

底面上の棧による後流に関する実験的研究

Experimental Study on the Wake Caused by Square Bar Roughness

服部 敦*・吉川秀夫**

By Atsushi Hattori and Hideo Kikkawa

Characteristics of the flow around an artificial roughness are investigated experimentally by focussing attention on the wake behind the roughness. In this study, a single square bar was placed on the channel bottom as a roughness, and the turbulent measurement was conducted to understand the essence of boundary layer development. Some important results, including the detailed structure of turbulent velocity field as well as temporally averaged one, were reported.

Keywords: boundary layer, single bar roughness, wake, turbulence

1. はじめに

護岸法面上に配置される人工粗度は、粗度要素の形状抵抗を主に利用するため大型であり、かつ施工上の理由や人工粗度の特性を把握し易いため、規則的に配列されているものが多い。そのような人工粗度を配置するにあたり、流れを巨視的にとらえる立場からは摩擦損失係数を、又、微視的には粗度を配したため生じる二次流や乱流特性などが護岸近傍の河床変化に与える影響などを知っておく必要がある。前者の要求を満たすため幾多の研究が行われており、例えば棧型粗度の場合、粗度要素の間隔は、剥離域長とほぼ等しい粗度要素高さの約10倍で設置すると摩擦損失係数がほぼ最大値となることが知られている¹⁾。又、後者の場合、段落ち部の後流や一様流中に端面を流れ方向と垂直に設置した厚板前縁の剥離流れの乱流測定から、横渦の長さスケールや放出周期が調べられ、前述の剥離流れの乱流特性の共通性が報告されている²⁾。以上より、人工粗度を持つ流れの特性は、粗度要素後流、特に剥離域部や剥離せん断層の特性の理解により総括的かつ合理的に扱えると考えられる。

著者らは、流れを二次元に簡略できることから、連続的に配列された正方形断面を持つ棧粗度面上の流れを、棧粗度個々からの影響の結果として解析することを目的とし、棧粗度面上の境界層の発達に関する研究を進めている。本報告は、その第一歩として水路底面上に棧粗度を1個だけ設置し、その上下流の乱流流速測定を行い、(1) 棧粗度を配置したため発生した乱れ強度とレイノルズ応力の特性と、(2) 境界層厚及

* 早稲田大学大学院 理工学研究科修士課程建設工学専攻 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

** 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (同上)

び排除厚について実験的に調べたものである。

2. 実験の概略

幅20 cm、高さ40 cm、長さ13 m、勾配1/200の亚克力製水路の水路床の上に、1 cm四方の正方形断面柵粗度を整流装置流出端から1 m下流に流れに対して垂直に配置した。座標軸は、柵上流面側に原点を取り、水路底面に沿って下流側にx軸、それに対し垂直上方にy軸とする(図-1参照)。実験に先立ち、水路横断方向の流速分布測定より、測定範囲($-40 \text{ cm} \leq x \leq 45 \text{ cm}$)の流れは水路中央面内の流れを用いて2次元で扱えることを確認した。従って、今回は水路中央面内において、2成分レーザー流速計(DANTEC社製)により流速測定を行った。測定は、断面数40で、1断面に付き約20点の測点を設け、一点に付き300 Hzで1000個のサンプリングを行った。実験の水利条件は、断面平均流速32 cm/sであり、フルード数は0.24、レイノルズ数は58200である。

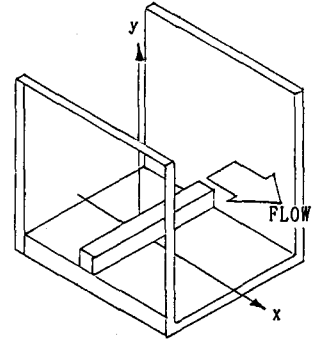


図-1 実験装置及び座標定義

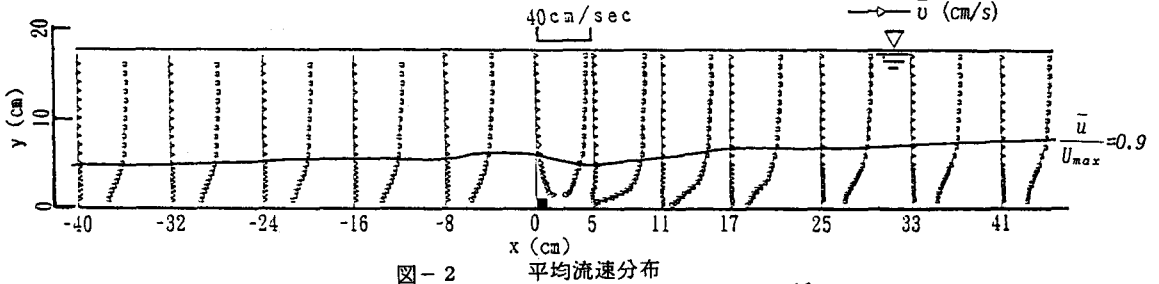


図-2 平均流速分布

3. 実験結果と考察

3.1 平均流速分布と境界層

図-2にx軸方向平均流速 $\bar{u}$ およびy軸方向平均流速 $\bar{v}$ の分布を示す。又、図-3にyについて対数表示した $\bar{u}$ の流速分布を示す。これらの図より、 $\bar{u}$ は $x = -40 \text{ cm}$ から柵粗度に近づくにつれ、底面近くは減速され、水面付近はわずかであるが加速されることがわかる。また、柵直上にあたる $x = 0 \text{ cm}$ において $\bar{u}$ は、 $\bar{v}$ の分布からわかるように上昇流が顕著となるため、分布形が上流側に比較してより一様化される。しかし、柵の直下流では、剥離渦が生じているため $0 \text{ cm} \leq y \leq 2 \text{ cm}$ の範囲では非常に大きな速度勾配をもつ流速分布になる。下流に進むにつれ $0 \text{ cm} \leq y \leq 2 \text{ cm}$ の範囲は徐々に加速され、 $2 \text{ cm} \leq y \leq 7 \text{ cm}$ の範囲は減速されるため $x = -40 \text{ cm}$ における流速分布形に回復していくと推察される。

図-2に、 U_{max} で $\bar{u}$ を無次元化したとき、 $\bar{u}/U_{max} = 0.9$ となる点を連ねた実線を示した。ここに、 U_{max} は鉛直断面内x軸方向最大流速である。図-3より、 $y \geq 7 \text{ cm}$ の領域はほぼポテンシャル流と考えられ、その領域の流速は $\bar{u}/U_{max} \geq 0.9$ と見積もられるため、本報告では境界層厚を $\bar{u}/U_{max} = 0.9$ が生じる水深として定義する。これより、柵の直後では上述の流速分布の一様化のため、急な境界層厚の減少がみられるが、他の領域では境界層厚は徐々に増加し、柵下流の境界層厚の増加率は上流に比べ大きくなっていることがわかる。

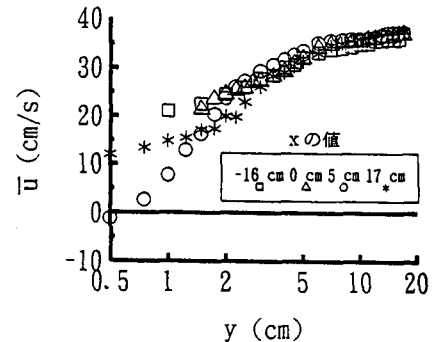


図-3 x軸方向の平均流速分布

図-4に次式で定義される排除厚 δ を $\bar{u}$ の測定値を用いて計算した結果を示す。

$$\delta = \frac{1}{U_{max}} \int_0^h (U_{max} - \bar{u}) dy \quad (1)$$

ここで、 h は水深である。また、同図の曲線は、比較のため次式の滑面上乱流の排除厚の式³⁾を測定領域内の U_{max} の平均値 37 cm/s を用いて、 $-40 \text{ cm} \leq x \leq -20 \text{ cm}$ の範囲の測定値にフィットさせたものである。

$$\delta = 0.37 \xi \left(\frac{U_{max} \xi}{\nu} \right)^{-\frac{1}{5}} \quad (2)$$

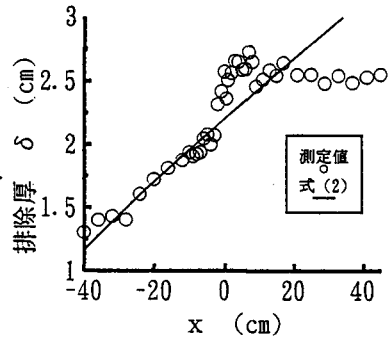


図-4 排除厚の縦断方向変化

ここで、 ν は動粘性係数、 $\xi = x + x_0$ であり x_0 は δ の仮想原点である。栈上流では、(2)式と良く一致するが、 $0 \text{ cm} \leq x \leq 10 \text{ cm}$ で急激に δ が増加し、その下流ではほぼ一定値となることがわかる。この δ の急増は、栈及び剥離渦が底面上に存在するためと考えられる。また、その下流で δ がほぼ一定値となるのは、この範囲では境界層厚は増加していることから、主に流速分布の変形に起因すると考えられるが、一定値に近くなる理由は本実験値のみでは判明できない。

3. 2 乱れ強度とレイノルズ応力

図-5(a)に x 軸方向及び y 軸方向の乱れ強度 u_{rms} と v_{rms} を、また同図(b)にレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の分布を示す。いずれの分布形も栈の直下流の剥離流線に沿って生じる剥離せん断層のため、栈の下流で鋭い最大値を有する分布形となる。 u_{rms} と v_{rms} は、栈の下流に進むにつれて断面内最大値は減少するが、その位置が水面方向に移動し、最大値より水面側の分布形が凸に膨らむ傾向がみられる。それに対して、 $-\overline{u'v'}$ は、最大値の減少が速く、分布形も平坦になっている。これは、レイノルズ応力の生成は主に剥離せん断層においてのみ行われ、また、 u_{rms} と v_{rms} は乱れ運動エネルギー

$k = 0.5(u_{rms}^2 + v_{rms}^2)$ として考えるとき剥離せん断層において k の生成に関係する $-\overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ が大

きく、平均流の運動エネルギーが乱れ運動エネルギーに変換され、よって k の総量が増加したためと考えられる。また、図-5より、栈の直上の $x = 0 \text{ cm}$ から直下流では、最大値より水面側のいずれの分布形も栈の上流側の分布形と良く似ており、栈の上流からの移流分と考えられる。これは、図-3の上述の範囲に対応する流速分布の勾配が栈より上流のものとほぼ等しいことから推察できる。

以上の現象を、流速測定領域で系統的にみるため、流れ関数 ϕ 、 k 及び $-\overline{u'v'}$ の等値線図を図-6の(a)～(c)に示す。 $-6 \text{ cm} \leq x \leq 0 \text{ cm}$ における ϕ の等値線の状況と k 及び $-\overline{u'v'}$ の等値線の状況は良く似ており、このことから栈の直上への u_{rms} 、 v_{rms} 及び $-\overline{u'v'}$ の上流からの移流が確認できる。また、栈の下流では、 k と $-\overline{u'v'}$ の等値線はそれぞれほぼ同じ方向に描かれているが、 ϕ の等値線に比べ、水面方向に向かっており、これは k と $-\overline{u'v'}$ の拡散のためと考えられる。この拡散と境界層厚の変化の関係は、図-5のそれぞれの分布形の変化と $\bar{u}/U_{max} = 0.9$ の曲線の対応から、密接であることがわかる。しかし、栈粗度の近くでは、境界層厚が底面固定壁による乱れが拡散している幅より薄くなっている。この原因として、栈粗度の近くではその上流に比較してポテンシャル流領域の流速分布がより一様分布に近づいたため、 $\bar{u}/U_{max} = 0.9$ が生じる水深位置と境界層厚を定義したことが不適切であったためと考えられる。

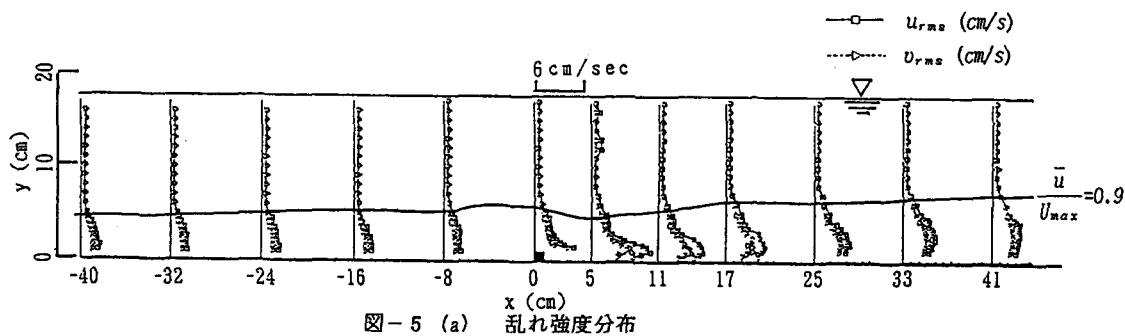


図-5 (a) 乱れ強度分布

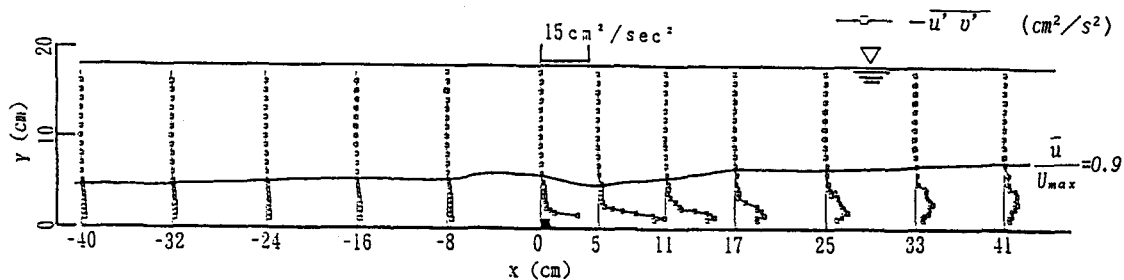


図-5 (b) レイノルズ応力分布

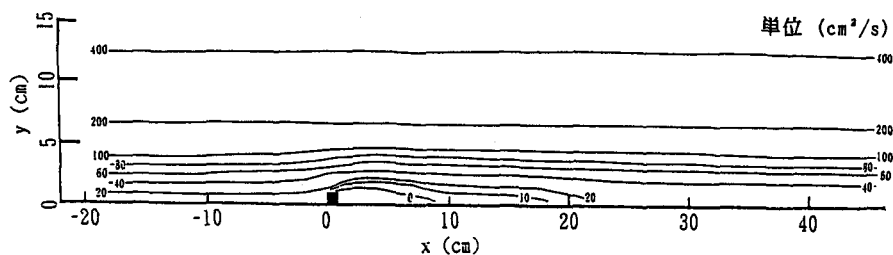


図-6 (a) 流れ関数分布

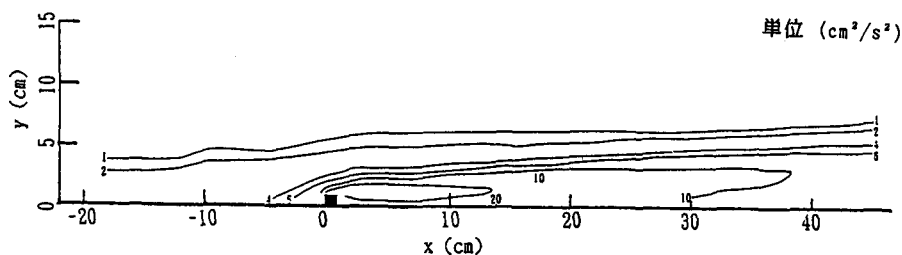


図-6 (b) 乱れ運動エネルギー分布

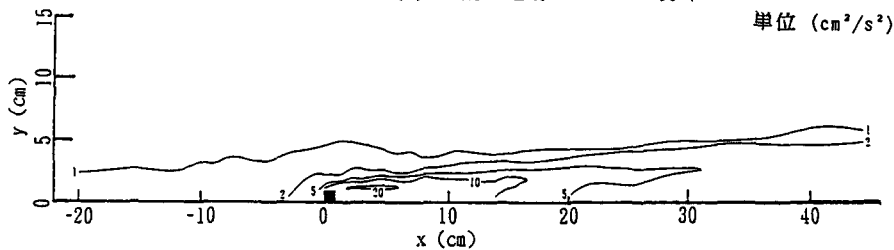


図-6 (c) レイノルズ応力分布

3. 3 剥離流線付近の乱れ強度

上述の乱れ強度の特性に加え、さらに栈の直下流の剥離流線周辺での特性を見るため、図-7に x と y を栈の高さで無次元化した X と Y の座標系で乱れ強度を U_{max} で無次元化した値を、欄津らの段落ち流れによる測定結果⁴⁾と比較した。同図は、栈の下流面と段落ち部を $X=1$ において重ねてあり、段落ち流れの測定結果は段落ち高さで座標軸を無次元化して示してある。両者の測定結果は、剥離流線の位置が異なり単純な比較はできない。しかし、 $X=0$ における上流からの乱れ強度の移流分が異なるため、それぞれの剥離流線より水面側の分布形の相似性は低い、剥離流線周辺から底面側では分布形の相似性が高く、また無次元乱れ強度の絶対値も近いことがわかる。以上より、剥離流線より水面側は、上流の乱れ強度の移流分により変化するが、剥離流線周辺から底面側ではエッジを持つ境界からの剥離を有する底面上の剥離流れの共通の特性が矩形断面を有する栈粗度も共有することを示唆すると考えられる。

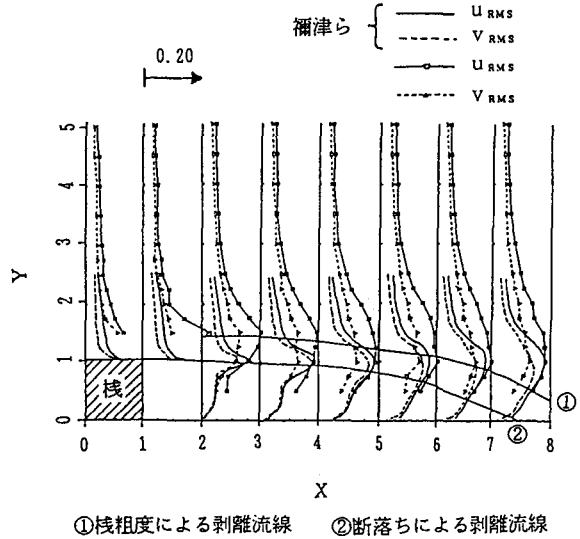


図-7 剥離流線近傍の乱れ強度分布

4. おわりに

本報告は、水路底面上に正方形断面を有する栈粗度を1個だけ設置し、その上下流の乱流流速測定から栈粗度が及ぼす乱流特性と境界層の関係について実験的に調べたものである。その結論を以下に示す。

x 軸方向平均流速 $\bar{u}$ の分布から定義される境界層厚と乱れの統計諸量の移流及び拡散との対応は、栈粗度近くを除いて良好であることが確かめられた。しかし、栈粗度周辺では平均流速分布が境界層内流れのみでなくポテンシャル流領域でも変化があるため、境界層厚の定義に用いられる U_{max} の決定が難しくなる。このような境界層を解析するには、例えば(2)式を導くにあたり用いた積分型の境界層方程式は不適切であり、乱れに関する情報が陽に考慮できる微分型の式を用いる必要がある。そのためには栈近傍の流れの特性について知る必要があるが、その第一歩として、栈粗度後流の乱流構造が次の二つの領域に分けて考えられる可能性を示した。すなわち、剥離流線より水面側の乱れ強度は、主に栈の上流からの移流分によるものであり、剥離流線より底面側ではエッジを持つ境界からの剥離を有する底面上の剥離流れと共通の乱れ強度特性を持つと考えられる。

今後の研究課題として、上述の剥離流れの乱れ特性を時空間相関やスペクトル解析などを用いてより明確に把握し、栈粗度の個々による影響を考慮した流れの解析の実現に近づくことである。

謝辞：本実験を進めるにあたり、早稲田大学流体実験室の江川清次氏にレーザー流速計の操作法から始まりその他の困難な相談に快く応じ、適切な対処をして戴いた。また、早稲田大学土木工学科4年生の山口元久君と山口伊吹君に実験、データ整理を手伝って戴いた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉川秀夫：水理学、技報堂出版、第9刷、pp.163
- 2) 谷一郎編：流体力学の進歩 境界層、第2刷、pp.139～pp.149
- 3) Schlichting, H.: Boundary-layer Theory, seventh edition, pp.638
- 4) Nezu, I., Nakagawa, H.: Turbulent structure of backward-facing step flow and coherent vortex shedding from reattachment in open-channel flows, Turbulent Shear Flows 6, pp.313～pp.337