

階段状水路における Skimming flow の エネルギー減勢

ENERGY DISSIPATION OF SKIMMING FLOWS ON STEPPED CHANNELS.

高橋 正行¹・安田 陽一²・大津 岩夫³

Masayuki TAKAHASHI, Youichi YASUDA, Iwao OHTSU

¹正会員 工修 日本大学助手 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

²正会員 工博 日本大学助教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

³正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

Many researchers studied the energy loss for skimming flows, in which the main flow skims on the stepped channel chute and a corner eddy is formed at each step. But a general agreement on the experimental results has not been obtained. In this paper, the energy loss for skimming flows has been investigated systematically under wide ranges of discharges, channel slopes, step heights, and dam heights. The effects of the channel slope and the step height on the energy loss for skimming flows have been clarified. The energy loss for various changes of dam height has also been made clear. Further, the energy loss for the jump formation immediately below the stepped channel end has been shown, and the results reveal that the utilization of the stepped channel is effective in dissipating the energy of a supercritical flow on a spillway or a channel chute.

Key Words: energy dissipator, stepped channel flow, skimming flow, stepped channel chute, stepped spillway.

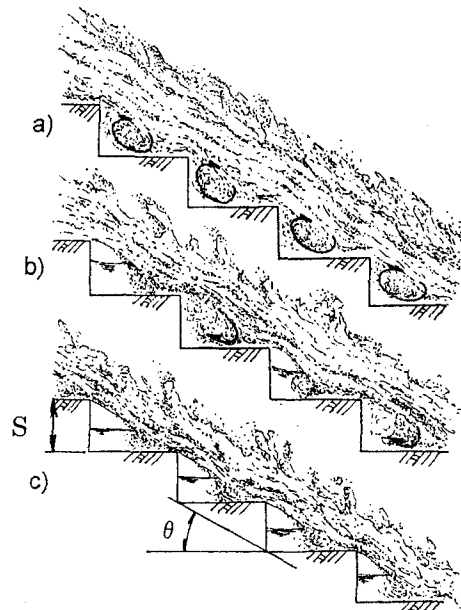
1. まえがき

堰やダムを流下する高速流のエネルギーを傾斜面上で効果的に減勢させる方法として階段状水路の利用が有効である^{1),2)}。また、階段状水路における流れは、水理条件によって様々な流況を呈するため、景観、親水性の面からも注目されている¹⁾。

階段状水路を流下する射流のエネルギー損失については、従来、多くの研究者^{1)~8)}によって検討されているが、空気混入を伴った白濁した流れの水深評価に問題があり、また系統的な実験がなされていないため、不明な点が多い。

水工設計上、種々の落差を伴う構造物に階段状水路を設置する場合、階段状水路を有効に機能させるためには、階段状水路の流れの特性、および階段状水路上の射流のエネルギー損失を解明することが重要である。

著者らは、最近、擬似等流状態^{9),10)}での階段状水路における流れの空気混入率[空気量/(空気量+水の量)×100(%)]の測定を行い、射流水深を評価し、流れの流水抵抗を実験的に明らかにした^{9)~11)}。



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

図-1 階段状水路流れの流況

表-1 実験条件

水路長 $L_0=5.0\text{m}$	水路幅 $B=0.40\text{m}$
階段状水路の高さ $H_{\text{dam}}=0.448\sim 1.58\text{m}$	ステップの高さ $S=0.0\sim 0.079\text{m}$
水路傾斜角 $\theta=5.7^\circ, 11.3^\circ, 19^\circ, 30^\circ, 55^\circ$	
流量 $Q=6.5 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (限界水深 $d_c=0.03\sim 0.10\text{m}$)	

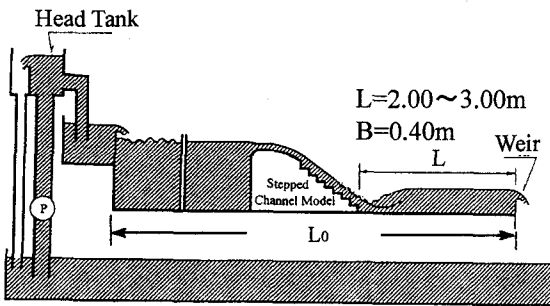


図-2 実験装置

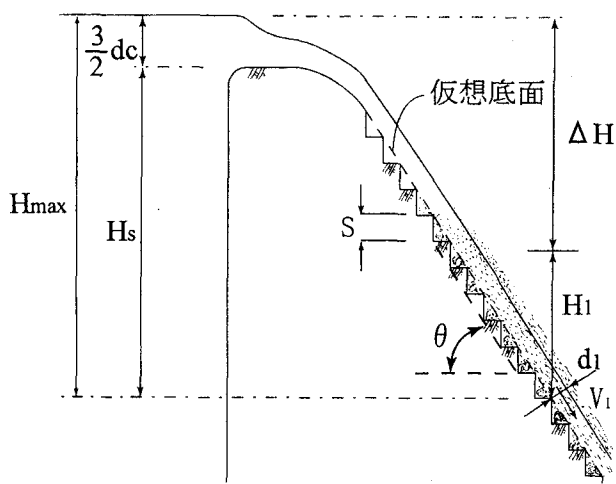
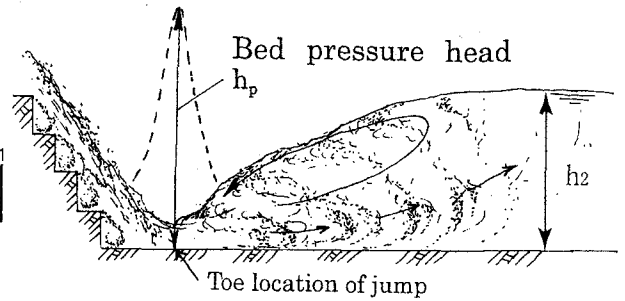
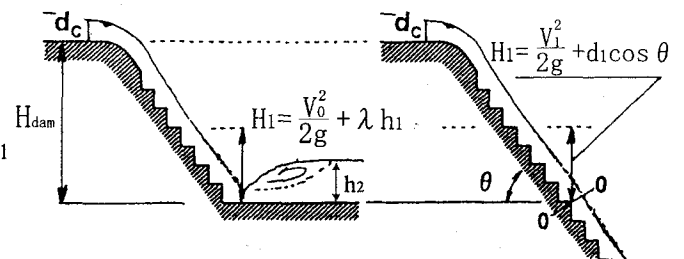


図-3 定義図



V_0, h_1 : 跳水始端断面における断面平均流速および水深
 V_1, d_1 : 0-0断面における断面平均流速および水深

a) 跳水形成からの水深の間接評価

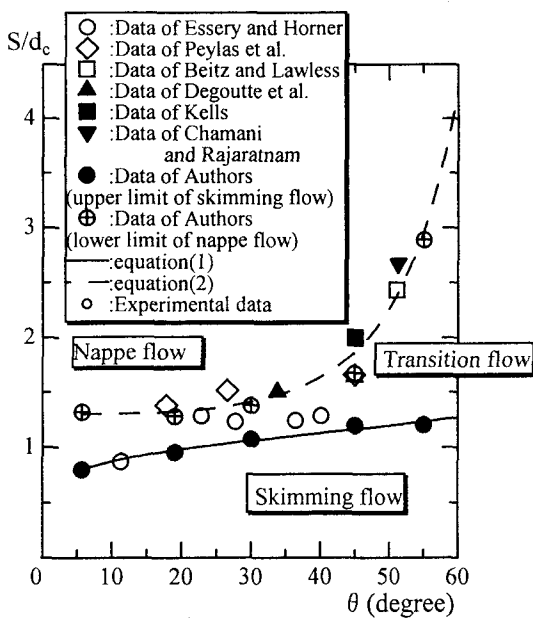
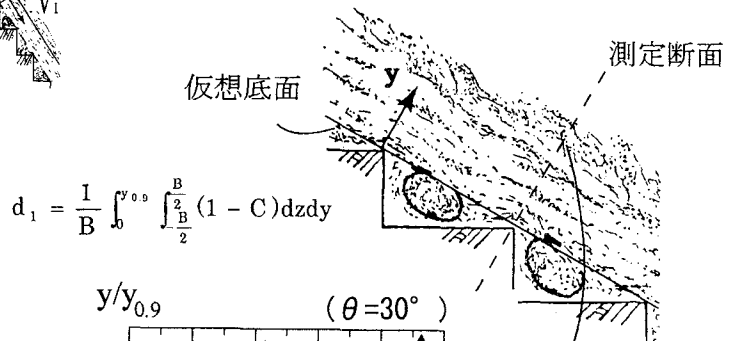
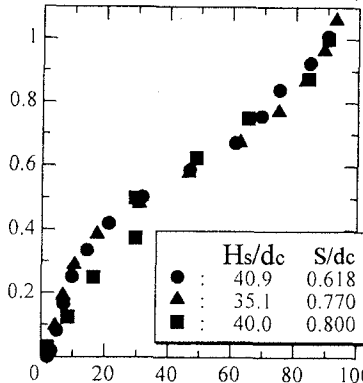


図-4 流況形成領域図



$$d_1 = \frac{1}{B} \int_0^{y_{0.9}} \int_{\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} (1 - C) dz dy$$

$y/y_{0.9}$ ($\theta=30^\circ$)



C : 空気混入率
 $y_{0.9}$: $C=90\%$ のときの y
 $C(\%)$

b) 空気混入測定による水深の直接評価

図-5 階段状水路流れの水深評価

ここでは、各ステップでエアークケットが生じることなく、常にステップ隅角部近くで渦が形成される流況、すなわち Skimming Flow (図-1(a)) を対象とし、階段状水路を流下する射流のエネルギー損失について、広範囲な実験条件のもとで検討を加えた。すなわち、階段状水路を流下する射流水深を的確に評価して^{10), 11)} 階段状水路上の射流のエネルギー損失の算定を行った。このことによって、Skimming Flow のエネルギー損失に対するダム高さ、水路勾配、およびステップ高さの影響を明らかにし、エネルギー損失の特性を系統的に解明することができた。さらに、階段状水路直下流部で形成される跳水のエネルギー損失が示され、階段状水路を流下する射流区間のエネルギー損失と跳水部によるエネルギー損失との割合が明らかになった。

2. 実験方法

実験は図-2 に示される装置を用い、表-1 に示される条件のもとで行なわれた。階段状水路における空気混入した射流水深を測定するため、点電極型ボイド率計 (Kanomax 社製) を用いて空気混入率を測定した。また、階段状水路直下流部に形成された跳水の終端水深を測定するために、ポイントゲージ (0.1mm 判読可能) およびサーボ式波高計を用いた (採取間隔 40ms, 採取時間 60s)。さらに、階段状水路直下流部の底面圧力を測定するため、ピトー管 (静圧管) を用いた。

3. 流況

階段状水路における流れの流況は相対ステップ高さ S/d_c (d_c : 限界水深 [$d_c = (q^2/g)^{1/3}$; q : 単位幅流量])、水路勾配 $\tan \theta$ 、相対落差高さ H_s/d_c (H_s : 階段状水路天端からの鉛直高さ) (図-3) によって変化する¹²⁾。特に、空気混入した流れが形成される領域^{13)~15)}では、流況の変化は相対落差高さによらず、流況は2つに大別される。すなわち、各ステップでエアークケットが生じることなく、常にステップ隅角部近くで渦が形成される Skimming flow と、各ステップでエアークケットおよびナップが形成される Nappe flow とに分類される。

図-4 は各流況の形成領域を示す。図中、実線は Skimming flow が形成されるとき相対ステップ高さの上限を示し、次式で示される⁹⁾。

$$\left(\frac{S}{d_c}\right)_s = 1.16(\tan \theta)^{0.165} \quad (1)$$

$$0.100 \leq \tan \theta \leq 1.43$$

また、一点鎖線は Nappe flow が形成されるとき相対ステップ高さの下限を示し、次式で示される¹⁶⁾。

$$\left(\frac{S}{d_c}\right)_N = 0.57(\tan \theta)^3 + 1.3 \quad (2)$$

$$0.100 \leq \tan \theta \leq 1.43$$

図-4 に示されるように、Skimming flow と Nappe flow との間で遷移領域が存在する^{7), 12), 16)}。

本研究では Skimming flow の流況を対象とする。

4. エネルギー損失

4-1. Skimming flow の相対エネルギー損失

階段状水路による射流のエネルギー損失 ΔH_1 を求めるため、階段状水路上流側の断面と階段状水路上の任意な断面 (図-3、5) との間でベルヌーイの定理を適用すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} H_{\max} &= H_s + \frac{3}{2}d_c \\ &= H_1 + \Delta H_1 = \frac{V_1^2}{2g} + d_1 \cos \theta + \Delta H_1 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 H_s は階段状水路天端から任意断面までの鉛直長さ、 d_c は限界水深、 H_1 は階段状水路の任意な断面での全水頭、 V_1 および d_1 は任意な断面での仮想底面上の断面平均流速および射流水深である (図-3、5)。なお、空気混入した流れの水深については水の水深に換算した^{10), 11)}ものである。

(3) 式は次の仮定を含む。

- 1) 圧力は静水圧分布する。
- 2) エネルギー補正係数を 1 とする。
- 3) 任意な断面は仮想底面に垂直な断面とし、仮想底面は各ステップのエッジを結んで得られる面とする。

(3) 式より、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ は次のように示される。

$$\frac{\Delta H_1}{H_{\max}} = 1 - \frac{(d_c/d_1)^2 + 2(d_1/d_c) \cos \theta}{3 + 2(H_s/d_c)} \quad (4)$$

階段状水路における射流水深 d_1 について、著者らは次の2つの評価方法を提案している^{9)~11)} (図-5 参照)。

- (1) 階段状水路の直下流部に跳水を形成させ、跳水始端での全水頭が階段状水路流れの全水頭と等しいものとして射流水深を間接的に評価した^{9), 10)}。
- (2) 階段状水路上の射流水深を直接測定するため、仮想底面上の空気混入率を測定し、水の水深に換算して射流水深を評価した^{10), 11)}。

これらの方法で評価された射流水深は様々な水路勾配に対して 10% 以内の差で整合性が認められている^{10), 11)}。

水に換算した射流水深を限界水深で無次元化した場合、無次元量 (d_1/d_c) は次元解析的考察から水路勾配 $\tan \theta$ 、ステップ高さ S/d_c 、および相対落差高さ H_s/d_c によって変

化することが推定される。この結果、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ は次の関係で示される。

$$\frac{\Delta H_1}{H_{\max}} = F\left(\frac{H_s}{d_c}, \frac{S}{d_c}, \tan \theta\right) \quad (5)$$

a) 相対ステップ高さの影響

相対ステップ高さ S/d_c による階段状水路の相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ の変化を図-6 に示す。

与えられた水路勾配 $\tan \theta$ および相対落差高さ H_s/d_c に対して、 S/d_c の値が 0.4~0.5 以下の場合、滑面水路 ($S/d_c=0$) の状態から相対ステップ高さ S/d_c が大きくなるにつれて階段状水路による射流の相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ の値は大きくなる。この場合、限界水深 d_c を一定にして考えるとステップ高さ S が大きくなるにしたがい、各ステップの水平面上に形成される渦の領域が広がり、それに伴い階段状水路仮想底面上(図-3)の射流水深が大きくなる。

与えられた $\tan \theta$ および H_s/d_c に対して、相対ステップ高さ S/d_c の値が 0.4~0.5 以上になると S/d_c による相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ の変化は小さい。特に、 H_s/d_c が大きくなると、 S/d_c による $\Delta H_1/H_{\max}$ の変化は無視できるほど小さく、階段状水路の流れは空気混入した流れとなることが実験的に確かめられる(図-6 に、 $S/d_c \geq 0.4 \sim 0.5$ のデータで空気混入している場合としない場合とを区分して示す)。なお、階段状水路を通過する流れが空気混入し始める条件については Bose (2000)¹⁴⁾、高橋ら (2000)¹⁵⁾ の研究によって示されている。

これらのことから、同一の水路勾配 $\tan \theta$ 、相対落差高さ H_s/d_c に対して、 $0.4 \sim 0.5 \leq S/d_c \leq (S/d_c)_s$ となるように階段状水路を設計すると、階段状水路による射流のエネルギー損失が最大となる。

なお、流量が幅広い範囲で変化する場合、上記の条件を満足するように設計するための1つの方法として、限界水深が同程度になるように、通水幅を変えるなどの工夫も考えられる。

b) 水路勾配および相対落差高さの影響

相対落差高さおよび水路勾配による相対エネルギー損失の変化を図-7 に示す。ただし、相対ステップ高さ S/d_c の値が 0.4~0.5 以上の Skimming Flow の場合を示す。図に示されるように、与えられた相対落差高さ H_s/d_c に対して、水路勾配 $\tan \theta$ が大きくなるにつれて、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ の値が小さくなる。これは、水路勾配 $\tan \theta$ が大きくなるにつれて、同一の相対落差高さに対して階段状水路の相対長さが短くなり、さらに、各ステップの水平面に流れが衝突しにくく渦の形成領域が小さくなるためと考えられる。なお、水路勾配が小さい場合 ($\theta < 19^\circ$)、水路勾配による相対エネルギー損失の違いはほとんど見られない。これは、水路勾配が小さいとき、

与えられた d_c に対して各ステップに形成される渦の形成領域は水路勾配の変化によってほとんど変わらず、射流水深の変化が小さかったためと考えられる。また、与えられた水路勾配に対して、相対落差高さ H_s/d_c が大きくなると、階段状水路の相対長さが長くなり、段数の増加に伴い渦が形成されている箇所が増加し、図-7 に示されるように、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max}$ の値が大きくなる。

なお、擬似等流状態の領域¹⁰⁾では、著者らによって Skimming flow の抵抗係数 f が明らかにされ、次の関係が得られている^{9), 10)}。

$$f = 8 \left(\frac{d_1}{d_c} \right)^3 \sin \theta = F \left(\frac{S}{d_c}, \tan \theta \right) \quad (6)$$

(4) 式および(6) 式の関係から、相対エネルギー損失 $\Delta H_1/H_{\max} = F(H_s/d_c, S/d_c, \tan \theta)$ の関係が得られ、擬似等流状態となる領域(図-6、7 の斜線で示した領域)では、図-6、7 の実線のようになり、実験値と一致している。

4-2. 跳水の形成を含んだエネルギー損失

階段状水路直下流側に跳水が形成される場合を対象として、階段状水路の射流区間のエネルギー損失と階段状水路直下流側での跳水部のエネルギー損失を合わせた損失水頭 ΔH_2 を求めるため、階段状水路上流側の断面と跳水終端断面との間でベルヌーイの定理を適用すると、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} H_{\max} &= H_s + \frac{3}{2} d_c \\ &= H_2 + \Delta H_2 = \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + \Delta H_2 \end{aligned} \right\} \quad (7-1)$$

$$\frac{\Delta H_2}{H_{\max}} = 1 - \frac{(d_c/h_2)^2 + 2(h_2/d_c)}{3 + 2(H_s/d_c)} \quad (7-2)$$

ここに、 H_2 は跳水終端断面での全水頭、 h_2 および V_2 は跳水終端断面での常流水深および断面平均流速である。また、(7) 式において、跳水終端断面における圧力は静水圧とし、エネルギー補正係数を 1 と仮定している。さらに、 $H_s = H_{\text{dam}}$ としている。

なお、跳水始端は階段状水路からの流線の曲がりにより底面圧力が最大となる断面とした(図-5 参照)。

相対ステップ高さ S/d_c の値が 0.4~0.5 以上の Skimming Flow を対象とした場合、一般に跳水終端での相対水深 h_2/d_c は水路勾配 $\tan \theta$ および相対落差高さ H_s/d_c によって変化する^{9), 10)}。なお、擬似等流状態では h_2/d_c は $\tan \theta$ のみによって変化する。

跳水の形成を含んだ相対エネルギー損失 $\Delta H_2/H_{\max}$ は次の関係で示される。

$$\frac{\Delta H_2}{H_{\max}} = F \left(\frac{H_s}{d_c}, \tan \theta \right) \quad (8)$$

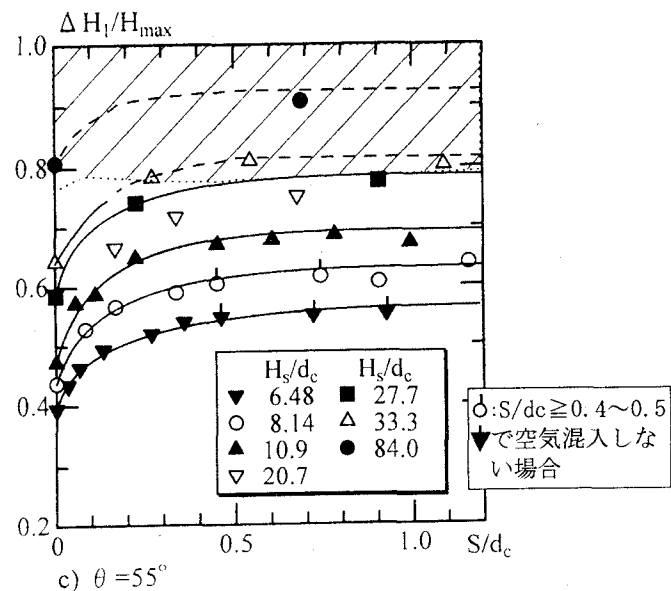
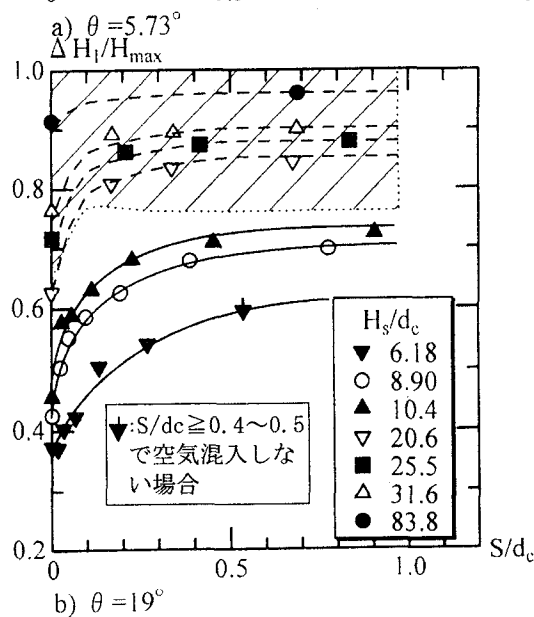
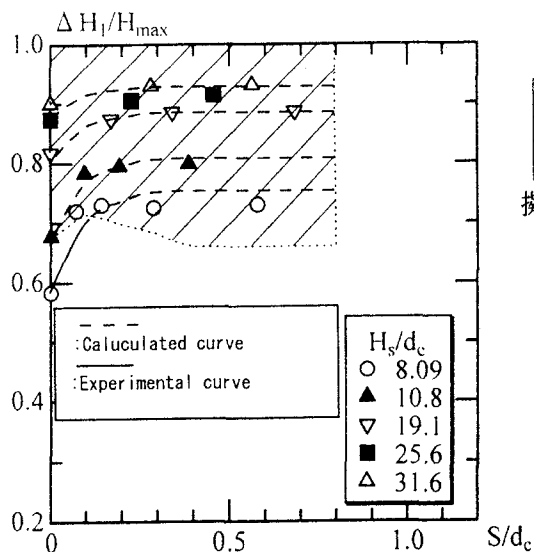


図-6 Skimming flowの相対エネルギー損失に対する相対ステップ高さの影響

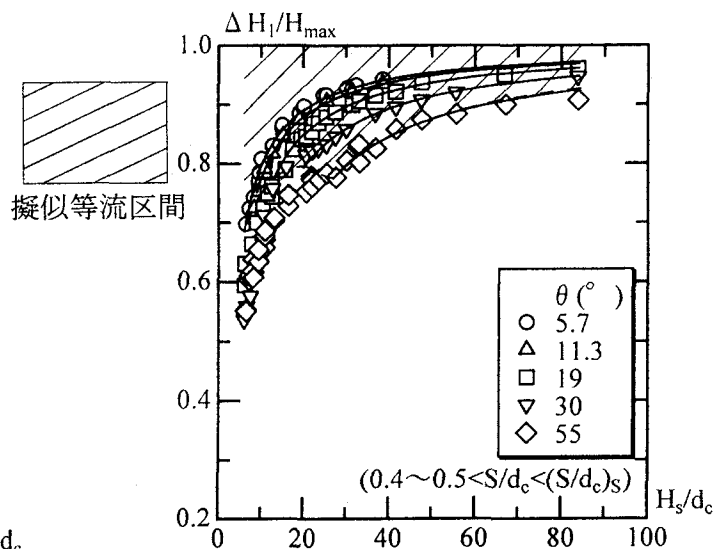


図-7 Skimming flowの相対エネルギー損失に対する相対落差高さ、水路勾配の影響

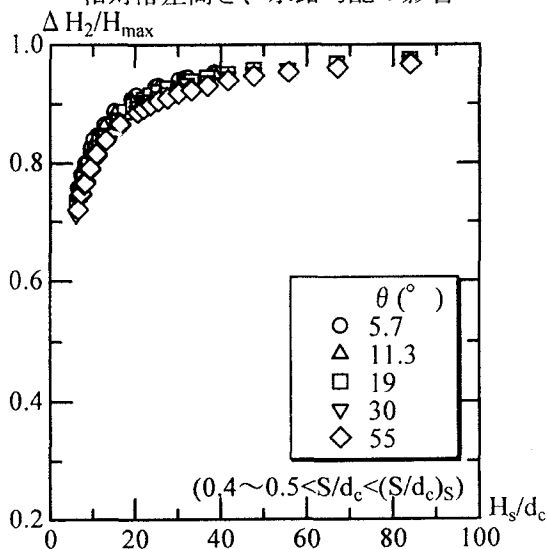


図-8 射流区間と跳水部とを合わせた相対エネルギー損失

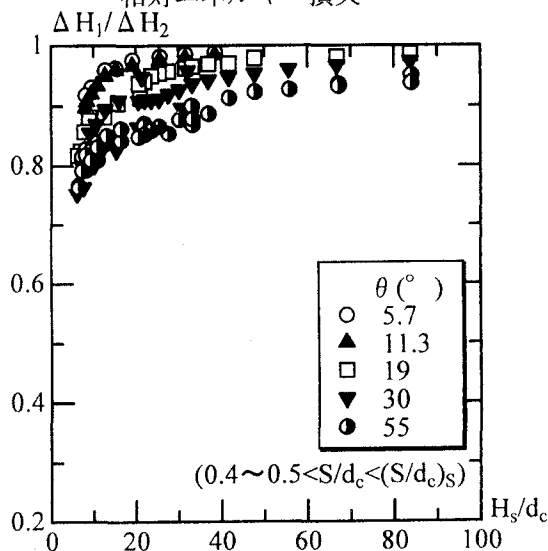


図-9 跳水を含んだエネルギー損失に対する階段状水路のエネルギー損失の割合

(8) 式の関係に基づき実験値を整理すると、図-8 に示されるように、水路勾配による相対エネルギー損失の変化は小さく、相対落差高さによって $\Delta H_2/H_{\max}$ の値が大きく変化する。

相対ステップ高さ S/d_c の値が 0.4~0.5 以上の Skimming Flow を対象にして、階段状水路上の射流区間と階段状水路直下流側での跳水部とを合わせたエネルギー損失に対する階段状水路上の射流のエネルギー損失の割合 $\Delta H_1/\Delta H_2$ を示したものを図-9 に示す。なお、 $\Delta H_1/\Delta H_2$ の算定にあたっては、階段状水路上流側の全水頭 $H_{\max}$ を同一にしている。図に示されるように、与えられた相対落差高さに対して、水路勾配が小さくなると、 $\Delta H_1/\Delta H_2$ の値は大きくなる。これは、同一の相対落差高さに対して、水路勾配が小さくなると、階段状水路の相対長さが長くなり、階段状水路上の射流区間のエネルギー損失が大きくなるためである。また、階段状水路上の射流区間のエネルギー損失が常に射流区間と跳水部を含んだエネルギー損失の 7~8 割以上となっている。このことから、階段状水路の利用は傾斜面上を流下する射流のエネルギーを減勢する効果が大いことが理解される。

5. まとめ

階段状水路における Skimming flow のエネルギー損失について広範囲な実験条件で系統的な検討を加え、階段状水路上の射流のエネルギー損失は水路勾配、相対ステップ高さ、および相対落差高さによって特徴づけられた。
・階段状水路上の射流のエネルギー損失に対するステップ高さの影響を明らかにした(図-6)。また、同一の水路勾配 $\tan \theta$ および相対落差高さ H/d_c に対して、相対ステップ高さ S/d_c の値が 0.4~0.5 以上の Skimming Flow が形成されるように階段状水路を設計すると、階段状水路による射流のエネルギー損失が最大となることを示すことができた。

・階段状水路上の射流区間と階段状水路直下流部に形成される跳水部を合わせた相対エネルギー損失を算出した結果、水路勾配による相対エネルギー損失の変化は小さく、相対落差高さによって大きく変化することが示された(図-8)。

・与えられた階段状水路上流側の全水頭に対して、階段状水路直下流部での跳水を含めたエネルギー損失に対する階段状水路上の射流区間のエネルギー損失の割合が常に 7~8 割以上となり(図-9)、階段状水路による射流のエネルギー減勢効果が大いことが明らかにされた。

参考文献

1) Chanson, H.: Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels,

Weirs and Spillways, Pergamon, Oxford, U.K., 1995.

- 2) Essery, L.T.S. and Homer, M.W.: The Hydraulic of Stepped Spillways, *CIRIA Report No.33*, 2nd edition, Jan, London, U.K., 1978.
- 3) Chanson, H.: Hydraulics of Skimming Flows over Stepped Channels and Spillways, *J. Hydr. Research*, IAHR, Vol.32, No.3, pp.445-460, 1994.
- 4) Peyas, L, Royet, P. and Degoutte, G.: Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 118(5), pp.707-717, 1992.
- 5) Chamani, M. R. and Rajaratnam, N.: Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.125, No.4, pp.361-368, 1999.
- 6) Matos, J. and Quintela, A.: Flow Resistance and Energy Dissipation in Skimming Flow over Stepped Spillways, *1st Int. Conf. on Water Resources Engineering*, ASCE, San Antonio, Texas, USA, Aug., pp.583-588, 1997
- 7) Fratino, U. and A. Piccinni, F.: Dissipation Efficiency of Stepped Spillways, *Hydraulics of Stepped Spillways*, A.A.Balkema, Rotterdam, pp. 103-110, 2000.
- 8) Peruginelli, A. and Pagliara, S.: Energy Dissipation Comparison among Stepped Channel, Drop and Ramp Structures, *Hydraulics of Stepped Spillways*, A.A.Balkema, Rotterdam, pp. 111-118, 2000.
- 9) Yasuda, Y. and Ohtsu, I.: Flow Resistance of Skimming Flows in Stepped Channels, *Proc. of XXVIII Biennial Cong., Spillways and Chute Structures*, B14, IAHR, Aug., 1999.
- 10) 安田 陽一, 高橋 正行, 大津 岩夫: 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, 2000.
- 11) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Discussion of Characteristics of Skimming Flow Over Stepped Spillways, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 126(11), 2000, (to be published).
- 12) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of flow condition on stepped channels, *The 27th Cong. of IAHR, Water Resources Engineering*, Div./ASCE, Aug., San Francisco, USA, pp.538-588, 1997.
- 13) Chamani, M. R.: Air Inception in Skimming Flow Regime over Stepped Spillways, *Hydraulics of Stepped Spillways*, A.A.Balkema, Rotterdam, pp. 61-67, 2000.
- 14) Bose, R. M. and Minor, H. E.: Guidelines for The Hydraulic Design of Stepped Spillways, *Hydraulics of Stepped Spillways*, A.A.Balkema, Rotterdam, pp. 163-170, 2000.
- 15) 高橋正行, 安田陽一, 大津岩夫: 階段状水路における Skimming flow の空気混入特性, 第 55 回土木学会年次学術講演会, II—176, 2000.
- 16) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Discussion of Onset of Skimming Flow on Stepped Spillways, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 127, 2001, (to be published).

(2000. 10. 2. 受付)