

相対的な再付着点距離の異なる 階段状開水路流れの乱流構造

TURBULENT FLOW STRUCTURE IN A STEPPED STEEP OPEN-CHANNEL
WITH DIFFERENT RATIOS OF REATTACHMENT DISTANCE TO STEP LENGTH

大本照憲¹・成合功光²・矢北孝一³

Terunori OHMOTO, Norimitsu NARIAI and Kouichi YAKITA

¹正会員 工博 熊本大学 工学部環境システム工学科 (〒860-0862 熊本市黒髪2-39-1)

²正会員 工修 第一復建(株) 技術統括本部 技術開発室 (〒812-0016 福岡市博多区博多駅南3-5-28)

³正会員 熊本大学技官 熊本大学 工学部環境システム工学科 (〒860-0862 熊本市黒髪2-39-1)

Characteristics of separated shear layer due to a backward facing step and newly developed boundary-layer after the reattachment point were investigated experimentally to clarify the turbulent flow structure and energy dissipation mechanism of stepped steep open channel. Measurements were made by using particle image velocimetry (PIV) and a high-resolution camera with 15fps(frame per second); extend to a distance of about 7 step heights downstream of the step. The Froude numbers were 1.92, 2.10 and 2.33, the Reynolds number based on step height were about 20000. The results showed that reattachment length had strong effects on the distribution of dynamic pressure and the pressure coefficient on the step wall. Reynolds shear stress and streamwise turbulent intensity decreased rapidly along the stream line separated from the step edge because of accelerated flow in mixing layer. Characteristics of the pressure coefficient on the step wall were discussed based on the budget of Reynolds momentum equation.

Key Words : Stepped open-channel, Separated shear layer, Reattachment length, Accelerating flow

1. はじめに

急勾配階段状水路は、堰やダムの洪水吐、雨水排水路等における流れの運動エネルギーを効果的に減勢させる工法として利用されて来た。また、近年では自由水面からの空気の連行による「ホワイト・ウォーター」現象で得られる景観効果や水質浄化機能を有することで注目を集めている。加えて、2000年3月には階段状水路の水理に関する国際ワークショップも開催され、エアレーション特性やエネルギー散逸、流れの内部構造、設計法等の議論がなされている¹⁾。

現在、階段状水路の流れの形態は、流量および勾配が小さく、ステップ上で跳水の発生するナップ・フローと流量と勾配が大きく、階段隅角部でローラー状の渦を形成し、階段エッジを連ねた線を擬似河床として流れるスキミング・フローの2種類に大別されている。最近ではこれらの中間の流況であるトランジション・フローの存在も指摘されている²⁾。従来の研究は、これらの流況におけるエネルギー損失や摩擦損失係数の推定、空気混入

率の分布等を主対象として行われてきた³⁾⁻⁴⁾。

しかし、高速で水深が小さい気液混相流であることから、ステップ上の乱流を計測することが極めて困難なために、実測データに基づいた乱流構造の実態解明に対する研究は数少ない。特に、階段状流れにおけるエネルギー減勢の主因である階段隅角部の剥離循環流と主流との運動量の交換については十分な検討は成されていない。

ところで、階段流れの素過程を議論する上で、参考となるものに後方ステップ流れがある。後方ステップ流れは、流体機械の内部に発生する剥離泡のモデルとして⁵⁾、計算流体力学における乱流モデルの精度を評価する対象として位置付けられ、最近では剥離・再付着現象を伴う流れ場の代表の一つとして直接数値計算(DNS)による乱流構造の解明が図られている⁶⁾。

一方、水工学の分野では急変流の基本モデルとして基礎的知見を与えている。開水路における段落ち流れを系統的に扱ったものに、柳津、中川⁷⁾⁻⁸⁾の研究がある。また、可視化法と画像処理法を用いて段落ち下流部における乱れの組織構造を検討したものに川西、余越等⁹⁾の研究があるが、大半は常流に限られており、射流における

段落ち流れの乱流構造を扱ったものはあまり多く無い。

著者等は、エネルギー減勢工として階段状開水路流れを雨水排水路に適用するために模型実験を実施した¹⁰⁾。次に、流れ場が平衡状態に達した階段部において水面変動、圧力および流速を計測し、流れの内部構造について実験的検討を行い、平均流特性および圧力特性を明らかにした¹¹⁾。また、ホットフィルム・プローブを用いた乱れの計測を行い、階段エッジから剥離した流れの再付着点下流では、乱れエネルギー、レイノルズ応力が流下方向に減少することを見いだした。その原因として底面近傍での急激な流下方向の加速によりレイノルズ法線応力と主流速の流下方向の空間勾配との積が負となり、乱れから平均流にエネルギーが逆カスケードしていることを指摘した¹²⁾。さらに、非接触型の代表的な画像処理法であるPIV法を用いて、階段流れの乱れ特性量を詳細に検討し、射流における階段流れの乱流構造について実験的検討を行い、管路および開水路常流との比較を行った¹³⁾。

本研究では、スキミング・フローで発生しうるケースとして階段エッジから剥離した流れの再付着点位置が直下流のステップ中央部に存在する場合、階段エッジ近傍の場合および直下流のステップを乗り越える場合の3ケースに着目し、ステップ長に対する再付着点距離の比が乱流構造に与える影響について検討した。

表-1 実験条件

項目	Case1	Case2	Case3
流量 $Q(l/sec)$	8.0	8.0	8.0
単位幅流量 $q(cm^3/sec)$	200.0	200.0	200.0
限界水深 $h_c(cm)$	3.44	3.44	3.44
ステップ長 $L_s(cm)$	6.0	3.0	2.0
ステップ高 $H_s(cm)$	1.0	1.0	1.0
限界流速 $V_c(cm/s)$	58.10	58.10	58.10
断面平均水深 $h(cm)$	2.10	1.96	2.23
最大流速 $U_m(cm/sec)$	92.75	92.93	97.24
フルード数 Fr	2.10	2.33	1.92
レイノルズ数 Re	20000	20000	20000
計測位置 x/H_s	-1.5~6.8	-1.5~6.5	-1.0~7.5

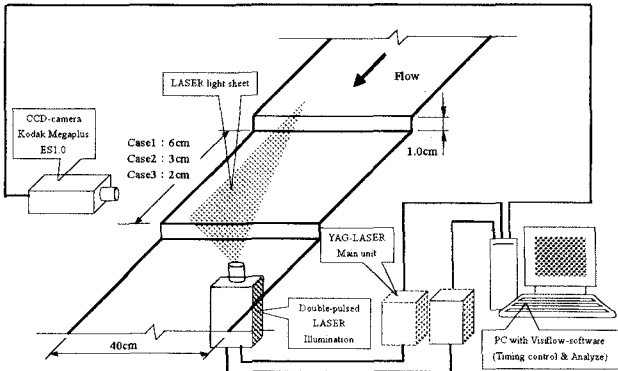


図-1 計測システムの概略

2. 実験装置および方法

実験に使用した水路は、長さ10m、幅40cm、側壁高さ30cmの可変勾配型の循環式直線水路である。計測部は、側壁および底面からレーザー光が照射可能なように全面がアクリル製となっている。階段部は、ステップ長 L_s を

6cm、3cm、2cmとし、1cmのステップ高の階段をそれぞれ2基設置した。階段部の平均路床勾配はそれぞれ、1/6、1/3、1/2となる。3ケースとも同じ流量としたので、限界水深のステップ高に対する比は同一の3.44である。また、計測位置は大量に気泡が混入することによってデータの物理的解釈を困難にすることを避けるために、気泡の混入が少ない階段開始点から1基目ないし2基目部分と

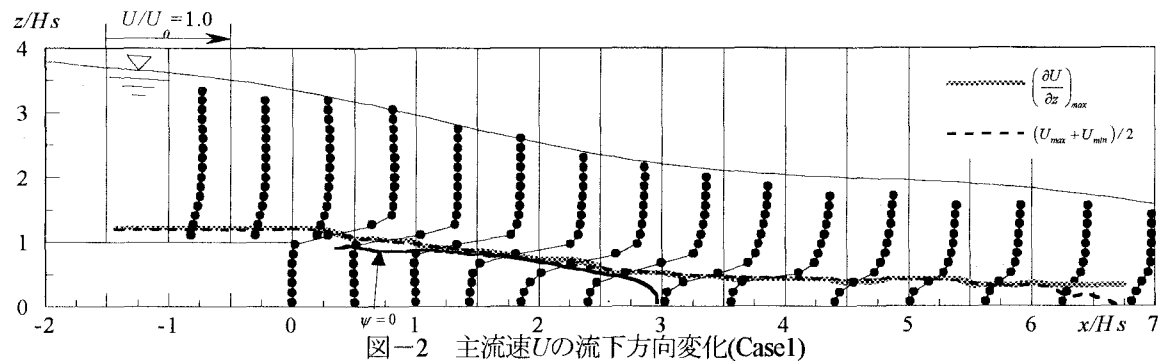


図-2 主流速 U の流下方向変化(Case1)

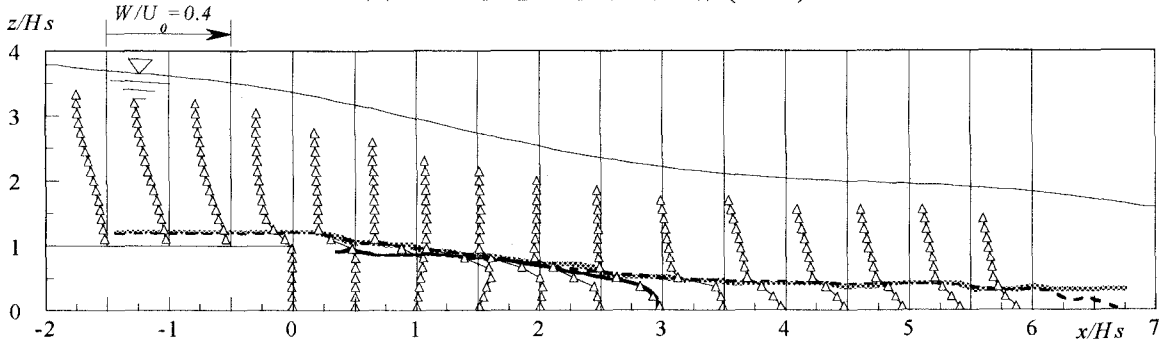


図-3 鉛直流速成分 W の流下方向変化(Case1)

した。座標系はステップ上の剥離循環流および剥離せん断層の把握を容易にするために、ステップに沿った流下方向を x 軸、水路横断方向を y 軸、鉛直上向きを z 軸とし、各座標に対応して瞬間流速成分を u, v, w 、変動速度成分を u', v', w' とする。表-1に実験条件を示す。

計測システムの概要を図-1に示す。光源に空冷式ダブルパルスYAGレーザ（出力25mJ）を用い、シート光の厚さを1mm、幅を8cm、パルス間隔を800 μ sに設定し、水路下方から底面に垂直上向きに照射した。レーザ光とCCDカメラを同期させて読み込まれた可視化画像は、30fps (frame per second) ,960 $\times$ 1018(pixel)のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録され、PIV法により処理された。ここに、画像の1pixelサイズは、0.092mmである。流速のサンプリング周波数は15Hz、1計測面での画像データは1000枚、計測時間は、33.3secであった。なお、トレーサとして粒径30 μ m、比重1.02のナイロン粒子を使用した。また、水面変動の計測には超音波水位計を使用し、サンプリング周波数は100Hz、1測点のデータ個数は4096に設定した。

3. 平均流特性

(1) 主流速および鉛直速度成分

図-2および図-3にCase1での最大流速 U_0 で無次元化した主流速 U および鉛直流速成分 W を示す。

図中には、剥離線および主流速の鉛直勾配 $(\partial U / \partial z)_{\max}$ が極大となる位置 $z_{\max}$ 、主流速が(極大流速+極小流速)/2となる位置 $z_{0.5}$ および流れ関数の値がゼロとなる線を挿入している。図よりステップ直下流の流れは、階段エッジにおいて剥離した後、急拡大部下流では剥離循環領域および主流域から流体の連行を受けながら混合層的に発達し、水路床に再付着していることがわかる。Case2およびCase3においても、剥離循環領域の形成と剥離せん断層の発達過程は類似していた。

主流速は、剥離せん断層内部で流下方向に増大が著しく、その変曲点は、 $z_{\max}$ および $z_{0.5}$ とほぼ一致している。また、循環領域の底面近傍で大きな逆流が発生している。1基目における逆流速の極大値はCase1では $x/Hs=2$ で $-0.14U_0$ 、Case2では $x/Hs=1.8$ で $-0.14U_0$ 、Case3では $x/Hs=1.7$ で $-0.14U_0$ であり、相対的な再付着点距離に依らないことが分かる。

鉛直方向成分 W は、剥離循環流域の $1 < x/Hs < 2$ で上昇流が卓越し、剥離せん断層の上層では下降流が発生していることから、周囲流体の剥離せん断層への連行が活発である。

1基目における上昇流の極大値は剥離循環流内で発生し、Case1では $x/Hs=1.5$ で $0.042U_0$ である。Case2では剥離循環流内で、Case3では1基目の階段エッジで極大値が発生し、Case2では $x/Hs=1.2$ で $0.046U_0$ 、Case3では $x/Hs=2.0$

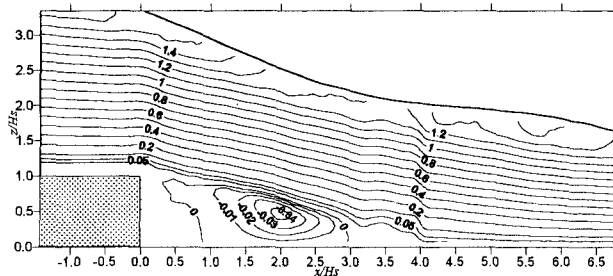


図-4 流れ関数の等値線 (Case1)

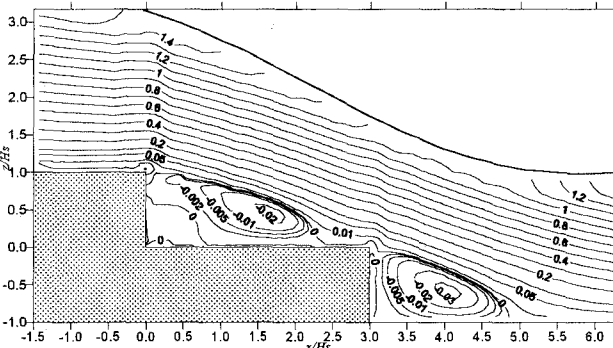


図-5 流れ関数の等値線 (Case2)

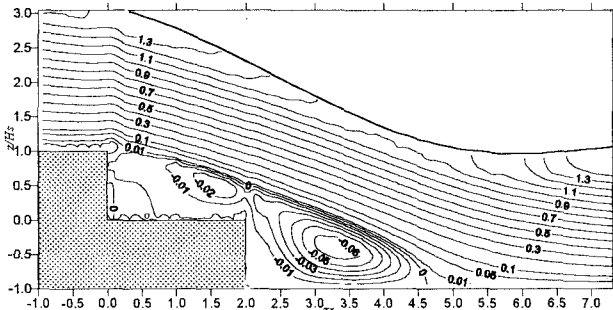


図-6 流れ関数の等値線 (Case3)

で $0.065U_0$ であった。また、1基目における下降流 W の極大値は、3ケースとも剥離せん断層内で発生し、その大きさはCase1では $x/Hs=2.9$ で $-0.22U_0$ 、Case2では $x/Hs=2.4$ で $-0.33U_0$ 、Case3では $x/Hs=2.0$ で $-0.29U_0$ であった。剥離せん断層外層では3ケースとも下降流を示し、水深の硫化方向変化率 $dh/dx < 0$ と強い相関があると考えられる。

(2) 流れ関数

流れ関数は横断方向に流れ場が一様であると仮定すれば、次式

$$\psi(x, z) = \int_0^z U dz \quad (1)$$

によって求められる。 $\psi=0$ は剥離循環領域の境界を示し剥離流線の指標として捉えられ、 $\psi=0$ と河床との交点は再付着点となる。図-4~6は U_0/Hs で無次元化した流れ関数の等値線を示す。再付着点距離は、Case1で $x_R/Hs=2.96$ 、Case2で $x_R/Hs=2.40$ 、Case3では1基目のステップを乗り越え $x_R/Hs=4.63$ であることが分かる。

剥離線の下方では、循環流が形成され、1基目の逆流渦の中心 $(x_c/Hs, y_c/Hs)$ は、Case1で(2.0, 0.45)、Case2で(1.65, 0.45)、Case3で(1.6, 0.5)である。逆流渦中心の高さは、3ケースとも約 $0.5Hs$ でほぼ同位置である。再付着

点距離に対する逆流渦中心の相対的流下距離(x_c/x_R)は、再付着点が1基目のステップ上に存在するCase1とCase2においてCase1が0.68, Case2が0.69であることから、逆流渦中心の相対的位置は、ステップ長に対する相対的な再付着点距離には依存しないことが考えられる。

また、1基目の逆流量は最大でCase1が-0.04, Case2が-0.02, Case3が-0.02である。なお、流況の目視観察では、各ケースとも階段エッジ直下流の隅角部において空間スケールが $Hs/2$ 規模の二次渦の存在が確認された。

4. 乱れ特性

最大流速 U_0 で無次元化したCase1における乱れ強度およびレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の流下方向変化を図-7~9に示す。乱れ強度およびレイノルズせん断応力は、主流速の変曲点である z_{max} で極大値をとり、自由せん断層と類似の傾向を持ち、乱れエネルギーの大半は剥離流線に沿った剥離せん断層内において生成されていることが考えられる。各ケースにおける乱れ強度およびレイノルズ応力に関する鉛直方向の極大値を流下方向にプロットす

れば図-10~12のようになる。

Case1,Case2およびCase3において、乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の極大値の発生位置 x/Hs は、それぞれ、0.21, 0.18および0.25であり、その大きさ $\sqrt{u'^2}_{max}/U_0$ は、それぞれ、0.39, 0.44および0.41である。3ケースとも階段エッジから剥離した直後に極大値を取り、流下方向に減少傾向を示す。

レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の極大値は、その発生位置 x/Hs およびその大きさ $-\overline{u'w'}/U_0^2$ がCase1では $x/Hs=1.5$ で0.031, Case2では $x/Hs=0.91$ で0.048, Case3では $x/Hs=0.84$ で0.046である。3ケースとも階段エッジからの急激な増加傾向は $\sqrt{u'^2}$ と同様であるが、極大値の位置は $\sqrt{u'^2}$ よりも下流側にずれる。乱れ強度 $\sqrt{w'^2}$ は、階段エッジ付近から緩やかな増加を示し、その傾向は $\sqrt{u'^2}$ および $-\overline{u'w'}$ とは異なる。

乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ およびレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の流下方向への減少は、剥離流線に沿い変曲点不安定によって生じた乱れが、剥離せん断層の上層からの流体の連行により加速され、乱れエネルギーの逆カスケードが生じたためであることが考えられる。

5. 動圧力分布および壁面圧力係数

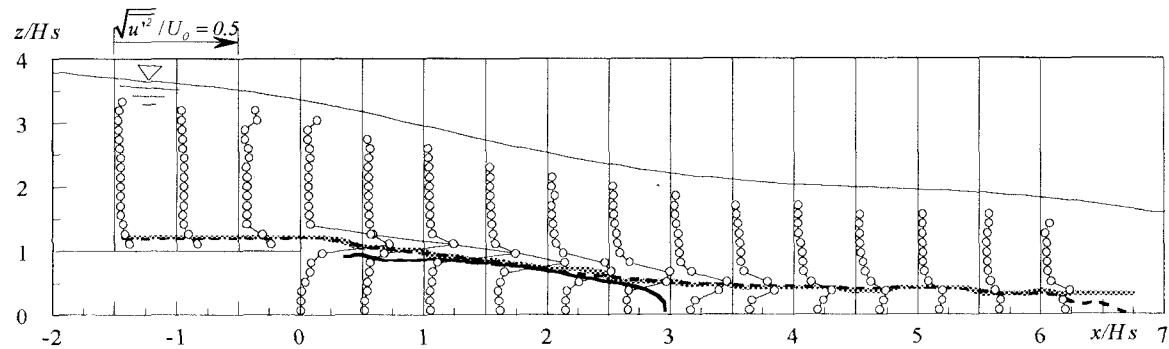


図-7 乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の流下方向変化(Case1)

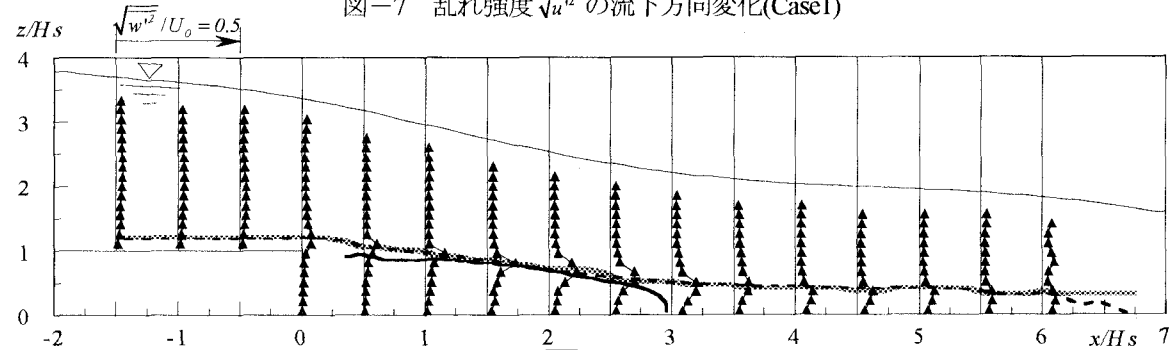


図-8 乱れ強度 $\sqrt{w'^2}$ の流下方向変化(Case1)

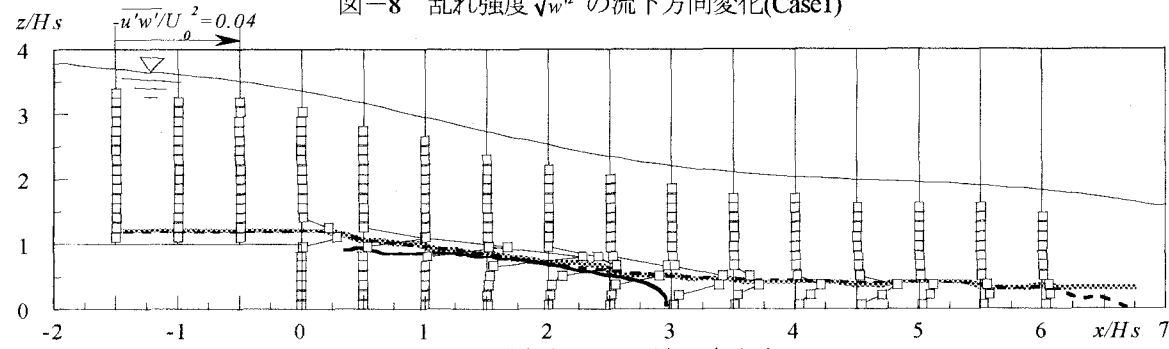


図-9 レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の流下方向変化(Case1)

階段流れにおいては、エッジ直下流の曲率の大きな水面形の変化や下流ステップへの再付着が生じ、剥離循環流が形成されるなど、動圧力の流れ場に与える影響が大きいことが考えられ、ステップ内の圧力場は静水圧からずれることが予想される。圧力は、レイノルズ数の十分大きい、横断方向に一樣な二次元流れを仮定し、鉛直方向のレイノルズ運動量方程式を鉛直方向に積分した、次式を基に議論する。

$$\frac{p}{\rho} = \int_z^h \frac{\partial(UW + \overline{u'w'})}{\partial x} dz + [W^2 + \overline{w'^2}]_z^h + g(h-z) \\ = p_d / \rho + g(h-z) \quad (2)$$

ここに、 ρ は水の密度、 p は総圧、 p_d は動圧、 h は水深、 g は重力加速度である。図-13~15に、各Caseの $U_0^2/2$ で無次元化した動圧力分布を示す。なお、図中には流れ関数の値がゼロの剥離流線と、 z_{max} の位置を参考線としてプロットしている。1基目のステップにおける動圧は、Case1では再付着点より若干上流側に当たる $x/Hs=2.5$ まで、Case2では再付着点 $x/Hs=2.4$ の付近まで負の動圧を示し、Case3では全域に亘って負の動圧であることが分かる。また、その極小値は剥離線および z_{max} の位置に沿って発生しており、Case1では $x/Hs=0.0$ で-0.18および $x/Hs=1.4$ で-0.18、Case2では $x/Hs=0.4$ で-0.4および $x/Hs=1.75$ で-0.25、Case3では $x/Hs=0.5$ で-0.35、 $x/Hs=1.6$ で-0.2および $x/Hs=2.0$ で-0.2である。再付着後はCase1およびCase2とも正圧が生じ、底面付近における圧力の流下方向変化は順圧勾配

であることから加速流が生じやすい状態にある。

また、レイノルズ運動量方程式を鉛直方向に積分することによって得られた壁面圧力係数が流下方向に変化する様子を図-16~18に示す。図中の C_p は壁面圧力係数で、次式によって定義する。

$$C_p = 2(p_d / \rho + g\Delta h) / U_0^2 \quad (3)$$

ここで、 Δh は、階段エッジの $x/Hs=0$ における水位からの偏差である。図中には壁面圧力に影響することが考えられる式(2)の各項の算定値も併示した。図より加速に伴う自由水面の低下により、静水圧項(S)が C_p を負側に大きくシフトさせる要因となる。また、動圧項(W^2)は C_p を正側にシフトさせる影響が各ケースとも表れている。1基目のステップにおけるその位置と大きさは、Case1では $x/Hs=2.7$ で0.093とさほど大きくないが、Case2およびCase3では $x/Hs=0$ から流下とともに増加し、Case2では $x/Hs=3.0$ で0.21、Case3では $x/Hs=2.0$ で0.14である。同地点での静水圧の項(S)の大きさが、Case2で-0.3、Case3では-0.16であることから、水面の低下による静水圧の減少は下降流による動圧によってほぼ相殺されている。

また、壁面圧力係数 C_p は、流下方向に特徴的な波状性を示し、移流による運動量輸送項(UW)の波状性と強い正の相関のあることが認められる。加えて、移流によ

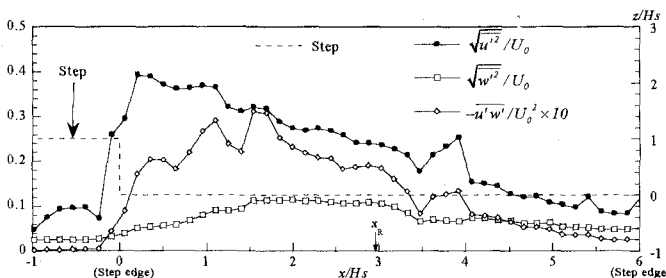


図-10 乱れ強度およびレイノルズ応力の極大値(case1)

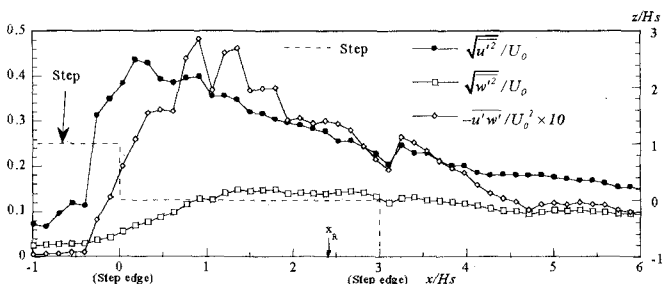


図-11 乱れ強度およびレイノルズ応力の極大値(case2)

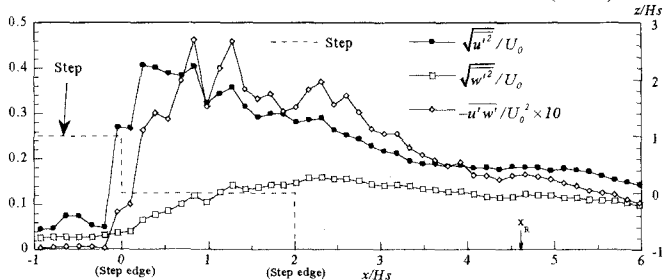


図-12 乱れ強度およびレイノルズ応力の極大値(case3)

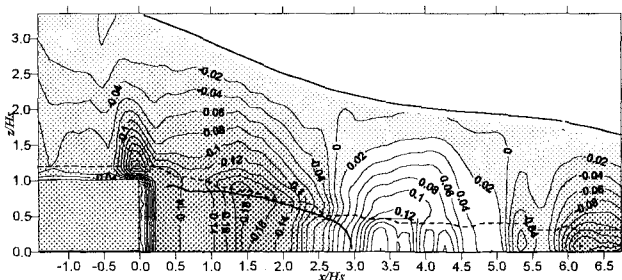


図-13 動圧力($p_d / (\rho U_0^2/2)$)の空間分布(case1)

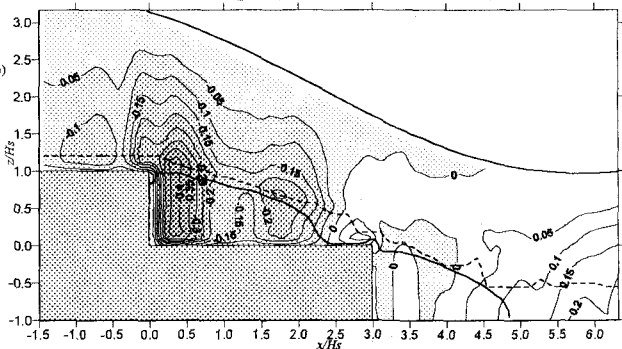


図-14 動圧力($p_d / (\rho U_0^2/2)$)の空間分布(case2)

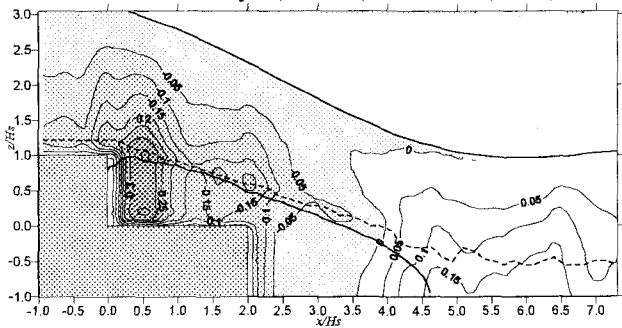


図-15 動圧力($p_d / (\rho U_0^2/2)$)の空間分布(case3)

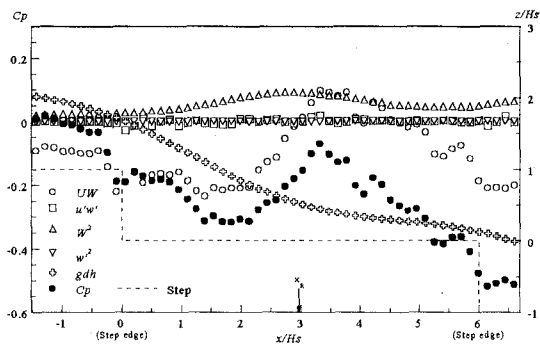


図-16 壁面圧力係数 C_p の流下方向変化(case1)

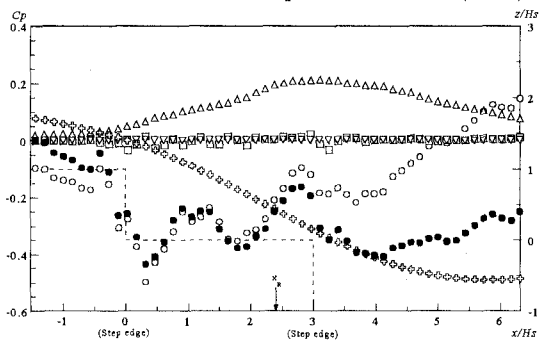


図-17 壁面圧力係数 C_p の流下方向変化(case2)

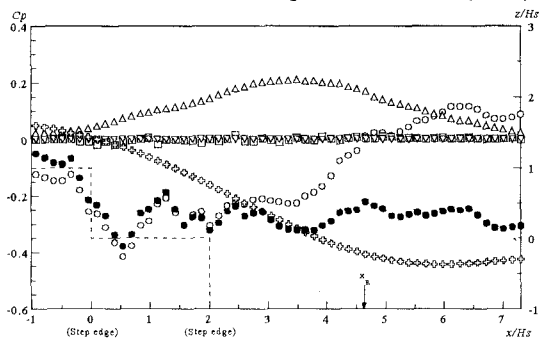


図-18 壁面圧力係数 C_p の流下方向変化(case3)

る運動量輸送項(UW)および壁面圧力係数 C_p の低下する位置は、動圧力の極小位置とも良く対応している。

6. まとめ

本研究では、ステップ長に対する再付着点距離の比が乱流構造に与える影響について検討した。得られた知見を要約すれば次のようになる。

- (1) ステップ直下流の流れは、相対的な再付着点に依らず剥離循環領域の形成と剥離せん断層の発達過程は類似しており、階段エッジで剥離した後、急拡大部下流では剥離循環領域および主流域から流体の連行を受けながら剥離せん断層が発達し水路床に再付着している。
- (2) 主流速は剥離せん断層内部で流下方向に増大が著しく、その変曲点は z_{max} および $z_{0.5}$ とほぼ一致している。また、循環領域の底面近傍で大きな逆流が発生しているが、その極大値は相対的な再付着点距離には依らない。
- (3) 各ケースにおける下降流の極大値は、剥離せん断層内で発生する。剥離せん断層外層では3ケースとも下降流を示し、水深の流下方向変化率と強い相関がある。

- (4) 循環流内の逆流渦の中心は相対的な再付着点距離に依らないが、逆流量は再付着点がステップ中央の場合が最も大きい。
- (5) 乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ および鉛直方向の極大値は、相対的な再付着点位置に依らず、階段エッジから剥離した直後に発生し、レイノルズ応力 $-u'w'$ の極大値の発生位置は $\sqrt{u'^2}$ よりも下流側にずれる。また、 $\sqrt{w'^2}$ の極大値は再付着点より上流側で発生する。
- (6) 再付着点までの動圧力は負の動圧を生じており、その極小値は剥離線および z_{max} に沿って発生する。
- (7) 壁面圧力係数 C_p は加速に伴う自由水面の低下により、静水圧の項(S)が C_p を負側に大きくシフトするが、下降流による動圧項(W^2)によってほぼ相殺される。また、壁面圧力係数 C_p の波状性は、移流による運動量輸送項(UW)の波状性と強い正の相関がある。

参考文献

- 1) Chanson, H.: Forum articles. Hydraulics of Stepped Spillways. Discussion, *Jl of Hydr Engrg*, ASCE, Vol.126, No.9, pp.636-637, 2000.
- 2) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of Flow Condition on Stepped Channels, Proceedings. 27th IAHR Biennial Congress, San Francisco, USA, Theme D, pp.583-588, 1997.
- 3) Chanson, H.: Hydraulic Design of Stepped Cascades, channels, Weirs spillways, *Pergamon*, 1994.
- 4) Chamani, M. R. and Rajaratnam, N.: Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways, *Jl of Hydr Engrg*, ASCE, Vol.125, No.4, pp.361-368, 1999.
- 5) 木谷: 剥離・再付着流れの乱流構造, 日本機械学会論文集 (B編), 55巻, 511号, pp.559-564, 1989.
- 6) LE, H., Moin, P. and Kim, J.: Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step, *Jl of Fluid Mech*, Vol.330, pp.349-374, 1997.
- 7) 瀬津, 中川, 天野: 開水路段落ちにおける剥離流の乱流構造に関する研究, 水理講演会論文集第30巻, pp.601-606, 1986.
- 8) 瀬津, 中川, 天野, 藤本: 開水路段落ち流れの流速回復過程と再付着点からの組織渦の放出特性, 水理講演会論文集, 第31巻, pp.413-418, 1987.
- 9) 川西, 余越: 段落ち流れの組織構造, 水工学論文集, 第33巻, pp.463-468, 1989.
- 10) 成合, 大本, 矢北, 田中, 太郎良: 急勾配階段状水路の雨水排水路への適用について, 河川技術論文集第7巻, pp.501-506, 2001.
- 11) 大本, 成合, 矢北, 長屋: 急勾配階段状水路における流れの内部構造, 水工学論文集第43巻, pp.305-310, 1999.
- 12) 成合, 大本, 矢北: 急勾配階段状流れの乱流構造, 水工学論文集, 第45巻, pp.517-522, 2001.
- 13) 大本, 成合, 矢北: 階段状開水路における剥離せん断層の乱流構造, 応用力学論文集, Vol.4, pp.541-548, 2001.

(2001. 10. 1受付)