階段状水路における Nappe Flow のエネルギー減勢

日本大学理工学部	正会員〇	高橋正行	日本大学理工学部	正会員	安田陽一
日本大学大学院	学生員	小島淳史	日本大学理工学部	正会員	大津岩夫
西安理工大学 協定	官学会員	田嘉寧			

まえがき

階段状水路における流れの流況は Skimming Flow (階段状水路の隅角部で常にエアーポケットを形成せず、渦の形成 が認められる流況(図-1(a)参照)) と Nappe Flow (常にエアーポケットが形成され、越流水脈を伴う流況(図-1(c)参照)) と に大別され ^{1)~3}、水路傾斜角、流量、ステップ高さ、階段状水路の総落差によって変化する。従来、Skimming Flow の

流況が形成される場合の平衡状態となるための水理条件および Skimming Flow のエネルギー損失などの検討がなされ、実験結果 が示されている ^{1)~4}ものの、Nappe Flow において平衡状態となる ための水理条件および Nappe Flow のエネルギー損失については 不明な点が多い。ここでは、傾斜角度 19°の階段状水路上で形成 される Nappe Flow を対象に、階段状水路直下に形成される跳水 に着目し、Nappe Flow が形成される場合の平衡状態となるため の水理条件を明らかにした。また、Nappe Flow のエネルギー損 失を明らかにした。

階段状水路における Nappe flow の流れのエネルギー

階段状水路における Nappe flow のエネルギーH を求めるため、 階段状水路直下に跳水を形成させ跳水始端断面での全水頭 H₁を 以下のように間接的に求めた。なお、跳水始端断面は底面の圧力 水頭が最大となる位置と定義している。跳水始端断面での H₁は、流線の曲がりの影響を考慮し次式で示される。

$$\frac{H_1}{dc} = \alpha \frac{1}{2} \left(\frac{dc}{h_1} \right)^2 + \lambda_1 \frac{h_1}{dc}$$
(1)

$$\lambda_{1} = 1 + \frac{1}{\rho_{w} g q h_{1}^{2}} \int_{0}^{h_{1}} u \Delta p dy \qquad (2)$$

ここで、 α はエネルギー補正係数を示し、 $\alpha=1$ と仮定する。また、 h_1 は跳水始端水深、g は重力加速度、dc は限界水深($dc=\sqrt[3]{q^2/g}$; q は単位幅流量)、 λ_1 は圧力補正係数、

 ρ_w は水の密度、 Δp は静水圧分布からの圧力増加分(流体運動による圧力)であり、 $\Delta p = \rho_w g(h_p \cdot h_1)(h_1 \cdot y)/y$ で近似される。 また、u は流速を示し、実験的に u=U(y/h_1)^{1/8} で示され、U は y=h1 での流速、y は水路床からの高さである。また、階段状 水路直下に形成される跳水部を検査部に選び、運動量方程式 [(3)式]を用い、跳水終端水深 h_2 および跳水始端断面での底面 圧力 ρgh_p の実測値から跳水始端断面での射流水深 h_1 が間接 的に求められる³。



図-1 階段状水路の流況

a) Skimming flow, b) Transition flow, c) Nappe flow



キーワード: 階段状水路、流れのエネルギー、エネルギー減勢、Nappe flow、平衡状態 連絡先: 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8 TEL.& FAX. 03-3259-0409

$$\rho q^{2} \left(\frac{1}{h_{2}} - \frac{1}{h_{1}} \right) = \frac{1}{2} \rho g h_{1} h_{p} - \frac{1}{2} \rho g h_{2}^{2} \qquad (3)$$

間接的に求めた跳水始端での射流水深 h₁および圧力補正係数 $\lambda_1 \epsilon(1)$ 式に 代入し、跳水始端断面での全水頭 H₁/dc を求め、Nappe flow のエネルギー H/dc と等しいものと考え整理したものを図-3 に示す。図-3 に示されるよう に、水路傾斜角 θ =19°、相対ステップ高さ 1.3 \leq S/dc \leq 6.4 の実験範囲で は、与えられた H_{dam}/dc に対して、S/dc が変化したとしても H/dc の変化 は小さく、同一な値を示している。また、H_{dam}/dc が 25 以上の場合、H/dc の値はほぼ一定値を示している。Nappe flow のエネルギーH/dc について は実験式(5)式で近似される。なお、実験範囲における誤差(|Hex. – H_{cal}|/H_{cal}×100%; H_{ex}:実験値、H_{cal}:計算値)は 7%以下である。

$$\frac{H}{dc} = 3.5 - 2.0EXP \left\{ -0.001 \left(\frac{H_{dam}}{dc} \right)^2 - 0.15 \frac{H_{dam}}{dc} \right\}$$
(5)

 $(1.3 \le S/dc \le 6.4, 8 \le H_{dam}/dc \le 80, \theta=19^{\circ})$

図-4に相対跳水終端水深 hg/dc と相対ダム高さ H_{dam}/dc との関係を示す。 図-4 に示されるように H_{dam}/dc が 25 以上の場合、H_{dam}/dc の変化による hg/dc の変化が小さい。

図-3、4から、 θ =19°、1.3 \leq S/dc \leq 6.4の場合、H_{dam}/dc が 25以上であ れば、流れのエネルギーH/dc および階段状水路直下に形成された跳水終端 水深 h₂/dc の大きさがほぼ一定値を示すようになり、Nappe flow における 平衡状態が生じたものと考えられる。

階段状水路における Nappe flow のエネルギー損失

階段状水路によるエネルギー損失 ΔH₁を求めるため、階段状水路直上流の断面と直下流の断面との間でベルヌーイの定理を適用し、(6)式が得られる。

$$\frac{\Delta H_{1}}{H_{max}} = 1 - \frac{H/dc}{H_{dam}/dc + 3/2}$$
(6)





階段状水路における Nappe flow の相対エネルギー損失 ΔH₁/H_{max} は(5)、(6)式より求められ、(7)の関係で示される(図·5)。 ΔH₁/H_{max}=f(H_{dam}/dc) (7)

図-5 に示されるように、誤差 5%以内で $\Delta H_1/H_{max}$ の値を算定することができる。なお、Pinherioの実験結果 5と比較すると、本実験結果と同様な傾向を示している。

まとめ

水路傾斜角 19°を有する階段状水路における Nappe flow の残留エネルギーを明らかにし、残留エネルギーおよび階段 状水路直下に形成させた跳水終端水深の変化から平衡状態になるための条件を示した。また、1.3≦S/dc≦6.4 の範囲では 階段状水路の流れの残留エネルギーH/dc および相対エネルギー損失 ΔH₁/H_{max}の変化に対する相対ステップ高さ S/dc の 影響が小さいことを明らかにした。さらに、Nappe flow の残留エネルギーについて実験式を提案し(5)式を用いて階段状 水路による相対エネルギー損失を 5%以内の誤差で予測できるようにした。 参考文献

- Y., Yasuda, M., Takahashi, and I., Ohtssu, (2001), "Energy Dissipation of Skimming Flows on Stepped-Channel Chutes.", Proc. of 29th IAHR Cong., Theme D, Vol. 1, IAHR, pp. 531-536.
- 2. 高橋正行,安田陽一,大津岩夫,(2001)," 階段状水路における Skimming flow のエネルギー減勢," 水工学論文集、土木学会,第45巻, pp. 415-420.
- 3. 安田陽一、高橋正行、大津岩夫、(2000)、"階段状水路の流水抵抗"、水工学論文集、土木学会、第44巻、pp. 527-532.
- 4. H., Chanson, (2002)," The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways", A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- 5. A., N., Pinheiro, (2000), "Nappe flow in Stepped Channels-Occurrence and Energy Dissipation," Hydraulics of Stepped Spillways, Balkema, Rotterdam, pp. 119-126.