

日大・理工 正員 安田 陽一
 日大院・理工 学生員 遠藤 和雄
 日大・理工 正員 大津 岩夫

1. まえがき ダムや堰などの急勾配水路における流れの流速を減勢させ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⁾。従来、階段状水路における流れの特性についてはいくつかの研究が報告されている^{1)~6)}が系統的な検討がなされていないため、十分に把握されていない。また、内部特性については検討がなされていない。ここでは、階段状水路における流れについて系統的に検討を加え、流況を分類し、各流況の形成領域を明らかにした。また、階段状水路におけるエネルギー損失の特性について明確にした。さらに、内部の圧力特性を示した。

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 s 、および単位幅流量 q によって変化し、ある断面から空気混入が顕著となる。ここで、空気混入が顕著となる下流側において、ステップ隅角部での渦の形成およびair-pocketの形成に着目することによって流況を二つに分類することができる。図-1(a)に示すように各ステップにおいてair-pocketの形成は認められず、ステップ隅角部に常に渦が形成される流況（ただし、ステップエッジからの剥離が観察される場合を含む）をskimming flowと呼び、図-1(b)に示すようにステップ隅角部において、渦の形成が認められず常にair-pocketが形成される流況をnappe flowと呼ぶ。各流況の形成領域については、図-2に示すように区分される。実線はskimming flowの下限、およびnappe flowの上限である。従来、skimming flowおよびnappe flowの境界について検討がなされているが、流況の定義が不明瞭であるため、図-2に示されるように、他研究者の示す境界はほとんど遷移領域にあることが示された。

3. 階段状水路における流れのエネルギー損失 次元解析の考察から、階段状水路における流れの相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}[(H_{\max}-H_1)/H_{\max}]$ は、(1)式のように示される。

$$\Delta H_1/H_{\max} = f(H_{\text{dam}}/dc, \alpha, N) \quad (1)$$

ここに、 N はステップ数を示す。skimming flowによるエネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ について実験値を(1)式の関係で整理したものを図-3に示す。従来、階段状水路終端部では水面の飛沫のために全水頭の評価方法が不明瞭となりエネルギー損失について明確な結果が得られていなかった。ここでは、階段状水路終端部での全水頭は階段状水路直下に形成される跳水終端水深を測定し、運動量方程式(2)式)を用いて水路終端部での水深を求め、間接的に算定した。

$$h_1 = (\sqrt{8F_2^2 + 1} - 1)h_2/2 : F_2 = (q/h_2)/\sqrt{gh_2}$$

$$H_1 = h_1 + (q/h_1)^2/2g \quad (2)$$

図-3に示されるように、skimming flowによる相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ はステップ数 N にかかわらず H_{dam}/dc および α によって変化する。すなわち、(3)式の関係で示される。

$$\Delta H_1/H_{\max} = f(H_{\text{dam}}/dc, \alpha) \quad (3)$$

また、与えられた H_{dam}/dc に対して α が小さくなるにつれて相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ は大きくなる。さらに、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ は H_{dam}/dc が15~20以下では H_{dam}/dc のわずかな変化で大きく異なるが、少なくとも50以上ではその変化は小さくなることが認められる。ダム直下に形成される跳水を含む相対エネルギー損

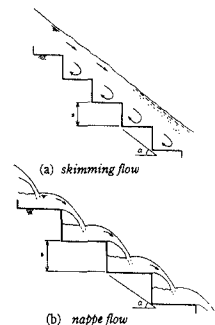


図-1 流況

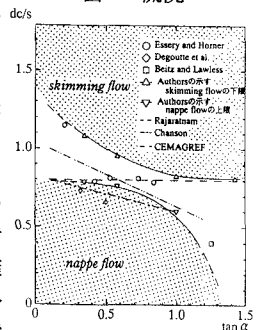


図-2 各流況の形成領域

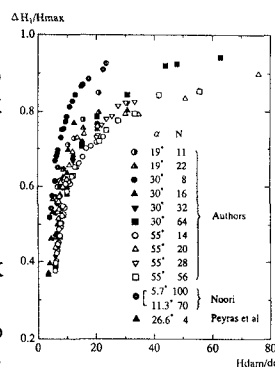


図-3 skimming flowにおける相対エネルギー損失

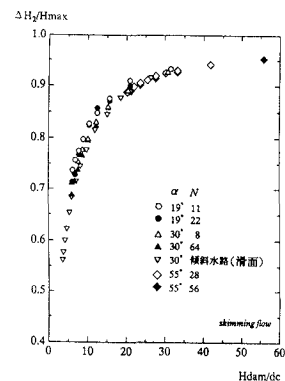


図-4 ダム直下に形成される跳水を含む相対エネルギー損失

失 $\Delta H_2/H_{\max}[(H_{\max}-H_2)/H_{\max}]$ について、(4)式の関係で整理したものを図-4に示す。

$$\Delta H_2/H_{\max}=f(H_{\text{dam}}/d_c, \alpha, N) \quad (4)$$

図-4に示されるように、跳水を含む相対エネルギー損失は傾斜角 α 、およびステップ数 N による違いは顕著でなく、ほぼ H_{dam}/d_c のみによって変化する。

したがって、階段状水路における流れによるエネルギー損失が大きくなった場合、ダム直下に形成される跳水によるエネルギー損失は小さくなることが理解される。

4. 内部特性

1)skimming flowの場合

ステップコーナーの圧力水頭について、実験値を(5)式の関係で整理したものを図-5に示す。

$$(p/w)/d_c=f(n, \alpha, N, H_{\text{dam}}/d_c, s/d_c) \quad (5)$$

ここに、 p はゲージ圧力、 n はダム堤頂を1段目としたステップの段数である。図-5に示されるように、skimming flowにおけるステップコーナーでの圧力水頭は、交互に増減を繰り返すことが認められ、この増減の振幅はステップ数 N が大きくなるにしたがって大きくなる。このことは、skimming flowにおいても主流がステップ上の衝突し、その影響でステップを通過する流線の曲がり角が交互に変化し、隅角部に形成される渦がステップごとに異なるためであると考えられる。

2)nape flowの場合

ステップコーナーでの圧力水頭について実験値を(5)式の関係で整理したものを図-6に示す。図-6に示されるようにnape flowにおけるステップコーナーでの圧力水頭はskimming flowの場合と異なった分布が得られる。なお、空気混入し始めた下流側において、ステップコーナーでの圧力水頭は、air-pocket下で見られるプール水深とほぼ等しいことが認められる。

5. まとめ 階段状水路における流れについて検討した結果、流況が図-2のように区分された。ダム直下に形成された跳水に着目することによってその全水頭が評価され、skimming flowによる相対エネルギー損失の特性が明らかとなった。その結果、相対エネルギー損失はステップ数 N にかかわらず傾斜角 α 、相対ダム高さ H_{dam}/d_c によって変化するこ

記号説明

d_c :限界水深 [$d_c=(q^2/g)^{1/3}$] g :重力加速度 h_1 :ダム直下での水深 H_{dam} :ダムの高さ H_{max} :ダム上流側の全水頭 [$H_{\text{max}}=H_{\text{dam}}+1.5d_c$] H_1 :ダム下流側での全水頭 [$H_1=h_1(q/h_1)^{2/3}$] H_2 :ダム直下に形成される跳水の終端での全水頭 ΔH_1 :ダム上流側からダム直下までの損失水頭 [$\Delta H_1=H_{\text{max}}-H_1$] ΔH_2 :ダム上流側からダム直下までの損失水頭 [$\Delta H_2=H_{\text{max}}-H_2$] N :ステップ数 n :ダム堤頂を1段目としたステップの段数 p :ゲージ圧力 q :単位幅流量 s :ステップ高さ w :水の単位体積重量 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) "Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways", Pergamon, Australia.
- 3)N.Rajaratnam(1990) "Skimming Flow in Stepped Spillways", Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol.116, No.4, pp.587-591.
- 4)L.Peyras, P.Royet and G.Degoutte(1992) "Flow and Energy Dissipation over Gabison Weirs", Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol.118, No.5, pp.707-717.
- 5)J.Diez-Cascon, J.L.Blanco, J.Revillia and R.Garcia(1991) "Studies on The Hydraulic Behavior of Stepped Spillways", International Water Power and Dam Construction, Sept., pp.22-26.
- 6)George C.Christodoulou(1993) "Energy Dissipation on Stepped Spillways", Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol.119, No.5, pp.644-650.
- 7)I.Ohtsu and Y.Yasuda(1955) Discussion of "Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Jour. of Hydr. Res., IAHR, Vol.33, No.1, pp.113-143.
- 8)遠藤、安田、大津(1995) "階段状水路におけるエネルギー損失" 土木学会第50回年次学術講演会. pp.212-213.

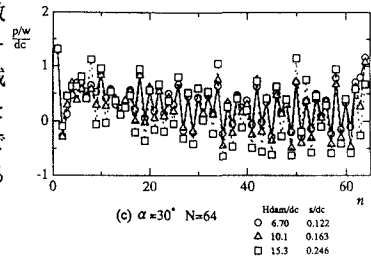
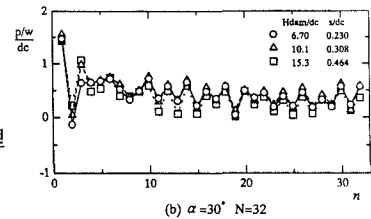
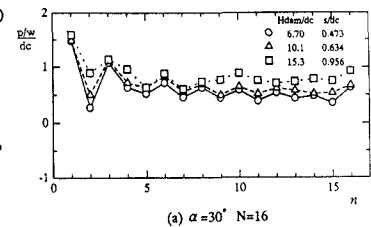


図-5 skimming flowにおけるステップコーナーの圧力水頭

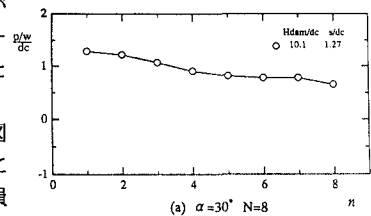


図-6 nape flowにおけるステップコーナーの圧力水頭