

PSII-13

段落部における射流から常流への遷移

日大 理工 正員 大津 岩夫
日大 理工 正員○安田 陽一
日大 理工 正員 栗津 清蔵

段落部において射流から常流へ遷移する流れの流況は表1のように分類される¹⁾。ここでは、段落上の流れが射流である場合、段落面に作用する圧力に着目した運動量方程式から、与えられた段落上の水理条件および下流水深に対して、段落上を通過する主流の方向が定まることを示した。このことから表1に示す各流況が形成される成因について考察を加えた。

表1

運動量方程式の適用

段落上が射流で段落下流側で常流へと遷移する流れにおいて、図1に示す1,2断面間の流体をコントロール・ボリュームに選び、運動量方程式を適用する。

$(w/g)q(v_2 - v_1) = P_5 + P_1 - P_2$ (1)
 P_1, P_2 は 1,2断面に作用する全圧力であり、静水圧と考えられる。

$P_1 = wh_1^2/2$, $P_2 = wh_2^2/2$ (2)

段落面に作用する全圧力 P_5 は段落上を通過する主流の流線の曲率の影響を考慮して、次のようにおく。

$P_5 = kws(h_1 + s/2)$ (3)

ここで、 s は段落高さ、 k は段落面に作用する実際の圧力と静水圧との比である。

式(1),(2),(3)から、次式が得られる。

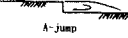
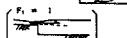
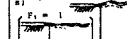
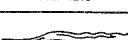
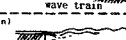
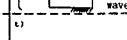
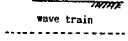
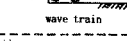
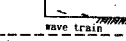
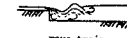
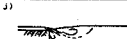
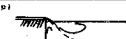
$$F_1^2 = \frac{(h_2/h_1)^2 - k(s/h_1)^2 - 2k(s/h_1) - 1}{2\{1 - 1/(h_2/h_1)\}} \quad (4)$$

ここで、 $F_1 = v_1 / \sqrt{gh_1}$ 。

フローパターンの考察

段落上の流れが全て射流で段落下流側で常流へ遷移する場合、式(4)を満足する必要がある。そこで、与えられた上流の水理条件($F_1, s/h_1$)に対して、下流水深 h_2/h_1 を変化させた場合の k の変化を式(4)から求めた。その一例を表2に示すように、下流水位を上げていくことによって、 k が1より大きくなる。つまり、 P_5 が静水圧より大きくなる。このことは、主流が段落直下で下に凸となる必要があることを意味する。すなわち、段落上を通過する流れが上向きとなることが示される。また、下流水位を下げたとき、表2に示されるように、下流水位が段落上の水位より高い状態($h_2/h_1 > s/h_1 + 1$)にもかかわらず、 k が1より小さくなる。つまり、 P_5 が静水圧より小さくなる。このことは主流が段落直下で上に凸となる必要があることを意味する。すなわち段落上を通過する流れが下向きとなることが示される。一般に、表2と同様な傾向が $0.5 \sim 1.5 \leq s/h_1 \leq 8.0 \sim 9.0, F_1 \geq 2.5 \sim 3.0$ の場合に得られる。すなわち、与えられた上流の水理条件($F_1, s/h_1$)に対して、下流水位を下げていったとき、下流水位が段落上の水位より高いにもかかわらず、段落上を通過する主流の方向が上向きから下向きへと変化する($k > 1$ から $k = 1$ を経て $k < 1$ となる)ことが示される。

すなわち、A-jumpの状態から下流水位を下げていくと、ある段階で段落上の流れは全て射流となる。そのとき、 k は1より大きくな

Low drop ($0.5 \leq s/h_1 \leq 8.0 \sim 9.0$)				High drop ($s/h_1 \geq 15 \sim 16$)			
$F_1 \geq 2.5 \sim 3.0$		$1.0 \leq F_1 \leq 2.5 \sim 3.0$		$F_1 \geq 2.5 \sim 3.0$		$1.0 \leq F_1 \leq 2.5 \sim 3.0$	
a1	 A-jump	f1	 $F_1 = 1$	e1	 A-jump	g1	 $F_1 = 1$
b1	 max. wave	g1	 $F_1 = 1$ wave train	e1	 wave train	g1	 $F_1 = 1$ wave train
c1	 wave train	h1	 wave train	e1	 wave train	g1	 wave train
d1	 wave train	i1	 wave train	e1	 wave train	g1	 wave train
a1	 (max. B-jump) max. plunging condition	j1	 max. plunging condition	e1	 max. plunging condition	g1	 max. plunging condition
a1	 (mini. B-jump) Limited jump	k1	 Limited jump	e1	 Limited jump	g1	 Limited jump

る必要がある。つまり、段落上を通過する流れが上向きとなる。このことによって、段落面下流側に大きな渦が誘起され、max. waveが形成される。また、max. waveの状態から下流水位を下げていくと、 k が1に近づく必要がある。つまり、段落上を通過する主流の方向が上向きから水平方向へと変化する。これにともない、段落面下流側に形成される渦は流下方向に長くなり、水面の動揺が下流側遠方まで続くようになる。すなわち、wave trainが形成される。wave trainの状態から下流水位を下げていくと、下流水位が段落上の水位より高いにもかかわらず、 k が1より小さくなる必要がある。つまり、段落上を通過する流れは下向きとなり、max. B-jumpが形成される。以上のように段落上を通過する主流の方向の変化にともない、段落面下流側に形成される渦の形状が変化する。このことから下流水位を下げることによって、max. waveの状態からwave trainを経てmax. B-jumpへと流況が遷移するものと推定される。また、wave trainの状態において、 $F_1 = 2.5 \sim 3.0$ のときは、 $s/h_1 = 1 \sim 2$ で $F_1 = 5$ のときは $s/h_1 \leq 4$ で段落上を通過する主流の方向は時間的に大きく変化し、図2に示す種々の流況を周期的に繰り返す場合がある。この場合、 k が1前後となる。このことは段落上を通過する主流の方向が上向き、下向きいずれにもなりやすいことを意味する。すなわち、図2に示す種々の流況が周期的に繰り返されるものと推定される。

上述（表1（b）～（d））以外の流況（表1（g）～（j）、（m）～（p）、（s）～（u））についても同様な考察から、段落上を通過する主流の方向が定まり、各流況が形成される成因について説明することができる。

なお、 $s/h_1 \leq 0.5 \sim 1.5$ 、 $F_1 \geq 2.5 \sim 3.0$ の場合、段落上の流れが射流であるとき、 k は1より小さくなる。このことから段落上を通過する主流の方向は下向きになる必要がある。すなわち、max. waveは形成されない。この場合、段落高さが非常に小さいことから、流況は水平水路の跳水の場合に近づく。

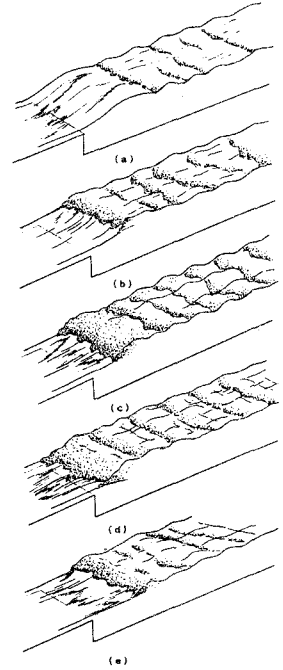


図2

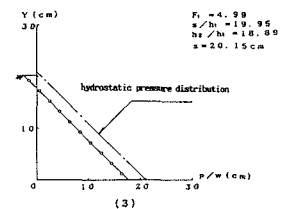
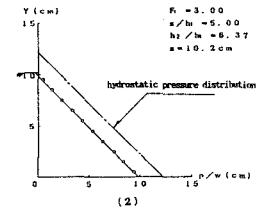
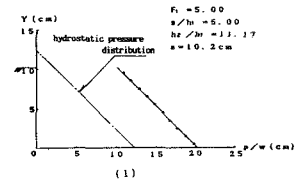


図3

段落面に作用する圧力

max. wave、およびmax. plunging conditionにおける段落面に作用する圧力の分布状態の一例を図3に示す。この図から段落面に作用する圧力は直線的に分布し、max. waveの場合、静水圧より大きく、max. plunging conditionの場合、静水圧より小さいことが理解される。なお、段落面に作用する圧力を実測することによって求められた k と、式（4）に実験で得た F_1 、 s/h_1 、および h_2/h_1 を代入することによって間接的に求められた k とは一致することが確かめられる²⁾。

記号説明

h_1 : 段落上の射流水深（図1）、 h_2 : 2断面での下流水深（図1）、
 q : 単位幅流量、 v_1, v_2 : 1, 2断面での平均流速

参考文献

1. 粟津、大津、安田、段落部における射流から常流への遷移、土木学会第43回年次講演会、1988、II-198
2. Ohtsu, I. and Yasuda, Y., Discussion of "Hydraulic jumps at positive and negative steps", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 25, 1987, No. 3, pp. 407-413.