

底面に棧粗度を有する 開水路の流れについて

FLOW OVER THE SQUARE ARTIFICIAL ROUGHNESS SET OBLIQUELY ON THE BED OF AN OPEN CHANNEL

井上 正史¹・福井 吉孝²・田邊 晴尊³・馮 晨⁴
Masashi INOUE, Yoshitaka FUKUI, Harutaka TANABE and Feng CHEN

¹学生員 東洋大学大学院 土木工学専攻 (〒350 埼玉県川越市鯨井2100)

²正会員 工博 東洋大学教授 工学部環境建設学科 (〒350 埼玉県川越市鯨井2100)

^{3,4}東洋大学工学部 環境建設学科 (〒350 埼玉県川越市鯨井2100)

The paper is written about the flow behavior over the square roughness, which are set obliquely on a bed of an open-channel.

In the experiment, a single and more square roughness is set obliquely on the bed, and the ratio of the water depth to roughness height and the length of roughness are changed.

The aim of this study is to investigate an existence of the spiral flow. By using such spiral flow, sediment load and floating material in the flow may be sent to the downward of channel. In the case using long roughness, the existence of spiral flow is recognized clearly but for the case shorter roughness, in such case between a pointed end of roughness and right side wall, there is no obstacle, such spiral flow can not be recognized so clearly. And in such shorter case, strong secondary flow from left side to right side along the bed is not produced.

Key Words: Square artificial roughness, Secondary flow, and Spiral flow

1. はじめに

開水路の底面に斜めに棧粗度を設置すると、水路横断方向のみならず底面から水面へ、あるいは水面から底面へ向かう水深方向の流れが生じ、結果として螺旋流が形成されることが知られている。

このような螺旋流は、流水中の物質の輸送のみならず「景観」の面からも、水深が浅い時にせせらぎを形成できるなど、好ましい状況をつくり出すことが可能である。¹⁾

本研究は、開水路床に斜めに棧粗度を設置した場合の流況を実験によりさらに詳細に明らかにしようとするものである。

近年、河川計画の上で「環境」が重視されるようになっており、「景観」を考慮に入れた越流型の水制が注目されている。

この越流型の水制の機能を検討するためにも、棧粗度まわりの流れの機構を把握しておくことは有効である。

これまで、河岸に棧粗度を設置した場合の実験・検討は多くされてきている。ところが

実河川は移動床であり、流砂などの堆積などの問題があるので、水路床に棧粗度を設置したケースは検討をされる機会が少なかった。

そこで、今回は中小河川や親水公園内などの用水路等を対象に、棧粗度を水路底部に設置した場合について、棧粗度の設置条件の違いにより流れがどのように変化するのか、模型水路を用いた実験より、断面内における主流速分布、二次流速分布、Reynolds応力から検討をする。

環境重視、その結果多自然型の水路を増やしていこうというのが最近の流れである。しかし、従来から考えられ用いられてきた人工水理構造物の有効性は依然として残っているのであるから、水理学的な観点から検討をしておくことは、決して無意味ではないと考える。

2. 実験概要

実験に用いた水路は、長さ900[cm]、幅(B) 30[cm]の亚克力製可変勾配水路である

。水路の中央底部に1辺が1.0[cm](棧高 $k=1.0[cm]$)の正方形断面角柱棧粗度を等間隔(棧粗度設置間隔 $L=10[cm]$)に3本ないし10本設置した。

実験水路概略図を図-1(図は3本設置時の概略図)に、実験ケースを表-1に示した。

水路幅いっぱいに棧粗度を設置した場合に生じる、棧に沿う流れによって物質が運搬され、右岸水路床付近で堆積する場合がある。Run 2-2-2~2-2-4は、これを流下させることを考えて棧を短くして右岸側壁との間に隙間を設けたケースである。既にこのケースでは、斜め棧3本の設置で螺旋流を得られる²⁾ことが判っているので、棧粗度を3本設置した。

流速の測定には、ピトー管およびx型Hot-film流速計を用い、サンプリング周波数100[Hz]、計測時間12.8[sec]で同測点における計測を2回行うことで、3方向の流速値を測定した。ここに、時間平均流速を u, v, w 、変動成分を u', v', w' とした。

測定時には、 $Q=11.0 [l/sec]$ の一定流量を与え、水路勾配は $I=1/1000$ にセットした。

3. 実験結果および考察

(1) 水路 Center Line上における諸水理量

(a) 主流速分布

図-2、図-4 にRun 1-2 および Run 2-2-1の場合の、断面内最大流速 u_{max} で無次元化された主流速分布 u/u_{max} の水路中央線上における流下方向変化を示す。横軸方向へグラフを1つずつずらして描くことで、流下方向へ連続的な主流速分布の変化を表した。

どちらのケースにおいても、棧粗度の後ろでの境界層の発達が見受けられる。直角に棧粗度を設置した場合(図-2)は、斜めに設置をした時(図-4)よりも水面付近まで境界層の発達が及んでいることがわかる。また、棧粗度を超えた後の境界層の減衰は、棧粗度を斜めに設置した場合(図-4)の方が早い。

(b) Reynolds応力分布

図-3、図-5 に Run 1-2 および Run 2-2-1の場合の Reynolds応力 $-u'w'/U^{*2}$ の流下方向の変化を示す。

直角に棧粗度を設置した場合(図-3)、1本目の棧粗度の前 $x=-5[cm]$ でのReynolds応力分布は、図中に直線にて示した流れが等流状態の時成立する、普遍分布式 $(-u'w'/U^{*2}=1-z/h)$ ³⁾にほぼ一致をしている。それが流下をするにしたがい、棧粗度の後ろで大きな値をとるようになる。棧の後ろに発生する複雑な流れにより流速変動に起因するReynolds

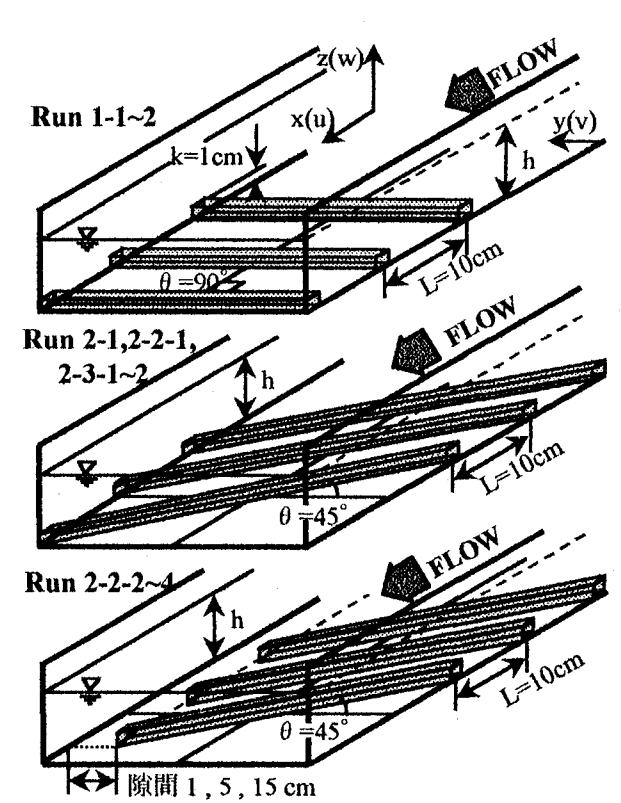


図-1 水路概略図

表-1 実験ケース一覧

	流量 $Q(l/s)$	h/k	B/h	棧設置 角度	棧本数 (本)	側壁と棧 の隙間
Run 0	11	—	—	—	0	—
Run 1-1	11	9	3.3	90°	1	なし
Run 1-2	11	9	3.3	90°	3	なし
Run 2-1	11	9	3.3	45°	1	なし
Run 2-2-1	11	9	3.3	45°	3	なし
Run 2-2-2	11	9	3.3	45°	3	右, 1cm
Run 2-2-3	11	9	3.3	45°	3	右, 5cm
Run 2-2-4	11	9	3.3	45°	3	右, 15cm
Run 2-3-1	11	9	3.3	45°	10	なし
Run 2-3-2	11	15	2	45°	10	なし

応力の値は大きな値をとる。

斜めに棧粗度を設置した場合(図-5)は、 $x=70 [cm]$ で、Reynolds応力分布が普遍分布形を示し、流れの回復がなされたということがわかり、直角に設置した場合よりも棧設置による影響が少ない事が判る。

また、Reynolds応力分布図と主流速分布図を比較してみると、棧粗度の後ろに流れの剥離が生じていることが判り、剥離域とReynolds応力が最大をとる位置が各測定断面でほぼ一致をすることがわかる(図中 流下方向への実線)。

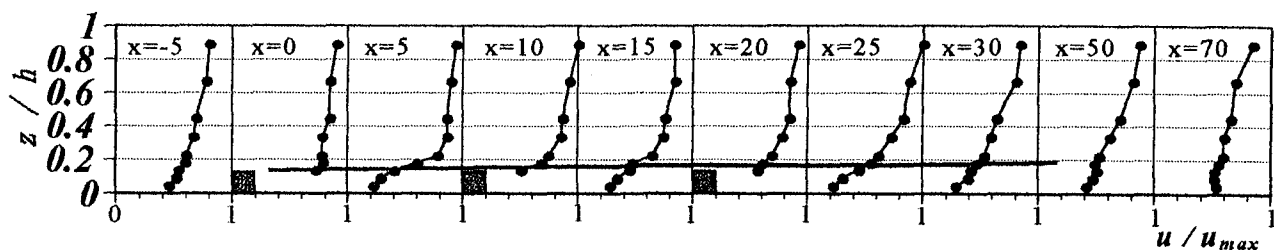


図-2 主流速分布図 (Run 1-2)

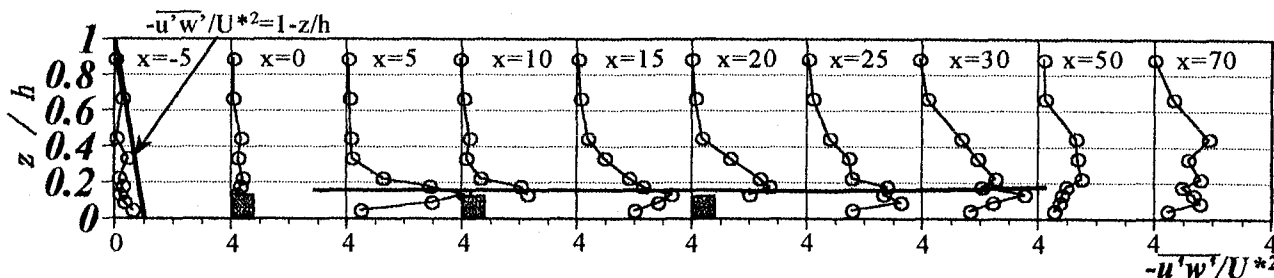


図-3 Reynolds応力分布図 (Run 1-2)

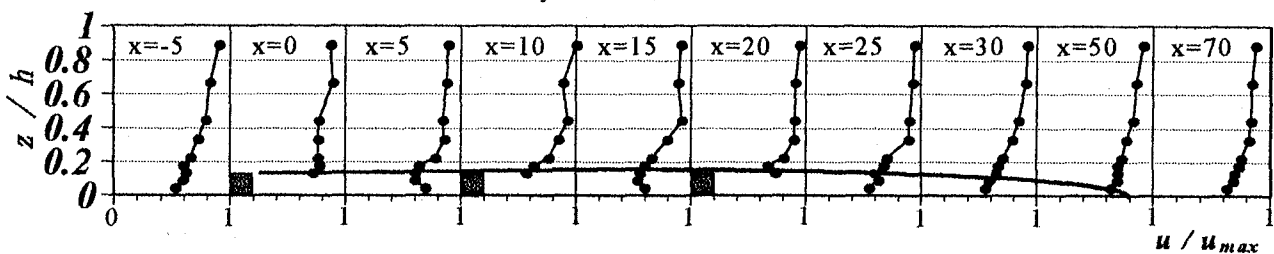


図-4 主流速分布図 (Run 2-2-1)

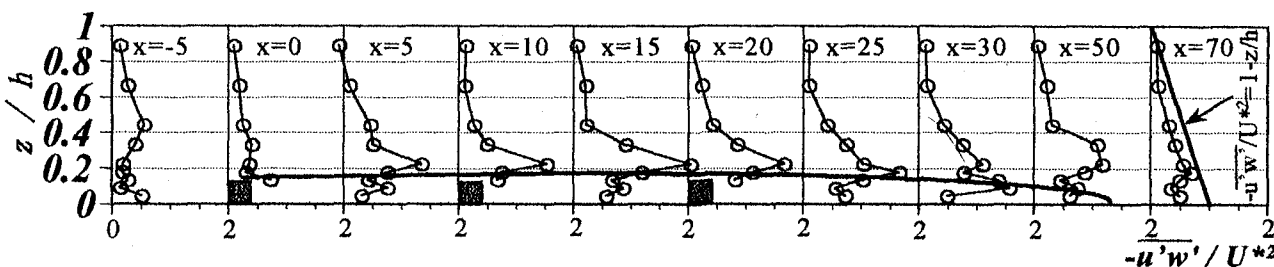


図-5 Reynolds応力分布図 (Run 2-2-1)

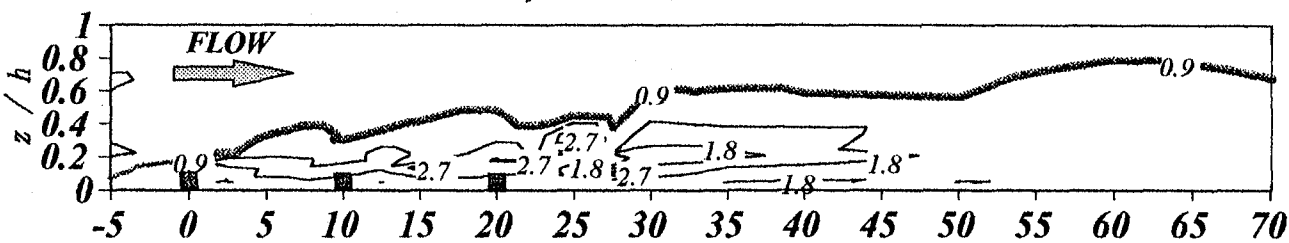


図-6 乱れ強度(u')コンター図 (Run 1-2)

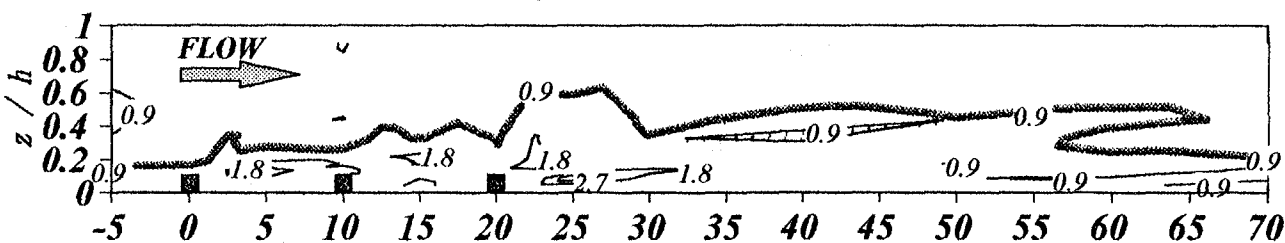


図-7 乱れ強度(u')コンター図 (Run 2-2-1)

(c) 乱れ強度($\sqrt{u'^2}$)分布

図-6、図-7 に Run 1-2 および Run 2-2-1 の場合の乱れ強度コンター図を示す。

先の主流速分布・Reynolds応力分布による

検討と同様に、棧粗度を直角に設置したほうが、水面付近まで棧の存在によって生じた乱れがおよんでいることが判る。

(2) 横断面内における流況の変化

(a) 主流速コンター

図-8から図-12に、横断面内での主流速 (u/u_{max}) コンター図を示す。

図-8は、水路床に何も無い状態での主流速コンター図である。左右対称な分布形を示している。

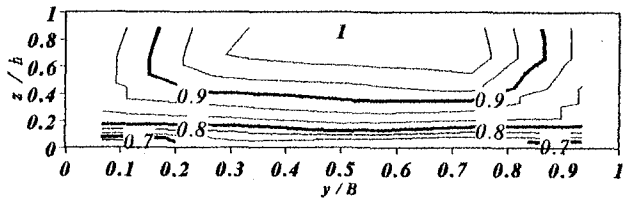


図-8 主流速(u/u_{max})コンター図 (Run 0)

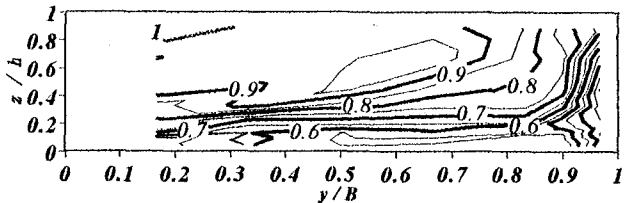


図-9 主流速(u/u_{max})コンター図 (Run 2-2-1)

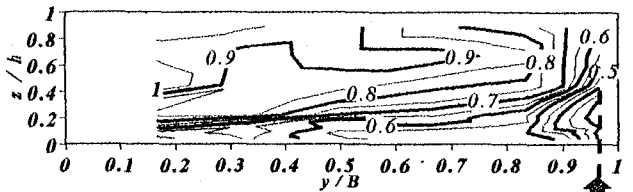


図-10 主流速(u/u_{max})コンター図 (Run 2-2-2)

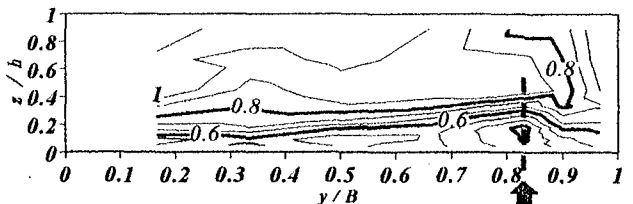


図-11 主流速(u/u_{max})コンター図 (Run 2-2-3)

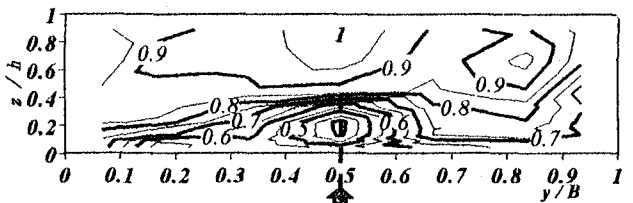


図-12 主流速(u/u_{max})コンター図 (Run 2-2-4)

隙間を設けなかった場合(図-17)と隙間を1 [cm]あけた場合(図-18)は、Reynolds応力分布にさほど変化は見られなく、右岸側壁付近で負の大きな値をとっている。二次流ベクトル図と比較してみると、そこでは強い上昇流が生じていて、右岸近傍でセル形を描くことができる。それは、大本ら⁴⁾による、“二次流の駆動力は流速変動からなるReynolds応力による”ことに一致をする。

また、隙間を広げていくと図-19、図-20を見て判るように、棧粗度がなくなる境目(先端)にReynolds応力の負の領域が見られる。これは、その部分で断面形状が変化するので複断面水路流れの特徴である、“低水路側の底面付近でと高水敷上で、Reynolds応力の符号が逆転する”ことに類似している。⁵⁾

したがって、Reynolds応力の符号の変化は二次流により影響を受けると言うことが言える。

図-9から図-12は、斜めに3本設置したケースの、2本目と3本目の間(2本目の後ろ5[cm])の棧粗度に沿った、斜めの断面での主流速コンター図である。

右岸側壁と棧との間に隙間を設けなかったケース(図-9)と隙間を1 [cm]設けた場合(図-10)は、やや最大流速の位置(流心)が左に寄っている。1 [cm]程度の隙間では特に目立った主流速の変化は見られない。なお、隙間があるケースについては、グラフ中に点線矢印にて隙間(棧の先端)の位置を表している。

隙間を5[cm]・15[cm]と広げていくと、棧粗度がなくなるところで急激に流速が減少して、断面内における主流速の最小値は一樣にしてここに位置する。棧に沿った水路底部の右向きの流れにより流速の主流方向成分が減少するために生じる。

(b) 二次流ベクトル図

図-13から図-16に横断面(棧粗度に沿った斜めの断面)での二次流ベクトル図を示した。隙間のないケース(図-13)では、右岸側壁部において壁に沿った強い上昇流(図中太点線にて表示)が確認できる。水路底部の棧に沿った右向きの流れの作用によるものと考えられる。

隙間の設置により、主流速コンター図において断面形が変化する境目で、主流速の減少が見られたが、二次流ベクトル図より判るように、棧粗度先端のところで発生する上昇流(二次流)により、主流速成分の減少が誘発された。

隙間を広げていっても、つまり棧長さを小さくしても(図-16)棧があるところではセル形(循環流)を確認できる。そのように隙間を設けても、底部では右向きの流れが生じており、棧間に物質を堆積させずに隙間部の流速の早い部分へ送り込み、下流側に物質を有効に輸送することができる。

(c) Reynolds応力分布

測定断面内、特に隙間との境目部分での運動量交換について、重要な特性値であるReynolds応力より検討をする。図-17から図-20に摩擦速度 U^* の二乗で無次元化したReynolds応力分布図を示す。

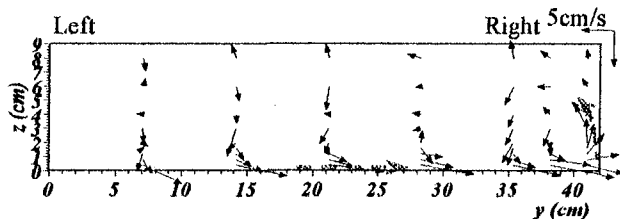


図-13 二次流ベクトル図 (Run 2-2-1)

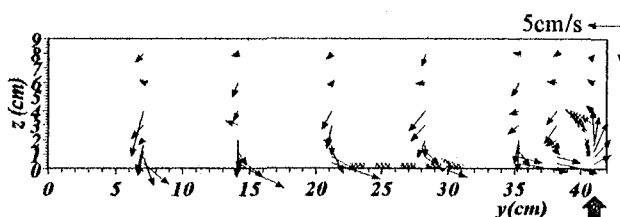


図-14 二次流ベクトル図 (Run 2-2-2)

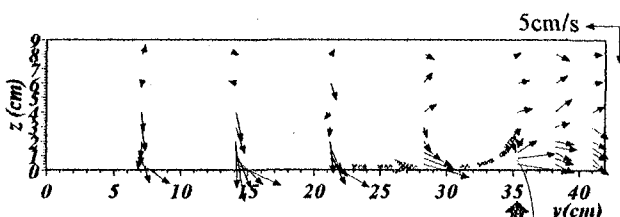


図-15 二次流ベクトル図 (Run 2-2-3)

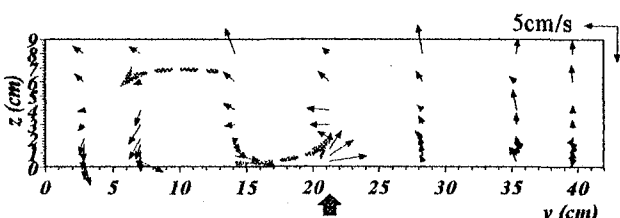


図-16 二次流ベクトル図 (Run 2-2-4)

(3) アスペクト比 (B/h) の違いによる 流況の変化

図-21・図-22 (Run 2-3-1) にアスペクト比 $B/h=3.3$ (水深小) の場合の、図-23・図-24 (Run 2-3-2) に $B/h=2.0$ (水深大) のそれぞれ 5 本目と 6 本目の間および 9 本目と 10 本目の間棧に沿った断面での、二次流ベクトル図を示す。

Run 2-3-1 においては、斜め棧粗度を連続して設置することによる螺旋流の形成を確認できる。また、流下するにつれ螺旋流の中心 (二次流の向きが逆になるところ、図中○印) が左岸側へ推移していく。

図-23 (Run 2-3-2) では、図-21 (Run 2-3-1) に比べて、右岸側壁部での上昇流が水面付近まで達していない。水深が大きくなることで、水圧の影響を受けたものと考えられる。

図-21・図-22 から流下方向への流況の変化を見ると、右岸側壁部での上昇流は流下するにつれて大きくなり、水面付近まで達する。水深が大きな (アスペクト比が小さい) 場合

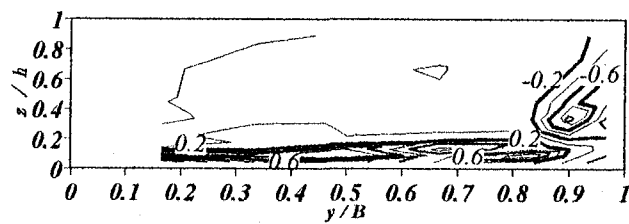


図-17 Reynolds 応力 $(-u'v')/U_*^2$ コンター図
(Run 2-2-1)

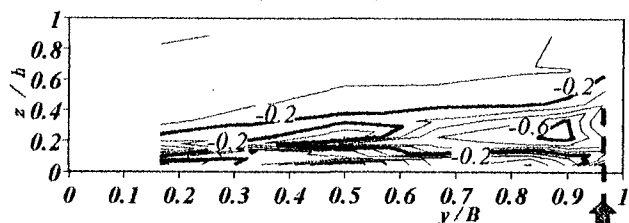


図-18 Reynolds 応力 $(-u'v')/U_*^2$ コンター図
(Run 2-2-2)

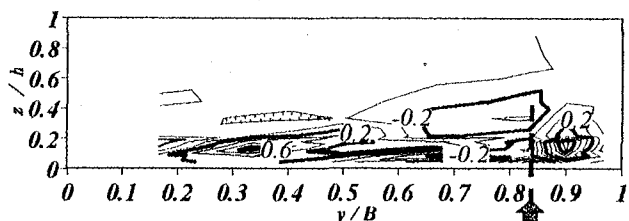


図-19 Reynolds 応力 $(-u'v')/U_*^2$ コンター図
(Run 2-2-3)

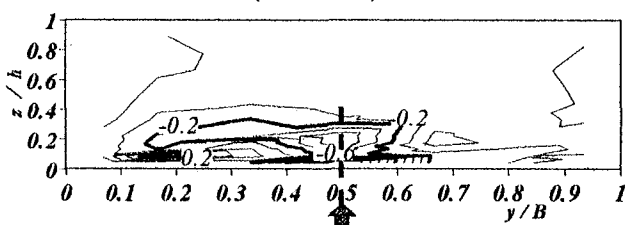


図-20 Reynolds 応力 $(-u'v')/U_*^2$ コンター図
(Run 2-2-4)

でも、斜めに棧粗度を連続して設置することで、結果として断面全体にわたる螺旋流の形成を期待できる。

(4) 抗力

棧粗度を設置することで、斜め方向への流れ、即ち二次流を生じさせる。この二次流が水路の片側へ向かい、側壁面で上昇流を引き起こす。その際、棧に働く力つまり抗力が働くが、この値が余り大きくなってしまいうことは、流れそのもののエネルギーを奪ってしまうので、抗力が大きくならないような配置が必要である。ここでは抗力を主流方向に直角な、長さ $L=150[\text{cm}]$ だけ離れた 2 断面間における運動量の式から求めた。

本実験での棧配置では、同じ距離間の 2 断面内での抗力は、棧の設置本数が増すにつれて増加していく (図-26)。設置角度の違いによる抗力の値の差は余り大きくないが、直角に設置した場合 (Run 1-1, 1-2) の方が、斜め設置の場合より大きな抗力の値を示した。これは先に示した水路中央線上での主流速分布、

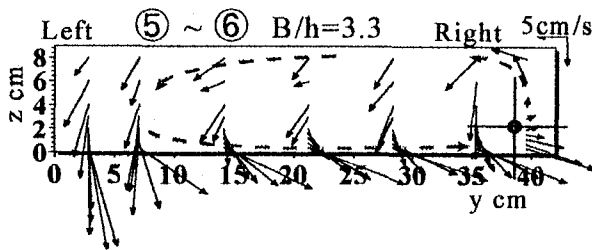


図-21 二次流ベクトル図 (Run 2-3-1)

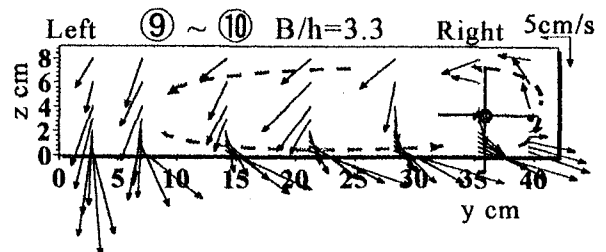


図-22 二次流ベクトル図 (Run 2-3-1)

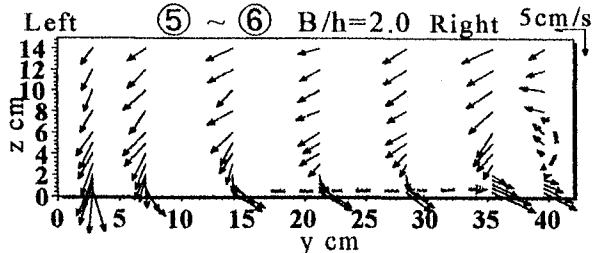


図-23 二次流ベクトル図 (Run 2-3-2)

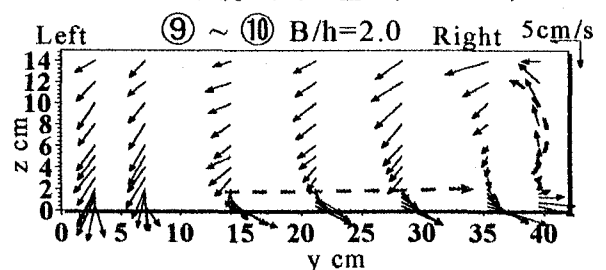


図-24 二次流ベクトル図 (Run 2-3-2)

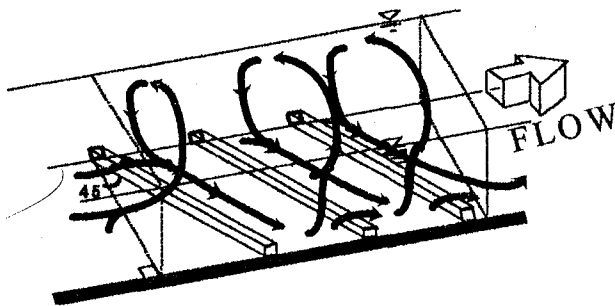


図-25 Spiral Flow 模式図

Reynolds応力分布、乱れ強度分布から判明した直角設置の方が、流れの変化に、より強く影響を及ぼすという結果と一致をする。

従って、斜めに棧粗度を設置した場合の方が流れに対する抵抗が少なく済むので、物質を流下させる目的に対して有効である。

4. 結語

隙間を設けず斜め棧粗度を複数設置すると、上昇流が誘起され、その箇所の水深も僅かであるが大きくなり横断方向に水路勾配を形成する。つまり、棧に沿った流れが右岸側壁近くで上昇し、そして表層近くで反対側へ向かう流れを生じさせ、それが次々に起こり図-25の様な螺旋流が形成される。¹⁾

この右岸側の上昇流は、主流速(u)の3~4割という大きな値をとるので、右岸側へ運ばれた底層物質がその上昇流に乗り、そして下流へと運搬される。しかし、その上昇流で運びきれないものもあるので、今回は側壁と棧との間に、隙間を設けることで解決をしようとしたわけだが、隙間を広げすぎると、右岸側での上昇流は弱くなってしまった。

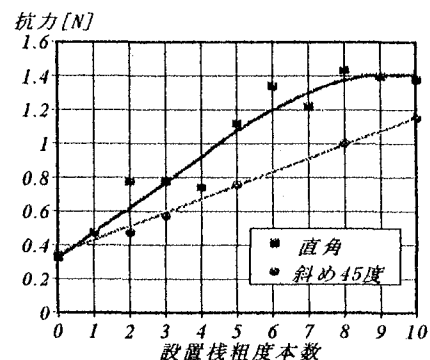


図-26 抗力と棧設置本数の関係

従って、適切な隙間(本実験からは5cm内外、つまり $y/B=0.17$ 位)を設けるなら、右岸側へ向かう強い流れは生じており、棧がない右岸側の隙間部底層での流速も所要のものが得られていることから、底層物質の下流への運搬を容易に行えるという結果を得た。今後は、実際にどれだけの物質の運搬が可能なのかを、移動床における実験を行い、検討を進めていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 宮垣圭吾, 森田優子: 棧粗度の斜め配置による開水路流れの制御, 水工学論文集, 第36巻, pp.259-264, 1992.
- 2) 井上正史, 福井吉孝, 粕谷直樹: 斜め棧粗度上の開水路流れについて, 第51回年次学術講演会, pp.232-233.
- 3) Nezu, I. and Nakagawa, H. Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.
- 4) 大本照憲, 平野宗夫, M. S. バル: 縦筋河床の三次元乱流構造について, 水工学論文集, 第33巻, pp.529-534, 1989.
- 5) 柳津家久, 阿部崇, 中川博次: 複断面水路流れの乱流構造と二次流に関する実験および数値計算, 水工学論文集, 第39巻, pp.747-752, 1995.

(1997.9.30受付)