

日大理工 正 大津 岩夫
 日大理工 正 栗津 清蔵
 東京電力 正 岡田 仁

重力ダム等の余水吐を流下する高速放流水のエネルギー減勢方法として跳水式減勢工が多く採用されている。特に、下流水深が跳水必要水深よりも小さい場合には、シルの設置によって水叩始端から跳水を生じさせてエネルギーを減勢させることが多い。ここではシル型減勢工の合理的木工設計指針を確立するための基礎として、基本的形状である水平水叩に設置された刃型せきとみなせる鉛直連続シルによる強制跳水について検討を行なう。従来、鉛直シルによる強制跳水に関して Forster-Skrinde⁽¹⁾, Rajaratnam⁽¹⁾, Rand⁽²⁾ による実験的研究が知られているが、強制跳水を支配する水理量間の関係がなお不明確であり、資料の解析方法等にさらに検討の余地がある。この報告は、強制跳水の特性を実験的に把握し、強性跳水を支配する水理量間の関係を明らかにしようとしたものである。

1. 流況の分類と水理量間の関係

下流水深が跳水必要水深よりも小さい場合、シルを設置すると水叩始端から強制跳水が生じる場合と拡散流況が生じる場合があり、強制跳水が生じる場合には、シル前方の流況が下流水深の影響をうける場合（シルを越える流れが潜り越流状態のとき）と下流水深の影響をうけない場合（シルを越える流れが自由越流状態のとき）とがある。潜り越流状態の場合、鉛直シルによる強制跳水を支配する水理量間の関係は式(1)によって示されるものと推論される⁽³⁾。

$$f(S/h_1, h_t/h_1, X_s/L_j, F_1) = 0 \quad (1)$$

自由越流状態の場合、強制跳水は h_t/h_1 に無関係に形成されるから、強制跳水を支配する水理量間の関係式は式(2)によって示されるものと推論される。

$$f(S/h_1, X_s/L_j, F_1) = 0 \quad (2)$$

すなわち、式(2)によってシル前方に一定の流況の強制跳水を生じるための必要シル高が示される。さらに、強制跳水が生じるための最小必要シル高 S_c は、式(2)において、与えられた F_1 に対して $(X_s/L_j)_{\min}$ のとき $S_h = S_c/h_1$ であるから、式(3)によって示されるものと推論される。

$$f(S_c/h_1, F_1) = 0 \quad (3)$$

式(3)に基づき実験値を整理すると図-1のように示され、実験式

$$(4) \text{ が得られる。 } S_c/h_1 = 0.227 F_1 + 0.349, (2.5 \leq F_1 \leq 9) \dots (4)$$

鉛直シルにおいては、与えられた F_1 に対して拡散-跳水臨界におけるシル高 $(S_c/h_1)_{s \rightarrow j}$ と跳水-拡散臨界におけるシル高 $(S_c/h_1)_{j \rightarrow s}$ とは等しく $(S_c/h_1)_{s \rightarrow j} = (S_c/h_1)_{j \rightarrow s} = S_c/h_1$ である。

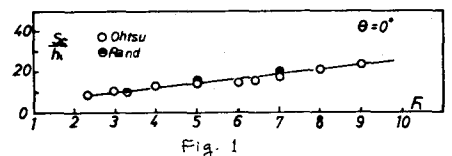


Fig. 1

式(1)に基づき実験値を整理すると、与えられた F_1 のもとで流況は図-2に示されるような領域に分類される。

$S/h_1 < S_c/h_1$ の場合、強制跳水が生じている場合にはシルを越える流れは潜り越流状態であり、与えられた F_1 のもとで h_t/h_1 ($\leq h_s/h_1$) が減少するとシル前方の渦（すなわち X_s/L_j ）は減少し、ある下流水深 h_s/h_1 よりもさらに h_s/h_1 が微小量減少すると拡散流況となる。逆に、拡散状態から h_s/h_1 が増加すると $h_t/h_1 = h_s/h_1$ のとき跳水状態へ移行し、跳水-拡散臨界と拡散-跳水臨界とは一致する。

$S/h_1 \geq S_c/h_1$ の場合、与えられた F_1 のもとで、ある下流水深 h_s/h_1 までは h_t/h_1 の減少に従いシル前方の渦（すなわち X_s/L_j ）は減少し潜り越流状態となるが、 $h_t/h_1 \leq h_s/h_1$ の場合、シル前方の流況は h_t/h_1 の影響をうけず、シルを越える流れは自由越流状態となり、 h_t/h_1 とは無関係に一定の流況の強制跳水が形成される。

2. 水理量間の関係式

(1) 自由越流状態の場合 式(2)の関係に基づき資料を整理すると図-3が得られ、実験式(5)が求まる。 $X_s = 5h_2$ の場合、式(5)は岩崎の式⁽¹⁾による副ダム高よりも幾分大きい値を示す。堤頂幅 l を考慮に入れた実験によると⁽⁹⁾、 $H \leq l \leq 2.5H$ ($H = \frac{3}{2}h_c$) のとき岩崎の式を満足する。これは、副ダム上で安定した限界水深が生じることによるものと考えられる。なお、式(5)において $(X_s/L_j)_{\min}$ のとき $S_h/h_1 = S_c/h_1$ である。

$$S/h_1 = -1.05(F-2)(1-x_s/L_j) + 1.08F - 1.56 \quad 3 \leq F \leq 9 \quad x_s/L_j \leq 1 \quad (5)$$

(2) 潜り越流状態の場合 シル前方の流速特性は自由跳水の場合と類似であることが推定され、二三の実験によっても確かめられる。自由跳水の場合 $0.2 \leq x_s/L_j \leq 0.6 \sim 0.7$ において式(6)~(8)が成立する。

$$U_m/v_i \propto 1/\sqrt{x/h_1} \quad (6)$$

$$Y/h_1 \propto x/h_1 \quad (Y_{h_1} = (0.370/\sqrt{F}) x/h_1) \quad (7)$$

$$U/U_m = f(\eta) \quad \eta \equiv y/Y \quad (8)$$

この点に着目して、シルの抗力を検討する。シルに加わる動水圧については、

シル前面の運動エネルギーがすべて圧力に変換されるものとする、シルの抗力 P は式(9)によって示される。 $P = \int_0^S \frac{\rho}{2} U^2 dy \quad (9)$

式(9)は式(8)を用いると式(10)のように示される。

$$P/\frac{1}{2}\rho U_m^2 = F^2 (U_m/v_i)^2 (Y/h_1) \int_0^{\frac{S}{Y}} (U/U_m)^2 d\eta \quad (10)$$

$$\text{式(6),(7)より } (U_m/v_i)^2 (Y/h_1) = \text{Const.} \quad \text{式(8)より } \int_0^{\frac{S}{Y}} (U/U_m)^2 d\eta = f(S/Y)$$

であるから式(10)は式(11)の関係で示される。

$$P/\frac{1}{2}\rho U_m^2 = f(F, S/Y) \quad (11)$$

また、強制跳水始端・終端間の流体をコントロール・ボリュームに選び、 x 方向

の運動量方程式、連続の式より式(12)が得られる。

$$P/\frac{1}{2}\rho U_m^2 = 1 + 2F^2 - (h_1/h_2)^2 / (h_1/h_2)^2 - 2F^2 (h_1/h_2) / (h_1/h_2) = f(F, h_1/h_2) \quad (12)$$

式(11),(12)より次の関係が得られる。

$$f(h_1/h_2, S/Y, F) = 0 \quad (13)$$

式(13)に基づき実験値を整理すると図4のように良い相

関が得られ、実験式を求めると式(14)のように示される。

$$h_1/h_2 = 1 - 0.260 (S/Y)^2 \quad (14)$$

式(14)を式(1)の関係に変換すると式(15)が得られる。

$$h_1/h_2 = (h_1/h_2) \{ 1 - 1.90 F \{ (S/h_1) / (x_s/L_j) (L_j/h_2) (h_2/h_1) \}^2 \} \quad 3 \leq F \leq 9, 0.2 \leq x_s/L_j \leq 0.6 \sim 0.7 \quad (15)$$

式(15)を図示すると図2の実線が得られ、実験値と比較するとほぼ一致している⁽⁵⁾。すなわち、式(15)により強制跳水を支配する水理量間の関係が示される。なお、 h_1/h_2 は式(5)(15)より次のように示される。

$$h_1/h_2 = (h_1/h_2) [1 - 1.90 F (S/h_1)^2 / \{ 1 + [0.951 S/h_1 - 1.03 F + 1.48] / (F-2) \} (L_j/h_2) (h_2/h_1) \}^2 \quad (16)$$

3. シルの抗力(潜り越流状態の場合)

従来、抗力係数 $C_d (= P / \frac{1}{2} \rho U^2 h_1 B)$ については $C_d = f(x_s/L_j)$ の関係を示す実験曲線が得られているが⁽¹⁾、実験値のばらつきが大きく検討の余地がある。式(15)と式(12)を変形した式(17)とにより式(18)の関係が

式化され、 C_d の F , S/h_1 , x_s/L_j ($0.2 \leq x_s/L_j \leq 0.6 \sim 0.7$) による変化の状況が示される(一例を図5(実線)で示す)。これと実験値(図5(2)は式(17)による間接測定値であり、図5(b)はマニターによる直接測定値である)とを比較すると、同様の傾向を示している。

$$C_d = (h_1/h_2 - 1) [2F^2 - (h_1/h_2 + 1) h_1/h_2] / F^2 (S/h_1) (h_2/h_1) \quad (17)$$

$$C_d = f(F, S/h_1, x_s/L_j) \quad (18)$$

(文献) (1) 水理公式集 (2) ASCE 1965 July. (3) 土木学会年報 1977

(4) 副ダムに関する実験 土木学会年報 1976 (5) 傾斜式シルによる強制跳水

(6) Rajaratnam-Mumtaz Jour. of Hy. Res. 1971. No.2

土木学会年報 1978.

(記号)

