

Skimming flow と Nappe flow のエネルギー損失の比較

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 高橋正行 京都大学大学院工学研究科 正会員 角 哲也
 日本大学大学院理工学研究科 学生員 〇小島淳史 日本大学理工学部 正会員 大津岩夫

まえがき

落差を伴う構造物から流出する射流のエネルギー減勢として階段状水路の利用が有効であることから、階段状水路を流下する流れのエネルギー減勢を解明することは水工設計上重要である。階段状水路において形成される流況は Skimming flow (階段状水路の隅角部で常にエア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 (常にエアポケットが形成され、越流水脈を伴う流況(図-1(c)参照)) および Transition flow であり¹⁾²⁾、各流況によって階段状水路によるエネルギー損失がどのように変化するかを知る必要がある。従来、Nappe flow と比べて Skimming flow の相対エネルギー損失が大きくなると言われている⁴⁾が不明な点が多い。また、各流況のエネルギー評価方法について検討の余地がある。ここでは、階段状水路直下流側に形成される跳水に着目して各流況のエネルギー評価方法を提案した。また、Skimming flow において傾斜角度 19° のとき、流水抵抗が他の角度に比べて最も大きくなることから、傾斜角度 19° の階段状水路を対象として、各流況のエネルギー損失を明らかにし、各流況のエネルギー損失の比較を行った。

階段状水路における射流のエネルギー

$\theta=19^\circ$ で形成される Skimming flow の場合、流下する射流のエネルギーは次式によって求められる。

$$\frac{H}{dc} = \frac{1}{2} \left(\frac{dc}{d_w} \right)^2 + \frac{d_w}{dc} \cos \theta \quad (1)$$

ただし、 d_w は射流水深であり、空気混入した流れの場合水だけに換算した水深である。また、 dc は限界水深 ($dc = \sqrt[3]{q^2/g}$; q は単位幅流量) である。なお、 $\theta=19^\circ$ の場合仮想底面と平行な流れが形成されているため、静水圧分布と仮定している。

Nappe flow および Transition flow の流況は、 $\theta=19^\circ$ の場合、各ステップ水平面に衝突しながら流下するため、射流のエネルギー H は流線の曲がりの影響を考慮し、次式によって求められる。

$$\frac{H}{dc} = \alpha \frac{1}{2} \left(\frac{dc}{h_w} \right)^2 + \lambda \frac{h_w}{dc} \quad (2), \quad \lambda = 1 + \frac{1}{wqh_w^2} \int_0^{h_w} u \Delta p dy \quad (3)$$

ここで、 $\alpha=1$ と仮定する。また、 h_w は射流水深(空気混入した場合は水に換算した水深)、 g は重力加速度、 λ は圧力補正係数、 Δp は静水圧分布からの圧力増加分、 u は流速を示し、実験的に $u=U(y/h)^{1/8}$ で示される。なお、 U は $y=h$ での流速、 y は水路床からの高さである。

階段状水路におけるエネルギーの評価方法

階段状水路を流下する流れのエネルギー H を評価するためには、(1)、(2)式から明らかなように、階段状水路の射流水深($d_w/dc, h_w/dc$)および圧力補正係数 λ を求める必要がある。ここでは、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 H_1/dc が、階段状水路から流下する射流のエネルギー H/dc と等しいものとする。また、跳水始端断面での全水頭 H_1/dc は次式によって求められる。

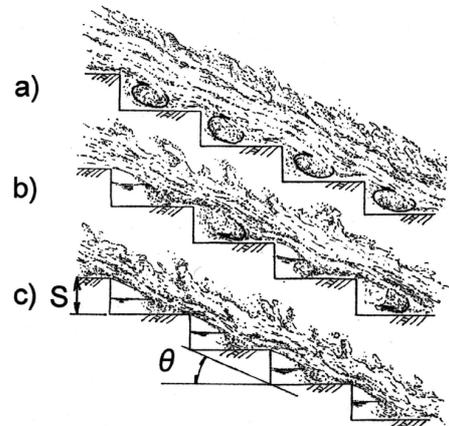


図-1 階段状水路の流況

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

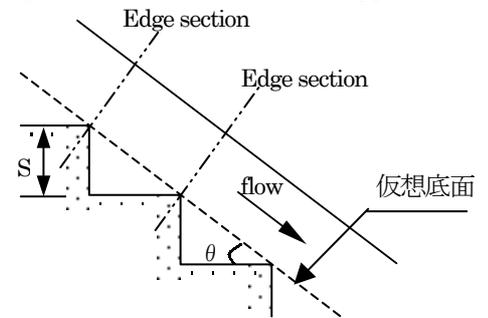


図-2 Skimming flow

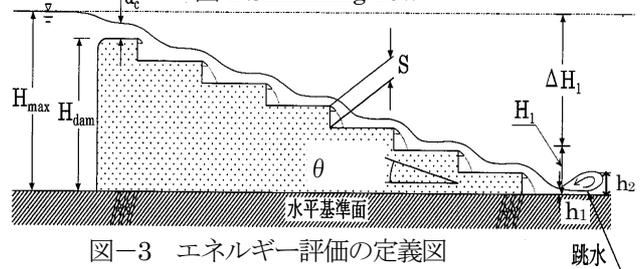


図-3 エネルギー評価の定義図

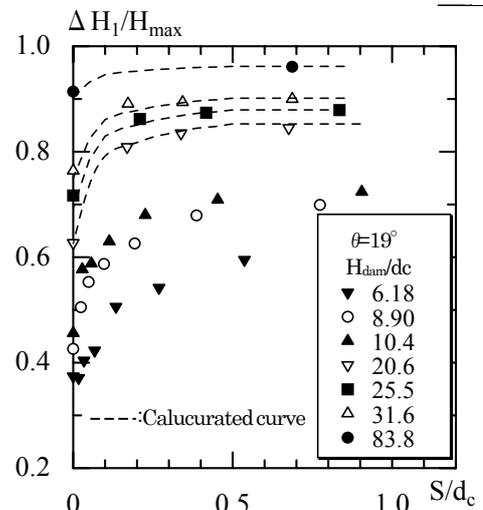


図-4 Skimming flow における相対エネルギー損失に対する相対ステップ高の影響

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、階段状水路流れ、跳水
 連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8 TEL. & FAX. 03-3259-0409

$$\frac{H_1}{dc} = \frac{1}{2} \left(\frac{dc}{h_1} \right)^2 + \lambda_1 \frac{h_1}{dc} \quad (4)$$

なお、圧力補正係数 λ_1 は(3)式から求めた¹⁾。また、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[(5)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 を間接的に求めた³⁾。

$$\rho q^2 \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right) = \frac{1}{2} \rho gh_1 h_p - \frac{1}{2} \rho gh_2^2 \quad (5)$$

階段状水路による射流のエネルギー損失

階段状水路上流側の断面と階段状水路直下の断面との間でベルヌーイの定理を適用すると、(6)式が得られる。なお、 H_{dam} は階段状水路の高さである。

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

階段状水路による射流の相対エネルギー損失 $\Delta H_1 / H_{max}$ は(4)、(5)、(6)式から求められ、各流況の相対エネルギー損失について整理したものを図-4、5に示す。

図-4に示されるように Skimming flow の相対エネルギー損失 $\Delta H_1 / H_{max}$ は、与えられた θ 、 H_1 / dc に対して S/dc によって変化する^{1),2)}。また $S/dc \geq 0.5$ の場合、与えられた H_{dam}/dc に対して S/dc による $\Delta H_1 / H_{max}$ の変化は小さく、最大値をとる。

図-5に示されるように $\theta=19^\circ$ 、 $0.96 \leq S/dc \leq 6.4$ の範囲では、Nappe flow および Transition flow における相対エネルギー損失 $\Delta H_1 / H_{max}$ は、与えられた相対ダム高さ H_{dam} / dc に対して S/dc による変化は小さく、ほぼ同一な値を示している。

階段状水路による各流況の相対エネルギー損失 $\Delta H_1 / H_{max}$ の比較を図-6に示す。ここに、Skimming flow の相対エネルギー損失は $S/dc \geq 0.5$ の場合を対象としている^{1),2)}。

$\theta=19^\circ$ の場合、図に示されるように、与えられた H_{dam} / dc に対して Nappe flow、Skimming flow、Transition flow の相対エネルギー損失は、ほぼ同一の値を示す。これは、水路傾斜角 $\theta=19^\circ$ 、相対ステップ高さ $S/dc \geq 0.5$ では流況が変化したとしても、主流がステップに衝突する位置が変化しなかったため、形状抵抗に対するステップ高さ S/dc の影響が小さかったものと考えられる。なお、 $S/dc \geq 0.5$ の Skimming flow の場合、ステップエッジ付近から時間的に不規則に空気層が形成される流況となるため、エネルギー損失に対するステップ隅角部に形成される渦の影響が小さいと考えられる。

まとめ

水路傾斜角 $\theta=19^\circ$ の階段状水路を対象に、階段状水路におけるエネルギー評価方法を示した。また、階段状水路直下に形成される跳水を用いることによって、流況に関わらず同一なエネルギー評価方法を用いることが可能であることを示した。また、 $1.3 \leq S/dc \leq 6.4$ の Nappe flow と $S/dc \geq 0.5$ の Skimming flow、Transition flow の相対エネルギー損失を比較すると、 $\theta=19^\circ$ では与えられた H_{dam} / dc 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 θ 、 H_{dam} / dc に対して階段状水路上の流況が変化したとしても、 $0.5 \leq S/dc \leq 6.4$ の範囲では相対エネルギー損失の大きさはほとんど変化しないことを示した。

参考文献

1. Y., Yasuda, M., Takahashi, and I., Ohtsu, (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.

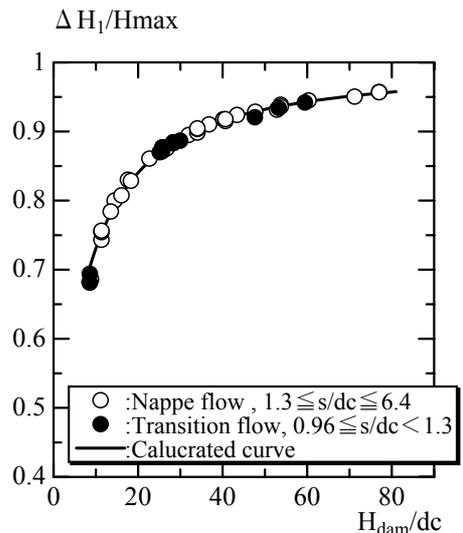


図-5 Nappe flow および Transition flow の相対エネルギー損失 ($\theta=19^\circ$)

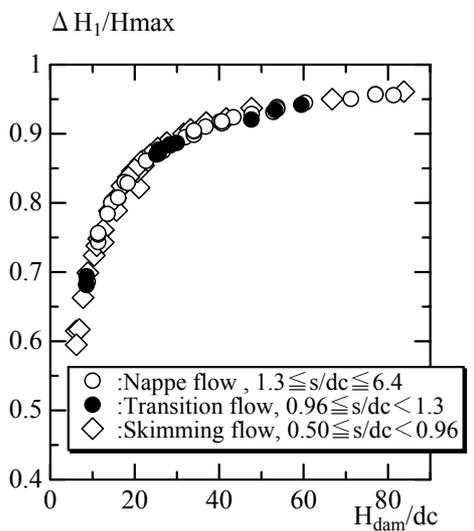


図-6 各流況における相対エネルギー損失の比較 ($\theta=19^\circ$)