急勾配階段状水路における乱流構造について

THE TURBULENT FLOW STRUCTURE IN STEPPED STEEP OPEN-CHANNEL

成合功光¹・大本照憲²・矢北孝一³
Norimitsu NARIAI, Terunori OHMOTO and Kouichi YAKITA

¹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)

²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 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)

Stepped steep open-channels have watched with interests such as landscape effect and water quality purification function by aeration besides the energy dissipator. The authors have made some experiments to clarify the flow structure and considered mean flow characteristics by measuring flow depth fluctuations, mean flow velocity and pressure head on one step. In this study, we conducted an experimental examination on the turbulent flow characteristics obtained with hot-film anemometer to elucidate accelerating flow over one step. Experimental results showed that Reynolds normal stress and shear stress clearly decreased with downstream distance from step edge by the effects of favorable pressure gradient, and inverse cascade of energy happened.

Key Words : Stepped steep open-channel, Turbulent flow structure, Accelerating flow

1. はじめに

急勾配階段状水路は, これまで, ダムの洪水吐や雨水排水路の効果的なエネルギー減勢工として利用されてきた。近年では, 水質浄化機能や景観効果もあることがわかり, 注目を集めている¹⁾²⁾。また, 山地河道において, 一連のステップとプールからなる階段状の河床が形成されることも報告されており, その河床については, 形成・形状特性などに関する実験的研究³⁾⁴⁾も行われるようになってきているなど, 山地河道の流れと階段状河床の動態との関係を知ることは, 土砂水理学においても重要な課題となっている。

急勾配階段状水路は, 主にエネルギーの減勢効果を中心に研究が進められているが⁵⁾⁷⁾, フルード数が大きく, かつ激しい水面変動を伴った気液混相流であることから, 水深の評価に曖昧な点がある。そのため, 各研究者によってエネルギー損失係数の評価が異なり, 実験データのばらつきも大きい。実験に工夫の施された研究例⁸⁾もあるが, その算定法が確立されたとはいえない。また, 階段状水路の流れは, 水路勾配, ステップ高および流量によって, 階段エッジ背後にエアポケットが形成され, ステップ上で跳水が発生するNappe flowと, 階段隅角部にローラー状の渦が形成され, 流水が各ステップのエッジを連ねた線上を流下するSkimming flowとに大別され

る。しかし, このような流れ場の流速変動を計測した例は, 著者らが調べた範囲内では, 見当たらない。その要因として, 一般に大量の気泡を含んだ高速流で激しい水面変動を伴い, さらに水深が浅いために計測を困難にしていることが挙げられる。著者らは, これまで急勾配階段状水路における流れの内部構造の解明を目的に, 水面変動や平均流特性, 圧力特性について実験的検討を行い, 水路勾配が1/10における平均流特性を明らかにした⁹⁾。

本研究では, 階段状水路を設計する際の基礎的知見を得るために, Skimming flowで平衡状態に達した階段部分において, 1ステップ内の流下方向の加速特性に着目し, その乱流構造の解明を目的に実験的検討を試みた。また, ステップ上での乱れエネルギーの輸送について, 実験で得られたデータを基に, 主流方向の速度変動の大きさおよびレイノルズ応力の収支式からそれぞれの大きさを規定する項について評価し, 急勾配階段状水路の乱れ特性に関する興味深い知見が得られたので報告する。

2. 実験条件および実験方法

実験は, 全長が6.0mの総アクリル製の可変勾配水路を使用した。勾配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,

図-1 模型水路（階段部分）

表-1 実験条件

項 目	Case1	Case2	Case3
流量 $Q(\ell/s)$	3.0	6.0	12.0
単位幅流量 $q(\text{cm}^2/\text{s})$	75	150	300
限界水深 $h_c(\text{cm})$	1.79	2.84	4.51
限界流速 $V_c(\text{cm/s})$	41.9	52.8	66.5
水路勾配 I	1/10	1/10	1/10
フルード数 Fr	3.51	2.36	2.79
レイノルズ数 Re	6600	13000	26000
ステップ高 $D(\text{cm})$	1.0	1.0	1.0
ステップ長 $L(\text{cm})$	10.0	10.0	10.0
水路幅 (cm)	40	40	40
$x/L=0$ での水深(cm)	1.48	2.16	2.84
$x/L=1$ での水深(cm)	0.51	1.13	1.70

既往の研究⁵⁾⁻⁷⁾に比べて比較的緩い1/10に設定した。図-1に階段部分の拡大図を示す。座標系は流下方向をx軸、水路横断方向をy軸、鉛直上向きをz軸とした。階段部はステップ高を1cm、ステップ長を10cmとしている。また、階段は水路全面にわたって設置した。

階段流れは一般に、気液混相流で水面変動が大きく薄層流であることから、LDV（レーザードップラー流速計）やPIV（Particle Imaging Velocimetry）、電磁流速計は使用が困難である。そのため、流速の測定にはX型熱膜流速計を用い、流下方向および鉛直方向の流速成分を同時測定した。水面変動の測定には超音波水位計を使用した。また、同一水路における流況および内部構造について把握するために、3種類の流量を通水し、平衡場が形成されることが認められる水路上流端から4m下流のステップの水路中央において計測を行なった。実験条件を表-1に示す。なお、フルード数に用いた代表速度および代表長さ、1ステップ内の平均水深および平均流速を用いた。

超音波水位計はそのままの状態では、空間分解能が低いことから、それを高めるために内径8mmのアルミ製の円筒にセンサーを装着し、空間分解能を8mmとして使用した。サンプリング周波数は100Hz、1測点のデータ個数を4096に設定した。

また、一般に急勾配階段状流れは、水面から空気を連行した気液混相流であることから、熱膜流速計のセンサーへの気泡の影響は、スパイク状のノイズとして表れる。そのため、気泡のセンサーへの影響を除去するために、得られたデータを統計処理する際には、図-2に示

図-2 流速変動のヒストグラム

図-3 水深の流下方向変化

すように流速計からの応答電圧が0V付近を示したものは除外し、残りの測定値の平均値より標準偏差の3倍の範囲にあるデータを抽出し、統計処理した。なお、この処理方法による主流速の流下方向変化と境界層型ピトー管による計測結果⁹⁾の傾向はほぼ一致していることが認められている。統計処理した各データは、それぞれの流量の限界水深および限界流速で無次元化を図った。

3. 階段状流れの流下方向変化

階段状水路の流れはNappe FlowとSkimming Flowに大別でき、その流況を判別する式として、代表的なものに広範な実験データから得られたH.Chansonの式¹⁾がある。

$$h_c/D > 1.057 - 0.465 \times D/L : \text{Skimming Flow}$$

$$h_c/D \leq 1.057 - 0.465 \times D/L : \text{Nappe Flow} \quad (1)$$

ここに、 h_c ：限界水深、 D ：ステップ高、 L ：ステップ長である。なお、式(1)は $D/L=0.2 \sim 1.25$ の範囲から得られたものである。本実験条件では $D/L=0.1$ であるが、式(1)を外挿して計算すると、単位幅流量 q が $31.8 \text{ cm}^2/\text{s}$ 以上でSkimming flowとなる。本実験で対象とした単位幅流量は、いずれも $31.8 \text{ cm}^2/\text{s}$ を上回っていることから、Skimming Flowの領域にあり、目視観察からも確認された。

図-3に水深の流下方向変化を示す。本実験流量の範囲における階段状流れの水面形は、路床勾配に平行な平坦な水面形とはならず、階段形状と同位相の水面形であることがわかる。各流量における1ステップ間の水面形は、流れが平衡状態の場合、いずれのステップにおいても同一の形をとる。また、 $x/L=0$ の位置での水深は極大

図-4 主流速 U の流下方向変化

図-5 加速度の流下方向変化

図-6 乱れ強さ $\sqrt{u'^2}$ の流下方向変化

図-7 乱れ強さ $\sqrt{w'^2}$ の流下方向変化

図-8 レイノルズ応力 $-u'w'$ の流下方向変化

値を示し、各ステップ間で同一の値をとることから、位相差はない。なお、いずれの流量においても全領域でフルード数が1を越えることから流れは射流である。

また、いずれの流量でも、流下に従いステップを基準にした水深が減少しており、加速流が発生していると考えられるが、水深の減少傾向は、流量の規模に応じて異なる。 $q=75\text{cm}^2/\text{s}$ では、 $x/L=0.3$ 付近を境界として上下流の水深変化が異なっている。この地点では、平均圧力水頭がステップ内で最も大きくなる位置であること⁹⁾から、主流がステップ上に再付着する地点であると考えられる。 $x/L=0.3$ 以降の水深は流下に従って漸減している。 $q=150\text{cm}^2/\text{s}$ および $300\text{cm}^2/\text{s}$ では、ステップ全域にわたった水深の減少が見られる。

底面付近における主流速 U の流下方向変化を図-4(a)に示す。これより、流速の増加傾向は、各流量に応じた水深の流下方向変化に対する減少傾向と対応し、流量が

小さい場合には再付着点付近で強くなっているが、ステップ上の計測範囲を全体的にみると、単位幅流量が増加するにつれて強くなっている。図-4(b)には、底面から離れた場合の流下方向変化を示す。図-4(a)および(b)から、底面から離れるにつれ、流速の増加傾向は弱まり、底面付近の流速の増加傾向が最も強いことがわかる。

図-5に、各流量に対する底面付近の加速度の流下方向変化を示す。なお図中の微分演算子 D/Dt は、Lagrange微分である。計測の範囲内では、 $x/L=0.45$ 以降において、流量が増加するに従い、大きな加速度を示す。各流量でみれば、 $q=75\text{cm}^2/\text{s}$ および $150\text{cm}^2/\text{s}$ では、再付着点付近の $x/L=0.3$ 付近が大きな加速を示す。また、流下に伴ってその加速は弱まるものの、階段エッジ付近で再び強くなる。この位置の圧力は流線のまがりに起因した遠心力の影響により静水圧に比べて低下するために流下方向の加速が強まったことが考えられる。 $q=300\text{cm}^2/\text{s}$ で

図-9 主流速 U の鉛直分布

図-10 乱れ強さ $\sqrt{u'}$ の鉛直分布

図-11 乱れ強さ $\sqrt{w'}$ の鉛直分布

図-12 レイノルズ応力 $-u'w'$ の鉛直分布

は、 $x/L=0.45$ 付近までは流下に伴い加速度が漸増し、その後加速は漸減するものの、最も大きな加速傾向を示す。

図-6に各流量における乱れ強さ $\sqrt{u'}$ の流下方向変化を示す。 $q=300\text{cm}^2/\text{s}$ では、流下方向に増加し、 $x/L=0.5$ 付近で極大値をとり、それ以降は一樣に減少を示すことがわかる。 $q=75$ および $150\text{cm}^2/\text{s}$ は、流下方向に一樣に減少する傾向を示す。

図-7に乱れ強さ $\sqrt{w'}$ の流下方向変化を、図-8にレイノルズ応力 $-u'w'$ の流下方向変化を示す。図-6～8に共通していえることは、各流量における流下方向の乱れ特性は、加速流によって乱れ強さおよびレイノルズ応力が $x/L=0.5$ 以降において一樣に流下方向に減少することがわかる。また、 $-u'w'$ での $q=150\text{cm}^2/\text{s}$ の $x/L=0.45$ および $q=300\text{cm}^2/\text{s}$ の $x/L=0.5$ までの乱れ特性量の増加傾向は、流量の増大に伴ってエッジからの剥離流の再付着点が下流方向へずれたことが影響したものと考えられる。

4. 階段状流れの鉛直方向変化

本章では、前章で示した階段状流れの流下方向変化から、底面付近での加速傾向の強く表れた $q=300\text{cm}^2/\text{s}$ についてその鉛直方向変化を示す。図-9に主流速 U の鉛直分布を示す。底面付近の主流速は、図-5の加速度の流下方向変化に示したように、全領域で加速傾向をみせ、特に強く表れているのが $x/L=0.3\sim0.6$ である。また、底面から離れるに従って、流下方向の加速傾向が弱まる。つぎに、鉛直方向の速度変化に注目すると、流下に伴い

鉛直方向の速度差が小さくなり、階段エッジ付近では鉛直方向にはほぼ速度差がなく、一樣化することがわかる。なお、水面付近については、気泡の影響が大きいために計測できなかった。

図-10に主流速の乱れ強さ $\sqrt{u'}$ の鉛直分布を示す。まず、全体的には、流下に従って乱れ強さが小さくなる。局所的に見ると、一般的な開水路等流では底面付近の乱れ強さが大きい、加速流によって $x/L=0.3\sim0.7$ の底面付近における乱れ強さが小さくなる。また、階段エッジ付近である $x/L=0.8\sim1.0$ では、鉛直方向に乱れ強さが一樣化している。

図-11に乱れ強さ $\sqrt{w'}$ の鉛直分布を示す。全体的に流下に従って乱れ強さが小さくなり、階段エッジ付近で鉛直方向に一樣化する傾向は、主流速の乱れ強さ $\sqrt{u'}$ と同じであるといえる。

同位置におけるレイノルズ応力 $-u'w'$ の鉛直分布を図-12に示す。これも、 $\sqrt{u'}$ および $\sqrt{w'}$ の鉛直分布と同様に、流下に従いレイノルズ応力が減少し、 $x/L=0.3\sim0.7$ の底面付近では、強い加速によって底面付近のレイノルズ応力が小さくなる。また、階段エッジ付近で鉛直方向に一樣化する。

5. 加速流のレイノルズ応力への影響

階段状流れでの加速流におけるレイノルズ応力の収支について検討する。主流方向の速度変動の大きさ $u'^2/2$ の収支式はつぎのようになる。

図-13 $\overline{u'^2}$ の発生項と減衰項

図-14 $-\overline{u'w'}$ の発生項と減衰項

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} \overline{u'^2} \right) = & -\overline{u'^2} \frac{\partial U}{\partial x} - \overline{u'v'} \frac{\partial U}{\partial y} - \overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\overline{u'p'}}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} \\ & + \overline{vu'} \Delta u' - \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{u'u'^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{v'u'^2} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w'u'^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

また、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の収支式はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} (-\overline{u'w'}) = & \left(\overline{u'^2} \right) \frac{\partial W}{\partial x} - \left(\overline{u'v'} \right) \frac{\partial W}{\partial y} - \left(\overline{u'w'} \right) \frac{\partial W}{\partial z} \\ & - \left(\overline{u'w'} \right) \frac{\partial U}{\partial x} - \left(\overline{v'w'} \right) \frac{\partial U}{\partial y} + \overline{w'^2} \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right) \\ & + \left(\frac{\partial (\overline{u'^2 w'})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{u'v' w'})}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{u'w'^2})}{\partial z} + \frac{\partial \left(\frac{p' w'}{\rho} \right)}{\partial x} \right) \\ & + \left(\frac{\partial \left(\frac{p' u'}{\rho} \right)}{\partial z} \right) \\ & + v \Delta (-\overline{u'w'}) + 2v \frac{\partial u'}{\partial x_k} \frac{\partial w'}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $\Delta \equiv \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ 、 $k=1,2,3$ 、 $\overline{\quad}$ ：時間平均、 U ：主流方向の流速成分、 W ：鉛直方向の流速成分、 u' ：主流方向の変動速度成分、 v' ：横断方向の変動速度成分、 w' ：鉛直方向の変動速度成分、 p' ：圧力の変動成分、 ρ ：密度、 v ：動粘性係数である。式(2)において、乱れの減衰項として支配的になる項は、加速流の場合には右边第1項であり、乱れの発生項として支配的になるのは右边第3項であると考えられる。同様に式(3)についてみると乱れの減衰項として右边第4項、乱れの発生項として右边第6項が支配的となる項である。

図-13は、各流量における式(2)の右边第1項と右边第3項を、図-14は、各流量における式(3)の右边第4項と右边第6項を無次元化したものをそれぞれプロットしたものである。

これらより、式(2)については、各流量とも右边第1項が負となり乱れの減衰項、右边第3項が正となり乱れの発生項である。式(3)では、右边第4項が乱れの減衰項であり、右边第6項が乱れの発生項であることがわかる。

その発生項と減衰項の流下方向変化をみると、 $\bar{u}^2$ では、図-13より各流量とも右辺第1項の影響が右辺第3項より大きく、減衰項の影響は、流量の増加に伴い加速度が増大することで下流方向への影響範囲が拡大する。

$-\bar{u}'\bar{w}'$ は図-14をみると、 $q=75\text{cm}^2/\text{s}$ では発生項と減衰項は同程度の大きさと相殺している。 $q=150\text{cm}^2/\text{s}$ においては再付着点付近で減衰項である右辺第4項の影響が大きい。 $q=300\text{cm}^2/\text{s}$ では、全域にわたって右辺第4項の影響が右辺第6項より大きい。これから、式(2)では右辺第1項が、式(3)では右辺第4項がそれぞれの大きさを規定していると考えられる。

また、乱れの発生項の影響が小さいのは、加速流によって主流速の鉛直方向変化($\partial u/\partial z$)が、流下に従って鉛直方向に一様化し、さらに、式(2)では右辺第3項の $-\bar{u}'\bar{w}'$ が、式(3)では右辺第6項の $\bar{w}^2$ が流下方向に減少していることで乱れの発生項自身が流下方向に小さくなることも影響していると考えられる。

これから、再付着点より下流側の主流部においては、顕著な乱れエネルギーの減衰が生じていることが、レイノルズ応力の収支を検討することにより明らかとなった。したがって、Skimming flowにおけるエネルギー減勢は、階段隅角部にローラー状の渦が形成されることによる形状損失の効果が大きいことが考えられる。また、階段状水路においてエネルギー減勢効果を高めるには、加速区間を短縮するようなステップ形状の工夫が必要である。

6. まとめ

本研究では、急勾配階段状水路を設計する際の基礎的知見を得るために、流れ場が平衡状態に達した階段部分において、1ステップ内の流下方向の加速特性に着目し、水面変動および流速を計測し、乱流構造を解明するために実験的検討を試みた。その結果、つぎのような知見が得られた。

- (1)急勾配階段状流れは、階段形状と同位相の水面形で、流下に従いステップを基準にした水深が減少するが、その減少傾向は流量規模に応じて異なる。また、流量の増大に伴い加速度が大きくなる。最も強い加速を示すのは底面付近である。流下方向の乱れ特性量については流量が異なった場合でも、基本的には流下方向に

一様に減少する傾向を示す。

- (2)主流速の鉛直方向変化をみると底面付近での加速傾向が大きく、階段エッジ付近では鉛直方向に一様化する。また、乱れ特性量については、流下に従って小さくなり、階段エッジ付近では鉛直方向に一様化する。さらに底面付近の強い加速により、一般的な開水路等流に見られる底面付近で大きな乱れ特性量が小さくなる。
- (3)階段状流れの加速流での乱れ特性量の流下方向の減少傾向を主流方向の速度変動の大きさおよびレイノルズ応力の収支式を用いて検討した。その結果、 $\bar{u}^2$ は、減衰項である式(2)の右辺第1項 $-\bar{u}^2\partial u/\partial x$ がその大きさを規定し、かつ発生項である右辺第3項 $-\bar{u}'\bar{w}'\partial u/\partial z$ 自身が流下方向に減少しており、 $-\bar{u}'\bar{w}'$ では、減衰項の式(3)の右辺第4項 $-(\bar{u}'\bar{w}')\partial u/\partial x$ がその大きさを規定し、かつ発生項である右辺第6項 $\bar{w}^2\partial u/\partial z$ 自身が流下方向に減少していることを示した。

参考文献

- 1) Chanson, H.: Hydraulic Design of Stepped Cascades, channels, Weirs spillways, Pergamon, 1994.
- 2) 柏井条介：ダム景観設計における水理的課題に関する一考察，ダム技術，No.120, pp.25-34, 1996.9.
- 3) 芦田，江頭，安東：階段状河床形の形成機構と形状特性に関する研究，第30回水理講演会論文集，pp.743-749, 1984.
- 4) 長谷川，上林：溪流における淵・瀬（ステップ・プール）の形成機構とその設計指針，水工学論文集第40巻，pp.893-899, 1996.
- 5) Chamani, M. R. and Rajaratnam, N.: Characteristics of skimming flow over stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.125, No.4, pp.361-368, 1999.
- 6) Chanson, H.: Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes, *Journal of Hydraulics Research*, Vol.32, No.2, pp.213-218, 1994
- 7) Chanson H.: Hydraulic of skimming flow over stepped channels and spillways, *Journal of Hydraulics Research*, Vol.32, No.2, pp.445-461, 1994. Discussion: Vol.33(3), pp.414-419, 1995
- 8) 安田，高橋，大津：階段状水路の流水抵抗，水工学論文集第44巻，pp.527-532, 2000.
- 9) 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.

(2000. 10. 2受付)