

II-106

階段状水路における skimming flow の流水抵抗について

日大 理工 正 安田 陽一

日大 理工 正 大津 岩夫

オリジナル設計(株) 埜渡 隆司

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、階段状水路が用いられている¹⁾²⁾。階段状水路による射流の流水抵抗を知ることが階段状水路を合理的に設計する上で重要である。従来、階段状水路による射流の流水抵抗については、階段上を越える射流水深を直接測定して評価している場合が多いため、流水抵抗が過大評価されているなど検討の余地がある³⁾。また、流水抵抗の評価方法を同一にして系統的な検討がなされていないため、不明な点が多い。本研究では、各ステップで air-pocket が形成されることなく常にステップ隅角部に渦が形成される流況(skimming flow)を対象として、広範囲な実験条件のもとで階段状水路による射流の流水抵抗について系統的な検討を行った。すなわち、階段状水路直下流側に形成された跳水終端水深から間接的に算出した跳水始端水深を用いて、階段状水路における射流水深を評価し、平衡状態(階段状水路における射流の水深や流速が流下方向に対してほぼ一定となり、同様な流況が繰り返し起こる状態)における skimming flow の流水抵抗を明らかにした。

階段状水路における流況とその形成条件

階段状水路における流況は、skimming flow と nappe flow とに大別され¹⁾、この2つの流況の間には中間的な流況が存在する²⁾。また、skimming flow の流況において、階段状水路上の水面形がステップの凹凸に影響される場合(Type A)と影響されない場合(Type B)とが存在する⁴⁾。各流況の形成条件を図-1に示す。実験的に nappe flow が形成されるための最小相対ステップ高さは(1)式、skimming flow が形成されるための最大ステップ高さは(2)式、および skimming flow Type A と Type B との境界を示す相対ステップ高さは(3)式で近似される。

$$s/d_c = 1.34(1.42 - \tan \alpha)^{0.25} \quad (1)$$

$$s/d_c = 1.16 \tan \alpha^{0.165} \quad (2)$$

$$s/d_c = 0.6 - 0.055(\tan \alpha + 0.5)^{-3.7} \quad (3)$$

階段状水路直下流側に形成される跳水終端水深

階段状水路における流れが skimming flow Type A となり、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、跳水終端水深 h_2 について検討を行う。相対終端水深 h_2/d_c について(4)式の関係で整理したものを図-2に示す。

$$h_2/d_c = f(H_{dam}/d_c, s/d_c, \alpha) \quad (4)$$

図-2に示されるように、与えられた相対ダム高さ H_{dam}/d_c に対して、傾斜角 α が小さくなるにつれて、相対終端水深 h_2/d_c は小さくなる。これは、傾斜角 α が小さくなると傾斜面の相対長さが長くなり、射流の流速が減勢され、水深が大きくなったため、対応終端水深 h_2 が小さくなる。また、与えられた傾斜角 α に対して、相対ダム高さ H_{dam}/d_c の値がある一定以上になると、相対終端水深 h_2/d_c が一定の値を示すようになる。これは、階段上を越える流れが平衡状態になったためと考えられる。なお、skimming flow Type A が形成される場合、 s/d_c による h_2/d_c の違いは認められない。

平衡状態における skimming flow の流水抵抗

平衡状態における skimming flow の流水抵抗を知るために、ステップエッジを結んだ面を仮想底面とし、その底面のせん断応力 τ_0 が(5)式で示されるものとする。

$$\tau_0 = f \rho V^2 / 8 = w d \sin \alpha \quad (5)$$

ここに、 d は平衡状態における射流水深、 V は平均流速 ($V = q/d$; q = 単位幅流量)、 f は摩擦抵抗係数である。

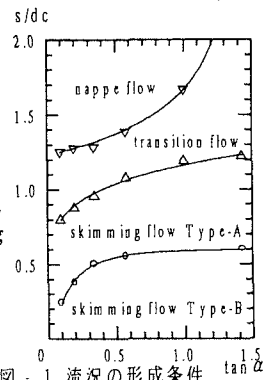


図-1 流況の形成条件

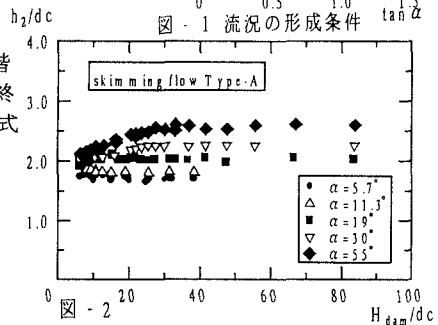


図-2 相対ダム高さの違いによる跳水終端水深

キーワード：階段状水路・射流・開水路流・流水抵抗

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8 Tel.&Fax. 03-3259-0409

平衡状態における射流水深 d を求める際に階段状水路直下での射流水深 h_1 を用いた。なお、階段状水路直下流側で形成される跳水終端水深 h_2 を測定し、運動量方程式(6)を用いて射流水深 h_1 を間接的に算出した。また、(6)式において、階段状水路直下で流線が曲げられることによって生じる底面圧力の増加が考慮されている。

$$(v_2 - v_1)wq/g = P_1 - P_2 \quad (6)$$

ここに、 $P_1 = wh_1 h_p/2$, $P_2 = wh_2^2/2$ と仮定している。

また、 $v_1 = q/h_1$, $v_2 = q/h_2$ である。

階段状水路における流れが平衡状態となったときの水深 d は、次式(7)より試算法によって求められる。

$$(q/d)^2/2g + d \cos \alpha = (q/h_1)^2/2g + \lambda h_1 \quad (7)$$

なお、 λ は圧力の補正係数であり、(8)式で示される。

$$\lambda = 1 + \frac{1}{wq} \int_0^{h_1} u \Delta p dy \quad (8)$$

ここに、 Δp は静水圧からの増加分を示す [$\Delta p = w(h_p - h_1)(h_1 - y)/h_1$]。また、流速 u については、 $u = U(y/h_1)^{1/8}$ としている [U は $y=h_1$ の流速、 y は水路床からの高さである]。

(7)式より求めた平衡状態における射流水深 d を(5)式に代入し、摩擦抵抗係数 f を求めた。

(9)式の関係で整理したもの図-3に示す。

$$f = f(s \cos \alpha / d, \alpha) \quad (9)$$

図-3に示されるように、摩擦抵抗係数 f は傾斜角 α および相対粗度高 $s \cos \alpha / d$ によって異なることが認められる。これは、傾斜角 α および相対粗度高 $s \cos \alpha / d$ によりステップ面上での流れの衝突位置が異なり、渦の形成が異なるため流水抵抗が変化するものと考えられる。また、相対粗度高 $s \cos \alpha / d$ がある一定以上になると(skimming flow Type A が形成された場合)、与えられた傾斜角 α に対して摩擦抵抗係数 f の値はほぼ一定の値を示す。

skimming flow Type A の摩擦抵抗係数 f について(10)式の関係で整理したものを図-4に示す。

$$f = f(\tan \alpha) \quad (10)$$

図-4に示されるように、摩擦抵抗係数 f は傾斜角 $\alpha = 19^\circ$ 付近で最大となることが認められる。これは、ステップ隅角部に形成される渦が大きいため、流水抵抗に対する渦の影響が大きくなるものと考えられる。

まとめ

skimming flow を対象に広範囲な実験条件のもとで、階段状水路直下流側で形成される跳水終端水深から階段状水路における流れが平衡状態となる条件を検討し、階段状水路における射流水深を間接的に求め、skimming flow における流水抵抗を評価した。このことから、平衡状態における摩擦抵抗係数 f が傾斜角 α および相対粗度高 $s \cos \alpha / d$ によって異なることを示した。また、平衡状態において skimming flow Type A の流況が形成される場合、摩擦抵抗係数 f は傾斜角 α によって変化し、 $\alpha = 19^\circ$ 付近で f が最大となることを明らかにした。

参考文献

- 1) H. Chanson (1994), "Hydraulic Design of Stepped Cascades, Weirs and Spillways," Pergamon, Australia.
- 2) I. Ohtsu and Y. Yasuda (1997), "Characteristics of Flow Condition on Stepped Channels," Proc. of XXVII IAHR Congress, San Francisco, pp.583-588.
- 3) N. Rajaratnam (1990), "Skimming Flow in Stepped Spillways," Jour. of Hydr. Engrg., ASCE, Vol.116, No.4, pp.587-591.
- 4) 橋本、安田、大津(1998)、階段状水路における流れの水力特性、II-330 土木学会第53回年次学術講演会、pp.660-661.

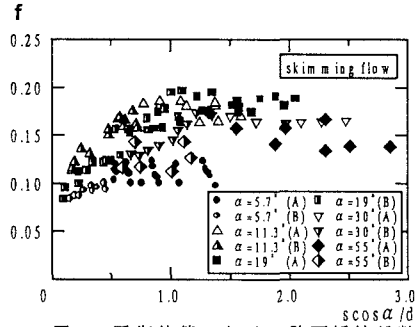


図-3 平衡状態における壁面抵抗係数

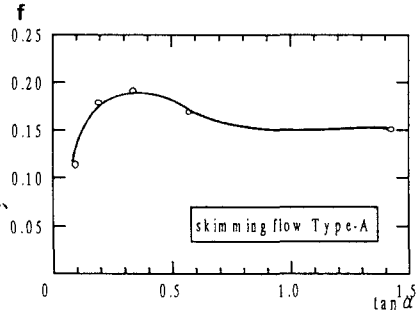


図-4 平衡状態における壁面抵抗係数