

段落ち部の底面圧力と水深評価について

西日本工業大学 正員○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。しかし、どのような条件のもとでこのように分類されるのかと言ったことはあまり明らかにされていない。本研究は、中間越流の出現機構の検討を行うためには、まず、段落ち部の水深と底面圧力を適切に評価することが必要であると考えて、完全越流（流れ込みも含めて）を対象として実験的に検討を行うものである。

2. 段落ち流れの概略 本研究では流れの形態を、図1に示すように四つの形態に分類しておく。すなわち、跳水始端が段落ち流れの衝突により最小水深を持つ断面より下流にある時を完全越流とし、下流水深が段落ち流れに影響を及ぼさない時である。IIからaまでの範囲にある下流水深のとき、流れがもぐり噴流的になる流れ込みの越流形態とする。次に、aからbの範囲の下流水深の時強制外力によって流れ込みにも波状流れにもなりうる領域を中間越流とする。さらに、下流水深がbより上にある時を、波状流れになる不完全越流とする。又、下流水深をIより漸次増大していくとbの下流水深の時突然流れ込みの形態から波状流れに変わる時の下流水深bを上界限とし、bより大きな水深から漸次減少させていくとaの下流水深の時波状流れから突然流れ込みに変わる時の下流水深aを下界限とする。

3. 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 p_d/w を βh_d 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 $P_2 = wD(2\beta h_d + D)/2$ 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)式と求められる。

【段落ち部水深】次に段落ち部の流れの流線の曲率半径分布を(3)式で仮定し速度分布を定めると(4)式となる。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(5)式となる。(4)式、(5)式より底面圧力を求め、(2)式と等置すれば、(6)式を得る。又、連続の条件より(7)式が成り立ち、c断面とd断面に底面摩擦を無視して運動量の定理を適用すれば(8)式が得られる。(5)～(8)式を無次元表示すれば(9)～(12)となる。段落ち部の水深は、 h_2/h_c , D/h_c を与えて、(2)式よりfを求め、(9),(10)を(11),(12)に代入し、(11),(12)式を共に満たす、 ϕ_s と r_s を試算法で求め、それらを(10)式に代入することで求められる。ここに、 $h_c = h_d/h_c$, $V_c = V_s/\sqrt{gh_c}$, $c^2 = \phi_s^2/2$, $a = h_d/r_s$

$$\rho q u_2 - \rho q u_c = \frac{w}{2} h_c^2 + \frac{w}{2} D(2\beta h_d + D) - \frac{w}{2} h_2^2 \quad (1)$$

$$2\beta \frac{h_d}{h_c} = \frac{2 + (h_2/h_c)^3 - 3(h_2/h_c) - (D/h_c)^2(h_2/h_c)}{(D/h_c)(h_2/h_c)} = f\left(\frac{h_2}{h_c}, \frac{D}{h_c}\right) \quad (2)$$

$$\frac{r}{r_s} = \eta^m \quad (3) \quad \frac{V}{V_s} = \exp\left\{\frac{a}{m+1}(1 - \eta^{m+1})\right\}, \quad \frac{V_b}{V_s} = \exp\left(\frac{a}{m+1}\right) \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{2g(3h_c/2 - h_d)} \quad (5) \quad V_o = \sqrt{3-2h_o} \quad (9) \quad F_{be} = \int_0^1 \left(\frac{V}{V_s} \cos \phi\right)^2 d\eta$$

$$\frac{f}{2} = h_d + \frac{V_s^2}{2g} \left\{1 - \left(\frac{V_b}{V_s}\right)^2\right\} \quad (6) \quad h_o = \frac{3}{2} + \frac{f-3}{2(V_b/V_s)^2} \quad (10) \quad F_{ce} = \int_0^1 \left(\frac{V}{V_s}\right)^2 d\eta$$

$$q = V_s h_d \int_0^1 \frac{V}{V_s} \cos \phi d\eta \quad (7) \quad V_o h_o F_{oe} = 1, \quad F_{oe} = \int_0^1 \frac{V}{V_s} \cos \phi d\eta \quad (11)$$

$$\rho \int_0^h (V \cos \phi)^2 dy - \rho q u_c = \frac{w}{2} h_c^2 - P_1 \quad (8) \quad 2V_o^2 h_o F_{be} + h_o^2 + h_o V_o^2 (1 - F_{ce}) = 3 \quad (12)$$

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 5~23 l/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 の圧力孔を設けマノ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)式による計算値と比較したものである。実験値の傾向とよく一致していることが分かる。図4は段落ち部の水深を計算値と比較したものである。実線は(3)式の曲率半径分布係数 m を0としたときの計算結果であり、点線は m を1としたときの計算結果である。ほぼ傾向は合致しているが、計算値は実験値に比して1割程度の差が現れている。これは、段落ち部の流れをポテンシャル流れで近似したことによるものと考えられる。図5は上部限界と下部限界時の下流水深及び、図1のIIの水面形状を呈する時の常流下流水深と跳水始端水深の関係を示したものである。この図より明瞭に2節で示した4領域の存在が認められる。

6. おわりに 段落ち部水深と底面圧力の評価を運動量の定理を用いて検討した。おおむね傾向は合致していた。上部限界、下部限界の出現機構を検討するためには、今後さらに段落ち部の速度分布についての考察を進めねばならないと考える。終わりに本研究を進める上で、実験に協力を頂いた西日本工業大学、岡本、池田、藤永、渡辺君に謝意を表す。

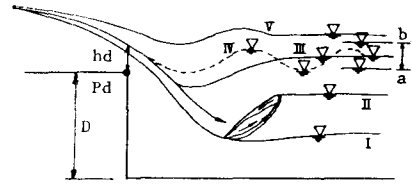


図1 流れの概略

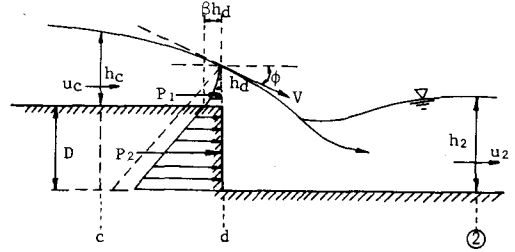


図2 流れ込みの時の概略

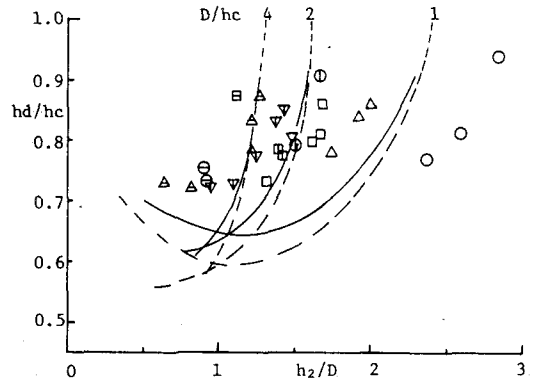


図4 段落ち部の水深

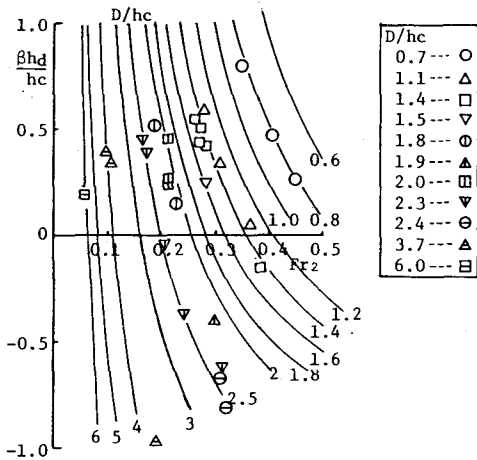


図3 段落ち部の底面圧力

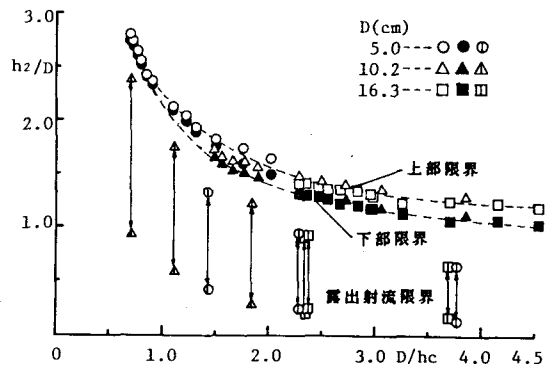


図5 中間越流が出現する下流水深