

階段状水路によるエネルギー減勢効果

日大院・理工 学 ○橋本 真一
 日大・理工 正 後藤 浩
 日大・理工 正 安田 陽一
 日大・理工 正 大津 岩夫

1. まえがき

堰やダムから越流する高速流を傾斜面上で減勢させる方法として、階段状水路が有効であると報告されている¹⁾。また、階段状水路は、美的景観上や水質浄化上など多目的に利用されている²⁾。階段状水路の流れの特性を知ることは、水工設計上意義がある。階段上を越える射流の減勢効果については、従来、多くの研究者^{1)~4)}によって検討されているが、系統的な研究がなされていないため不明な点が多い。本研究においては、ステップを越える流れの水面がステップの形状に大きく影響されることなく、常にステップ隅角部に顕著な渦が形成される流況(図-1(a))、すなわち *skimming flow* を対象とし、系統的に検討することにより、階段状水路によるエネルギー減勢効果について明らかにした。

2. 階段状水路における相対エネルギー損失

次元解析的考察から、階段状水路における相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ [= $(H_{\max} - H_1)/H_{\max}$] は eq. (1) のように示される。

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

skimming flow における相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ は、水面の飛沫のため、ダム直下の水深 h_1 を直接測定することでは正確に評価することができない。そこで、階段状水路終端部での全水頭 H_1 は階段状水路直下に形成される跳水終端水深 h_2 を測定し、運動量方程式 eq. (2) を用いて跳水始端水深 h_1 を求め、eq. (3) から H_1 を間接的に算定したものである。なお、ダム直下の流線の曲がりの影響を考慮するため、跳水始端断面での底面の圧力水頭 h_p を測定し、始端の全圧力 P_1 を $P_1 = w h_1 h_p / 2$ と仮定して算定した。

$$\frac{wQ}{g}(V_2 - V_1) = P_1 - P_2 \quad \text{ただし} \quad V_1 = \frac{Q}{h_1}, V_2 = \frac{Q}{h_2}, P_1 = \frac{w}{2} h_1 h_p, P_2 = \frac{w}{2} h_2^2 \quad (2)$$

$$H_1 = h_p + (Q/h_1)^2 / 2g \quad (3)$$

傾斜角 α および H_{dam}/d_c を一定として、 s/d_c の違いに対する相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ への影響について eq. (1) 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、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ は、 H_{dam}/d_c を一定としたとき、 s/d_c がほぼ 0.4 以下において s/d_c の影響が認められ、 s/d_c が小さくなるにつれて、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ が小さくなることが認められる。このことは s/d_c が 0.4 より小さくなると、すなわち、 s/d_c が小さくなると流水抵抗が軽減するためと考えられる。このことから、与えられた H_{dam}/d_c に対して s/d_c が 0.4 以上であれば、*skimming flow* の形成範囲ではエネルギー減勢効果が最も高くなることを明確にした。なお、傾斜角 α が異なる場合 ($\alpha = 30^\circ, 19^\circ$) についても同様な結果が得られた。

$s/d_c \geq 0.4$ の *skimming flow* において、階段状水路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 H_{dam}/d_c に対して、傾斜角 α が小さくなるにつれて小さくなることが認められる。これは、傾斜角 α が小さくなると傾斜面上の相対長さが長くなり、さらには、主流がステップに衝突しやすくな

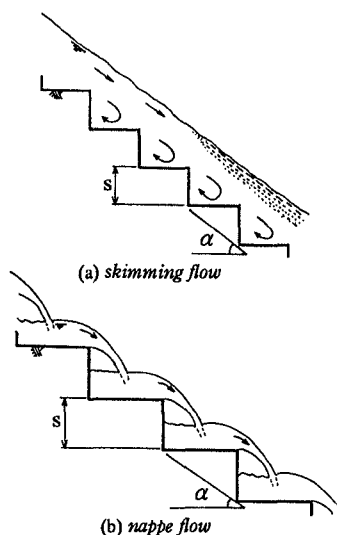
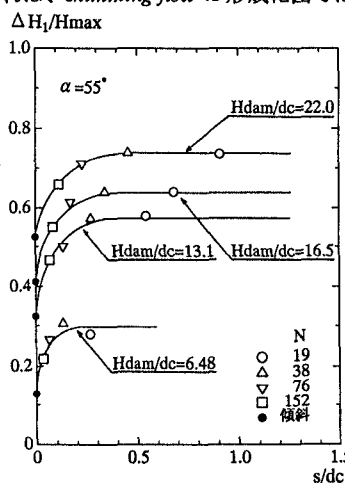
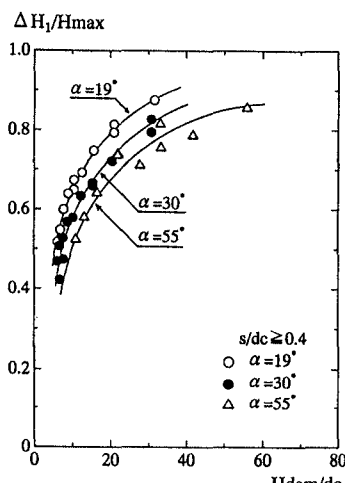


図-1 流況

図-2 s/d_c による相対エネルギー損失の変化図-3 $s/d_c \geq 0.4$ における H_{dam}/d_c による相対エネルギー損失

キーワード：開水路・階段状水路・射流・減勢工・水環境
 〒101 東京都千代田区神田駿河台 1-8 TEL. 03-3259-0668 FAX. 03-3259-0409

ることから、流水抵抗が大きくなりエネルギー損失が大きくなるものと考えられる。

s/dc の違いによる階段上の流速分布の比較を示したものを図-4に示す。

図-4は傾斜角 α および H_{dam}/dc が一定の条件において、 s/dc の異なるステップ上の流速の一例を示している。図中●印は、 $s/dc=0.269(N=19)$ のときの流速を示しており、○印は $s/dc=0.0336(N=152)$ のときの流速を示している。▼印および▽印はそれぞれの水面を示す。

図-4に示されるように、 s/dc の違いから、境界層（速度勾配 $du/dy > 0$ を有する領域）の発達状態が異なることが認められる。すなわち、ダムクレスト部からの相対距離(x/dc)が同じ位置における流速分布を比較すると、図中●印、相対ステップ高 s/dc が大きい場合($s/dc=0.269$)、境界層の発達の程度が大きいことが認められる。このことは、 s/dc が大きくなると流水抵抗が大きくなるためと考えられる。

次に、ダム直下に形成される跳水を含む相対エネルギー損失 $\Delta H_2/H_{max}[(H_{max}-H_2)/H_{max}]$ について、eq. (5)の関係で整理したものを図-5に示す。

$$\Delta H_2/H_{max} = f(H_{dam}/dc, \alpha, N \text{ or } s/dc) \quad (5)$$

図-5に示されるように、跳水を含む相対エネルギー損失 $\Delta H_2/H_{max}$ は、傾斜角 α およびステップ数 N (または相対ステップ高 s/dc)に関わらず、ほぼ H_{dam}/dc によって変化することが認められる。すなわち、eq. (6)の関係で示される。

$$\Delta H_2/H_{max} = f(H_{dam}/dc) \quad (6)$$

図-5から、与えられた相対ダム高に対して傾斜角 α が小さくなると、階段状水路上のエネルギー損失が大きくなり、その分ダム直下に形成される跳水によるエネルギー損失が小さくなっていることが理解される。

3. 結論

階段状水路において *skimming flow* が形成される場合のエネルギー減勢効果を示した。すなわち、 $19^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ の場合、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{max}$ に対する相対ステップ高 s/dc の影響が $s/dc \leq 0.4$ で表れることを示した。また、ダム直下に形成される跳水を含む相対エネルギー損失 $\Delta H_2/H_{max}$ は、主として相対ダム高 H_{dam}/dc によって示されることを実験的に明らかにした。

付記

本研究は日本大学総長指定研究費の補助を受け実施したものである。

謝辞

本研究の実験を遂行する上で、土木四年 埜渡隆司君、斉藤智之君、角田篤亮君より大いなる協力を得たので、記して謝意を表する。

【記号説明】

dc $[(q^2/g)^{1/3}]$: 限界水深、 g : 重力加速度、 h_1 : ダム直下での水深、 h_p : ダム直下での底面の圧力水頭、 H_{dam} : ダム高、 $H_{max} = H_{dam} + 1.5dc$: ダム上流側の全水頭、 $H_1 = [h_p + (q/h_1)^2/2g]$: ダム下流端での全水頭、 $\Delta H_1 = H_{max} - H_1$: ダム上流側からダム直下までの損失水頭、 $H_2 = [h_2 + (q/h_2)^2/2g]$: 跳水終端での全水頭、 $\Delta H_2 = H_{max} - H_2$: ダム上流側から跳水終端までの損失水頭、 N : ステップ数、 n : ダム堤頂を1番目としたステップの段数、 q : 単位幅流量、 s : ステップ高、 u : 流れ方向の流速、 $V_1 = q/h_1$: 跳水始端における流速、 $V_2 = q/h_2$: 跳水終端における流速、 $V_c = q/dc$: 限界流速、 w : 水の単位体積重量、 α : 傾斜角

【参考文献】

- 1) N. Rajaratnam (1990) "Skimming Flow in Stepped Spillways", Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, VOL. 116, No. 4, pp. 587-591.
- 2) 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.
- 3) Hubert Chanson (1994) "Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes", Jour. of Hydr. Res., VOL. 32, pp. 213-218.
- 4) Hubert Chanson (1994) "Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways", Pergamon, Australia.
- 5) 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.
- 6) 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回年次学術講演会, pp. 236-237.
- 7) I. Ohtsu and Y. Yasuda "Characteristics of Flow Condition on Stepped Channels", XVI, IAHR, Congress, San Francisco, August 1997 (to be published)

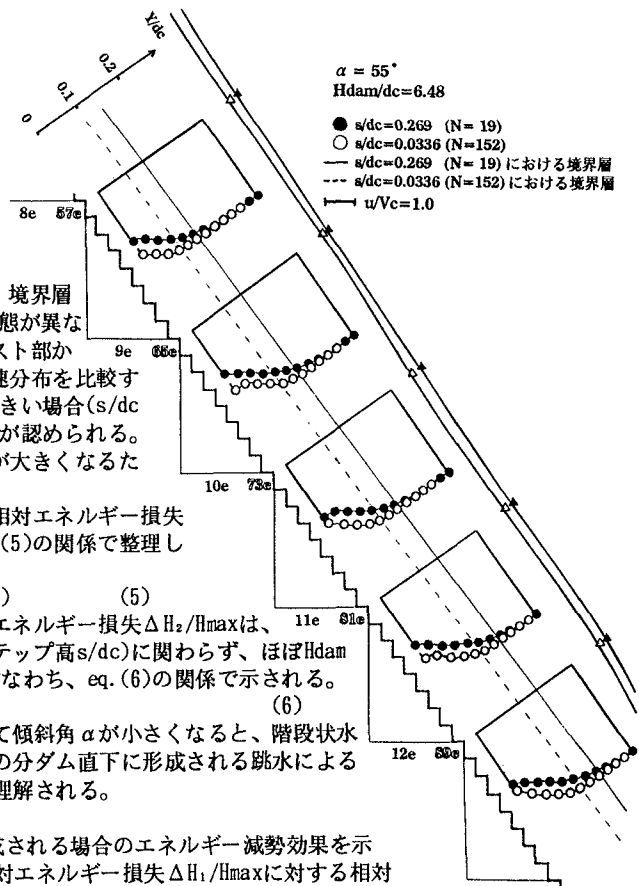


図-4 s/dc の違いによる流速分布の比較

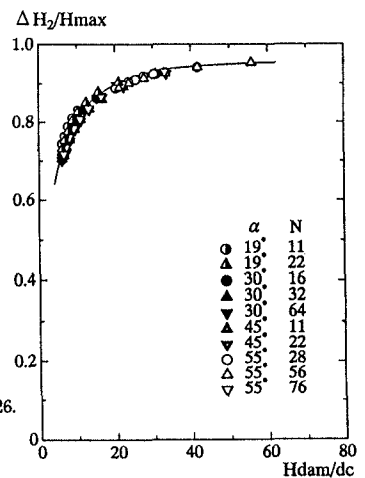


図-5 跳水を含んだエネルギー損失