

II-197

段落ち部に射流が出現するときの水深評価について

西日本工業大学 正員 〇赤司 信義
西日本工業大学 正員 石川 誠
山口大学工学部 正員 斎藤 隆

1. はじめに 段落ち部の流れは、下流水位条件によって、完全越流、中間越流、不完全越流といった三種の越流形態を示し、中間越流ではもぐり噴流的な流れ込みの形態と波状水面を呈する形態とのどちらの形態をもとりうることはよく知られている。図1は段落ち部の流れの形態を下流水深に対応させて示したものである。これまでの分類によれば、下流水位がbより高い場合が不完全越流、bからaの間にある場合が中間越流、aより低い場合が完全越流となっている。下流水位がIIからaの間に下流水位がある時、段落ち部上の流れは射流であるが、そこでの水深は下流水位の影響を受けて変化する。従って、この範囲の流れは完全越流と呼ぶよりも流れ込みもしくは潜り噴流的な流れと呼ぶ方が適切であると考える。本研究では段落ち部の流れをこの4種の形態に分けて検討すると共に段落ち部に射流が出現している時の段落ち流れをポテンシャル流れとして取り扱い、段落ち部水深の検討を行うものである。

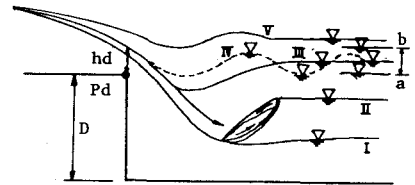


図1 段落ち部の流れの概略

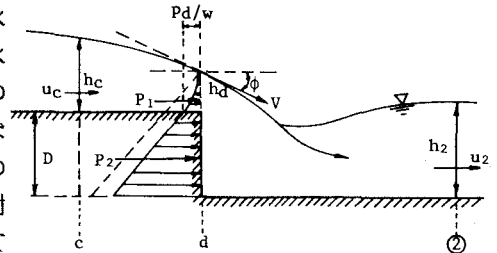


図2 流れ込みの時の概略

2. 段落ち流れの考察 【底面圧力】図2は流れ込みの時の概略を示している。今段落ち部の底面圧力を p_d/w とし (h_d は段落ち部での水深)、段落ち背後のピエゾ水頭を一定とすると段落ち背後に働く全水圧 P_2 は $P_2 = wD(2p_d/w + D)/2$ と示される。c断面(支配断面)と段落ち下流の②断面に運動量の定理を適用すると(1)式となり、底面圧力は(2)式となる。(2)式を D/h_c について書き直すと(3)式となる。

$$\rho qu_2 - \rho qu_c = \frac{w}{2} h_c^2 + \frac{w}{2} D(2\frac{p_d}{w} + D) - \frac{w}{2} h_2^2 \quad (1) \quad \frac{D}{h_c} = -\frac{p_d}{w} + \sqrt{(\frac{p_d}{w})^2 - \{3 - (\frac{h_2}{h_c})^2 - \frac{2}{h_2/h_c}\}} \quad (3)$$

$$\frac{p_d/w}{h_c} = \frac{2 + (h_2/h_c)^3 - 3(h_2/h_c) - (D/h_c)^2(h_2/h_c)}{2(D/h_c)(h_2/h_c)} = f(\frac{h_2}{h_c}, \frac{D}{h_c}) \quad (2)$$

【段落ち部の速度分布】段落ち部の流れをポテンシャル流れと仮定すると、y方向の力の釣合は(4)式で表され、流線の曲率半径分布を(5)式で、流線の傾角分布を(6)式で仮定して、速度分布を定めると(7)式となる。

$$\frac{V}{r \cos \phi} + \frac{dV}{dy} = 0 \quad (4) \quad \frac{r}{r_s} = \eta^m \quad (5) \quad \frac{\phi}{\phi_s} = \eta \quad (6)$$

$$\frac{V}{V_s} = \exp \left\{ \frac{h_d/r_s}{m+1} (1 - \eta^{m+1}) \right\}, \quad \frac{V_b}{V_s} = \exp \left(\frac{h_d/r_s}{m+1} \right) \quad (7)$$

【段落ち部の水深】水表面流線について比エネルギー一定の条件を適用すれば、水表面流速は(8)式となる。又、圧力分布は(9)式となる。(9)式に $y=0$ を代入して底面圧力を求め、(2)式と等置すれば、(10)式を得る。 V_b/V_s が既知であれば h_d を直ちに求めることができるが、 V_b/V_s を定めるためには r_s を求めなければならない。 r_s を定めるため、(11)式の連続の条件と、c断面とd断面間に底面摩擦を無視して運動量の定理を適用した(12)式を用いる。(11)式中の P_1 は(9)式を積分した値である。この時、(11)、(12)式を共に満たす、 ϕ_s と r_s を試算法で求め、 r_s を(7)、(10)式に代入することで h_d を求める事ができる。

$$V_s = \sqrt{2g(3h_c/2 - h)} \quad (8) \quad \frac{p}{w} = h_d - y + \frac{V_s^2}{2g} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{V}{V_s} \right)^2 \right\} \quad (9) \quad \frac{h_d}{h_c} = \frac{3}{2} + \frac{f-3}{2(V_b/V_s)^2} \quad (10)$$

$$q = V_s h_d \int_0^1 \frac{V}{V_s} \cos \phi d\eta \quad (11) \quad \rho \int_0^h (V \cos \phi)^2 dy - \rho qu_c = \frac{w}{2} h_c^2 - P_1 \quad (12)$$

4. 実験装置と方法 実験装置は長さ10m，幅40cm，高さ40cmの開水路途中7mの位置に5cm, 10.2cm, 16.2cmの段差を設けた開水路である。流量は5～23l/sで変化させ、ポイントゲージで水深を測定し、段落ち背後は背面にφ2mmの圧力孔を設けマンオメーターで読み取った。

5. 実験結果とその検討 図3は段落ち部の底面圧力測定値を(2)式(図中の実線)と比較したものである。実験値と計算値はよく一致していることが分かる。図4は図2の流れの形態の区分条件を検討したもので、3本の太い点線は、4領域の区分の実験値の平均的傾向を示したものである。図中の細い点線は、不完全越流と中間越流の限界は段落ち部底面圧力が $p_d/w=hc$ (段落ち断面の圧力分布が静水圧分布) の時と考え、中間越流と流れ込みの限界は $p_d=0$ と考えて、各々の条件を(3)式に代入したものが図中の細い点線と一点鎖線である。 $p_d/w=hc$ の点線は実験値の限界線とほぼ一致していること、 $p_d=0$ の一点鎖線については D/h_c が3以上では実験値とよく一致していることが認められる。図5は、段落ち部水深の実験値と計算値($m=0$)とを比較したものである。実線が計算曲線で、一点鎖線は計算曲線から定められる $h_2/D=1, 1.3$ の位置を連ねたものである。同図より、 D/h_c が一定のとき、 h_2 が低下するにつれて h_d も低下し一定値に近づくという傾向は合致している。実験値は $h_d=0.72h_c$ に近づく傾向があるのに対して、計算値は漸近値が D/h_c によって異なっている。 h_2/h_c が1に近づく時、 h_d/h_c は D/h_c に関わらず一定値に近づく傾向をここでは説明できないが、今後検討を進めるためには、底面付近にポテンシャル流れの仮定が成り立たないこと、段落ち部よりわずかに上流の支配断面では一般的に対数速度分布が成り立つと言われている、この対数速度分布の関係がどの様に関連付けられるのかということ等を検討せねばならないと考える。

D/hc	D (cm)		
	5	10.2	16.3
0.71, 0.72	○		
1.12~1.14	●		
1.44~1.46		▲	
1.79~1.85	●		
2.29~2.38		△	□
3.67~3.72		▲	■
6.04			■

計算曲線			
----	$p_d/w = hc$		
----	$p_d/w = 0$		
D (cm)	5	10.2	16.3
上部限界	○	△	□
下部限界	●	▲	■

実験: $h_2 = D$

露出射流共役水深			
D (cm)	5	10.2	16.3
	○	△	■

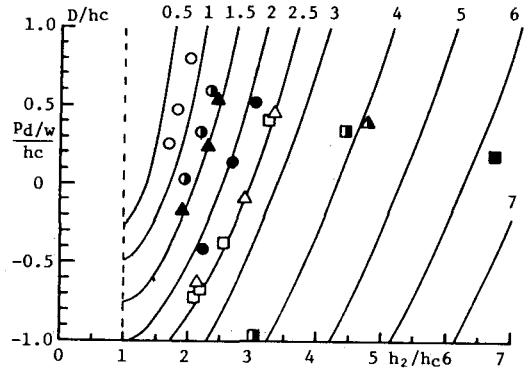
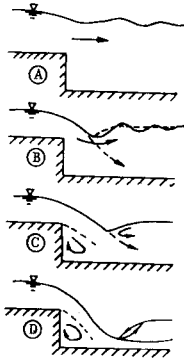


図3 段落ち部底面圧力の比較

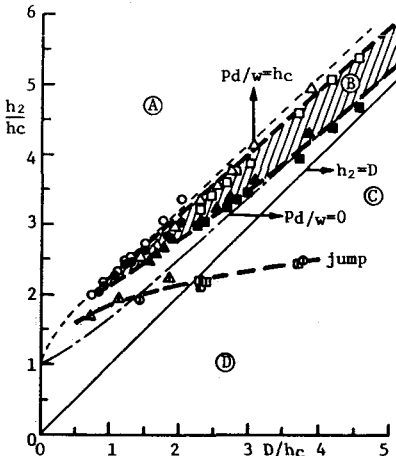


図4 段落ち部の流れの形態の区分条件について

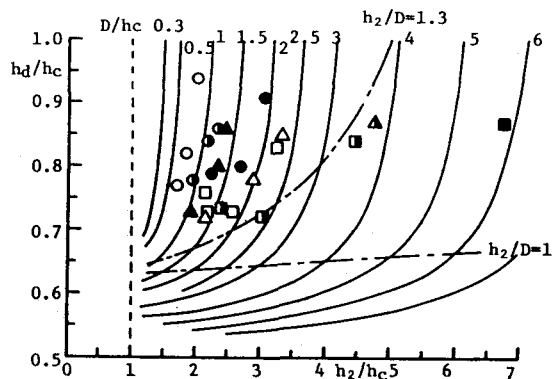


図5 段落ち部の流れの水深の評価