

II-106

階段状水路におけるエネルギー損失

日大院 理工 学 遠藤 和雄
日大 理工 正 安田 陽一
日大 理工 正 大津 岩夫

1. まえがき

急勾配水路における流れの流速を小さくするための方法として、階段状水路の利用が挙げられる¹⁾。さらに、美的景観上、水質浄化上、階段状水路が用いられる場合がある²⁾。ここでは、階段状水路における流れのエネルギー損失について検討を加えた。

2. 流況

階段状水路における流れの流況は、傾斜角 α 、ステップ高さ s 、および単位幅流量 q によって変化し、図-1に示されるようにskimming flowとnappe flowとに大別される³⁾。skimming flowはステップを越える流れの水面がステップの凹凸に大きく影響され、比較的滑らかな状態を呈する流況である(図-1(a))。nappe flowはステップを越える流れの水面がステップの凹凸に大きく影響され、水面が大きく乱れる状態を呈する流況である(図-1(b))。各流況の形成条件については、 $s/d_c \leq 1.25$ (d_c :限界水深)の場合skimming flowとなり、 $s/d_c > 1.25$ の場合nappe flowになることが報告されている⁴⁾。なお、nappe flowが形成されるための水理条件については傾斜角 α によっても異なることが実験的に示され、また、このことは他の研究者^{5),6)}によっても指摘され検討の余地がある。

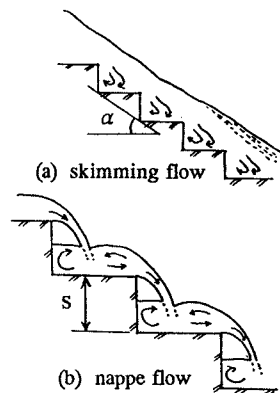


図-1 流況

3. 階段状水路における流れのエネルギー損失

skimming flowによる相対エネルギー損失 $\Delta H/H_{max}$ は階段を越える流れが近似的に等流状態であると解釈するとベルヌーイの定理から(1)式で示される。

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{(f/8 \sin \alpha)^{1/3} \cos \alpha + 1/2(f/8 \sin \alpha)^{-2/3}}{3/2 + H_{dam}/d_c} \quad (1)$$

ここに、 f は摩擦抵抗係数であり、 H_{dam} はダム高さである。また、 $H_{max} = H_{dam} + 1.5d_c$ である。

nappe flowによる相対エネルギー損失はChanson^{1),2)}によって(2)式が提案されている。

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{0.54(d_c/s)^{0.275} + 1.715(d_c/s)^{-0.55}}{3/2 + H_{dam}/d_c} \quad (2)$$

一般に、次元解析的考察から、階段状水路の流れの相対エネルギー損失 $\Delta H/H_{max}$ は(3)式のように示される。

$$\Delta H/H_{max} = f(H_{dam}/d_c, \alpha, N) \quad (3)$$

ここに、 N はステップの段数を示す。

skimming flow($d/s \geq 0.8$)⁴⁾による相対エネルギー損失 $\Delta H/H_{max}$ について、実験値【著者ら $[\alpha = 55^\circ (N=13, 20), \alpha = 30^\circ (N=8, 16, 32, 64)]$ 、Peyrasら⁶⁾ $[\alpha = 45^\circ (N=5), \alpha = 26.6^\circ (N=4)]$ 、Sorensen⁷⁾ $[\alpha = 52^\circ (N=15, 24)]$ 、Diez-Casconら⁸⁾ $[\alpha = 53^\circ (N=60)]$ 、Christodoulou⁹⁾ $[\alpha = 55^\circ (N=10, 13)]$ 】を(3)式の関係で整理したものを図-2に示す。図-2に示されるように、skimming flowによる相対エネルギー損失 $\Delta H/H_{max}$ はステップ数 N に関わらず、 H_{dam}/d_c および α によって変化する。すなわち、(4)式の関係で示される。

$$\Delta H/H_{max} = f(H_{dam}/d_c, \alpha) \quad (4)$$

なお、図-2においてSorensen⁷⁾の実験値は、射流水深の測定断面(最上段から N 段下流側の断面)でのフルード数 $Fr = (q/d_c)/\sqrt{gd_c \cos \alpha}$ が $Fr > 4$ の範囲でプロットされている。 $Fr < 4$ の場合、水深 d_c の値が流れの飛沫を含めた測定値のため、過大評価されている。この結果、損失水頭 $[\Delta H = H_{dam} + 1.5d_c - \{(q/d_c)^2/(2g) + d_c \cos \alpha\}]$ の間接値が正確でないと考えられる。

図-3に、skimming flowおよびnappe flowによる相対エネルギー損失の比較を示す。与えられた α 、および N に対して先に述べたように $H_{dam}/d_c \leq 1.25N$ ではskimming flow、 $H_{dam}/d_c > 1.25N$ ではnappe flowの形成が認められる。すなわち、与えられた α, N および H_{dam}/d_c に対して、流況は一義的に定まり、一つの相対エネルギー損失 $\Delta H/H_{max}$ が示される。

次に、与えられた α に対して、skimming flowの場合とnappe flowの場合とを比較すると、 $H_{dam}/d_c > 35, N \geq 10$ ではskimming flowとnappe flowによる相対エネルギー損失の違いは顕著ではない。最近の研究(Chanson¹⁰⁾によると、 $H_{dam}/d_c > 35$ (階段を越える流れが近似的に等流状態になる場合)ではskimming flowによるエネルギー損失はnappe flowの場合よりも大きくなることが報告されている。しかしながら、図-3から、 α および N によっては、与えられた H_{dam}/d_c に対してskimming flowによる相対エネルギー損失がnappe flowによる相対エネルギー損失よりも常に大きくなるとは限らないことが示される¹⁰⁾。

4. 結論

階段を越える流れについて検討した結果、skimming flowによる相対エネルギー損失はステップ数 N に関わらず傾斜角 α 、相対ダム高さ H_{dam}/d_c によって変化することが明らかとなった。また、この結果にもとづき、skimming flowとnappe flowによるエネルギー損失の比較がなされた。

記号説明(図-4参照)

d_c : 限界水深($d_c = (q^2/g)^{1/3}$) d_s : ダム直下の水深 g : 重力加速度
 H_{dam} : ダム高さ(最上段から N 段下流側の断面での全水頭) H_{max} :
 ダム上流側の全水頭($H_{max} = H_{dam} + 1.5d_c$) H_1 : 最上段から N 段下流
 側の断面での全水頭($H_1 = ((q/d)^2/2g + d_c \cos \alpha)$) ΔH : 損失水頭
 ($\Delta H = H_{max} - H_1$) N : ステップ数 q : 単位幅流量 s : ステップ高 α :
 傾斜角

参考文献

- 1) Hubert, Chanson(1994) "Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Jour. of Hydr. Res., VOL.32 pp.231-218.
- 2) Hubert, Chanson(1994) "Hydraulics of Stepped Spillways and Cascades", Int.conf.on Hydr.in Civ.Engr.(Hydraulics Working With the Enviroment), The Int. of Engrs., Australia, pp.217-222.
- 3) I.T.S.Essery, and M.W.Horrner(1978) "The Hydraulic Design of Stepped Spillways", CIRIA, Report No.33, 2nd edition, London, UK.
- 4) N.Rajaratnam(1990) "Skimming Flow in Stepped Spillways", Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, VOL.116, No.4, pp.587-591.
- 5) G.Degoutte, L.Peyras, and P.Royet(1992) Discussion of "Skimming flow in Stepped Spillways" Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, vol.118, No.1, pp.111-114.
- 6) L.Peyras, P.Royet, and G.Degoutte(1992) "Flow and Energy Dissipation Over Gabion Weirs", Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, VOL.118, No.5, pp.707-717.
- 7) Robert, M.Sorensen(1985) "Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation", Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, VOL.111, No.12, pp.1461-1472.
- 8) J.Diez-Cascon, J.L.Blanco, J.Revilla and R.Garcia(1991) "Studies on The Hydraulic Behavior of Stepped Spillways" International Water Power and Dam Construction, Sept., pp.22-26.
- 9) George, C.Christodourou(1993) "Energy Dissipation on Stepped Spillways", Jour. of Hydr. Eng ASCE, VOL.119, No.5, pp.644-650.
- 10) I.Ohtsu, and Y.Yasuda(1995) Discussion of "Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Jour. of Hydr. Res., IAHR, VOL.33, 1995, No.1, PP.113-143.

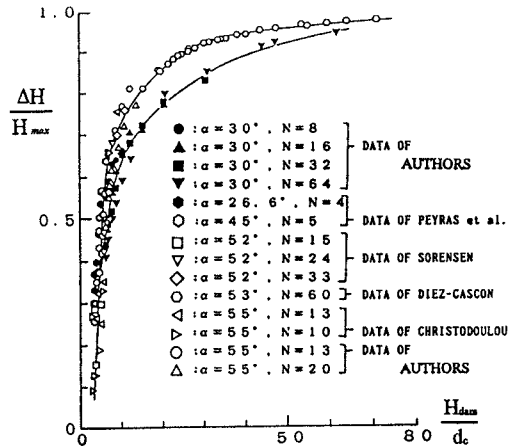


図-2 skimming flow による相対エネルギー損失

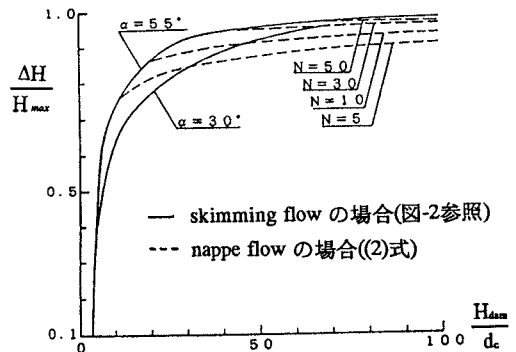


図-3 skimming flow と nappe flow による相対エネルギー損失の比較

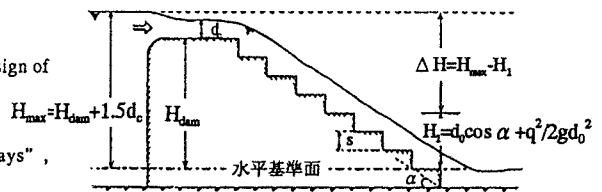


図-4 定義図