

日大・理工 学員 ○高橋 正行 村井 貞斉 高坂 保孝 藤本 秀昭
日大・理工 正員 後藤 浩 安田 陽一 大津 岩夫

はじめに

階段状水路における流れは、流量、ステップ高さ、水路傾斜角など水利条件によって、様々な流れの様相を呈する。階段状水路は堰やダムなどから流出する射流のエネルギー減勢¹⁾²⁾として、また最近では、美的景観・親水性³⁾・水質浄化を考慮した水路として利用されている。さらに、河床勾配が急な所では河床勾配を緩和するため、連続的に落差工が施され、階段状の水路となっている。従来、階段状水路において、ステップ上で跳水が形成されるための水利条件について報告されているが、不明な点が多い。ここでは、階段状水路のステップの勾配に着目し、ステップ上で跳水が形成されるための水利条件について広範囲な水路傾斜角のもとで検討を加えた。

流況の説明

階段状水路における流れの流況は水路勾配 $\tan \alpha$ (図 1 参照)、ステップの勾配 $\tan \theta$ および相対ステップ高 dc/S (dc : 限界水深) によって種々変化する。すなわち、階段状水路における流れが全て射流となる場合(図 1)と、ステップ上で跳水が形成される場合(図 2)とがある。

ステップ上を通過する流れが射流の状態の下流する場合、ステップ隅角部で常に渦の形成が見られる skimming flow(図 1-1)と、常に nappe が形成され、個々のステップに Air pocket が見られる nappe flow(図 1-2)とに大別される¹⁾³⁾。一方、ステップ上で跳水が形成される場合、図 2 に示されるように、与えられた $\tan \alpha$ に対して流況は相対ステップ高 dc/s およびステップの勾配 $\tan \theta$ によって変化する。特に、跳水から射流へ、または射流から跳水へ変化する境界付近では、跳水の流況はステップの勾配 $\tan \theta$ によって以下のように特徴づけられる。

- (1) $0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \sim 10^\circ$ ($0.00 \leq \tan \theta \leq 0.087 \sim 0.176$)

流況 A : ステップから越流した流れが次のステップに衝突し、ステップ上で跳水が形成され、流速が十分に減勢された状態で越流する。この場合、越流水脈は大きく乱れることなく下流する。(図 2-1)

- (2) $25^\circ \sim 35^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ($0.466 \sim 0.700 \leq \tan \theta \leq 1.000$)

流況 B : nappe がステップに衝突し、その位置がステップ下流端近くとなり、部分的に表面渦が形成されるものの、流速はほとんど減勢されない。この場合、ステップを通過する流脈は大きく乱れ、splash した状態で下流する。(図 2-2)

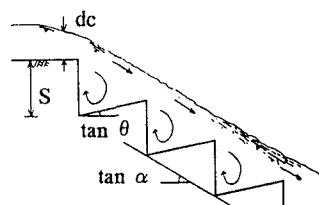


図 1-1 skimming flow

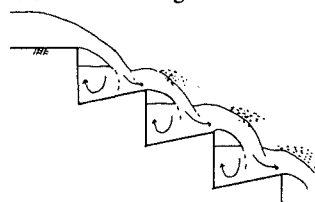


図 1-2 nappe flow

	$0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \sim 10^\circ$	$5^\circ \sim 10^\circ \leq \theta \leq 25^\circ \sim 35^\circ$	$25^\circ \sim 35^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
大 ↑ dc/S ↓ 小	(1) 流況 A	(2) 中間的な流況	(3) 流況 B
	(4) 流況 A	(5) 流況 A	(6) 流況 A

$19^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$

図 2 流況

(3) $5^\circ \sim 10^\circ \leq \theta \leq 25^\circ \sim 35^\circ$ ($0.087 \sim 0.176 \leq \tan \theta \leq 0.466 \sim 0.700$)

この場合、流況 A と流況 B との中間的な状態となる。すなわち、nappe がステップに衝突し、ステップ上で跳水が形成されるものの流速が十分には減勢されない状態で越流する (図 2-3)。

なお、ステップ上で跳水が形成される場合、どのステップにおいても第一段目で形成される流況とほぼ同じ流況が繰り返されている。

ステップ上で跳水が形成される場合と射流の状態で流下する場合との境界については、次元解析的考察から次の関係で示されるものと推論される。

$$dc/S = f(\tan \alpha, \tan \theta) \quad (1)$$

(1) の関係で実験値を整理したものを図 3 に示す。

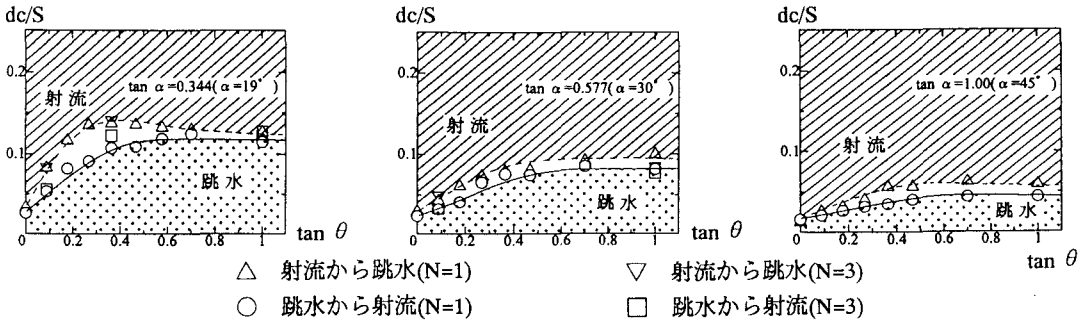


図 3 跳水の形成領域

図中破線は流量、すなわち $dc(=\sqrt{q^2/g})$ を増加させたことによって、ステップ上で跳水が形成されている状態からステップ上の流れが射流の状態に変化する境界を示し、実線は流量を減少させたことによって、射流の状態から跳水が形成される状態に変化する境界を示す。

図に示されるように、ステップに勾配を持たせた場合、流量の変化方法によって境界が異なる。すなわち、履歴効果が認められる。また、ステップの勾配 $\tan \theta \leq 0.4$ の場合、与えられた水路勾配 $\tan \alpha$ に対して、 $\tan \theta$ が大きくなるほど、境界を示す相対ステップ高 dc/S は大きくなる。これは、相対ステップ高 dc/S が大きくなることによって、nappe の衝突位置が下流側に近づき、表面渦が形成される領域が小さくなり、流況が遷移しやすくなるためと考えられる。さらに、ステップの勾配 $\tan \theta$ を一定にして考えたとき、水路勾配 $\tan \alpha$ が大きくなるに従って、 dc/S が小さくなる。これは、水路勾配 $\tan \alpha$ が大きくなるにつれて、相対ステップ長さが短くなるため、ステップを通過する流線の曲率が大きい(dc/S が小さい)場合に跳水が形成されるためと考えられる。

まとめ

ステップ上で形成される跳水の流況が特徴づけられ、階段状水路における跳水の形成条件が示された。今後は、さらに広範囲な実験条件のもとで検討を行っていく。

記号説明

S: ステップ高さ, dc : 限界水深, $\tan \alpha$: 水路の勾配, $\tan \theta$: ステップの勾配, q : 単位幅流量, g : 重力加速度

参考文献

1. CHANSON, H. L. (1994). Hydraulics of Stepped Spillways and Cascades. 1994 Conf. on Hydraulics in Civ. Engrg., Brisbane, Queensland, 1994. The Inst. of Engrs., Australia Conference Preprints pp 217 - 222.
2. L. T. S. Essery and H. W. Horner (1978) "The Hydraulic Design of Stepped Spillways", CIRIA Report No. 33, 2nd edition, London, UK.
3. 遠藤、安田、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.