II -330

階段状水路における流れの特性について

日大院・理工　学　橋本 真一
日 大・理 工　正　安田 陽一
日 大・理 工　正　大津 岩夫

1. まえがき

急勾配水路の流速を減衰せる方法として、階段状水路が用いられている[1]。また、階段状水路は、美的景観、水質浄化など多目的に利用されている[1]。階段状水路の流れの特性を知ることは、水工設計上意義がある。階段状水路における射流の抵抗係数については、二、三の研究者[1),2),5)]によって検討されているが、流れの飛沫が激しいにも関わらず水深を直接測定していたため抵抗係数が過大評価されたり、また、階段上を越える流れの不等流区間と擬似等流区間(以下、平衡状態と呼ぶ)との境界が不明な状態で係数を評価していたため、明確な結論が得られていない。

本研究においては、空気混入が顕著となる領域において、常にステップ隅角部に顕著な渦が形成される流況(図-1(a))、すなわち、*skimming flow* を対象とし、階段状水路の流れが平衡状態となるための条件を明らかにし、平衡状態における流れの抵抗係数について検討した。

2. 階段状水路を越える流れが平衡状態となるための条件

階段上を越える流れが平衡状態(擬似等流状態)となるための条件を示すため、ダム直下に形成される跳水終端水深 h_2について eq. (1)の関係で整理したものを図-2 に示す。階段上を越える流れが平衡状態である場合、流下方向に対して流速および水深がほぼ一定となるため、ダム直下に形成される跳水終端水深 h_2は、平衡状態であれば相対ダム高 H_{dam}/dc に関わらず同じになると考えられる。ここで、階段上を越える流れが、流れ方向に対して同様な流況が繰り返されながら流下する状態を「平衡状態」と定義する。すなわち、平衡状態では、流下方向に対して流速および水深が一定となる。

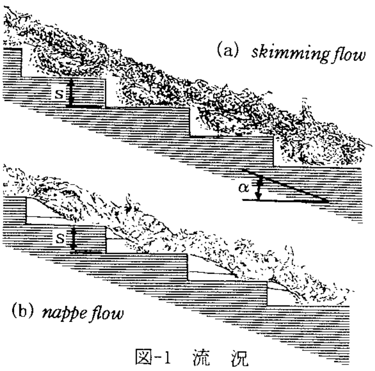

図-1　流　況

$$\frac{h_2}{dc} = F\left(\frac{H_{dam}}{dc}, \frac{s}{dc}, \alpha\right) \quad \cdots \quad (1)$$

eq. (1)の dc は限界水深($dc=(q^2/g)^{1/3}$, q:単位幅流量)である。

図-2 に示されるように、s/dc≧0.5～0.6 の場合、傾斜角αおよび相対ダム高 H_{dam}/dc によって相対終端水深 h_2/dc が変化する。なお、s/dc<0.5～0.6 では s/dc によっても変化する[3]。与えられた傾斜角αに対して H_{dam}/dc がある一定以上($H_{dam}/dc \geqq (H_{dam}/dc)e$)になると h_2/dc が一定値を示す。すなわち、平衡状態となることを意味する。平衡状態となるための必要な相対ダム高 $(H_{dam}/dc)e$ については、実験的に eq. (2)で示される。

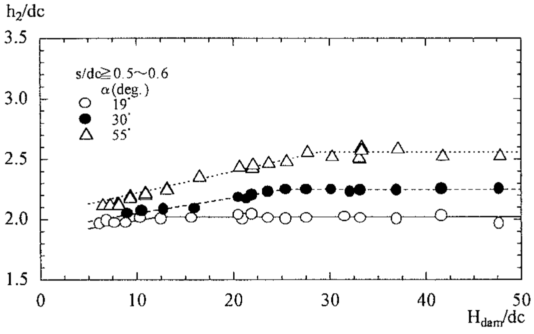

図-2 ダム直下で形成される跳水の終端水深

$$\left(\frac{H_{dam}}{dc}\right)_e = 29.6 - 1.2(\tan\alpha)^{-2.5} \quad \cdots \quad (2)$$

3. 平衡状態における流れの抵抗係数

壁面抵抗係数 f は、eq. (3)で定義される。

$$\tau_0 = f\frac{\rho V_0^2}{2} \quad \cdots \quad (3) \qquad \because 19° \leq \alpha \leq 55°, \frac{s}{dc} \geq 0.5\sim0.6$$

キーワード：開水路・階段状水路・射流・減勢工・水環境・抵抗係数
〒101-8308　東京都千代田区神田駿河台 1-8　TEL. 03-3259-0668　FAX. 03-3259-0409

ここに、V_0，d_0は平衡状態での射流の平均流速および射流水深である。τ_0は壁面せん断応力であり、$\tau_0 = w\, d_0 \sin\alpha$で示されるものとすると、eq. (3)は次のように整理される。

$$f = \frac{\tau_0}{\frac{\rho V_0^{\,2}}{2}} = 2\sin\alpha\left(\frac{d_0}{dc}\right)^3 \quad \cdots \quad (4)$$

擬似等流水深d_0の算定については、ダム直下に形成される跳水始端断面の全水頭H_1と階段状水路水路終端部での全水頭が等しいものとして、eq. (5)より試算法によって求めた。

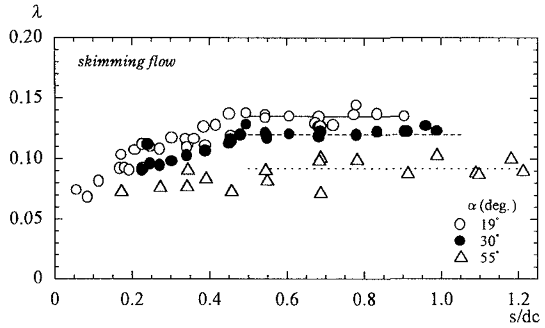

図-3 平衡状態における壁面抵抗係数λについて

$$H_1 = hp + \frac{(q/h_1)^2}{2g} = d_0\cos\alpha + \frac{(q/d_0)^2}{2g}$$

$$\Leftrightarrow \quad 2g\cos\alpha d_0^{\,3} - \left\{2ghp + \left(\frac{q}{h_1}\right)^2\right\} d_0 + q^2 = 0 \quad \cdots \quad (5)$$

ただし、跳水始端水深h_1については、ダム直下に形成される跳水に運動量方程式を適用し、eq. (6)から算定したものである。すなわち、ダム直下に形成される跳水終端水深h_2を測定し、また、ダム直下の流線の曲がりによる影響を考慮するため、跳水始端断面での底面の圧力水頭hpを測定した上で、運動量方程式eq. (6)にこれらの測定値を代入してh_1を算定したものである。ここに、運動量補正係数βを1、始端の全圧力P_1を$P_1 = wh_1hp/2$と仮定した。

$$\frac{wq}{g}(V_2 - V_1) = P_1 - P_2 \quad \cdots \quad (6)$$

平衡状態となった流れを対象として、壁面抵抗係数λ（=4f）についてeq. (7)の関係で整理したものを図-3に示す。.

$$\lambda = 4f = F\left(\frac{s}{dc},\ \alpha\right) \quad \cdots \quad (7)$$

図-3に示されるように、壁面抵抗係数λ（=4f）は、傾斜角αによって変化し、s/dc≧0.5～0.6ではs/dcによる違いはほとんど見られない。これは、傾斜角αによって、ステップ水平面での流れの衝突位置が変化し、流水抵抗が異なるためと考えられる。また、壁面抵抗係数λ（=4f）は、傾斜角αが大きくなるにつれてλの値が小さくなることが認められる。このことは、傾斜角αが大きくなるにつれて流れがステップ水平面のエッジ近くに衝突するようになり抵抗係数λに対する階段状水路の凹凸の影響が小さくなるものと考えられる。

4. 結論

19°≦α≦55°の広範囲な条件のもとで、階段上を越える流れが平衡状態となるための水理条件を示すことができた。そして、平衡状態における流れの抵抗係数λ（=4f）を示し、傾斜角αによって抵抗係数が異なることを明らかにした。

【記号説明】

$dc[=(q^2/g)^{1/3}]$：限界水深、f（=λ/4）：壁面抵抗係数、g：重力加速度、h_1：ダム直下での水深、hp：ダム直下での底面の圧力水頭、$H_1[=hp+(q/h_1)^2/2g]$：ダム下流端での全水頭、$P_1[=(whph_1)/2]$：始端の全圧力、$P_2[=(wh_2^{\,2})/2]$：終端の全圧力、q：単位幅流量、s：ステップ高、$V_1[=q/h_1]$：跳水始端の平均流速、$V_2[=q/h_2]$：跳水終端の平均流速、w：水の単位体積重量、α：傾斜角、τ_0：壁面せん断応力

【参考文献】

1) Hubert Chanson(1994) " Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways ", Pergamon, Australia.
2) M. J. Tozzi(1994) " Residual energy in stepped spillways ", International Water Power Dam Construction, May 1994, pp.32-34.
3) 橋本、後藤、安田、大津(1997) " 階段状水路における射流の減勢効果 ", 土木学会第52回年次学術講演会概要集, pp.658-659.
4) I. Ohtsu and Y. Yasuda(1997) " Characteristics of Flow Condition on Stepped Channels ", XXVII, IAHR, Congress, San Francisco.
5) Jorge Matos(1997) Discussion of " Model Study of a Roller Compacted Concrete Stepped spillway ", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Oct. 1997, pp.933-936.