

ステップ上の再付着点位置が階段状開水路に与える影響

第一復建株式会社 正員 ○成成功光 熊本大学工学部 正員 大本照憲
 熊本大学工学部 正員 矢北孝一 九州建設コンサルタント 末松誠二

1. はじめに

著者らは、階段状開水路における流れの内部構造の解明を目的に実験的検討を行い、PIV法を用いて階段流れの乱れ特性量を詳細に検討し、射流での階段流れの乱流構造について、管路および開水路常流との比較を行い、その特徴について明らかにした¹⁾。本研究では、階段状開水路流れで支配的な流況となるスキミング・フローで発生しうる3ケースの実験を行い、再付着点位置が階段状開水路流れの乱流構造に与える影響について実験的検討を行った。

2. 実験装置および計測方法

実験は、長さ10m、幅40cmの総アクリル製可変勾配水路を使用した。階段部は、ステップ長 L_s を6cm、3cm、2cmとし、1cmのステップ高 H_s 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。

また、大量に気泡が混入することでデータの物理的解釈を困難にすることを避けるために、気泡の混入の少ない階段開始点から1基目ないし2基目部分とした。表-1に実験条件を示す。流速の計測では、光源に空冷式ダブルパルスYAGレーザー(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。レーザー光と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、トレーサーとして粒径30 μ m、比重1.02のナイロン粒子を使用した。

3. 実験結果と考察

図-1にCase1での最大流速 U_0 で無次元化した主流速を示す。図中には、主流速の鉛直勾配($\partial U/\partial z$)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の1基目においても、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は $x/H_s=2$ で $-0.14U_0$ 、Case2は $x/H_s=1.8$ で $-0.14U_0$ 、Case3は $x/H_s=1.7$ で $-0.14U_0$ であり、再付着点位置に依らないことが分かる。

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、 $\psi(x, z) = \int_0^z u dz$ によって求められる。 ψ 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、 ψ と河床との交点は再付着点となる。図-2~4は U_0/H_s で無次元化した流れ関数の等値線を示す。再付着点位置は、Case1で $x_R/H_s=2.96$ 、Case2で $x_R/H_s=2.40$ 、Case3では1基目のステップを乗り越え $x_R/H_s=4.63$ である。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($x_c/H_s, y_c/H_s$)は、Case1で(2.0, 0.45)、Case2で(1.65, 0.45)、Case3で(1.6, 0.5)で、3ケースとも渦の中心高は約 $0.5H_s$ でほぼ同位置である。再付着点位置に対する逆流渦中心の相対的流下距離(x_c/x_R)は、Case1が0.68、Case2が0.69であることから、再付着点位置にはそれほど依存していない。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、再付着点がステップ中央の場合で最も大きい。

表-1 実験条件

項目	Case1	Case2	Case3
流量 (l/s)	8.0	8.0	8.0
単位幅流量(cm ² /s)	200.0	200.0	200.0
限界水深 (cm)	3.44	3.44	3.44
限界流速 (cm/s)	58.10	58.10	58.10
断面平均水深(cm)	2.10	1.96	2.23
最大流速 (cm/s)	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

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5~7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/H_S 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 $-u'w'$ の極大値は、その発生位置 x/H_S およびその大きさ $-u'w'/U_0^2$ が Case1 で $x/H_S=1.5$ で 0.031, Case2 で $x/H_S=0.91$ で 0.048, Case3 で $x/H_S=0.84$ 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。また、Case1 は、他の 2 ケースと異なり、極大値が相対的に $\sqrt{u'^2}$ よりも小さい。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 $-u'w'$ とは異なる。3 ケースに共通している $\sqrt{u'^2}$ および $-u'w'$ 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と考えられる。

4. おわりに

本研究ではスキミング・フローにおける 3 ケースの実験を行い、再付着点位置が階段状開水路の乱流構造に与える影響について実験的検討を行い、主流速、流れ関数および乱れ特性量に関する類似点および相違点を示した。

参考文献：1) 大本, 成合, 矢北, : 応用力学論文集 Vol.4, 2001, pp.541-548.

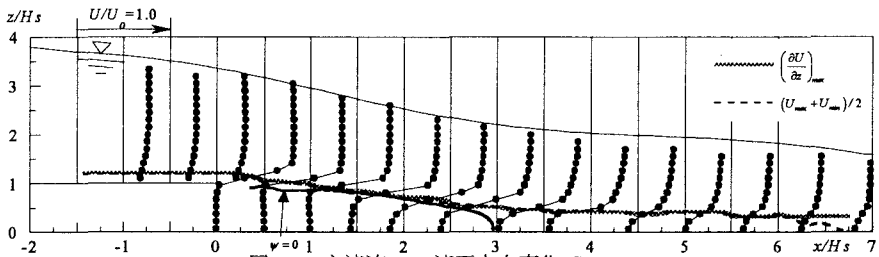


図-1 主流速 U の流下方向変化(Case1)

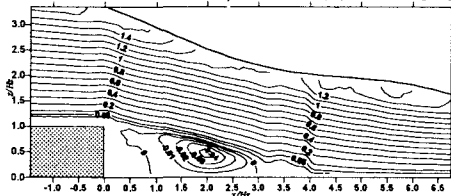


図-2 流れ関数の等値線 (Case1)

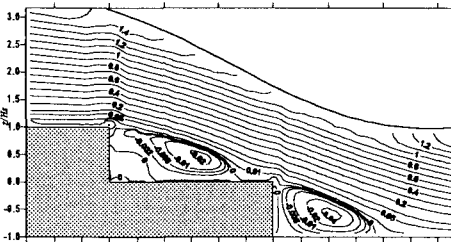


図-3 流れ関数の等値線 (Case2)

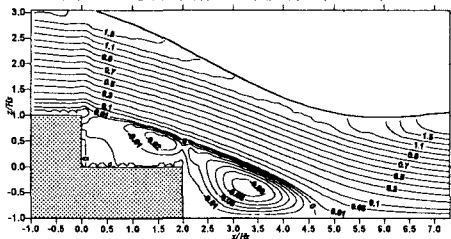


図-4 流れ関数の等値線 (Case3)

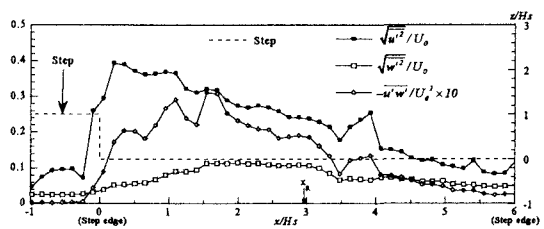


図-5 乱れ強度およびレイノルズ応力の極大値(Case1)

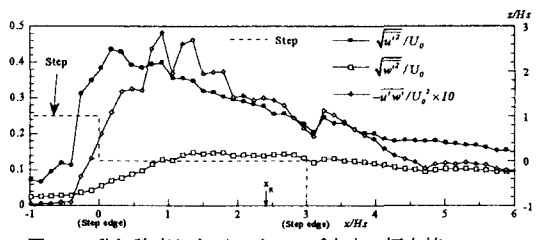


図-6 乱れ強度およびレイノルズ応力の極大値(Case2)

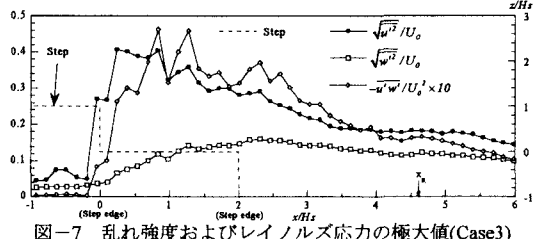


図-7 乱れ強度およびレイノルズ応力の極大値(Case3)