M.L.: Roughness spacing in rigid open channels, Proc.of ASCE, Vol.87, HY3, pp121-150, 1961.
- 6) Herbich, J.B. and Shulits, S.: Large-scale roughness in open-channel flow, Proc.of ASCE, Vol.90, HY6, pp203-230, 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, pp543-547, 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, pp41-49, 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, pp65-74, 第357号, 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 No.600, pp23-36, 1998.
- 11) 福岡捷二, 横山洋, 水口雅教, 内田龍彦：家屋水没を伴う密集市街地氾濫流の解析, 第53回年次学術講演会講演概要集第2部, pp396-397, 1998.

(1998. 9. 30 受付)