

階段状水路における射流のエネルギー損失

ENENRGY LOSS OF SUPERCRITICAL FLOWS IN STEPPED CHANNEL FLOWS

高橋 正行¹・安田 陽一²・大津 岩夫³

Masayuki TAKAHASHI, Youichi YASUDA, and Iwao OHTSU

¹正会員 修(工) 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 博(工) 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)

The stepped channel is effective for the energy dissipation of the supercritical flow. Systematical investigation on the energy loss due to the stepped channel flows is required. As the flow condition in the stepped channel, Skimming flow, Transition flow, and Nappe flow are defined. But the clarification of the energy loss has been made only for Skimming flow. In this paper, the residual energy for various flow conditions has been investigated systematically. The effects of the step height, the channel slope, and the total drop height on the residual energy are clarified for various flow conditions. The comparison of the residual energy for various flow conditions shows that the difference of the residual energy due to the flow conditions is negligible for $S/d_c \geq 0.5$ (d_c : critical depth, S : step height). The relative energy loss for various flow conditions can be predicted. Also, the equilibrium condition for each flow condition is shown.

Key Words : Stepped Channel Flow, Residual Energy, Spillways, Energy Dissipator, Stepped Channel Chute

1. まえがき

堰やダムなどの落差を伴う構造物や急傾斜地の水路を流下する流れのエネルギーを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⁾³⁾。また、景観・親水・生態系に配慮した水路としても利用されている^{2), 4)}。階段状水路において形成される流況は skimming flow (階段状水路の隅角部で常にエアポケットを形成せず、渦の形成が認められる流況 (図-1 参照)), nappe flow (常にエアポケットが形成され、越流水脈を伴う流況 (図-1 参照)) および transition flow である。なお, transition flow の存在は著者によって初めて定義された流況である^{2), 5)}。階段状水路の水工設計上, 各流況におけるエネルギー損失を明らかにすることが重要である。この場合, 階段状水路流れのエネルギー評価の確立が必要である。

著者は, これまでに skimming flow を対象として流水抵抗および階段状水路によるエネルギー損失を系統的に検討して明らかにしてきた^{1), 7)}。nappe flow のエネルギー損失については^{2, 3}の研究^{8, 9)}がなされているが, nappe flow のエネルギー評価方法に問題があり, 系統的な検討がなされていないため, nappe flow の流れのエネ

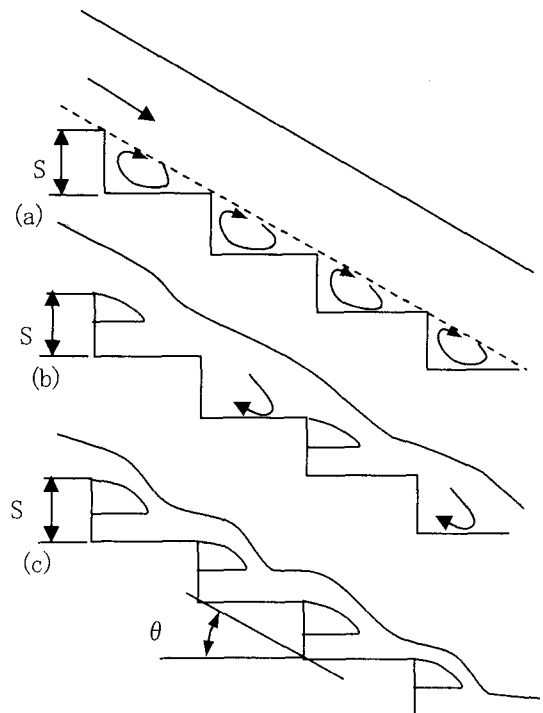


図-1 階段状水路に形成される流況

(a) skimming flow; (b) transition flow; (c) nappe flow

ルギーについて不明な点が多い。

本研究では、広範囲な実験条件の下で nappe flow および transition flow のエネルギー損失を系統的に明らかにし、skimming flow の場合と比較を行った。すなわち、提案した階段状水路下流端のエネルギー[Residual energy(残留エネルギー)] E_{res} の評価方法^{7,10)}に基づき、各流況における残留エネルギー E_{res}/d_c [d_c : 限界水深 ($d_c = (q^2/g)^{1/3}$; q : 単位幅流量)]および相対エネルギー損失 H_L/H_{max} [H_L : 階段状水路によるエネルギー損失; H_{max} : 階段状水路直上流での全水頭]を求めた。これによって、残留エネルギー E_{res}/d_c に対する相対ステップ高さ S/d_c [S : ステップ高さ], 相対落差高さ H_{dam}/d_c [H_{dam} : 落差高さ]および水路傾斜角度 θ の影響を明らかにした。特に、相対ステップ高さ S/d_c が0.5よりも大きくなると、残留エネルギー E_{res}/d_c が S/d_c によらず一定となることを示した。また、従来不明確であった各流況の相対エネルギー損失^{2), 3)} H_L/H_{max} を明らかにした。さらに、階段を有さない一般傾斜水路の残留エネルギーと階段状水路の残留エネルギーを比較し、エネルギー減勢に対する階段状水路の有効性を確認した。なお、skimming flow, transition flow および nappe flow において、各段で同じ流況が繰返されるための水理条件(平衡条件)についても示した。

2. 実験

実験は長方形断面水平水路に階段状水路を設置し、表-1に示す条件のもとで行った。また、水路傾斜角度 $\theta = 23^\circ$ 以上の場合、階段状水路流入部のクレスト形状をWESの標準堤頂形状とした。

階段状水路直下流部で形成された跳水終端水深を測定するため、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)。また、流況把握のため、ビデオおよびカメラ撮影を行った。

3. 階段状水路流れの流況

階段状水路における流況は相対ステップ高さ S/d_c および水路傾斜角度 θ によって変化し、図-2に示されるように、skimming flow, nappe flow, transition flow に区分される^{5), 6)}。

skimming flow の流況は θ , S/d_c によってさらに2つに分類される¹¹⁾(図-2, 3参照)。

4. 階段状水路の残留エネルギー(Residual Energy)

階段状水路における各流況(skimming flow,

表-1 実験条件

$\theta = 5.71^\circ$	$7 \leq H_{dam}/d_c \leq 38$	$0.8 \leq S/d_c \leq 5.5$	$B = 40\text{cm}$
$\theta = 11.3^\circ$	$4 \leq H_{dam}/d_c \leq 38$	$0.9 \leq S/d_c \leq 5.4$	$B = 40\text{cm}$
$\theta = 19^\circ$	$9 \leq H_{dam}/d_c \leq 80$	$1.1 \leq S/d_c \leq 6.4$	$B = 40\text{cm}$
$\theta = 23^\circ$	$31 \leq H_{dam}/d_c \leq 61$	$1.0 \leq S/d_c \leq 2.0$	$B = 40\text{cm}$
$\theta = 30^\circ$	$7 \leq H_{dam}/d_c \leq 69$	$1.1 \leq S/d_c \leq 5.9$	$B = 40\text{cm}$
$\theta = 55^\circ$	$6 \leq H_{dam}/d_c \leq 70$	$1.2 \leq S/d_c \leq 3.3$	$B = 40, 50\text{cm}$

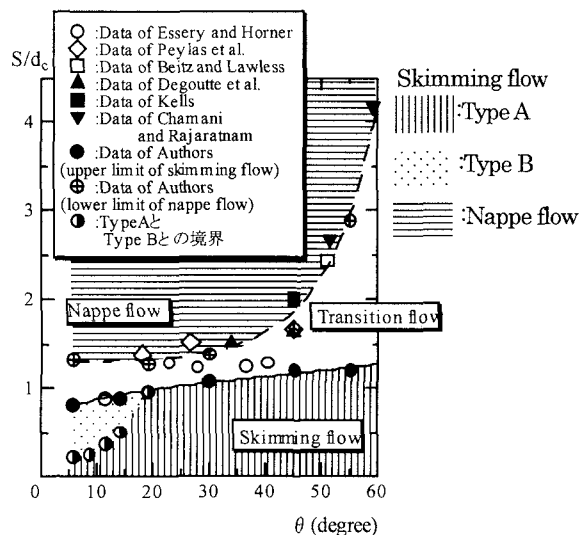


図-2 流況形成領域図

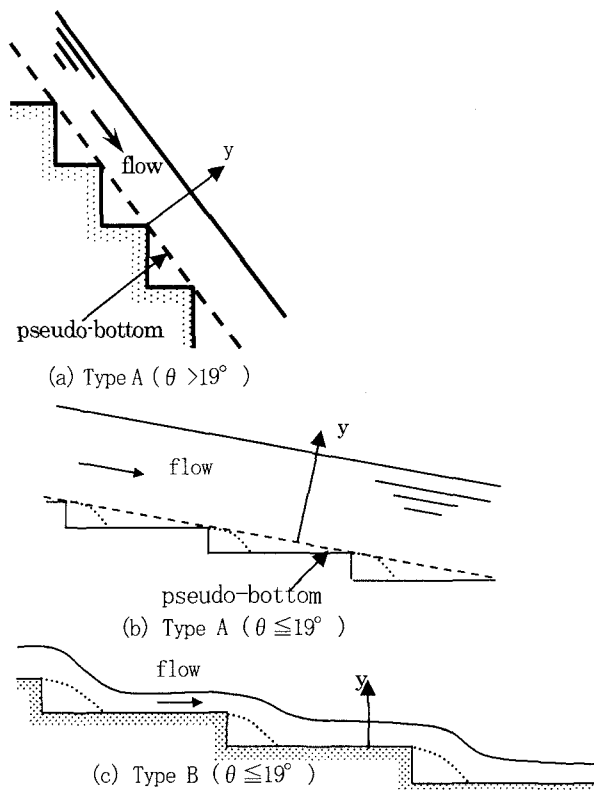


図-3 Skimming flowの流況分類

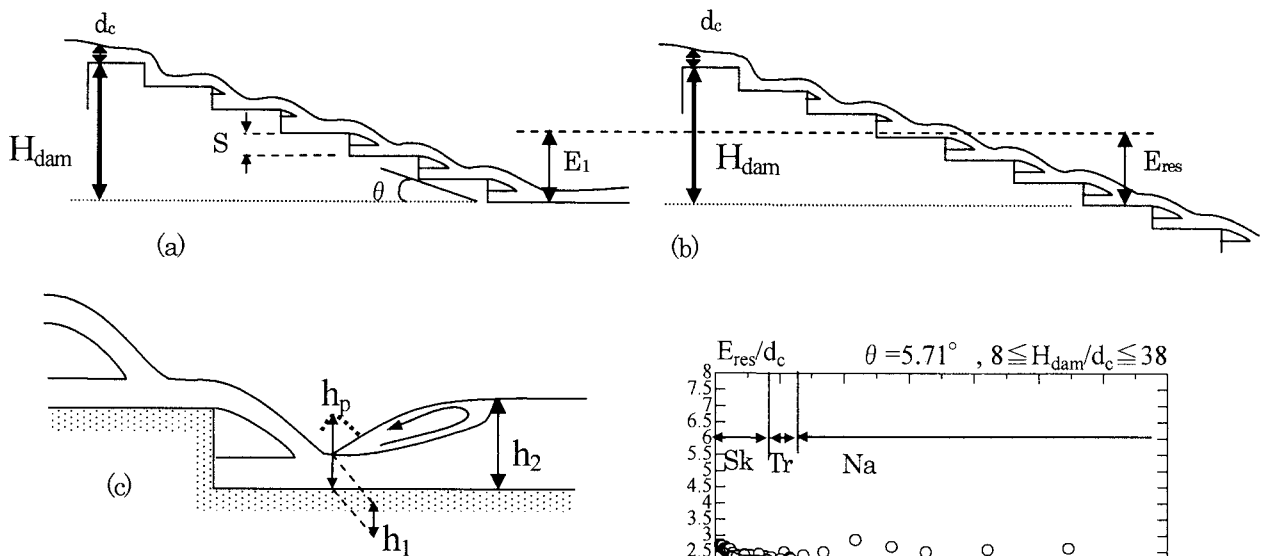


図-4 残留エネルギーの評価方法

transition flow, nappe flow)の残留エネルギー E_{res} を系統的に評価するために, skimming flow の場合に提案した E_{res} の評価方法^{7),10)}を適用する. 以下にその要点を示す.

同一な落差高さ H_{dam} , ステップ高さ S , 水路傾斜角度 θ , 流量 Q の下で, 階段状水路直下流側のエネルギー E_1 (図-4(a))が階段状水路上での残留エネルギー E_{res} (図-4(b))と等しいものと仮定した. また, 階段状水路直下に形成させた跳水を利用して E_1 を評価した. この方法を用いる場合, E_1 の測定断面の位置が重要であり, E_1 の断面を階段状水路下流側の底面圧力が最大となる断面とした (図-4(c)参照).

E_{res} は跳水始端断面の水深 h_1 および断面平均流速 V_1 を用いて次式で求められる.

$$E_{res} = E_1 \quad ; \quad E_1 = \lambda_1 h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (1)$$

ここに λ_1 は圧力分布補正係数である. E_{res} を限界水深 d_c で無次元化し整理すると次式が得られる.

$$\frac{E_{res}}{d_c} = \lambda \frac{h_1}{d_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{d_c}{h_1} \right)^2 \quad (2)$$

なお, 跳水始端断面の水深 h_1 は間接値であり, 跳水部に適用した運動量方程式(跳水始端での流線の曲がりの影響を考慮したもの)から算出されたものである.

平衡状態の E_{res}/d_c について, 相対ステップ高さ S/d_c と水路傾斜角度 θ で整理したものを図-5に示す. 図-5に示されるように, 与えられた水路傾斜角度 θ に対して, 相対ステップ高さ $S/d_c < 0.5$ の範囲では, S/d_c が大きくなると, E_{res}/d_c の大きさは小さくなる. 一方, $S/d_c \geq 0.5$

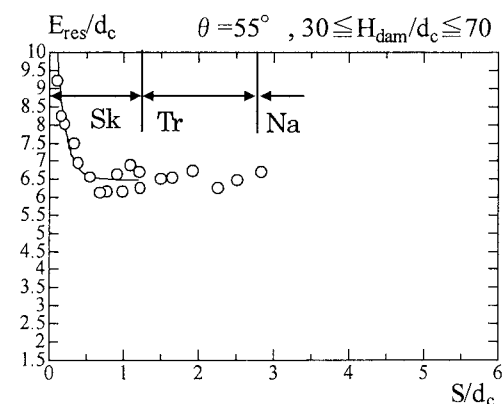
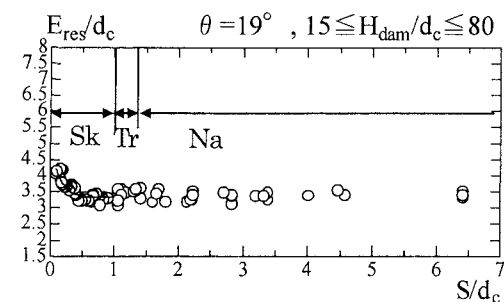
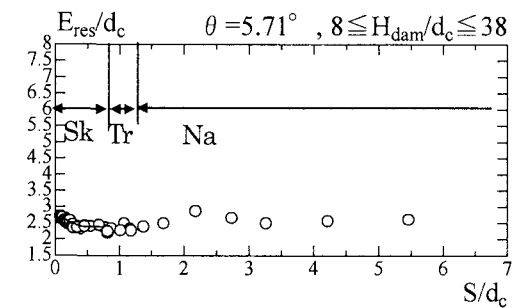


図-5 E_{res}/d_c に対する S/d_c の影響 (Sk: Skimming flow; Tr: Transition flow; Na: Nappe flow)

の場合, 本実験条件の範囲では S/d_c に関わらず E_{res}/d_c は一定値を示す. すなわち, skimming flow, transition flow および nappe flow による E_{res}/d_c の値の違いは認められない(図-5).

$S/d_c < 0.5$ の場合, 主流とキャビティ内に形成される

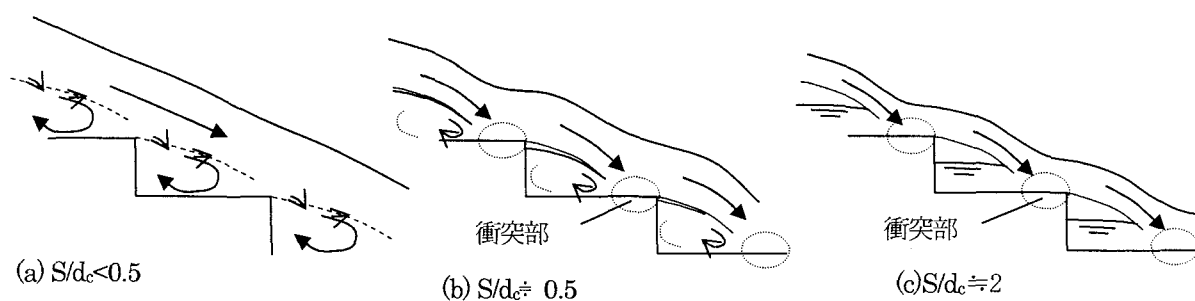


図 - 6 ステップ背面側の S/d_c による空気層の形成過程

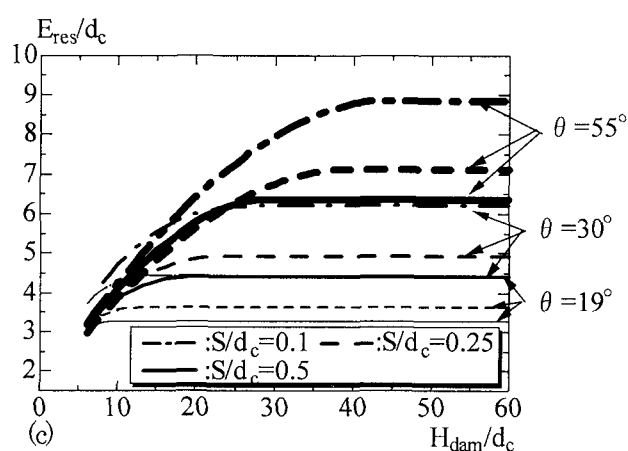
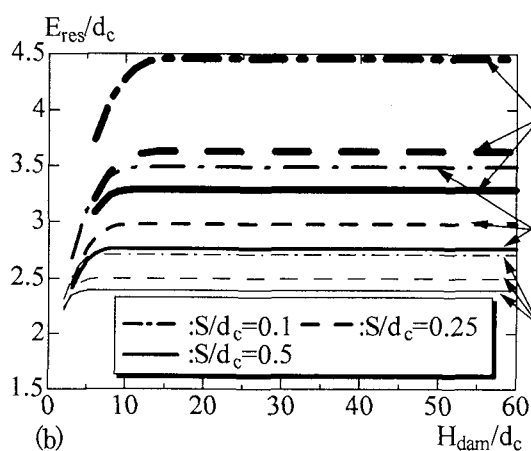
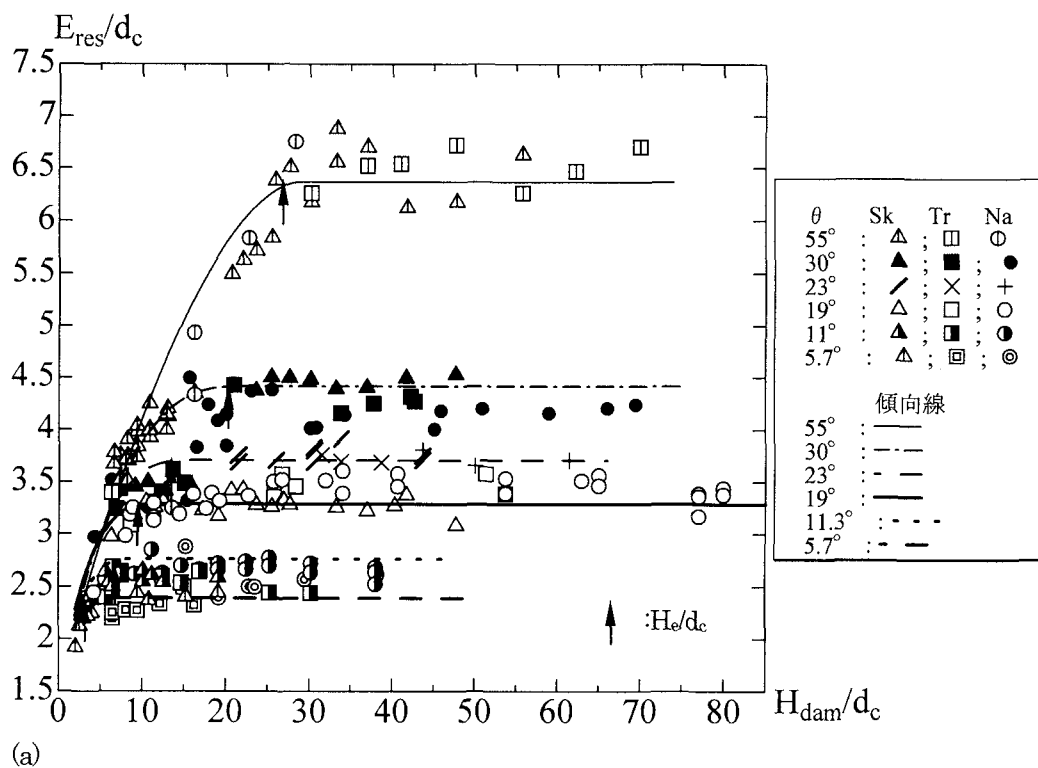


図 - 7 階段状水路直下の残留エネルギー E_{res}/d_c と相対落差高さ H_{dam}/d_c との関係

表 - 2 階段状水路と通常コンクリート表面を有する滑面水路との残留エネルギーの比較

渦との間で流れの相互干渉があるため、 S/d_c による E_{res}/d_c の変化が認められるものと考えられる。

$S/d_c = 0.5$ で、ステップ背面エッジ付近から空気層が間欠的に形成されるようになり、衝突部を除いて主流と隅角部内の流体との間で流れ

$\theta(^{\circ})$	$(E_{res}/d_c)_{non_step}$	$(E_{res}/d_c)_{s/d_c=0.1}$	$(E_{res}/d_c)_{s/d_c=0.25}$	$(E_{res}/d_c)_{s/d_c=0.5}$
5.71	4.78	2.71	2.50	2.29
11.3	7.25	3.49	2.98	2.76
19	10.0	4.46	3.62	3.29
30	13.2	6.20	4.93	4.42
55	18.2	8.86	7.10	6.37

の相互干渉がなくなるため (図 - 6 参照) S/d_c による E_{res}/d_c の変化が認められなくなったものと考えられる。すなわち, $S/d_c \geq 0.5$ の場合, 残留エネルギーの大きさに対して衝突部で生じるエネルギー損失が支配的となり, nappe flow の場合と類似になるものと考えられる。なお, この実験の S/d_c の範囲においては S/d_c による衝突の程度の違いは小さかったものと考えられる。

図 - 5 の実線は平衡状態における skimming flow の残留エネルギー E_{res}/d_c を示す^{1), 11)}。なお, 平衡状態での skimming flow の残留エネルギー E_{res}/d_c は (3) 式から求められる。ここに, d_w は水に換算した水深である。なお, 抵抗係数 f は (4) 式で表示され, 実験で得られた d_w/d_c の値を (4) 式に代入することによって算出される¹¹⁾。

Type A

$$\left(\frac{E_{res}}{d_c}\right)_{typeA} = \frac{d_w}{d_c} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{d_c}{d_w}\right)^2 = \left(\frac{f}{8 \sin \theta}\right)^{\frac{1}{3}} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta}\right)^{-\frac{2}{3}} \quad (3a)$$

Type B

$$\left(\frac{E_{res}}{d_c}\right)_{typeB} = \frac{d_w}{d_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{d_c}{d_w}\right)^2 = \left(\frac{f}{8 \sin \theta}\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta}\right)^{-\frac{2}{3}} \quad (3b)$$

$$f = 8 \left(\frac{d_w}{d_c}\right)^3 \sin \theta \quad (4)$$

階段を有さない傾斜水路の残留エネルギーの大きさと階段状水路の場合を比較したものを表 - 2 に示す。なお, 階段を有さない水路のコンクリート表面の抵抗係数を $f=0.03$ ¹²⁾ として残留エネルギーを算定した。

表 - 2 に示されるように, $S/d_c=0.1, 0.25, 0.5$ の場合の階段状水路における残留エネルギーと階段を有さない場合との比は各々 $0.45 \sim 0.57, 0.36 \sim 0.52, 0.33 \sim 0.48$ となる。すなわち, 階段を有さない傾斜水路と比べて, エネルギー減勢に対する階段状水路の効果が大きいことが理解される。

$S/d_c \geq 0.5$ の場合の E_{res}/d_c を θ と H_{dam}/d_c で整理したものを図 - 7(a) に示す。この場合, 平衡状態ばかりでなく非平衡状態においても S/d_c による残留エネルギーの違いは見られない。図中実線は傾向線を示し, 矢印は skimming flow において平衡状態になるために必要な相対落差高さ H_e/d_c を示す。図 - 7(a) に示されるように, skimming flow ばかりでなく transition flow および nappe flow においても与えられた θ に対して, ほぼ等しい H_e/d_c の値で平衡状態となる。

なお, $S/d_c < 0.5$ の場合の残留エネルギー E_{res}/d_c について, 実験値から得られた傾向線を図 - 7(b), (c) に示す。図 - 7(b), (c) に示されるように, $S/d_c < 0.5$ の場合の

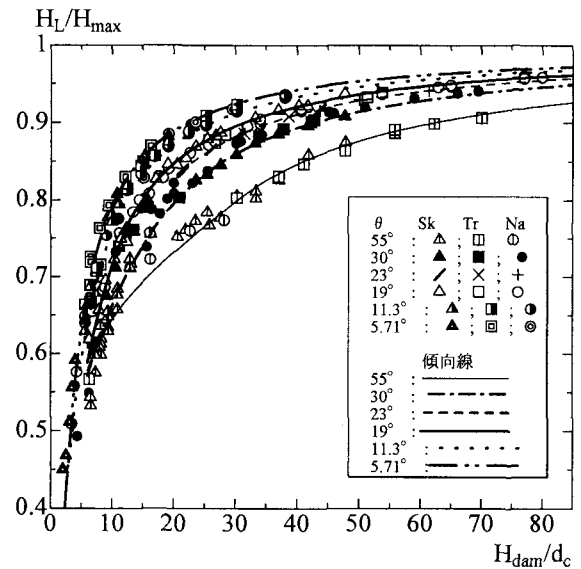


図 - 8 階段状水路による相対エネルギー損失

E_{res}/d_c は水路傾斜角度 θ , 相対落差高さ H_{dam}/d_c , および相対ステップ高さ S/d_c によって変化する。

以上のことから, 図 - 5, 6 の結果から平衡状態および非平衡状態での残留エネルギーを知ることができる。このことから, 高落差ばかりでなく低落差の階段状水路に対して水工設計が可能となる。

5. 階段状水路による相対エネルギー損失

階段状水路によるエネルギー損失 H_L を求めるため, 階段状水路直上流断面と階段状水路下流の断面間でベルヌーイの定理を適用すると次式が得られる。

$$\frac{H_L}{H_{max}} = 1 - \frac{E_{res}/d_c}{H_{dam}/d_c + 3/2} \quad (5)$$

階段状水路の skimming flow, nappe flow および transition flow の相対エネルギー損失 H_L/H_{max} は (5) 式および図 - 5, 7 に示す残留エネルギー E_{res}/d_c の結果から算定され, 相対エネルギー損失 H_L/H_{max} は次の関係で示される。

$S/d_c < 0.5$ の場合

$$\frac{H_L}{H_{max}} = F\left(\theta, \frac{S}{d_c}, \frac{H_{dam}}{d_c}\right) \quad (6a)$$

$S/d_c \geq 0.5$ の場合

$$\frac{H_L}{H_{max}} = F\left(\theta, \frac{H_{dam}}{d_c}\right) \quad (6b)$$

$S/d_c \geq 0.5$ の H_L/H_{max} を θ と H_{dam}/d_c とで整理した結果を

図-8に示す。図-8に示されるように、与えられた θ および H_{dam}/d_c に対して、 H_t/H_{max} はskimming flow, transition flow および nappe flow のどの流況においてもほぼ等しい値を示す。

6. まとめ

階段状水路による射流のエネルギー損失について、skimming flow, transition flow および nappe flow の各流況を対象に広範囲な実験条件の下で系統的な検討を加えた結果を以下に要約して示す。

- ① skimming flow の場合と同様な残留エネルギー (Residual Energy) の評価方法^{7,10)}に基づき、transition flow および nappe flow の各流況の残留エネルギーを算定し、 E_{res}/d_c に対する相対ステップ高さ S/d_c 、水路傾斜角度 θ 、相対落差高さ H_{dam}/d_c の影響を明らかにした(図-5, 7)。平衡状態の場合、 $E_{\text{res}}/d_c = F(S/d_c, \theta)$ によって表示され、非平衡状態の場合、 $E_{\text{res}}/d_c = F(H_{\text{dam}}/d_c, S/d_c, \theta)$ によって表示される。
- ② 相対ステップ高さ $S/d_c \geq 0.5$ の場合、与えられた水路傾斜角度 θ 、相対落差高さ H_{dam}/d_c に対して、 S/d_c による残留エネルギー E_{res}/d_c の違いは見られないことを示した(図-5)。すなわち、skimming flow, transition flow および nappe flow による残留エネルギー E_{res}/d_c の違いが認められないことを示し、現象に基づく考察を加えた。
- ③ 与えられた水路傾斜角度 θ に対して平衡状態となるために必要な相対落差高さ H_c/d_c は、 $S/d_c \geq 0.5$ の場合、skimming flow, transition flow および nappe flow の各流況に関わらずほぼ等しい値を示す[図-7(a)]。
- ④ $S/d_c = 0.1, 0.25, 0.5$ の場合の階段状水路における残留エネルギーと階段を有さない場合とを比較することで、エネルギー減勢に対する階段状水路の効果が大きいことを示した(表-2)。
- ⑤ 相対エネルギー損失 H_t/H_{max} は、 $S/d_c \geq 0.5$ の場合、水路傾斜角度 θ 、相対落差高さ H_{dam}/d_c によって表示される(図-8)。

参考文献

- 1) 高橋正行, 安田陽一, 大津岩夫: 階段状水路における Skimming flow のエネルギー減勢, 水工学論文集, 土木学会, 第45巻, pp. 415-420, 2001.
- 2) Chanson, H.: The Hydraulics of stepped chutes and spillways, *Balkema*, Lisse, 2001.
- 3) H.-E., Minor and W.H., Hager (ed.): Hydraulics of stepped spillways, *Balkema*, Rotterdam, 2000.
- 4) 安田陽一, 大津岩夫, 三矢康彦, 浜野龍夫: 長崎県河通川におけるエビ・カニの遡上に配慮した魚道の効果, 河川技術論文集, 土木学会, 第8巻, pp. 343-348, 2002.
- 5) Ohtsu, I., and Yasuda, Y.: Characteristics of flow condition on stepped channels, *The 27th Cong. of IAHR, Water Resources Engineering*, Div./ASCE, San Francisco, USA, pp. 538-588, 1997.
- 6) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Discussion of "Onset of skimming flow on stepped spillways", *Journal of Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 127, No. 6, pp. 522-524, 2001.
- 7) 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.
- 8) Essery, I.T.S. and Horner, M.W.: The hydraulic design of stepped spillways, *CIRIA Report No. 33*, Jan., London, 2nd edition, 1978.
- 9) Pinheiro, A.N., and Fael, C.S.: Nappe flow in stepped channels - Occurrence and energy dissipation, *International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, H.-E., Minor and W.H., Hager eds., Balkema, pp. 119-126, 2000.
- 10) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Discussion of "Characteristics of skimming flow over stepped spillways", *Journal of Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 126, No. 11, pp. 869-871, 2000.
- 11) 高橋正行, 安田陽一, 大津岩夫: 階段状水路における Skimming flow の流水抵抗, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 土木学会, 第2巻, pp. 40-44, 2003.
- 12) Henderson, F.M.: Open channel flow, *The Macmillan Company*, Canada, 1966.

(2003. 9. 30 受付)