

日大院・理工 学 川戸 隆行

日大・理工 正 安田 陽一

日大・理工 正 大津 岩夫

1. まえがき

連続設置された落差工や砂防ダムにみられる階段状水路を越える流れの多くは、流入する流量に対して落差高さが比較的高いため、越流水脈を伴った流れである nappe flow (図-1(a)) を呈する。従来、階段状水路を越える流れの特性について、特に skimming flow (各ステップに air pocket が形成されず、ステップ隅角部に顕著な渦の形成される流れ：図-1(b)) に関しては2,3の研究者^{1),2),3)}によって検討が行われているが、nappe flow に関しては十分な検討が行われておらず不明な点が多い。また、nappe flow と skimming flow のエネルギー損失の比較が行われているが、研究者によって結論が異なる^{2),4)}。階段状水路における nappe flow の特性を明らかにすることは、水工設計物の設計精度を向上させることができ重要である。ここでは、階段状水路 ($0.10 \leq \tan \alpha \leq 0.20$) における nappe flow のエネルギー減勢について、実験的に明らかにした。また、階段状水路で形成される流況によるエネルギー減勢の違いを明らかにするため、同一の水理条件 (水路の傾斜勾配、相対ダム高) のもとで、nappe flow と skimming flow のエネルギー減勢を比較し検討を行った。

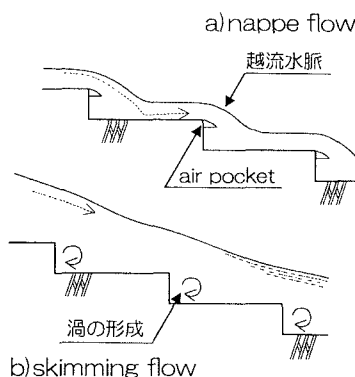
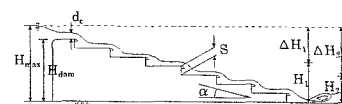


図-1 流況図



定義図

II. 階段状水路直下流側に形成される跳水の水量間関係

nappe flow の形成領域において、階段状水路直下流側に跳水が形成される場合の跳水終端水深 h_2 について、式(1)の関係で整理した結果を図-2 に示す。なお、跳水始端の位置は、階段状水路を下流する流れが水平水路に衝突する際に、底面の圧力が最大となっている場所として定めた。

$$h_2/d_c = f(H_{dam}/d_c, \tan \alpha, S/d_c) \cdots (1)$$

図-2 に示されるように、与えられた水路の傾斜勾配 $\tan \alpha$ に対して、相対下流水深 h_2/d_c は相対ダム高 H_{dam}/d_c によらずほぼ一定の値を示す。nappe flow が形成されると、 H_{dam}/d_c が 5~8 以降では、どのステップ上にも同様の流況が形成されることが実験で確認された。このことから h_2/d_c は H_{dam}/d_c に関わらず、ほぼ一定値を示したものと考えられる。

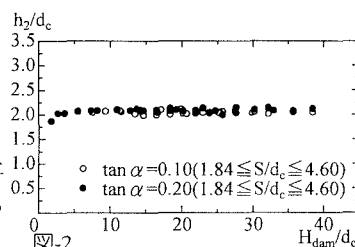


図-2 相対ダム高と跳水終端水深の関係

III. 階段状水路における nappe flow のエネルギー損失

階段状水路における nappe flow の相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{max}$ については次元解析的考察から、式(2)の関係で示される。ここで、 ΔH_1 は階段状水路直下流部におけるエネルギー損失、 H_{max} は階段状水路流入部での全水頭である。

$$\Delta H_1/H_{max} = f(H_{dam}/d_c, \tan \alpha, S/d_c) \cdots (2)$$

なお、階段状水路直下流部における全水頭 H_1 は、流脈の乱れと階段状水路直下における流線の曲がりの影響を考慮するため、階段状水路直下流側に形成される跳水の終端水深 h_2 を計測し、運動量方程式(3)を用いて間接的に跳水始端水深 h_1 を算出して、式(4)より求めた。ここで、跳水始端断面での底面圧力 h_p は実験的に計測

キーワード：階段状水路、開水路流、エネルギー減勢、射流、河川景観

連絡先：住所、〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8 TEL.03-3259-0668 FAX.03-3259-0409

し、跳水終端断面での圧力は静水圧分布をしていると仮定した。

$$wq/g \cdot (V_2 - V_1) = P_1 - P_2 \cdots (3) \quad \text{ただし, } V_1 = q/h_1, V_2 = q/h_2, P_1 = 1/2 \cdot w h_1 h_p, P_2 = 1/2 \cdot w h_2^2$$

$$H_1 = V_1^2/2g + \lambda h_1 \cdots (4) \quad \lambda \text{ は圧力の補正係数}^{5)} \quad \lambda = 1 + 1/wq \cdot \int_0^{h_1} u P_{dy}$$

式(2)の関係で $\Delta H_1/H_{\max}$ について整理した結果を、図-3,4 に示す。図-3 より、与えられた階段状水路の傾斜勾配 $\tan \alpha$ に対して、 $\Delta H_1/H_{\max}$ は相対ステップ高 S/d_c ($1.84 \leq S/d_c \leq 4.60$) に関わらず、 H_{dam}/d_c によって変化することが示された。なお、nappe flow が形成されるときステップごとのエネルギー損失は、頂部から四段目以降では実験的にステップの落差高さにほぼ相当していることが確かめられている。図-4 より、 $\Delta H_1/H_{\max}$ について、 $\tan \alpha$ による違いは見られるものの、その影響は小さく主に H_{dam}/d_c によって $\Delta H_1/H_{\max}$ の値が変化することが示された。

以上より、階段状水路 ($0.10 \leq \tan \alpha \leq 0.20$) における nappe flow の $\Delta H_1/H_{\max}$ は、式(5)の関係で示されることが明らかになった。

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

次に、階段状水路直下に形成される跳水を含むエネルギー損失 $\Delta H_2/H_{\max}$ について、式(6)の関係で整理したものを図-5 に示す。

$$\Delta H_2/H_{\max} = f(H_{\text{dam}}/d_c, \tan \alpha, S/d_c) \cdots (6)$$

図-5 に示されるように、 $\Delta H_2/H_{\max}$ は $\tan \alpha$ に関わらずほぼ H_{dam}/d_c によって変化することが示された。

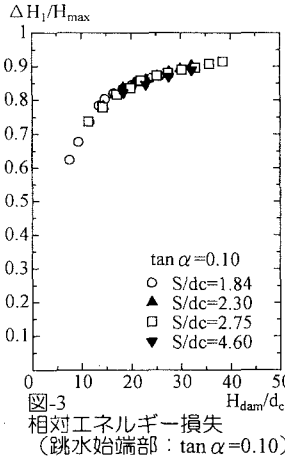


図-3 相対エネルギー損失
(跳水始端部: $\tan \alpha = 0.10$)

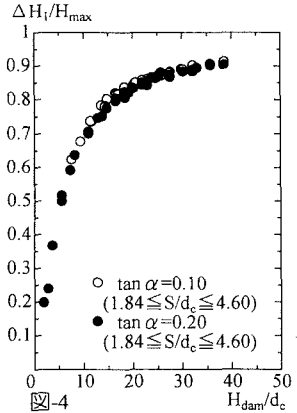


図-4 相対エネルギー損失
(跳水始端部)

IV. nappe flow と skimming flow のエネルギー損失の比較

与えられた階段状水路の傾斜勾配 $\tan \alpha$ 、相対ダム高 H_{dam}/d_c に対して、nappe flow と skimming flow ($S/d_c \geq 0.3$ の場合)⁵⁾ の相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ の比較をした結果を図-6 に示す。図-6 から、skimming flow ($S/d_c \geq 0.3$ の場合)の方が nappe flow より減勢効率が良いことが理解できる。

これは、skimming flow は nappe flow と比較すると、ステップ隅角部に大きな渦が形成されており、この渦の形成がエネルギー損失に大きく影響を与えているためであると考えられる。

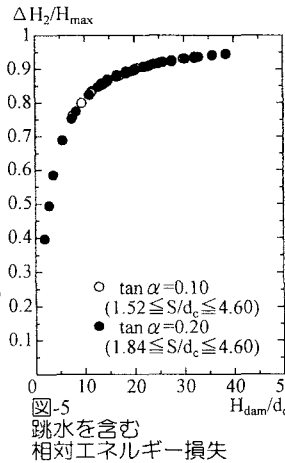


図-5 跳水を含む
相対エネルギー損失

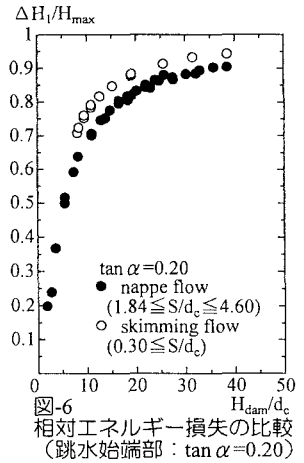


図-6 相対エネルギー損失の比較
(跳水始端部: $\tan \alpha = 0.20$)

V. まとめ

階段状水路の傾斜勾配が $0.10 \leq \tan \alpha \leq 0.20$ における nappe flow のエネルギー減勢について、実験的に明らかにした。相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ は相対ステップ高 S/d_c によらず、 $\tan \alpha$ と相対ダム高 H_{dam}/d_c によって示されることを明らかにした。また跳水を含む相対エネルギー損失 $\Delta H_2/H_{\max}$ は $\tan \alpha$ 、 S/d_c によらず H_{dam}/d_c によって示されることを明らかにした。さらに、nappe flow と skimming flow のエネルギー減勢を比較した結果、skimming flow ($S/d_c \geq 0.3$ の場合)の方が減勢効率が良いことを明らかにした。

<参考文献>

1. 安田, 遠藤, 大津(1996)"階段状水路における流れの特性", 土木学会第 51 回年次講演会, pp.236-237.
2. Hubert Chanson(1994)"Hydraulic Design of stepped Cascades, Channels Weirs and Spillways", Pergamon, Australia.
3. 橋本, 安田, 大津(1998)"階段状水路における流れの特性について", 土木学会第 53 回年次講演会, pp.660-661.
4. Chamani, M.R., and Rajaratnam, N.(1994)."Jet Flow on Stepped Spillways", Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol.120, No.2, pp.254-259.
5. 壱渡, 安田, 大津(1998)"階段状水路における skimming flow のエネルギー減勢", 日本大学第 42 回理工学部学術講演会, pp.578-579.