

II-PS5

段落部における流れの特性

日大 理工 正員○安田 陽一
日大 理工 正員 大津 岩夫

鉛直段落の上部で常流から限界流を通過し、射流を経て段落下流側で常流へ遷移する流れは落差工や取水堰などで多く見られる。この場合、実験によると、下流水位の変化にともない段落部を通過する主流が水面に沿い、波状水面が下流側遠方まで続く流況（この流況をwave train¹⁾と呼ぶ）と段落下流側で主流が潜り込む流況（この流況をplunging condition¹⁾と呼ぶ）とが観察される。wave trainが形成される場合、下流側遠方まで水面の変動が大きく、河川兩岸の堤体侵食の原因にもなる。また、plunging conditionは、一見安定した流況として見られるが、ある下流水深のもとでは下流側広範囲にわたって水面に沿って逆流が生じ、カヌーがその逆流に巻き込まれるなどの事例が報告されている²⁾。しかしながら、wave trainやplunging conditionの形成領域については十分に解明されていない。また、plunging conditionの遷移領域の長さについても明確ではない。ここでは、広範囲な段落高さ [$1.0 \leq s/h_1 \leq 20$; s : 段落高さ, h_1 : 段落上の水深（この場合、 $h_1 = h_c$; h_c : 限界水深）] のもとで系統的検討を行ない、下流水位の変化にともなう段落部を越える流れの70-パターンについて説明を加え、流況を分類した。また、wave trainおよび plunging conditionの形成領域を明らかにした。さらに、plunging conditionの遷移領域の長さを表示した。

流況の分類 段落の上部で常流から限界流を通過し、射流を経て段落下流側で常流へ遷移する場合、段落高さによる流況の相違が認められる。すなわち、低段落水路 ($0.5 \sim 1.5 \leq s/h_1 \leq 8.0 \sim 9.0$) の場合と高段落水路 ($s/h_1 \geq 15 \sim 16$) の場合とで下流水深の変化にともなう一連の70-パターンが異なり、流況は表-1に示されるように分類される。

(1) 低段落水路 ($0.5 \sim 1.5 \leq s/h_1 \leq 8.0 \sim 9.0$) 段落部を通過する流れが全て常流である状態から下流水位を下げていくと、段落の上部で限界流が生じ、常流から限界流を経て射流へと変化する。このとき、段落部を通過した主流は水面に沿って流れ、水面の変動が下流側遠方まで続く。すなわち、wave trainが形成される（表-1(b), (c)）。この状態から下流水位を下げていくと、段落下流側で定常的なwaveが形成される（表-1(d)）。さらに下流水位を下げていくと、下流水位が段落高さより高い状態でwaveは碎波され、段落からの主流がplungingする。すなわち、plunging conditionが形成される。このplungingしたばかりの流況を maximum plunging conditionと呼ぶ¹⁾（表-1(e)）。plunging conditionの状態から下流水位を下げていくと、段落下流側の水平水路床で直ちに跳水が形成されるようになる（表-1(f)）。この流況をlimited jumpと呼ぶ¹⁾。

(2) 高段落水路 ($s/h_1 \geq 15 \sim 16$) 段落部を通過する流れが全て常流である状態から下流水位を下げていくと、段落の上部で限界流が生じるようになり、段落部からの主流が水面に沿うwave trainが形成される（表-1(h), (i)）。この状態から下流水位を下げていくと、低段落水路で観察された定常的なwaveは形成されず、下流水位が段落高さより低い状態で段落からの主流がplungingするようになる。すなわち、maximum plunging conditionが形成される（表-1(j)）。plunging conditionの状態から下流水位を下げていくと、limited jumpが形成される（表-1(k)）。

以上(1)、(2)で述べたmaximum plunging conditionおよび limited jumpは下流水位を下げていった場合に対して検討されたものであるが、低段落水路におけるmaximum plunging conditionの場合を除いて、下流水位を上げていった場合もこれらの流況はほぼ同一な水理条件 ($s/h_1, h_a/h_1$; h_a : 下流水深) のもとで形成される。低段落水路においてmaximum plunging conditionが形成される場合は、下流水位の上げ下げによる形成条件の違いが認められる。すなわち、下流水位を上げていくことによって得られるplunging conditionの上限での下流水深は 下流水位を下げていくことによって得られる maximum plunging conditionでの下流水深よりも大きくなる。なお、下流水位を上げていった場合、表-1(d)に示される流況は形成されず、maximum plunging condition の状態から、表-1(c)に示す流況に変化する。

各種の流況が形成されるための水理条件

段落部を通過する主流の流線の曲がりの影響を考慮して 段落面に作用する全圧力を $kws(2h_1+s)/2$ [k は段落面に作用する実際の圧力と静水圧との比を示

表-1 70-パターンの分類

低段落水路 ($0.5 \sim 1.5 \leq s/h_1 \leq 8.0 \sim 9.0$)	高段落水路 ($s/h_1 \geq 15 \sim 16$)
$F_1=1$	$F_1=1$
a)	g)
b)	h)
c)	i)
d)	
e)	j)
f)	k)

す]とし、段落の上部で限界水深となる断面と遷移部終端断面との間の流体をコントロール・リウムに選び、水平方向に運動量方程式を適用すると次式¹⁾が得られる。

$$k = \frac{(h_d/h_1)^2 - 2\{1 - 1/(h_d/h_1)\} - 1}{(s/h_1)^2 + 2(s/h_1)} \quad (1)$$

低段落水路 下流水位を下げていくことによって得られるmaximum plunging conditionの場合、 k は s/h_1 に関わらず実験的に $k \approx 0.64$ となり¹⁾、式(1)に代入することによって、水深間の関係 $h_d/h_1 = f(s/h_1)$ が求められる（図-1実線）。下流水位を上げていくことによって得られるmaximum plunging conditionの場合、 k は s/h_1 に関わらず実験的に $k \approx 0.83$ となり¹⁾、式(1)に代入することによって、水深間の関係が求められる（図-1点鎖線）。また、limited jumpの場合、 k は s/h_1 によって変化し、実験的に次式で示される¹⁾。

$$k = 0.17 - 10(-4.1(s/h_1)^2 - 0.025) - 0.85 \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入することによって水深間の関係が求められる（図-1二点鎖線）。

高段落水路 maximum plunging conditionの場合、 k は実験的に $k \approx 0.83$ となり¹⁾、式(1)に代入することによって水深間の関係が得られる（図-2実線）。また、limited jumpの場合、表-1(k)に示されるように、段落面と段落部を通過する流れとの間にair pocketが形成され、水深間の関係は実験的に式(3)で示される¹⁾（図-2一点鎖線）。

$$h_d/h_1 = 1.66 (s/h_1)^{0.19} \quad (3)$$

各流況の形成領域

低段落水路および高段落水路において段落の上部で限界流が生じるための水理条件³⁾ [式(1)に $k=1$ を代入することによって求められる（図-1、2破線）]およびmaximum plunging condition, limited jumpの水深間の関係から水面の変動が下流側遠方まで続くwave trainおよび段落部からの主流が潜り込むplunging conditionの形成領域が図-1, 2に示されるように明らかにされた。

遷移領域の長さ

plunging conditionおよびlimited jumpの遷移領域の長さ L_j の実験値を $L_j/H_L = f(H_L/H_1)$ (H_L : 遷移部による損失水頭, H_1 : 段落上部で限界水深となる断面での全水頭, H_L/H_1 : 相対エネルギー損失)の関係¹⁾で整理すると、実験的に次式で示される（図-3）。

$$\begin{aligned} \log_{10}(L_j/H_L) &= -4.8(H_L/H_1) + 2.2 \\ &\quad (0.07 \leq H_L/H_1 \leq 0.2) \\ \log_{10}(L_j/H_L) &= -1.71(H_L/H_1) + 1.58 \\ &\quad (0.2 \leq H_L/H_1 \leq 0.8) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 L_j は遷移部始端から常に逆流が観察されなくなった最初の鉛直断面までの水平長さとして定めた。

参考文献

- 1) Ohtsu, I. and Yasuda, Y., "Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop" J. of Hydr. Res., IAHR, 1991, 29 (3), pp. 309-328, and 1992, 30 (3), pp. 428-432.
- 2) Leutheusser, H. J. and Birk, W. M., J. of Hydr. Engrg., ASCE, 1991, 117 (2).
- 3) 芦田和男、土木研究所報告、第105号、1961.

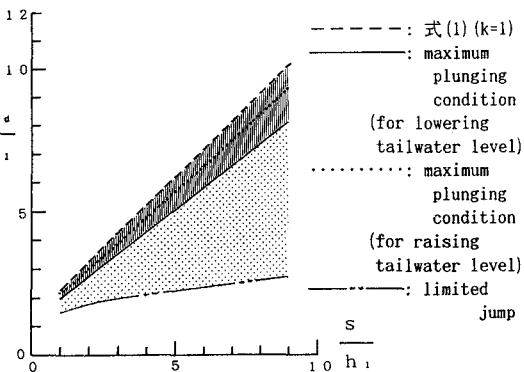


図-1 各流況の形成領域（低段落水路）

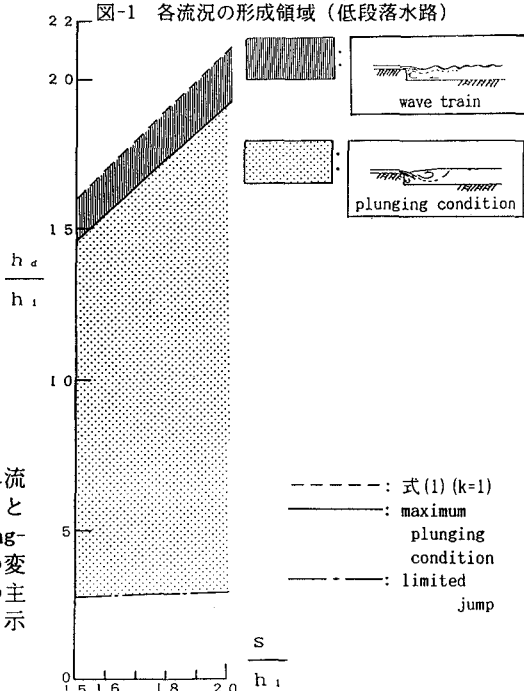


図-2 各流況の形成領域（高段落水路）

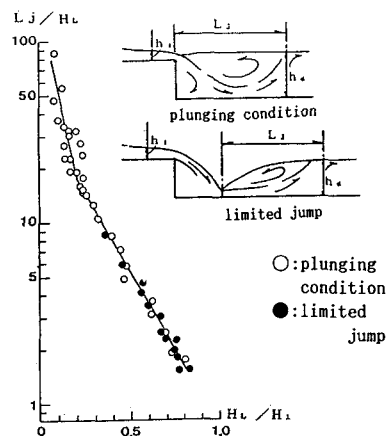


図-3 遷移領域の長さ