

(II-8)

階段状水路における Nappe flow のエネルギー減勢

日本大学大学院理工学研究科 ○学 員 小島淳史

日本大学理工学部 正 員 安田陽一

日本大学理工学部 正 員 大津岩夫

1. まえがき

堰やダムから越流する高速流を減勢させる方法の一つとして、階段状水路が用いられている。また日本では、急勾配河川が多く連続設置された落差工や砂防堰堤などの落差を伴う構造物が階段状水路となる場合がある。そのような構造物を越える流れは、流入する流量に対して落差が比較的大きいため越流水脈を伴う場合が多い。水工設計上、階段状水路における流れのエネルギー減勢を知ることは重要である。従来、階段状水路におけるエネルギー減勢について多くの研究者^{1)~3)}によって検討がなされている。特に各ステップで air-pocket が形成されることなく、常にステップ隅角部で渦が形成される流況 (Skimming flow) については、広範囲な水路傾斜角度のもとで検討がなされている³⁾。しかし、Nappe flow (各ステップを越える流れが越流水脈を伴い air-pocket が形成される流況) によるエネルギー減勢について不明な点が多い。本研究では、Nappe flow を対象とし、階段状水路直下流側に形成される跳水の水量間の関係から階段状水路によるエネルギー損失の評価を行った。また、水路傾斜角度が 19° における Nappe flow の相対エネルギー損失について他の研究者による実験結果と比較を行った。さらに Skimming flow と Nappe flow における相対エネルギー損失の比較および検討を行った。

2. 流況の形成条件

階段状水路における流況は、相対ステップ高さ s/d_c 、相対ダム高さ H_{dam}/d_c 、水路傾斜角 θ によって変化し、Skimming flow と Nappe flow に区分される³⁾。なお、二つの流況の間には中間的な流況³⁾ (Transition flow) が存在する。各流況の形成範囲を図-1 に示す。本研究では Nappe flow の流況を対象とする。

3. 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 ΔH_1 を求めるため、階段状水路上流側の断面と階段状水路直下における跳水始端部とでベルヌーイの定理を適用すると、(1)式が得られる。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_{dam} は階段状水路の高さ、 d_c は限界水深 [$d_c=(q^2/g)^{1/3}$; q : 単位幅流量; g : 重力加速度]、 H_1 は階段状水路直下での全水頭、 h_1 は跳水始端水深、 λ_1 は階段状水路直下での圧力補正係数である。

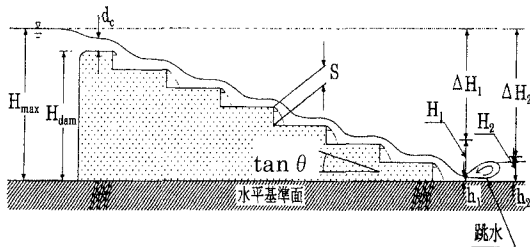


図-2 定義図

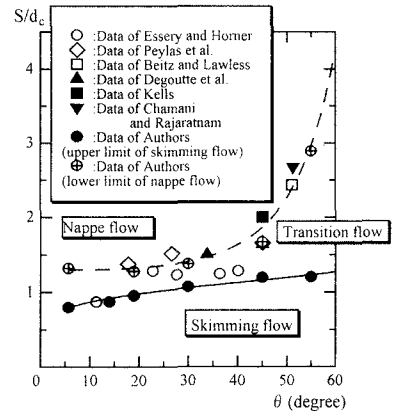


図-1 流況形成領域図

$$\begin{aligned} H_{\max} &= H_{dam} + 1.5 d_c = H_1 + \Delta H_1 \\ &= \alpha \frac{q^2}{2gh_1^2} + \lambda_1 h_1 + \Delta H_1 \cdots (1) \end{aligned}$$

$$\lambda_1 = 1 + \frac{1}{wqh_1} \int_0^{h_1} u \Delta p dy \cdots (2)$$

ただし、(2)式における Δp は静水圧からの圧力の増加分を示し、また u は流速を示し、実験的に $u=U(y/h_1)^{1/8}$ で示される。なお、 U は $y=h_1$ の流速、 y は水路床からの高さである。

Nappe flow による相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ は (1)式より (3)式のように示される。

階段状水路直下流部での射流水深 h_1 については、階段状水路直下に形成される跳水部を検査部を選び、運動量方程式 [(4)式] を用いて跳水終端水深 h_2 および跳水始端での底面圧力 ρgh_p の実験値から間接的に求められる。

$$\frac{\Delta H_1}{H_{\max}} = 1 - \frac{\left(\frac{h_1}{d_c}\right)^{-2} + 2\lambda_1 \left(\frac{h_1}{d_c}\right)}{2 \left(\frac{H_{dam}}{d_c}\right) + 3} \cdots (3)$$

$$\rho q^2 \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right) = \frac{1}{2} \rho gh_1 h_p - \frac{1}{2} \rho gh_2^2 \cdots (4)$$

キーワード：階段状水路、Skimming flow、Nappe flow、減勢工

連絡先：住所、〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8 TEL. & FAX. 03-3259-0409

階段状水路直下での相対水深(h_1/d_c)および λ_1 は、相対ダム高さ H_{dam}/d_c 、水路勾配 $\tan \theta$ 、階段状水路の段数 N によって変化するものと推測され、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{max}$ は(5)式の関係で示される。

$$\Delta H_1/H_{max} = f(H_{dam}/d_c, \tan \theta, N) \cdots (5)$$

従来 Chanson¹⁾は、Rand⁴⁾による実験式(6)から得られる射流水深がどのステップ面上でも形成されているものと仮定し、(1)式を用いて Nappe flow の相対エネルギー損失を求めている。(図-3、実線および破線)。

$$\frac{h_1}{s} = 0.54 \left(N \frac{d_c}{H_{dam}} \right)^{1.275} \cdots (6)$$

Nappe flow の相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{max}$ の実験値を(5)の関係で整理したものを図-3に示す。なお図中には Pinheiro による実験値²⁾もプロットされている。図に示されるように $\theta=19^\circ$ の場合、 $2.22 \leq S/d_c \leq 6.47$ の範囲では、 N の値によらず $\Delta H_1/H_{max}$ は H_{dam}/d_c によって変化する。また、Pinheiro による実験結果は、本実験結果と同様な傾向を示している。さらに、Chanson¹⁾によって提案した式においては、図-3 実線、破線に示されるように、与えられた H_{dam}/d_c に対して $\Delta H_1/H_{max}$ が N によって変化する。実験値と比較すると、 $N=12$ では同様な結果を示すが、 $N=4$ の場合、実験値と異なった値を示す。すなわち、Chanson¹⁾による提案式では、実験結果を十分に説明できない。なお、(1)、(6)式から $\Delta H_1/H_{max}$ を算定するにあたり、 $H_{dam}=NS$ の関係が用いられている。

4. Skimming flow と Nappe flow における相対エネルギー損失の比較

Skimming flow の相対エネルギー損失は、与えられた $\tan \theta$ 、 H_{dam}/d_c に対して図-4に示されるように S/d_c によって変化する³⁾。また $S/d_c \geq 0.5$ の場合、 S/d_c による $\Delta H_1/H_{max}$ の変化は小さく、 $\Delta H_1/H_{max}$ の値が最も大きくなる。今回 Nappe flow の相対エネルギー損失と比較を行った Skimming flow の相対エネルギー損失は、 $S/d_c \geq 0.5$ の場合を対象としている。与えられた同一水路勾配 $\tan \theta=0.344$ に対して Nappe flow の場合と Skimming flow の場合における相対エネルギー損失の比較を図-5に示す。図に示されるように、与えられた H_{dam}/d_c に対して Nappe flow と Skimming flow の相対エネルギー損失は、ほぼ同一の値を示す。

5. まとめ

水路勾配 $\tan \theta=0.344$ において Nappe flow の相対エネルギー損失を示し、 $2.22 \leq S/d_c \leq 6.47$ の範囲では、 N の値に関わらず、 $\Delta H_1/H_{max}$ は H_{dam}/d_c によって変化する事を明らかにした。また、Chanson¹⁾による提案式から Nappe flow の実験結果を十分に説明することが出来ないことを示した。 $2.22 \leq S/d_c \leq 6.47$ の Nappe flow と $S/d_c \geq 0.5$ の skimming flow の相対エネルギー損失を比較すると、 $\tan \theta=0.344$ では与えられた H_{dam}/d_c に対して、ほぼ同じ相対エネルギー損失の値となることを示した。すなわち、与えられた $\tan \theta$ 、 H_{dam}/d_c に対して階段状水路の流況が変化したとしても、相対エネルギー損失の値に変化がほとんど認められない場合があることを初めて示した。

参考文献

1. Chanson, H. (1994), "Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes," Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 32, No.2: pp. 213-218.
2. Antonio N. Pinheiro, (2000), "Nappe flow in Stepped Channels-Occurrence and Energy Dissipation," Hydraulics of Stepped Spillways, Balkema, Rotterdam, pp. 119-126.
3. 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.
4. RAND, W. (1955), "Flow Geometry at Straight Drop Spillways," Proceeding, ASCE, Vol. 81, No. 791, pp. 1-13.

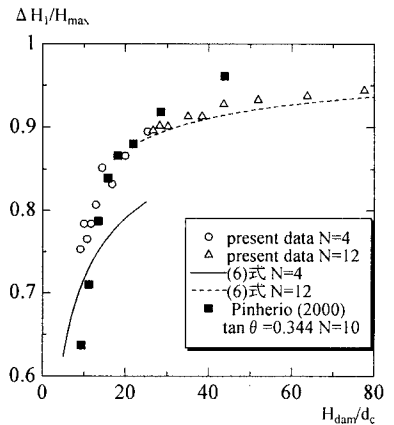


図-3 nappe flow の相対エネルギー損失 ($\tan \theta=0.344$)

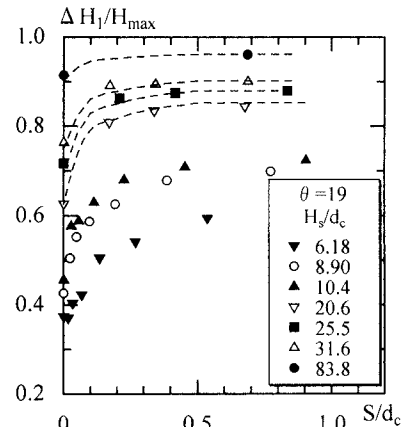


図-4 $\theta=19^\circ$ skimming flow における相対エネルギー損失に対する相対ステップ高の影響

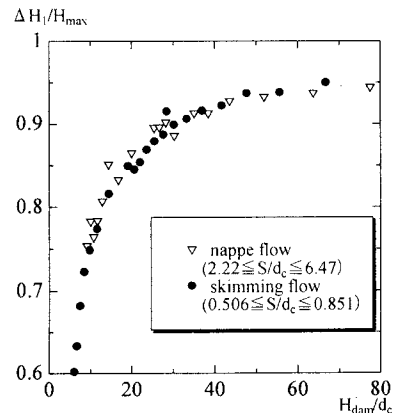


図-5 nappe flow と skimming flow の相対エネルギー損失の比較 ($\tan \theta=0.344$)