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 日本大学大学院 学生員 小島淳史 西安理工大学 協定学会員 田 嘉寧 日本大学理工学部 正会員 安田陽一 日本大学理工学部 正会員 大津岩夫

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 12-33、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 かものの、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)

$$\lambda_1 = 1 + \frac{1}{\rho_w g q h_1^2} \int_0^{h_1} u \Delta p dy$$
 (2)

ここで、 α はエネルギー補正係数を示し、 α =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 は圧力補正係数、

 $\rho_{\rm W}$ 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、 $\Delta p = \rho_{\rm W} g(h_{\rm P} \cdot h_{\rm I})(h_{\rm I} \cdot y)/y$ で近似される。また、u は流速を示し、実験的に $u = U(y/h_{\rm I})^{1/8}$ で示され、U は $y = h_{\rm I}$ 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 $\rho g h_p$ の実測値から跳水始端断面での射流水深 $h_{\rm I}$ が間接 的に求められる 3 。

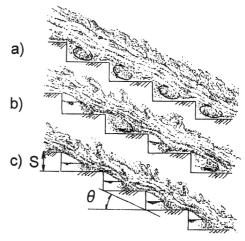
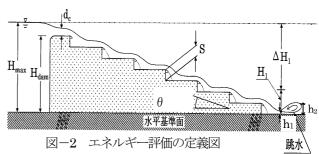


図-1 階段状水路の流況

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



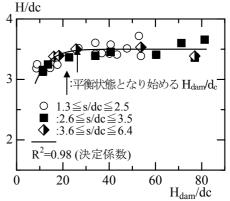


図-3 Nappe flowのエネルギーと 相対ダム高さの関係

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

$$\rho q^{2} \left(\frac{1}{h_{2}} - \frac{1}{h_{1}} \right) = \frac{1}{2} \rho g h_{1} h_{p} - \frac{1}{2} \rho g h_{2}^{2}$$
 (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 λ1 を(1)式に 代入し、跳水始端断面での全水頭 Hı/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、Hdam/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.-Hcal | /Hcal × 100%; Hex:実験値、Hcal: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)

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

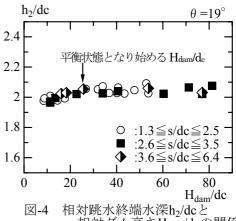
図-4に相対跳水終端水深h₂/dcと相対ダム高さHdam/dcとの関係を示す。 図-4 に示されるように H_{dam}/dc が 25 以上の場合、H_{dam}/dc の変化による h₂/dc の変化が小さい。

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。

$$\Delta H_1 / H_{\text{max}} = 1 - \frac{H/dc}{H_{\text{dam}}/dc + 3/2}$$
 (6)



相対ダム高さH_{dam}/dcの関係

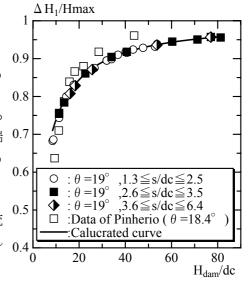


図-5 Nappe flowの相対エネルギー損失

階段状水路における Nappe flow の相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{max}$ は(5)、(6)式より求められ、(7)の関係で示される(図-5)。 $\Delta H_1/H_{max}=f(H_{dam}/dc)$ (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/Hmax 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。

- 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.
- 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.
- 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.
- A., N., Pinheiro, (2000), "Nappe flow in Stepped Channels-Occurrence and Energy Dissipation," Hydraulics of Stepped Spillways, Balkema, Rotterdam, pp. 119-126.