

階段状水路における Skimming flow の水理特性

日本大学理工学部 正員 ○高橋正行
 日本大学理工学部 正員 安田陽一
 日本大学理工学部 正員 大津岩夫

落差を伴う水工構造物を流下する高速流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と報告されている^{1)~3)}。階段状水路流れの流水抵抗や階段状水路による射流のエネルギー減勢を明らかにすることは水工設計上重要である。著者らは擬似等流状態（各階段上で流下方向に対して同様な流況が繰り返される状態）における Skimming flow（各ステップでエアポ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）の流水抵抗について検討を加えてきた^{1),2),6)}。ここでは、階段状水路における Skimming flow の流況が水路傾斜角度および相対ステップ高さによって変化し、2 つに区分されることを示し、その形成領域を明らかにした。さらに、各流況に対応して流水抵抗を特徴づけた。

流況

階段状水路において空気混入し始めた断面より下流側の領域では、相対ステップ高 S/d_c (d_c :限界水深 [$d_c=(q^2/g)^{1/3}$; q : 単位幅流量])、水路傾斜角 θ によって Skimming flow (図-1(a)参照) や Nappe flow (図-1(c)参照) が観察される。Skimming flow の形成領域を図-2 に示す。Skimming flow の流況は、さらに2 つに分けることができる。

Skimming flow (Type A)

階段状水路を越える流れの水面が水路の形状の影響をほとんど受けずに、エッジを結んだ仮想底面とほぼ平行に流下する (図-3(a), (c))。水路傾斜角が大きい場合 ($\theta \geq 30^\circ$)、この流況は相対ステップ高さ S/d_c の値によらず常に形成される。また、水路傾斜角 θ が比較的小さい場合 ($\theta \leq 19^\circ$)、 S/d_c が小さくなると、この流況の形成が認められる。

Skimming flow (Type B)

階段状水路を越える流れの水面が水路の形状の影響によって変化し、ステップ面上で平行流が形成されるようになる (図-3(d))。この流況は、水路傾斜角が小さく ($\theta < 19^\circ$)、相対ステップ高さが大きい場合に形成される。

なお、Type A と Type B との間で中間的な流況(階段状水路上を越える流れの水面が水路の形状の影響を受けるものの、ステップ面上で平行流は観察されない)が形成される。

Skimming flow の流水抵抗

階段状水路上の Skimming flow の流況が2 つに分けられるため、流況に対応した抵抗係数 f の算定方法を以下に示す。

Type A の場合、エッジを結んだ仮想底面より上方の流れに運動量方程式を適用し(図-4(a)参照)、(3)式の関係から抵抗係数 f を算定する。

$$f = 4 \tau / (\rho_w V_w^2 / 2) \quad (1)$$

$$\tau = \rho_w g d_w \sin \theta \quad (2)$$

$$f = 8 (d_w / d_c)^3 \sin \theta \quad (3)$$

ただし、 τ はエッジを結んだ仮想底面上に作用するせん断応力、 ρ_w は水の密度、 d_w は水だけに換算した水深、 g は重力加速度、 V_w は断面平均流速 ($V_w = q_w / d_w$) である。

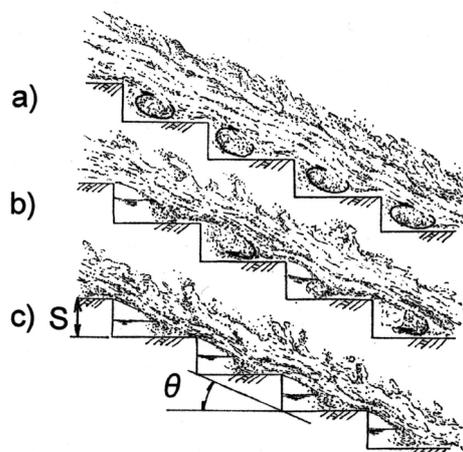


図-1 階段状水路の流況

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

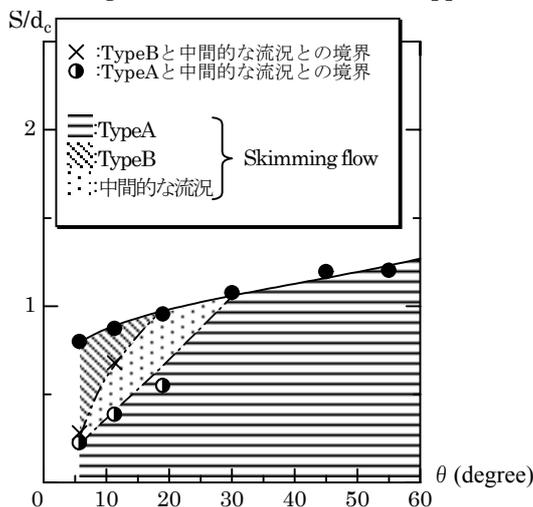


図-2 流況形成領域図

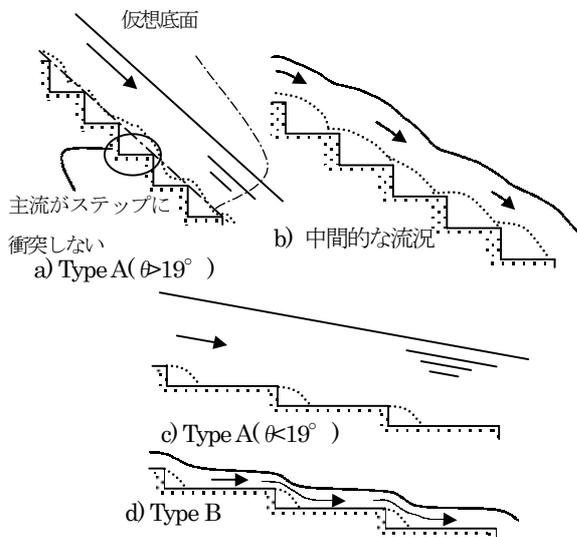


図-3 Skimming flow の流況

キーワード：階段状水路、Skimming flow、流水抵抗、洪水吐き

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8 Tel.&Fax.03-3259-0409 E-mail : masayuki@civil.cst.nihon-u.ac.jp

Type B の場合、ステップを越える流れの水面形は階段状水路の形状の影響を受ける。ここではステップ上で平行流が生じる断面での水深、その断面の平均流速を代表水深 d_w および代表流速 V_w とし、平均的な流れとして取り扱う(図-4(b)参照)。すなわち、(3)式中の d_w をステップ上で平行流が生じる断面での水深として抵抗係数 f を算定する。

中間的な流況の場合、水路の形状の影響を受けて水面に凹凸が現れるものの、エッジ断面での水深が仮想底面上の平均水深とほぼ同じ大きさを示すため、エッジ断面の仮想底面上の水深を代表水深 d_w とし(図-4(c)参照)、(3)式の関係を用いて f を算定する。

階段状水路における射流水深 d_w は、空気混入率[空気混入率=(空気量)/(水の量+空気量)]を測定し、水だけに換算した水深として直接求める方法と、階段状水路直下流側に形成される跳水を利用して間接的に求める方法を用いている^{2,6)}。Skimming flow の各流況に対応した射流水深を算定した結果、直接測定値と間接測定値との差が±10%以内となっていることが確かめられている^{2,6)}。

擬似等流状態における Skimming flow の抵抗係数 f について(4)式の関係で整理したものを図-5 に示す。

$$f = F(S/dc, \theta) \quad (4)$$

図に示されるように、 f は相対ステップ高さ S/dc および水路傾斜角 θ によって変化する。また、Type A(中間的な流況を含む)と Type B で f の変化傾向が異なる。

各流況に対応した抵抗係数 f の変化について以下に説明を加える。

Type A の流況が形成される場合、図-5(a)に示されるように、与えられた相対ステップ高さ S/dc に対して水路傾斜角 θ が 19° 付近で f の値が最大となっている。 $\theta \geq 19^\circ$ の場合、 S/dc が大きくなると与えられた水路傾斜角 θ に対する f の値が大きくなり、ある段階から S/dc による f の変化は小さくなる。 f の変化が小さい S/dc の領域では、ステップエッジから瞬間的に空気層が形成されるようになり、相対ステップ高さが大きくなるにつれて空気層が形成される頻度が多くなる。また、 θ によって f が変化するの、底面近くの主流がステップに衝突する間隔が θ によって変化するためと考えられる。

Type B の流況が形成される場合、図-5(b)に示されるように水路傾斜角 θ が大きくなるにつれて f の値は大きくなっている。また、相対ステップ高さ S/dc の変化による f の変化は小さい。

以上のことから、設計流量 q_w (または限界水深 d)、水路傾斜角 θ 、ステップ高さ S が与えられたとき、図-2 より流況が明らかとなり、また図-5 より流況に対応した抵抗係数 f の値が求められる。さらに、 f の値を知ることによって、階段状水路を流下する射流の平均流速 V_w (Type B の場合、代表流速)および平均水深 d_w (Type B の場合、代表水深)が求められる。すなわち、水工設計上有益な情報を示すことができた。

参考文献

- 1) Chanson, H: Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways, Pergamon, Oxford, U.K., 1995
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Ohtsu, I, Yasuda, Y. and Takahashi, M.: Discussion of "Onset of Skimming Flow Stepped Spillways.", J. Hydr. Engrg., ASCE, 127(6), 2001 (to be published).
- 5) Yasuda, Y., Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Energy Dissipation of Skimming Flows on Stepped-channel Chutes, The 29th IAHR Cong., Theme D2, IAHR, September, Beijing, 2001 (accepted paper).
- 6) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Discussion of Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways, J. Hydr. Engrg., ASCE, 126(11), pp.869-871,2000.

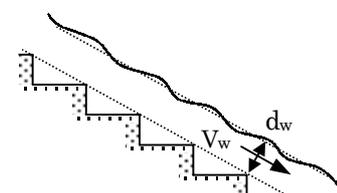
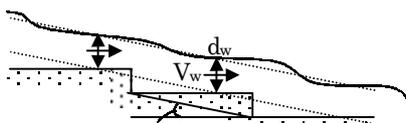
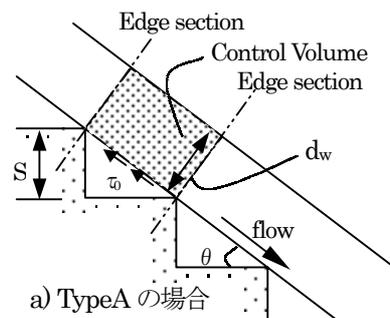
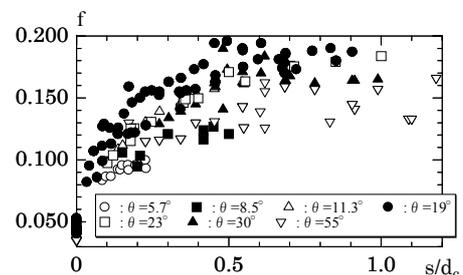
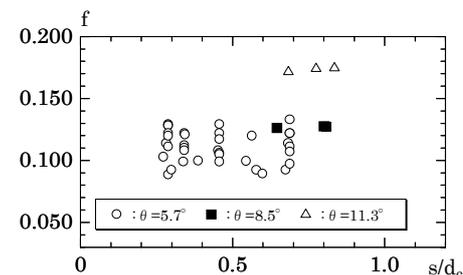


図-4 階段状水路の代表水深



a) Type A および中間的な流況の抵抗係数



b) Type B の抵抗係数

図-5 Skimming flow の流水抵抗