

開水路流れの大規模乱流構造と構造物周辺の 局所流との関連について

今本博健・宇民 正・上野鉄男・日繁喜剛啓・仲井公哉

ON THE RELATION BETWEEN LARGE SCALE STRUCTURE OF TURBULENCE AND LOCAL FLOW AROUND OBSTACLES IN OPEN CHANNEL FLOW

By *Hirotake* IMAMOTO, *Tadashi* UTAMI, *Tetsuo* UENO,
Yoshihiro HISHIKI and *Kimiya* NAKAI

Synopsis

The stability and the transversal scale of secondary flows in an uniform open channel flow are examined by using the flow-visualizing techniques. Important results are obtained that the larger friction velocity brings stabler secondary flows.

The local flow just upstream side of a broad crested weir is also examined with the intention of clarifying the three-dimensional characteristics of it. It is shown that the local flow is characterized by U-shaped vortices which are arranged in a transversal direction. The scale, position, strength and fluctuation of the U-shaped vortices are measured experimentally and the results are examined to conclude that they have a close relation with those of the secondary flows in an approaching flow.

Experimental study is also made on the local scour just upstream side of an broad crested weir. The results show that the scale of the scour hole is wavy in a transversal direction due to the effect of secondary flows.

1. 概 説

開水路流れの中に設置された構造物の周辺には渦運動を含む複雑な流れが構成される。とくに渦運動は一般に接近流のもつエネルギーの一部を局所的に集中させる役割を果たすため、渦運動が発生すると非常に大きな流速や吸込みあるいは局所洗掘などがひき起され、災害の原因となりやすい。

このような構造物周辺の局所流の特性を渦度の変形の概念を基礎に解析する方法が Sqwire と Winter¹⁾, および Hawthorne²⁾ により体系化されている。しかしこの方法は変動量を微小とするいわゆる摂動法によっているため、河川工学において実際に問題となっているような構造物周辺の流れ、すなわち、局所流の流速が主流のそれに匹敵するような流れには適用できない。一方、せん断流の場に障害物があると、その前面に渦運動が生じることを指摘した解析的研究がある^{3,4)}。しかしこの研究は、二次元場における Helmholtz の渦度保存則を前提としたもので、このような二次元的な解析では渦運動は閉領域内での回転運動となってしまう、やはり渦度の集中を伴う強い渦を予測するには至らない。このような河川構造物周辺の局所流については、橋脚周辺の馬蹄型渦の発生機構についてそれが接近流中に含まれている渦度の集中によるものであるという Shen ら⁵⁾ の指摘があり、そのことを宇民⁶⁾ は実験的に検証している。

さて、上に述べたような解析方法あるいは現象理解においてはいずれにおいても接近流の平均流速分布は二次元的であることが前提となっている。しかるに、最近の可視化法による開水路流れの流況観察の結果、開水路における二次流の存在ならびにその動態が明らかになって来た。その結果、たとえば開水路段上り部

における流れのように、たとえ流れの幾何学的な境界条件が2次元적であっても、接近流中に存在する二次流のために実際に生じる流れは三次元的となる場合があることが明らかにされた⁷⁾。

そこで、本報告では、幾何学的な境界条件が基本的には二次元的である広頂堰のまわりの局所流を対象とし、その三次元的な特性を接近流中に含まれる二次流の特性との関連の下に検討した。

2. 開水路二次流の安定性に関する実験的検討

2. 1 実験の主旨

開水路流れの内には従来考えられていた程不規則的ではない性質をもつ大規模乱流構造が存在することが最近の研究により明らかにされて来ている。著者^{7,8)}らはこれらの構造について、バッファー層内では馬蹄型渦がランダムに発生し、それより外の領域では馬蹄型渦の作用が総合化されて二次流が組織されるといったモデルで説明している。このような乱流構造によって、Photo. 1 に示されているように流下方向流速成分の横断方向分布にくびれが生じる。それは水路近くでは間隔も狭くしかも比較的不規則的に発生しているが、水路床から離れるにつれてその平均間隔も広がってその位置にも規則性が出てくる。Kline⁹⁾らは粘性底層およびその近辺におけるこのくびれの現象を low-speed streaks と呼んでいるが、上記のようにこのくびれは水路床近くとそこから隔った所とは発生機構において若干の差はあるものの水深のほとんど全域にわたって生じている。本報告ではこれを低速部 (low-speed band) と総称することとする。

ところで、河川工学において取扱いの対象となるような比較的レイノルズ数の高い流れにおいては、概してまさつ速度も大きいため、バッファー層の厚さは薄くなり、流れの殆んど全域にわたって二次流が発達していることになる。したがって、横断方向に水理学的に一様な性質をもつ水路においても、もしそこで二次流が安定的に発達するならば、先述の低速部が安定化することとなるから、ある地点では常に大きな流速が通過し、またある地点では常に小さな流速が通過することとなる。このような流れの横断方向の変動特性は流れの中におかれた構造物周辺の局所流に影響を与えるであろうことが当然予想される。そこで、本節ではまず一様な開水路流れにおける大規模乱流構造とりわけ二次流のスケールと位置およびその安定性を明らかにする目的で、先に述べた低速部の間隔ならびに位置の変動特性を各種の水理条件ならびに水路床条件の下で検討した。

2. 2 実験装置および方法

実験に用いた水路は宇治川水理実験所に設置されている長さ 12 m、幅 40 cm、深さ 25 cm の透明アクリル樹脂製直線循環式水路であって、水路底面および側面からの流況観測および照明が可能である。路床勾配は任意に設定することができるが、本実験では1/1000と一定にしている。

実験によっては粗面路床を用いた。そのためには、標準ふるいによりほぼ一様粒径とした砂粒を長さ 1.2 m、幅 39.5 cm、厚さ 0.4 cm の鉄板にペイントによりはりつけ、流れの可視化を容易にするために表面を黒く塗装したものをを用いた。砂粒径 d_s は 0.3 cm および 0.6 cm の2種類を用いている。また、従来の研究成果⁸⁾を参考に、二次流を規制する場合には路床に棧粗度 (断面 3 mm×3 mm の真鍮の角棒) を流下方

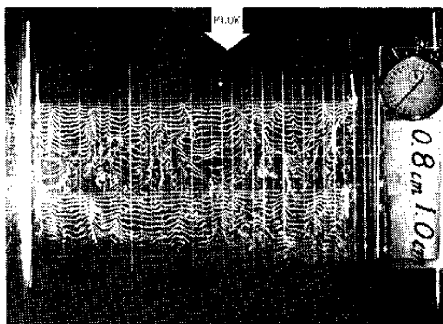


Photo. 1 Structure of the flow near the channel bed visualized by hydrogen bubble method.

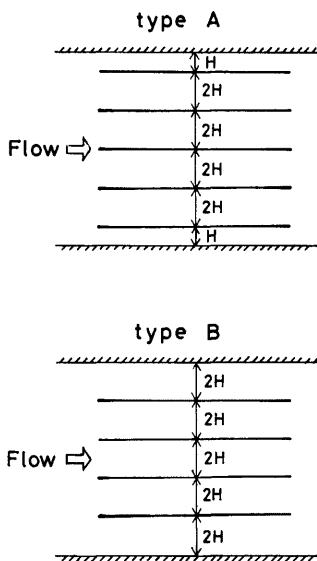


Fig. 1 Type of arrangement of longitudinal roughness elements.

向に平行に設置した。棧粗度の配列は Fig. 1 に示されるような 2 種類のタイプを用いた。すなわち、type A では側壁から水深 H の奇数倍の距離に棧を置いてあり、type B では H の偶数倍の所に置いてある。

流況の観測および流速計測は水素気泡法を用いて行なわれた。すなわち、陰極の白金線に 5 ないし 10 Hz のパルス状直流電圧をかけて水素気泡列を発生させ、場合に応じてそれを水路上方、水路側方あるいは水路床下方の固定点よりモータードライブカメラを用い連続撮影している。撮影時間および時間間隔については流れに含まれる大規模乱流構造の動態もとらえることができるように考慮した結果、ほとんどの実験ケースについて 1 秒に 1 回ずつ 30~40 回連続撮影することとしている。

摩擦速度 U_* を求めるには各種の方法があるが、本実験では水路下流端をせき上げているため、エネルギー勾配 I_0 より算出した。すなわち、横断方向に 3 点、縦断方向に計測区間を含む 6 m の区間の水深を計測し、その結果から I_0 を求めた。なお、流体としては水素気泡法を使用する上で電気伝導度を高める必要があるため、水に酸化ナトリウムを

Table 1 Hydraulic conditions for the experiment on the large scale structure of turbulence in an uniform open-channel flow.

Case	Q (l/sec)	H (cm)	U_m (cm/sec)	R_e	U_* (cm/sec)	R_*	d_s (cm)	Type of bed
C-1	1.55	4.06	9.54	3050	0.74	237	smooth	N
2	1.55	4.06	9.54	3050	0.74	237	smooth	A
3	1.55	4.06	9.54	3050	0.74	237	smooth	B
4	2.55	6.62	9.67	5040	0.93	487	smooth	N
5	0.80	3.98	4.93	1580	0.61	185	smooth	N
6	1.56	4.09	9.54	3070	0.79	254	0.3	N
7	1.56	4.09	9.54	3070	0.79	254	0.3	A
8	1.56	4.09	9.54	3070	0.79	254	0.3	B
9	1.56	4.12	9.49	3080	0.88	285	0.6	N
10	1.56	4.08	9.56	3070	0.88	283	0.6	A
11	1.56	4.10	9.51	3070	0.88	284	0.6	B
12	4.05	5.05	20.05	10125	1.33	672	smooth	N
13	4.05	5.30	19.10	10125	1.85	981	0.6	N

Q =Discharge

H =Depth

U_m =Mean Velocity

R_e =Reynolds Number

U_* =Friction Velocity

R_* =Friction Reynolds Number

d_s =Grain Size

Type N : No longitudinal roughness elements

Type A, B : As shown in Fig. 1

適量混合している。本節で用いた水理条件は **Table 1** にまとめられている。

なお、座標系として水路上流端の水路床中心位置に原点をおき、流下方向に x 軸、横断方向に y 軸、鉛直上方に z 軸をとっている。また砂粒粗度をつけた場合については、砂粒をはりつけている水路床の鉄板表面から水面までの距離を水深 H としている。

2. 3 低速部の横断方向の平均間隔

Fig. 2 は滑面上の流れに関して可視化計測より得られた低速部の間隔 λ の平均値 $\bar{\lambda}$ と路床からの高さ z との関係を示したものである。ここで λ_* および z_* は $\bar{\lambda}$ および z を内部パラメータである U_* と ν とによりそれぞれ無次元化したもので、 $\lambda_* = U_* \cdot \bar{\lambda} / \nu$ および $z_* = U_* \cdot z / \nu$ である。また、図中の R_* は摩擦レイノルズ数 $U_* \cdot H / \nu$ である。この図より、 z_* が小さい場合 λ_* は $\lambda_* \approx 100$ に近づく傾向が認められ、low speed streaks に関する従来の検討結果⁹⁾と一致する。しかし、 z_* が大きくなるといづれの R_* あるいは R_* においても $\bar{\lambda}$ は増加する傾向がみられ、また、 R_* あるいは R_* の増加に伴い λ_* は急速に大きくなるようすがうかがわれるが、中川ら¹⁰⁾も同様な傾向を見出ししている。とくに本図からは λ_* は R_* とよりも R_* との相関性が大きいことが認められる。

つぎに、外部パラメータである H を用い、 $\bar{\lambda}/H$ と z/H の関係を示すと **Fig. 3** のようになる。これより、 $\bar{\lambda}$ は4種の R_* の流れのいずれにおいても水深方向に増大していることが明らかであり、また、 R_* による差異もあり認められない。半水深程度から上方では低速部が不明瞭となって $\bar{\lambda}$ の読み取りに誤差を含むことを考慮しても、この図のほうが先の図よりばらつきが少ないと言える。

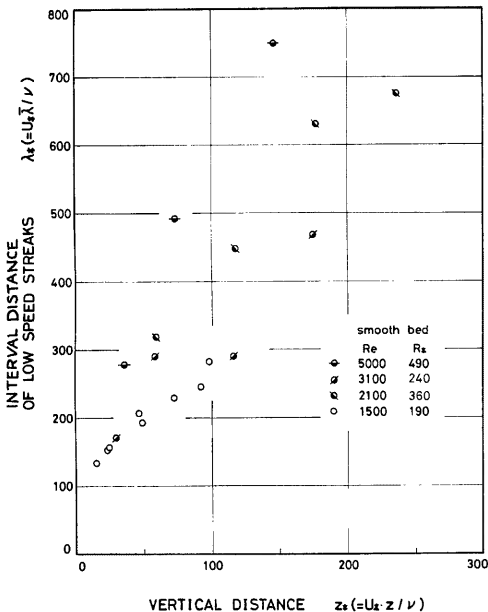


Fig. 2 Mean interval distance between low-speed bands (flow over smooth bed).

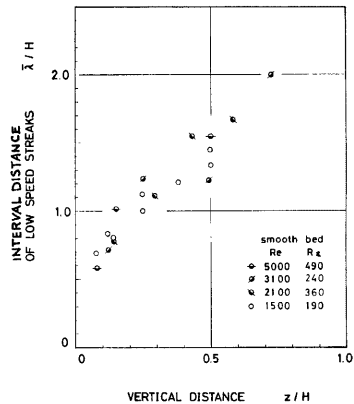


Fig. 3 Mean interval distance between low-speed bands (flow over smooth bed).

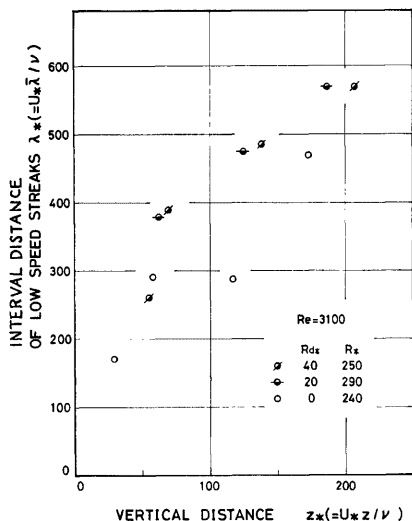


Fig. 4 Mean interval distance between low-speed bands (flow over rough bed).

以上の検討より、 λ は粘性底層およびその近傍では内部パラメータにより規定されるが、バッファー層およびそれより外の領域ではむしろ H という外部パラメータにより支配されるようになり、バッファー層は λ に関しても文字通り遷移領域に相当していると言えよう。

つぎに、粗面上の流れについて検討する。**Fig. 4** および **Fig. 5** は同一の流量 Q および水深 H のもとで、路床が滑面の場合、 $d_s = 0.3 \text{ cm}$ の粗面の場合および $d_s = 0.6 \text{ cm}$ の粗面の場合のそれぞれの流れにおける λ の水深方向変化を、先と同様に内部パラメータおよび外部パラメータにより無次元化して示したものである。図中で d_s は内部パラメータにより無次元化されて $R_{ds} (= U_* d_s / \nu)$ で表示されており、 $R_{ds} = 0$ は滑面を表わす。なお、この水理条件下では 2 種類の粗面は不完全粗面である。

これらの図より、粗面上の流れにおいても水路床面から離れる程 λ が増加する傾向がみられ、滑面上の流れと共通していることが知れる。また、同じ z_* の値に対して R_{ds} が大きいほど λ_* も大きくなる傾向がこの場合も認められる。

このように、 λ は底面粗度の有無にかかわらず水路床面から離れた位置における程大きくなる傾向が見出された。低速部は上昇流を伴っていることを考えあわせると、このことは、低速部の流体が上昇しながら集合して行くかあるいは上昇するにともなって低速部が消滅することを意味している。

2. 4 低速部の横断方向分布

二次流の安定性に関する一つの指標を得るため、水路横断方向の各位置 y における低速部の発生頻度を検討した。すなわち、1 秒に 1 回づつ 40 回にわたって流況を水素気泡法によって連続写真撮影し（陰極は水路横断かつ水平方向に設置）、えられた 40 枚の写真のうちある地点 y に関しては $y - 0.5 \text{ cm}$ から $y + 0.5 \text{ cm}$ の帯状の間に低速部が発生している写真の枚数 n を求めた。 y を 0.5 cm づつずらしながら各 y 毎に n をこのようにして求め、測定範囲（ $-10 \text{ cm} < y < 18 \text{ cm}$ ）における n の横断方向の総計を N とするとき、 n/N は低速部の相対的な発生頻度と言える。各種の流況と水路床条件の下で n/N を求めて **Fig. 6** に示した。ここで各実験ケースにおける水理条件と水路床の状況は **Table 1** に示した通りであるが、その概略は各図面

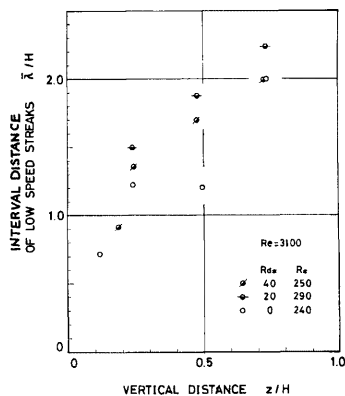
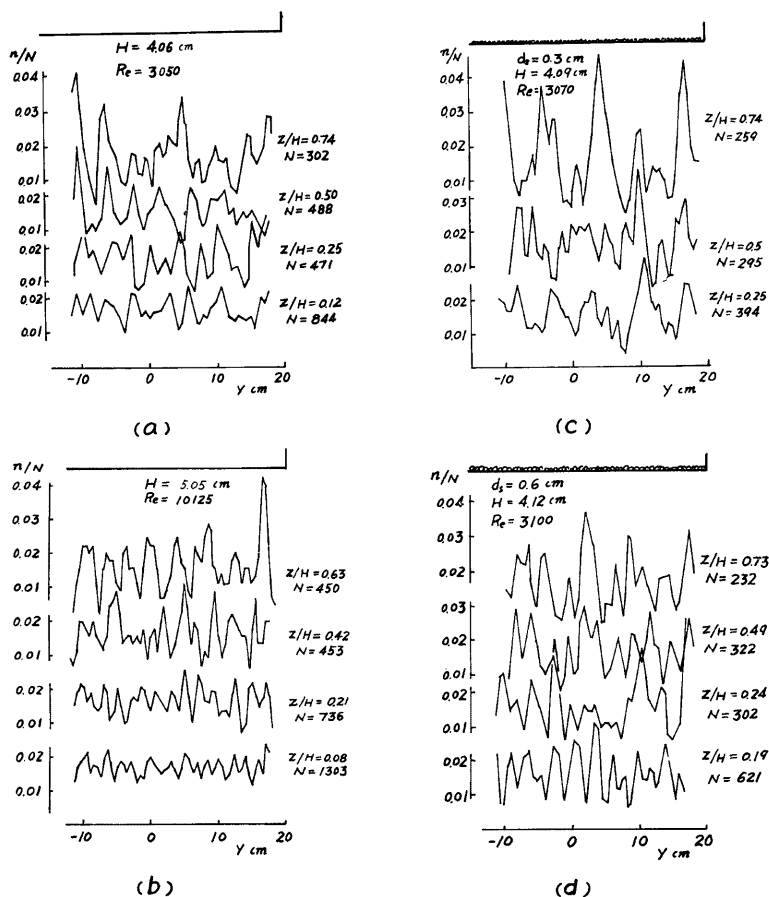


Fig. 5 Mean interval distance between low-speed bands (flow over rough bed).



の上方にも示してある。

Fig. 6 (a) は $H = 4.06 \text{ cm}$, $Re = 3050$ の滑面上の流れについて低速部の横断方向の相対頻度分布を示したものである。本図において、水路床に近い $z/H = 0.12$ では低速部は横断方向にほぼ一様に発生しているが、 z/H が大きくなるにつれて相対頻度の高い位置および低い位置がみられる。しかもそれらピークの横断方向の位置は観測地点の高さ z によって異っている。これは、低速部の位置が時間と共に不規則的に変動するが、その変動の時間スケールが底面近くでは観測時間40秒より充分小さいため分布曲線がほぼ一様になったのに対し、 z/H が大きい所ではその時間スケールが大きくなったためピークが出たものと考えられる。

Fig. 6 (b) は同じく滑面水路床の場合で、 Re を 10125 と比較的高くした場合の相対頻度分布を示している。本図でも $z/H = 0.08$ では分布曲線はほぼ一様であるが、 $z/H \geq 0.21$ では低速部が集中する所とそうでない所がかなり明瞭になってくる。しかもそのような集中する位置は z/H が変わってもそれほど変化しておらず、その横断方向の間隔はほぼ水深のオーダーとなっている。以上から、 Re が大きい流れの方が二次

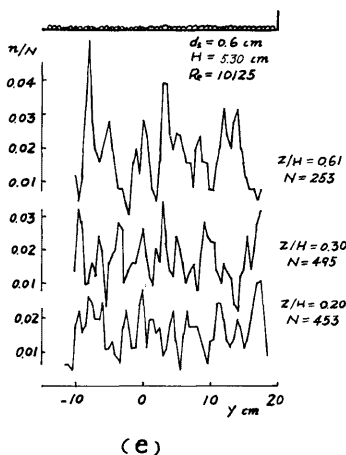


Fig. 6 Distribution of occurring frequency of low-speed bands.
(Flow over smooth and rough bed).

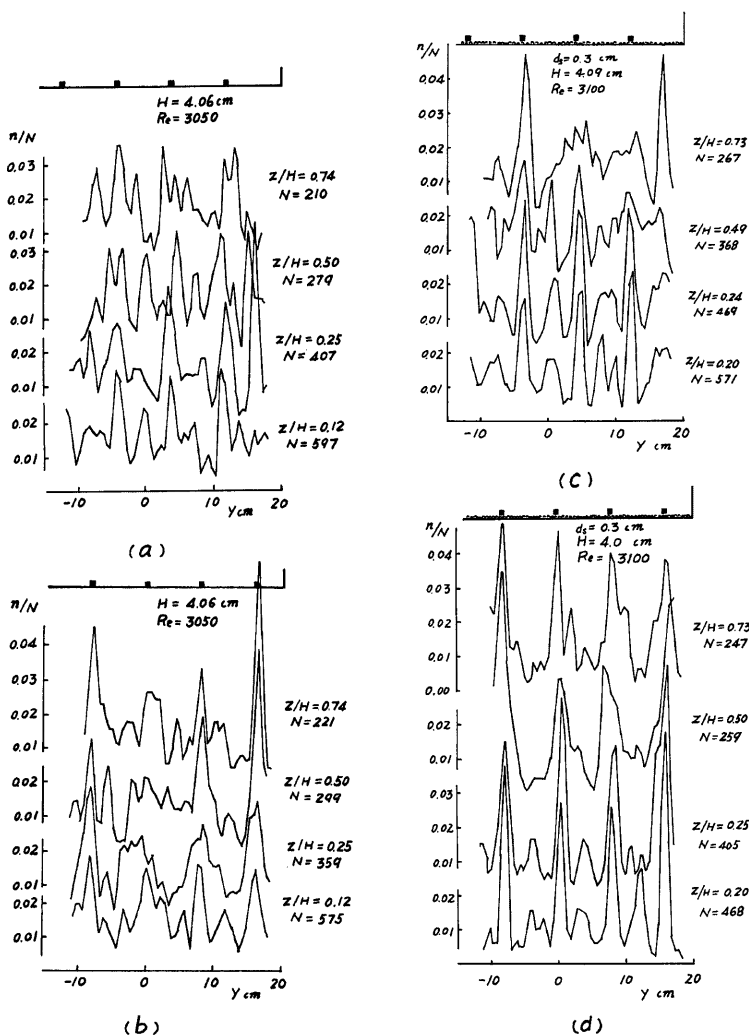
流の安定性がよいのではないかという検討課題が得られる。高い R_b の流れにおけるほど二次流が安定することは村本ら¹²⁾ も指摘している。また木下¹³⁾ は実験水路における二次流は洪水流における二次流ほど安定していないことを指摘している。

そこで、水深および R_b が (a) の場合とほぼ同じであるが、水路床面にそれぞれ平均粒径 0.3 cm の砂粒と 0.6 cm の砂粒を敷きつめた状態で実験が行なわれた (c) と (d) の場合における相対頻度分布について次に検討しよう。本図でもやはり z/H の増加にともなって分布曲線に波状にピークが表われるという傾向が明らかであり、しかもそのピークの間隔は、大きなピークがほぼ $2H$ の間隔で存在してその中間に比較的小さなピークがあるという型態となっていることがわかる。同様に (e) は (b) と同じ R_b であるが、水路床に (d) と同じ平均粒径 0.6 cm の砂粒を敷きつめた場合の流れにおける低速部の相対頻度分布である。本図においては、先に (c) と (d) について述べた頻度分布のピーク位置の特徴がますます明確に現われている。すなわち、水路側壁面から $H, 3H, 5H, \dots$ の位置に頻度分布の比較的大きなピークがあり、その中間の位置に比較的小さなピークがある。

以上の実験事実は、同じ R_b の流れでも滑面水路床より粗面水路床上の流れにおける方が二次流は安定し、その低速部の位置は水路側壁面から $H, 3H, 5H, \dots$ となることを明らかにしている。以上から開水路二次流の安定性に寄与しているのは R_b の高さよりもまさつ速度の大きさであるといえよう。実際、著者ら¹⁴⁾ は開水路の粗度係数についての実験結果を自らのモデルに基づいて検討し、その結果、まさつ速度が大きいことはエネルギー逸散が大きいことを意味し、それは強い馬蹄型渦が頻繁に発生していることを意味することを考察として述べた。ところで、このような強い馬蹄型渦の頻繁な発生は二次流の安定的な発達を促す訳だから、この考察は上記の実験結果と一致している。

さて、著者ら⁸⁾ および木下¹³⁾ は、粗度要素を適当に配置することによって二次流の発達をある程度制御できることを示した。ここではその結果に基づいて、3 mm×3 mm の正方形断面をもつ真鍮棒を流下方向に向けて平行に並べることにより二次流の安定性を検討した。Fig. 7 (a)~(f) はその実験結果を示したものである。各実験ケースの水理条件は各図面の頂部に記入されているが、各ケースにおける水深と R_b はほぼ等しく、水路床の粗滑と棧の配置が互に異なるように設定してある。棧の配置としては Fig. 1 の Type A と Type B の二種類を用いている。

まず滑面上に棧を B 型に配置した (a) 図について見てみると、この図では頻度分布が集中してピークを示



す位置は棧の位置とその中間の位置の両方となっており、その集中度合いもそれぞれ大きくないことがわかる。これは、安定的な二次流の配置にともなう低速部と、棧によって強制的に作られた低速度部とが共存し、結果的には二次流がそれほど安定していないためと考えられる。(b) 図では棧の配置はA型で、二次流の安定条件と一致しているので、棧の位置における頻度はかなり高くなっている。

次に (c) 図と (e) 図は水路床面にそれぞれ平均粒径 0.3 cm および 0.6 cm の砂礫をしきつめ、その上にB型に棧を配置したものである。本図の場合、棧の配置は二次流の安定的な配置位置とずれているが、頻度

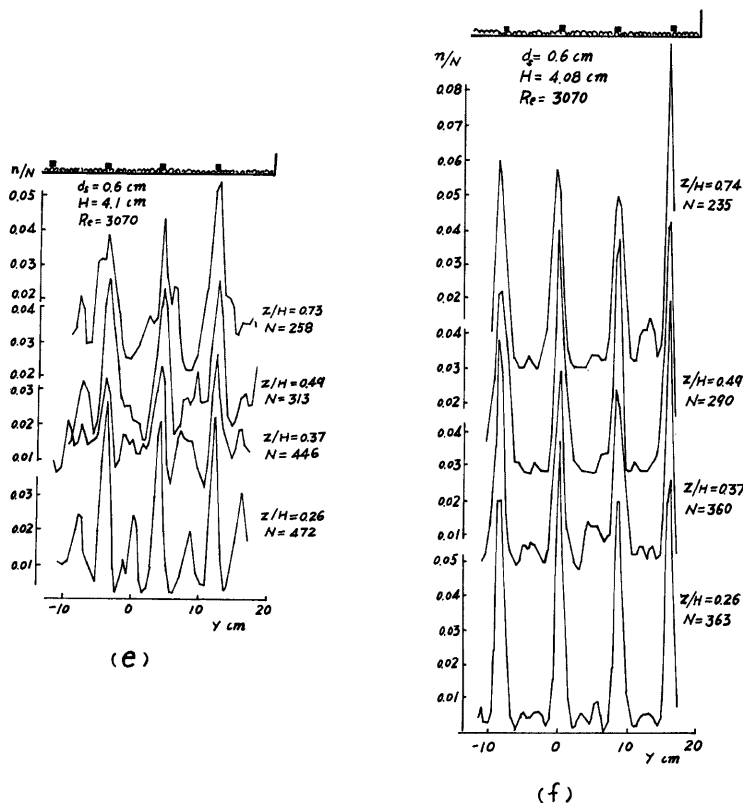


Fig. 7 Distribution of occurring frequency of low-speed bands.
(Flow over the bed with longitudinal roughness elements).

分布の集中位置は棧の位置と一致しており、しかもその集中の度合は (b) 図の場合よりむしろ大きいといえる。このことから、まさつ速度が増大すると馬蹄型渦の強さと発生頻度が増大させられること。また棧はそのような馬蹄型渦の作用を組織化して二次流をひき起す上で非常に有効であることがわかる。したがって、本図と同じ条件で棧の位置を A 型に配置した場合には二次流の安定性はより一層大きくなるであろうことが予測される。(d) 図と (f) 図とはそのような条件の下

での実測結果であるが、予想どおり二次流が安定的に発達していることが明確に認められる。

以上の諸検討結果から、二次流が安定的に発達する場合の流れの横断面内の流況は概略 Fig. 8 のように表現されよう。この結果は、幅の広い開水路流れにおける二次流の配置に関する池田¹⁵⁾の考察とほ

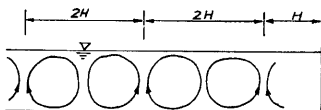


Fig. 8 Schematic flow pattern in the transversal cross-section of a flow in which secondary flows develop stably.

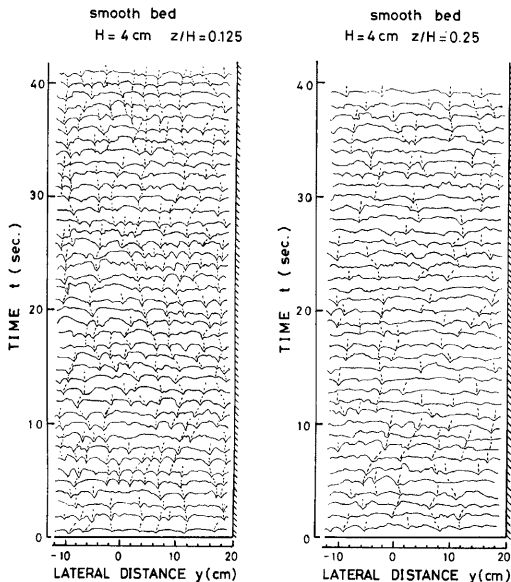


Fig. 9 Distribution of low-speed bands in time-space plane (flow over smooth bed).

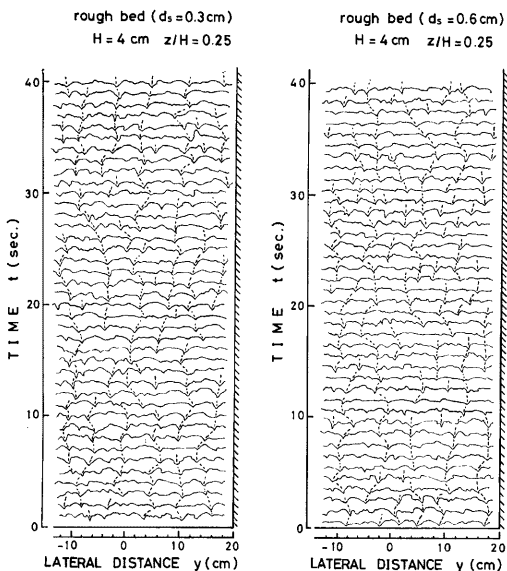


Fig. 10 Distribution of low-speed bands in time-space plane (flow over rough bed).

ば一致している。

(3) 低速部の時間的な変動特性

低速部の連なりおよび変動を検討するため、 $H=4.1$ cm、 $R_s=3100$ の滑面上の流れのようすを固定点から1秒ごとと40秒間連続写真撮影し、得られた各瞬間における流速分布をずらして並べたものが Fig. 9 (a)(b) であり、Fig. 10 (a)(b) は同水理条件で $d_s=0.3$ cm および $d_s=0.6$ cm の粗面上の流れの場合を示したものである。図中の縦方向にのびた破線は低速部の位置を時間軸方向に結んだものであり、時間的な変動をみることができる。Fig. 9 の (a) についてみると、低速部にはすぐ消滅するものと比較的長く続くものが混在しており、隣りあう低速部の間隔は一定ではないことが認められる。Fig. 9 (b) では、低速部の絶対数が(a)より少く、また、長く続くものがみられなくなる。一方、Fig. 10 の場合には低速部の長く続くものが Fig. 9 (b) と比較して多く、それらの間隔がほぼ水深の2倍に相当していることが注目される。

3. 固定床水路における広頂堰前面の局所流

3. 1 実験の主旨

Photo. 2 は段上り高さ $z_0=4$ cm、 $H=6.7$ cm、 $R_s=1990$ の条件のもとで、段上り部前面の流況を水素気泡法を用いて可視化した一例を示したものである。この写真より、段上り部前面では渦が形成されているが、横断方向に渦軸はつながっておらず、ところどころで渦軸が立ち上りU字型を示しているのが認められるが、このU字型の渦は固定したものではなく左右に変動し、時には隣接した渦と合体したりあるいは新たに発生したりするものであり、これらの運動は Fig. 11 に示されるように接近流の低速部の変動と対応しているようであることが、一連の観測から認められた。この渦はすでにU

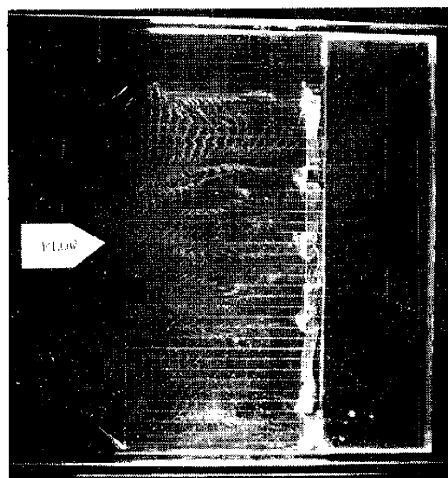


Photo. 2 Structure of the flow around the up-stream side of an abrupt step-up.

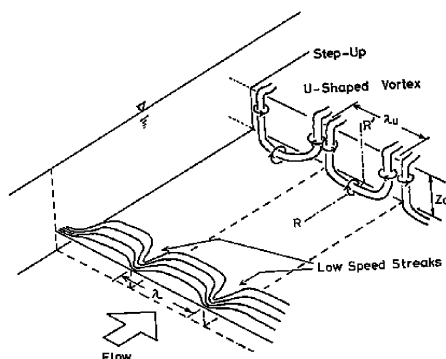


Fig. 11 Schematic view on the relation between U-shaped vortex before an abrupt step-up and low-speed bands in an approaching flow.

Table 2 Hydraulic conditions for the experiment on the U-shaped vortex just upstream side of an abrupt step-up.

Case	Q (l/sec)	H (cm)	U_m (cm/sec)	R_s	U_* (cm/sec)	R_*	z_0 (cm)
A-1	0.79	4.01	4.93	1510	0.60	183	2
2	0.80	3.98	5.03	1580	0.61	185	1
3	0.78	4.00	4.89	1540	0.62	195	0.5
4	1.12	6.90	4.06	2110	0.69	360	5
5	1.13	6.89	4.10	1990	0.79	383	4
6	1.13	6.84	4.13	1990	0.79	380	3
7	1.13	6.85	4.12	2000	0.80	389	2
8	1.13	6.82	4.14	2000	0.80	386	1
9	1.14	5.19	5.49	2020	0.69	254	3
10	1.13	5.14	5.50	2000	0.70	255	2
11	1.13	5.14	5.50	2000	0.71	259	1
12	1.15	5.12	5.61	2040	0.73	265	0.5
13	0.61	4.10	3.71	1180	0.54	171	3
14	0.63	3.91	3.91	1110	0.53	150	3
15	0.63	3.91	3.91	1110	0.52	149	3

字型渦と名付けられ、低速帯との対応が推測されている⁷⁾。本節では段上り部前面の局所流を特徴づける U 字型渦のスケールおよび U 字型渦と接近流の低速部との対応性について検討する。なお、U 字型渦のスケールは Fig. 11 に示すように U 字型渦の境界間の距離 λ_u で表現することとする。

なお、実験装置としては 2.2 で述べた水路の巾一杯に広頂堰をとりつけたものを用いた。その流下方向の

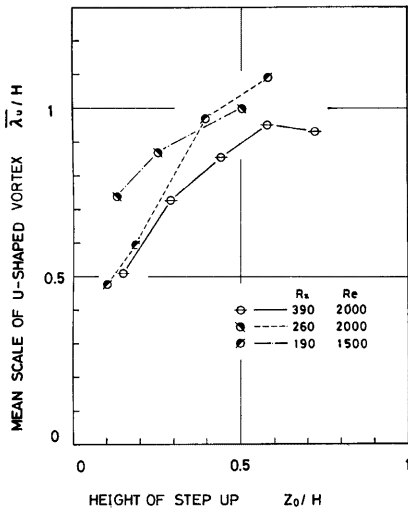


Fig. 12 Mean scale of U-shaped vortex.

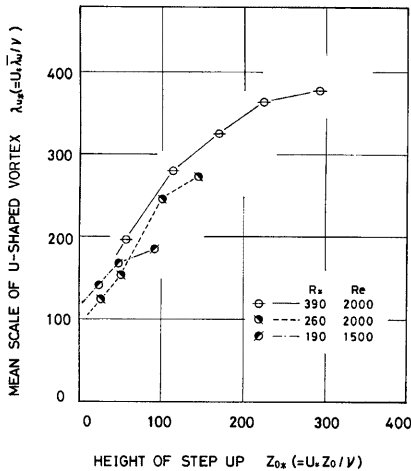


Fig. 13 Mean scale of U-shaped vortex.

z_0 が大きくなると内部パラメータにより一義的に規定されなくなることを意味している。これは接近流中の低速部の平均スケール $\bar{\lambda}$ の特性と類似した特性である。

このように、広頂堰の高さ z_0 は水路横断方向に一樣であるにもかかわらず U 字型渦が形成され横断方向に現象が変化し、その横断方向のスケールも広頂堰の高さとともに変化するという特性が見出された訳であるが、これらに物理的に妥当な説明を与えるためには、接近流の構造との関係を明らかにする必要がある。

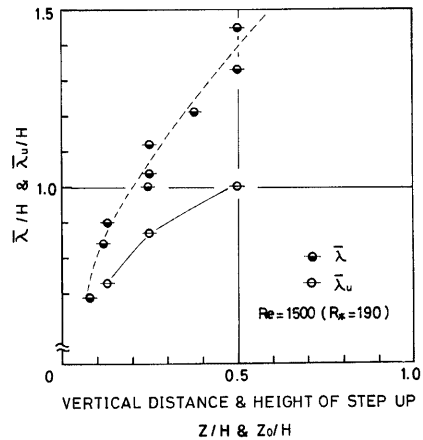


Fig. 14 Relation between mean scale of U-shaped vortex and mean interval distance between low-speed bands.

巾は 10 cm であり、その高さはアクリル樹脂板を積重ねることにより任意に変えられるようにした。本節における実験条件は Table 2 に示されている。

3. 2 U字型渦のスケール

Fig. 12 は 3 種の R_* の流れに関して、広頂堰の段上り高さ z_0 と U 字型渦の平均スケール $\bar{\lambda}_u$ とをそれぞれ H で割って無次元化して示したものである。これより、いずれの R_* の流れにおいても z_0/H が増加するにつれ $\bar{\lambda}_u/H$ も増加する傾向があることが認められる。また、Fig. 13 は同じく z_0 と $\bar{\lambda}_u$ とを接近流の内部パラメータを用いて無次元化した量 $\lambda_{u*} = U_* \cdot \bar{\lambda}_u / \nu$ および $z_{0*} = U_* \cdot z_0 / \nu$ の関係を示したものである。本図から z_{0*} が小さくなるにつれ、 R_* に関係なく急速に $\lambda_{u*} \approx 100$ に近づくようすが見出されるが、 z_{0*} が大きくなると R_* により λ_{u*} は異った増加傾向を示すことが認められる。このことは、 z_0 が粘性底層の厚さのオーダーになると $\bar{\lambda}_u$ は内部パラメータに規定されるが、

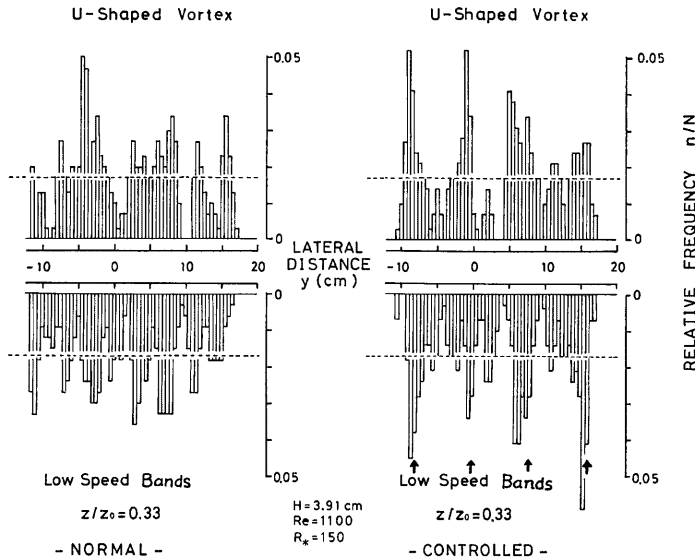


Fig. 15 Relation between the distribution of occurring frequency of low-speed bands and that of U-shaped vortex.

と思われる。

Fig. 14 は広頂堰を設置しない場合の $H=4$ cm, $R_e=1500$ の一様な開水路流れにおける低速部の平均的な間隔 λ の無次元量 λ/H と z/H の関係、ならびに同じ水理条件で広頂堰を設置し、その高さ z_0 を変化した場合における U 字型渦の平均的なスケールの無次元量 λ_w/H と堰の高さの無次元量 z_0/H との関係を同時に示したものである。これより、 λ_w は広頂堰の高さの位置に対応する地点 ($z=z_0$) の λ より小さいことが見出される。また、ある z_0 に対応する λ_w の値はその z_0 のほぼ $0.4 \sim 0.5$ 倍に等しい高さ ($z=0.4 \sim 0.5 z_0$) の λ の値とほぼ一致することが認められ、このことは λ_w が z_0 の $0.4 \sim 0.5$ 倍の地点の接近流の構造に規定されることを意味している。

3. 3 U字型渦の位置

槽粗度を type A に配列すると接近流の低速部の分布が槽粗度の位置に集中するという **2. 4** の結果を応用し、低速部と U 字型渦の境界の位置の対応性を通常の場合 (normal) および槽粗度による場合 (controlled) についてそれぞれの横断方向の相対頻度分布より検討したものが **Fig. 15** である。なお、 $H=3.9$ cm, $R_e=1100$, $z_0=3$ cm であり、低速部の計測位置は $z=1$ cm の地点であって、図中の矢印は槽粗度の配列位置を示している。

通常の場合、低速部のふらつきにより相対頻度分布においても相対頻度の高い区間および低い区間が明瞭に現われていないが、 U 字型渦の境界の相対頻度の高い位置は低速部のそれとほぼ対応しているのが認められる。一方、槽粗度で規制された場合には、低速部の分布が槽粗度の位置に集中して発生すると U 字型渦の境界もそれにほぼ対応した位置に集中している。これらのことより、 U 字型渦の境界すなわち渦軸の立ち上り部分と接近流の低速部とは対応するものであると言え、**Fig. 12** の模式図のようになるものと考えられる。

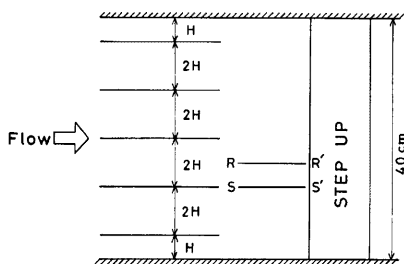


Fig. 16 Arrangement of longitudinal roughness elements and the measuring section.

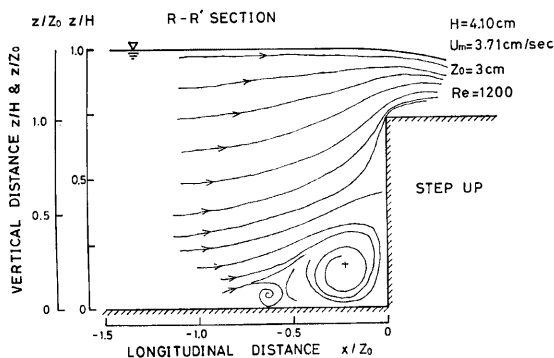


Fig. 17 Flow patterns in the vertical section passing R-R'.

らえることは難しいため、Fig. 16 に示すように路床に機粗度を type A に配列して 2 次流を安定させ、それによって U 字型渦も位置的に安定させるという手法を用いて、R-R' および S-S' の 2 断面で計測を行なっている。なお、水理条件は $H=4.1$ cm, $Re=1200$, $z_0=3$ cm である。

Fig. 17 は R-R' 断面における流線のパターンを示したものである。流線は段上り前面において急激に水面方向に曲げられ、 $z/z_0=0.3$ より上方の流線は段上り頂部に向い、 $z/z_0=0.3$ より下方の流線は渦の内部に吸い込まれるようすが把握される。また、渦は 1 つではなく、規模の大きな主渦とその前方にそれと回転方向が同じで規模の小さい副渦が存在している。

以上より、渦を構成する流線は主流から連なっているという重要な特性が見い出された。これは堰前面の渦を形成する流体は主流から供給されており、2 次元的な渦と異なることを意味する。さらに、主渦や副渦が存在して複雑な流況を呈する広頂堰前面の流況を、流線の単純な剝離現象としてとらえるのは困難であることが知れる。

Fig. 18 は実測された流速分布より計算された R-R' 断面での y 方向の渦度成分 $\omega_y (= \partial U / \partial z - \partial W / \partial x)$, U : 流速の x 方向成分, W : 流速の z 方向成分) と、同じ断面内の接近流の U および ω_y の分布を示したものであり、Fig. 19 は同じく流速分布より計算された R-R' 断面での 2 次元発散 $(-\partial U / \partial x - \partial W / \partial z)$ の分布を示したものである。

以上の検討より、広頂堰前面の U 字型渦の渦軸の立上り部分は、広頂堰の段上り高さ z_0 の約半分の高さにおける接近流の低速部に対応していることが明らかになった。ただ、その高さにおける低速部の強さすなわちそこでの上昇流の大きさとか流下方向流速成分の欠損の大きさがどれほどになれば U 字型渦の渦軸の立上りが形成されるに至るかといった定量的な問題は今後の検討課題である。

Fig. 12 において λ_w/H の値が大きくてせいぜい 1.0 であり、2 次流の横方向のスケールが水深のほぼ 2 倍であることを考慮するとこの値は一見小さいように見えるが、その理由は上の結論から明らか

である。すなわち、Fig. 12 の R_s がいずれも小さいため広頂堰の高さ z_0 の約半分の高さにおける接近流の低速部の間隔が $2H$ に達していなかったためと考えられる。したがって、まさつ速度の大きな流れにおいては λ_w/H はほぼ 2.0 に達するであろう。

3. 4 広頂堰前面の局所流の内部構造

この節では広頂堰前面の局所流の内部構造について、U 字型渦に注目して検討を行なう。2・3 で述べたように U 字型渦は変動し、通常の状態ではその内部構造をと

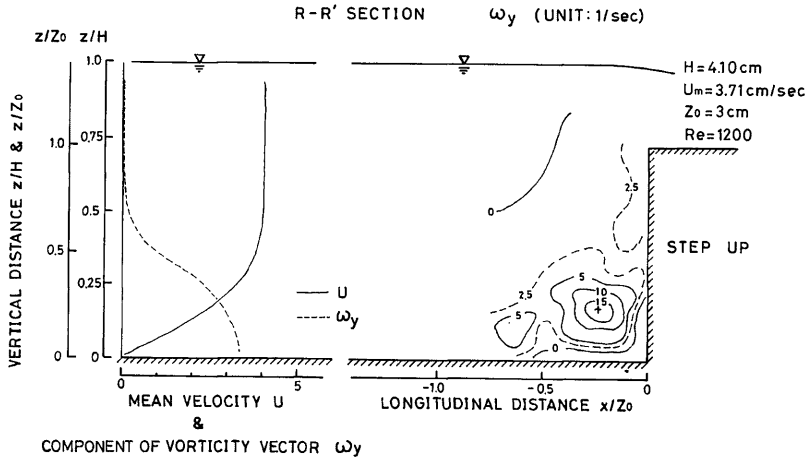


Fig. 18 Distribution of y-component of vorticity.

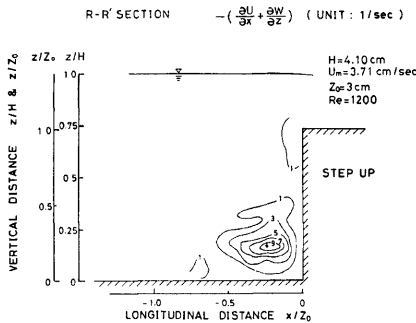


Fig. 19 Distribution of two-dimensional divergence.

ω_y は渦軸に近づくに従って急激に増大し、その値は接近流の ω_y と比較してもかなり大きな値となっている。このことと前述した流線の特性より、広頂堰前面に生ずる渦は接近流中に存在する渦度が広頂堰という障害物により集中せられた結果生ずると言える。また、2次元発散の値も渦軸近傍で急激に大きくなっており、渦軸近傍でこの断面に対して垂直な方向に強い流出のあることを示している。

以上より、段上り部前面に形成される渦は接近流のうち路床近傍の部分を巻き込むことにより構成されており、その巻き込みの過程は接近流中に存在する渦度が段上りという障害物により集中せられる過程と一致し、また、渦糸が巻き込まれると同時に伸

長させられるので、渦中の流体は軸のまわりを回転しながら軸方向に移動するものと考えられる。このような機構は橋脚前面の馬蹄型渦と同種であり、横断方向に一樣な段上り部であっても局所流はこのような3次元構造を示すことは注目すべきことと言える。

つぎに、 $S-S'$ 断面の流線のパターンを示すと Fig. 20 のようである。 $S-S'$ 断面は U 字型渦の渦軸の立ち上り部分に相当する断面であり、流線形状は Fig. 17 とは様相を異にしている。すなわち、 $x/z_0 = -0.8$ から流線は剥離して広頂堰頂部を越えて行くようすが認められ、その内部の流線も閉じたものとはならず広頂堰頂部から抜けて行くものと思われる。

$S-S'$ 断面の剥離流線より内部の領域については、流速の空間的・時間的変動が大きく水素気泡が散らばるため、詳細な計測を行なうに至らなかったが、以上の考察をもとに U 字型渦を形成する流線の概念図を示すと Fig. 21 のようであると考えられる。図で示されるように、 $R-R'$ 断面付近で巻き込まれた路床

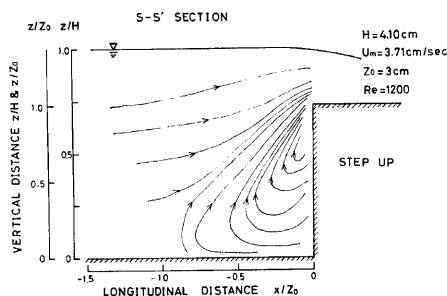


Fig. 20 Flow patterns in the vertical section passing S-S'.

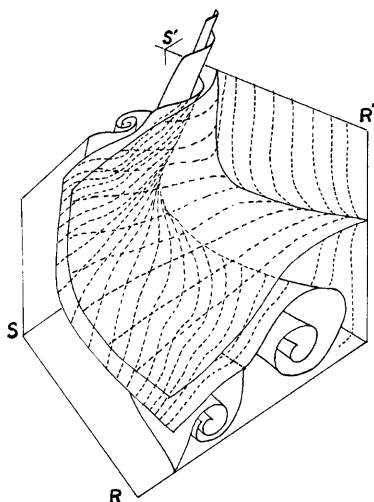


Fig. 21 Conceptual view of three-dimensional flow patterns around the upstream side of an abrupt step-up.

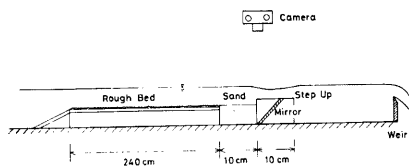


Fig. 22 Experimental set-up for the observation of local scour.

近傍の流体はらせん運動をしながら水路横断方向に移動し、渦輪の立ち上る S-S' 断面から広頂堰の頂部に放出されるものと考えられる。

4. 広頂堰前面の局所洗掘に關する検討

4. 1 実験の主旨

以上の固定床における実験的検討より、広頂堰前面に生じる局所洗掘においても接近流中の大規模乱流構造との関連により横断方向に変化が生じるのではないかと予測される。本節では、そのような局所洗掘の水路横断方向の変化に注目して若干の実験的検討を行なう。

4. 2 実験装置および方法

実験水路としては宇治川水理実験所に設置された計測部分 1 m をアクリル樹脂とした長さ 5.65 m, 幅 40 cm, 深さ 30 cm の木製水路と長さ 16 m, 幅 1 m, 深さ 30 cm のアクリル樹脂製の水路の 2 本を用いた。いずれも長方形断面直線循環式水路であり、路床勾配は本実験では 1/1000 としている。

広頂堰の模型は長さ 40 cm, 幅 10 cm, 高さ 5 cm のアクリル樹脂製のものと、長さ 1 m, 幅 10 cm, 高さ 5 cm の木製のものの 2 種を水路により使い分けているが、長さ 40 cm の広頂堰の模型には内部に 45° の鏡を取り付け、前面の洗掘形状が上部から詳細に計測できるようになっている。実験に用いた砂はほぼ一様砂と考えられる 50 号粒径が 0.1 mm のものを用いている。

実験は Fig. 22 に示されるように、広頂堰の前方 10 cm の部分だけに前述の砂を敷き、それより上流側には $d_s = 0.3$ cm の粗度板を設置するという方法で行なわれ、スクレーパーを用いて砂をならした後、流水開始時刻を $T=0$ とし、それ以後 60 分間、一部のケースについては 120 分間計測を行なっている。このような実験装置としたのは実測部分の上流に河床波が発生するのを防いで clear-water scouring の条件下で実験を行ない、2 次流の効果だけを抽出しようとしたためである。

また、洗掘形状の計測は、水路上方に固定さ

Table 3 Hydraulic conditions for the experiment on the local scour just upstream side of an abrupt step-up.

Case	Q (l/sec)	H (cm)	B (cm)	U_m (cm/sec)	R_s	z_0 (cm)	U_* (cm/sec)
A-1	3.80	4.03	40	23.57	9510	0.95	1.81
2	3.80	4.05	"	23.46	9530	0.97	1.81
3	3.80	4.07	"	23.34	9550	1.01	1.81
4	3.83	4.05	"	23.64	9810	1.01	1.81
5	3.86	4.05	"	23.83	8900	0.97	1.81
6	4.48	5.02	"	24.10	10500	0.97	2.28
7	4.86	5.01	"	23.25	10600	0.96	2.28
8	4.87	5.02	"	24.25	11000	0.99	2.28
9	6.56	6.71	"	24.41	15100	1.00	2.32
10	6.56	6.73	"	24.37	15100	0.98	2.32
11	6.56	6.75	"	24.30	15200	0.98	2.32
B-1	11.90	4.93	100	24.14	10600	1.00	2.20
2	11.90	5.00	"	23.80	10600	0.98	2.21
3	11.90	5.02	"	23.71	10600	0.97	2.22
4	6.10	3.82	"	15.97	5450	1.01	1.93
5	14.50	5.52	"	26.27	13000	1.01	2.33
6	10.20	4.67	"	21.84	9110	0.97	2.14
7	22.90	7.74	"	29.59	20500	0.98	2.75
8	16.90	6.86	"	24.64	15100	0.97	2.59

れたカメラにより平面形状と鏡の中に写し出された立面形状とを同時に撮影することにより行なわれた。各時刻における洗掘深 z_s の実測には、それを写真から判読した値とポイントゲージで実測された値との関係をやめ求めておき、それを用いて写真から読み取られた値から求めている。このような方法を採用したのは、計測時刻ごとに流水を止めてポイントゲージで計測すると微妙な現象が攪乱されてしまうと考えたからである。

また、まさつ速度 U_* を求めるに際しては、広頂堰のためにエネルギー勾配を正確に求めにくいので、接近流の鉛直方向の流速分布を超小型プロベラ式流速計（プロベラ径 5 mm）を用いて求め、それに粗面 ($d_s = 0.3$ cm) 上での対数則を適用し、カルマン定数 $\kappa = 0.4$ として U_* を求めている。

本実験で用いた水理条件はまとめて Table 3 に示されている。

4. 3 洗掘のスケールと安定性

Photo. 3 は $H = 5$ cm, $z_0 = 1$ cm, $R_s = 1.05 \times 10^4$ において潜り状態で設置された広頂堰の前面の局所洗掘の平面形状および立面形状（鏡に写ったもの）の流出開始から 60 分経過後における状態を示したものである。この写真から、横断方向に一樣な構造物であってもその前面の洗掘形状は一樣とはならず、横断方向に平面的にも立面的にも波形模様となっていることが見い出せる。

Fig. 23 は上記の水理条件における実験より読み取られた立面形状の経時変化を示したものである。図より、流水開始から 30 分までは洗掘の浅い地点（以後浅地点と呼ぶ）と深い地点（以後深地点と呼ぶ）の位置は安定していないが、30 分以後はそれらの位置はほぼ固定し、位置の変動はほとんど見られない。浅地点間の距離を b とすると、この場合における b の平均値 $\bar{b}$ はほぼ $1.6 H$ となっている。

Fig. 24 は前図において水路中央付近の代表的な 2 地点、すなわち、 $y = -5$ cm あたりの浅地点と $y =$

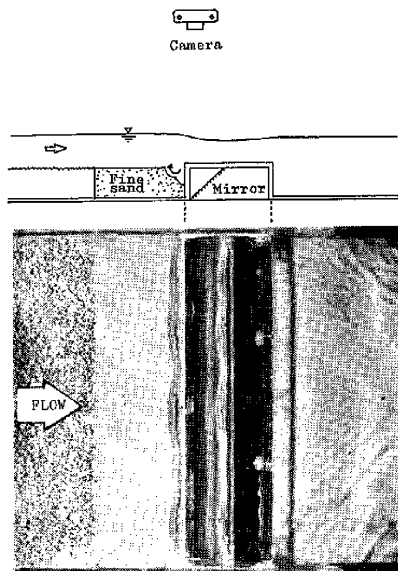


Photo. 3 Local scour around the upstream side of an abrupt step-up.

0 cm 付近の深地点における洗掘深の時間変化を対数表示したものであり、時間 t (sec) は U_m と z_0 により無次元化表示されている。これより、両地点とも時間変化は直線で示され、初期には急速に洗掘が進行し以後緩慢になるようすがわかるが、どちらの地点も平衡状態には達していないようである。しかし、浅地点と深地点とはその直線の勾配が異なっており、両地点での洗掘力が異なっているものと推察される。両者の差は時間とともに開く傾向にあるが、これ以後もますます大きくなるものと予想される。ちなみに $U_m \cdot t / z_0 = 10^5$ においては、深地点は浅地点の2倍深く洗掘されている。

次に、洗掘形状の横断方向スケール b の変化特性を検討するため、水路幅 B が 1 m と 40 cm の2種の水路を用い、堰高 z_0 はともに 1 cm とし、流量 Q と水深 H とを変化させて実験を行ない、 $\bar{b}/H$ と水路巾・水深比 B/H との関係を調べてみた。その結果が Fig. 25 に示されている。この図から、 B/H が 10 より小さくなると $\bar{b}/H$ は 2 より若干小さくなる傾向が見られるが、 B/H が 10 以上ではほぼ $\bar{b}/H$ は 2 に等しく一定となっている。

以上の諸検討結果から、広頂堰前面の局所洗掘孔の水路横断方向の変化は、二次流に呼応して生じた

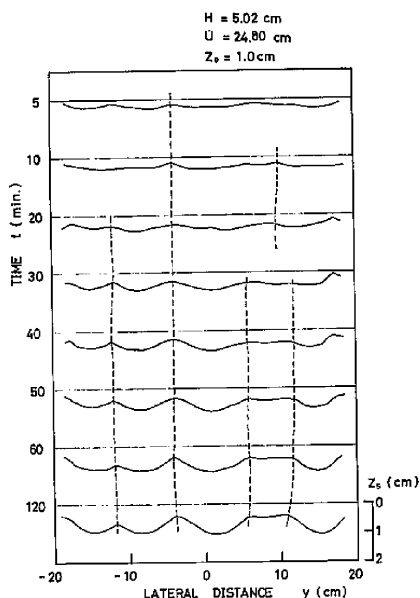


Fig. 23 Time variation of the depth of scour hole at the upstream side of an abrupt step-up.

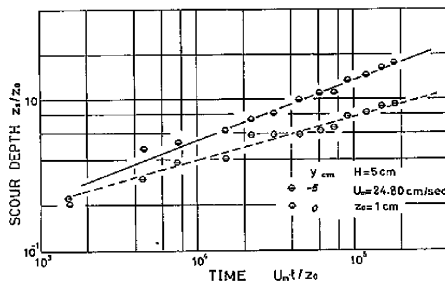


Fig. 24 Time variation of the depth of scour at the point $y = -5$ cm and the point $y = 0$ cm.

広頂堰前面の U 字型渦があたかも真空掃除機のように堰前面の土砂を吸上げたために生じたものと言える。実際、広頂堰の頂上および堰の下流部においては、前面の局所洗掘孔の浅地点の下流の部分だけに砂が

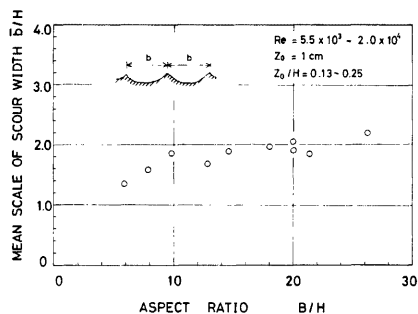


Fig. 25 Transversal mean scale of local scour just upstream side of an abrupt step-up.

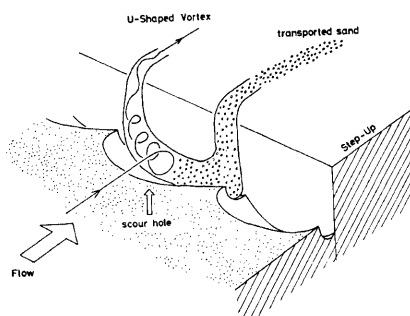


Fig. 26 Schematic view of the mechanism of local scour just upstream side of an abrupt step-up.

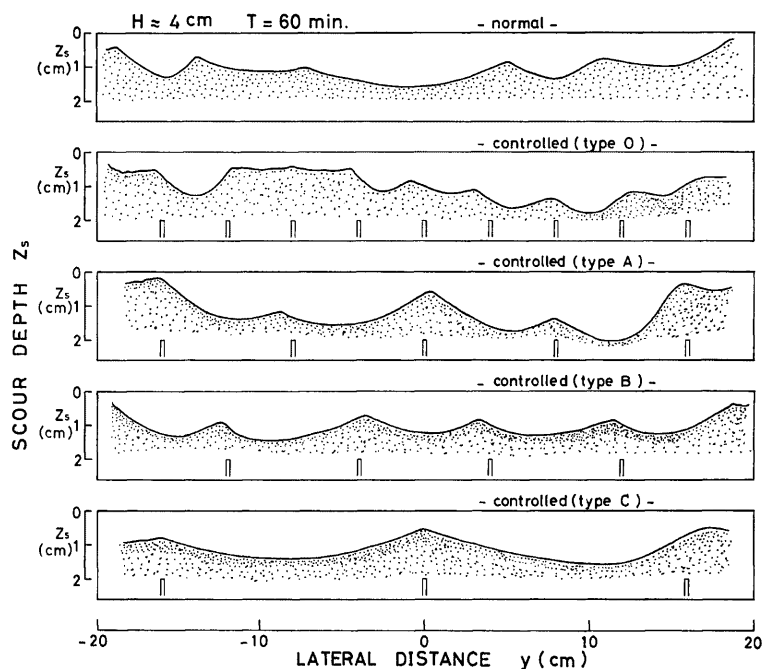


Fig. 27 Depth of local scour in case when the secondary flow is controlled by longitudinal roughness elements ($H=4$ cm).

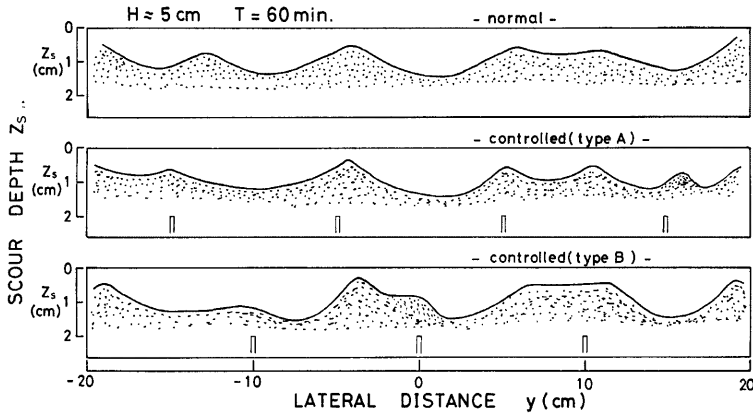


Fig. 28 Depth of local scour in case when the secondary flow is controlled by longitudinal roughness elements ($H=5$ cm).

堆積していることが観察され、上記の現象理解を裏づけている。以上の現象理解を概念的に図示すると Fig. 26 のようである。すなわち、 U 字型渦の軸が水平に近い所では砂が渦の中にまきこまれるため洗掘が発達し、まきこまれた砂は渦軸のまわりを回転しながら軸の立上り部分の方へ運搬され、広頂堰の上へと放出される。このような型態で洗掘が進行すると U 字型渦はさらに安定化していくようである。

4. 4 二次流の安定性と局所洗掘深との関係

Fig. 27 および Fig. 28 は $H=4$ cm および $H=5$ cm の場合において棧組度をいろいろな型に配列した場合の60分後における洗掘の立面形状を示したもので、棧組度の位置も共に記入されている。本図から、広頂堰前面の局所洗掘はいつれの棧組度の配置においてもほぼ棧の位置に対応した洗掘形状をもつことがわかるが、とりわけA型の場合の対応性がよいことが指摘される。

そこで、棧組度をA型に配置した場合の洗掘深を z_{sA} とし、棧組度を全くおかない場合のそれを z_{sn} として、両者の比を調べてみると、水深 H が 4 cm の場合、最も浅い所を比較すると $z_{sA}/z_{sn}=0.88$ となり、最も深い所を比較すると $z_{sA}/z_{sn}=1.30$ が得られる。同様に $H=5$ cm の場合については、前者は 0.59 後者は 1.01 となる。

以上のことは、二次流が安定しているA型の場合、安定していない場合に比べて浅い地点は一層浅くまた深い地点は一層深くなることを示している。このことは、二次流が安定化すると局所洗掘が増加する場合があることを意味しており、このことは防災対策を考える上で重要な事実といえよう。

5. 結 論

水路構造物周辺の局所流と接近流に含まれた大規模乱流構造との関連を解明するために、先ず一樣な開水路流れの中に含まれている大規模乱流構造とりわけ二次流の安定性について実験的に検討し、次いで広頂堰前面の局所流の三次元的特性を先に明らかにされた二次流の安定性との関連の下に固定床および移動床の水路において実験的に検討した。得られた結論のうち主たるものを列挙すると次のようである。

(1) 一樣長方形断面水路における低速部の平均間隔 λ は、粘性底層およびその近傍では内部パラメータに規定されて $\lambda \approx 100\nu/U_*$ となるが、路床から離れるにつれて増大し、水面近傍では $\lambda \approx 2H$ となる。

(2) 開水路における二次流はまさつ速度 U_* の増大とともに安定化する。二次流が安定していると

き、低速部は水路側壁面から水深の奇数倍の距離の位置に集中して配置される。

(3) 広頂堰のように、幾何学的な境界条件がたとえ水路横断方向に一樣な水理構造物の前面においても、接近流中の大規模乱流構造に対応して堰前面に三次元的な U 字型渦が形成される。すなわち、そのような U 字型渦の立上り部分の位置は、その堰の高さの約半分の高さの位置における接近流中の低速部の位置に対応している。

(4) この U 字型渦は接近流の路床近傍の流体部分を巻き込むことにより構成されており、その巻き込み過程は接近流中に存在する渦度が U 字型渦の軸の位置へ集中させられてゆく過程と一致している。

(5) 広頂堰前面の局所洗掘形状は水路横断方向に一樣とならず、その平面形状も立面形状も波形を呈する。波形模様水路横断方向の平均スケールは、水路幅・水深比が10以上の水路でまさつ速度が充分大きな流れの場合にはほぼ水深の2倍となる。

(6) このような広頂堰前面の局所洗掘は、接近流中の大規模乱流構造とくに二次流に呼応して広頂堰前面に生じる U 字型渦によって堰前面の土砂が吸出され放出されるために生じるものである。

(7) 二次流が安定化すると広頂堰前面の局所洗掘深の最大値が増加する場合があります、防災対策上注意を要する。

参 考 文 献

- 1) Squire, H.B. and K.G. Winter: The secondary flow in a cascade of airfoils in a uniform stream, Jr. Aeron. Sci., No. 18, 1951, pp. 271-277.
- 2) Hawthorne, W.R.: The secondary flow about struts and airfoils, Jr. Aeron. Soc., No. 21, 1954, pp. 588-608, 648.
- 3) Yih, C.S.: Two solutions for inviscid rotational flow with corner eddies, Jr. Fl. Mech., Vol. 5, 1959, pp. 36-40.
- 4) Fraenkel, L.E.: On corner eddies in plane inviscid shear flow, Jr. Fl. Mech., Vol. 11, 1961, pp. 400-406.
- 5) Roper, A.T., V.R. Schneider and H.W. Shen: Analytical approach to local scour, Proc. 12th. Congress, I.A.H.R., Vol. 3, Colorado State Univ., U.S.A., 1967, pp. 151-161.
- 6) 宇民 正：層流実験に基づく橋脚前面の局所流の研究，土木学会論文報告集，第228号，1974，pp. 65-76.
- 7) 宇民 正・上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究，京都大学防災研究所年報，第19号B，1976，pp. 267-288.
- 8) 宇民 正・上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究(2)一路床形態と大規模乱流構造との関連について，京都大学防災研究所年報，第20号B-2，1977，pp. 331-354.
- 9) Kline, S.J., W.C. Reynolds, F.A. Schraub and P.W. Runstadler: The structure of turbulent boundary layer, Jr. Fl. Mech., Vol. 30, 1967, pp. 741-773.
- 10) 中川博次・福津家久：開水路乱流の bursting 現象とその特性，土木学会 第32回年次学術講演会講演概要集，第2部，1977，pp. 281-282.
- 11) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，写真測量，Vol. 6, No. 1, 1967, pp. 1-17.
- 12) 村本嘉雄・河田恵昭・布村明彦：砂礫河川の掃流砂に関する基礎的研究，京都大学防災研究所年報，第20号B-2，1977，pp. 451-474.
- 13) 木下良作：洪水と流路形態の現地観測，水工学シリーズ，78-A-7，土木学会水理委員会，1978，pp. A-7-1~17.
- 14) 宇民 正・上野鉄男：開水路の抵抗特性と大規模乱流構造との関連について，土木学会第32回年次学

術講演会講演概要集, 第2部, 1977, pp.283-284.

- 15) Ikeda, S and H. Kikkawa: Secondary circulation in straight channels, Dept. Found. Eng. Fac. Eng., Saitama Univ., 6, 1976, pp.1-13.