

鉛直シルによる強制跳水

FORCED HYDRAULIC JUMP BY A VERTICAL SILL

大津 岩夫*
By Iwao OHTSU

1. まえがき

重力ダム等の洪水吐き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¹⁾の設置によって水叩き始端から跳水を形成させてエネルギーを減勢させことが多い。しかしながら、シルによる強制跳水の諸特性については不明な点が多く、シル型減勢工の設計は主として個々のダムについての水理模型実験によってなされている。

ここではシル型減勢工の合理的水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きに設置された刃形せきとみなせる単一の長方形鉛直連続シル(図-1, 2)による強制跳水について実験的検討を行う。

下流水深が跳水必要水深よりも小さいときシルを設置すると、跳水が形成される場合(図-1, 2)と射流状態でシル上を飛散する飛散流況(spray, 図-3)が生じる場合がある。跳水が形成されている場合、シル前方の流況が下流水深の影響を受ける場合(これをI型跳水ということとする。図-1)と下流水深の影響を受けない場合(これをII型跳水といふことにする。図-2)とがある。ここに、図-1, 2における h_1 は跳水始端の水深、 h_t は下流水深、 S はシル高、 x_s は跳水始端からシルまでの長さであり、与えられた跳水始端のフルード数 F_1 、 h_1 のもとで自由跳水が形成されている場合、 h_1 と共に水深を h_2 、自由跳水の長さを L_j とする。

このような流況の生じる水理条件を明らかにし、与えられた単位幅流量 q 、水叩き始端の水深、下流水深に対

して跳水が水叩き始端から形成されるためのシル高、およびシル設置位置を知ることが水工設計上必要である。

従来、鉛直連続シルによる強制跳水に関して、Forster and Skrinde¹⁾、Rajaratnam²⁾、Rand³⁾による実験的研究が知られている。Forster and SkrindeはII型跳水の場合に限って検討を行い、Rajaratnamはシルに作用する抗力について論じているが、I, II型跳水と飛散流況の生じる水理条件については検討がなされていない。Randは強制跳水を支配する水理量間の関係を次元解析によって求めようとしたが、その関係式は得られず、資料の解析方法に検討の余地があるものと思われる。

この研究²⁾は、強制跳水の特性について新たな観点

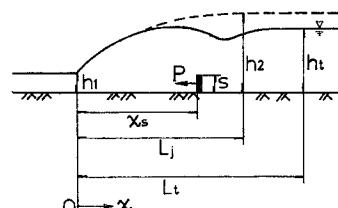


図-1 I型跳水

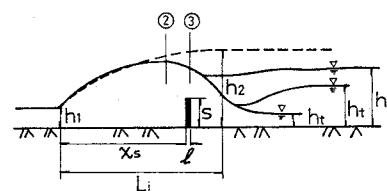


図-2 II型跳水



図-3 飛散流況

* 正会員 工修 日本大学専任講師 理工学部土木工学科

注 1) 水叩き(減勢)補助構造物のうち、これに大きな動圧が加わる場合を「バッフル」、これに動圧は加わらず跳水必要水深を確保するためのものを「副ダム」というようであるが、ここでは両者ともに「シル」ということとする。

注 2) 土木学会年次学術講演会等に発表したもの(参考文献4)~8))に検討を加え、まとめたものである。

から系統的説明を試みたものであり、流況の分類を試み、強制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。

すなわち、I型跳水の場合、跳水上、下流端の水深間の関係については、シル前方の流速特性に着目してシルに作用する抗力を検討することにより、一般に次の関係によって示されることを明らかにした。

$$f(h_t/h_2, S/Y_s) = 0$$

ここに、 Y_s はシルに接近する主流の幅を代表する長さである。さらに、この関係に基づき、次元解析によって得られる強制跳水を支配する基本水理量間の関係 $f(S/h_1, h_t/h_1, x_s/L_j, F_1) = 0$ を明確にし、新しい実験公式を提案したものである。また、強制跳水による損失水頭 H_L について検討し、I型跳水の遷移領域の長さ L_t (図-1、跳水始端断面から、シル下流側の流況が流下方向にほとんど変化しなくなる断面までの長さを遷移領域の長さということにする)については、これを H_L と関連づけることによって、一般に次の関係によって示されることを明らかにし、実験式を提案したものである。

$$f(L_t/H_L, H_L/H_1) = 0$$

ここに、 H_1 は跳水始端の比エネルギーを示す。

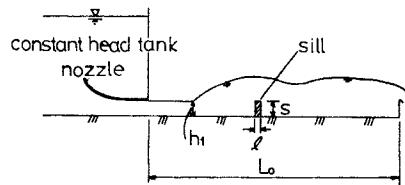
II型跳水の場合については、跳水が形成される水理条件を明らかにし、下流水深が小さい場合に、強制跳水が形成されるための必要シル高について検討し、実験式を提案したものである。

2. 強制跳水の流況

(1) 強制跳水を支配する基本水理量

図-4、表-1 の装置、条件のもとで実験を行った。ここではゲート直下からただちに跳水を形成させるのではなく、露出射流を経て境界層が発達した状態の断面から跳水を形成させた。跳水始端はノズルの流出口から 70~200 cm 離れた断面であり、ピトー管による流速分布の測定によって境界層の発達状態を確かめた。シル下流において水面がレベルとなり、流速分布の流下方向の変化が急に小さくなる断面を遷移領域終断面とし、この断面を水面形の測定結果および流速測定結果によって決定した。この断面よりも上流側では流況は大きく変化し、この断面よりも下流側において流況は徐々に通常の開水路流に漸近する。遷移領域の長さ L_t を跳水始端から遷移領域終端断面までの長さとする。また、下流水深 h_t の測定値は遷移領域終端断面の水深測定によって得られる。

与えられた F_1, h_1, S のもとで、I型跳水が形成されている場合は、跳水の流況および x_s は下流水深 h_t に



(水路は 2 種類 (幅 33 cm, 長さ $L_0=4.5$ m, および幅 16 cm, 長さ $L_0=4$ m) の長方形断面水平水路を用いた (l, S, h_1 : 表-1 参照))

図-4 実験装置

表-1

F_1	h_1 (cm)	S (cm)	l (cm)	
3	2.9~4.0	1.5~6.4	2.0	
5	2.4~3.1	1.5~10.0		
7	1.4~2.9	2.3~13.0		
9	1.6~2.3	2.0~14.2		

よって変化し、1つの h_t に対して 1 つの L_t が定まる (図-1)。ここで、 $F_1=v_1/\sqrt{gh_1}$, $v_1=q/h_1$, g は重力の加速度である。II型跳水の場合、シル前方の流況および x_s は h_t の影響を受けないが、シル下流の流況および遷移領域の長さは h_t の大きさによって種々変化する (図-2)。

I型跳水の場合、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定される。

$$f(h_1, S, x_s, h_t, q, g) = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

次元解析によると式(2)が得られる。

$$f(S/h_1, h_t/h_1, x_s/h_1, F_1) = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

さらに、与えられた F_1, h_1 のもとで自由跳水の場合と比較するため、 x_s を L_j で無次元化した量 x_s/L_j を用いると、

$$x_s/L_j = (x_s/h_1)/(L_j/h_2) (1/2) (\sqrt{8 F_1^2 + 1} - 1)$$

および $L_j/h_2 = f(F_1)$ (図-5) であるから、式(2)は式(3)のように示され、鉛直シルによる強制跳水を支配する基本水理量間の関係は式(3)で示されるものと推論される。

$$f\left(\frac{S}{h_1}, \frac{h_t}{h_1}, \frac{x_s}{L_j}, F_1\right) = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

II型跳水の場合、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は式(4)によって示されるものと推論される。

$$f\left(\frac{S}{h_1}, \frac{x_s}{L_j}, F_1\right) = 0 \quad \dots \dots \dots (4)$$

式(4)から、下流水深が小さい場合、II型跳水を形成するための必要シル高についての関係 $S/h_1 = f(F_1, x_s, L_j)$ が示される。

また、下流水深が小さく II型跳水が形成されているとき、与えられた F_1, h_1 のもとでシル高 S を小さくするにつれて x_s は小さくなり (すなわち、一定な F_1, h_1 ,

に対して L_j は一定となるから x_s/L_j も小さくなり、あるシル高 $(S_c)_{j \rightarrow s}$ よりもさらにシル高が微小量減少すると、飛散流況へと変化する。逆に、飛散状態から S を大きくしていくと $S \geq (S_c)_{s \rightarrow j}$ でシル前方にくずれ込みが生じ、II型跳水が形成され、 $(S_c)_{s \rightarrow j} = (S_c)_{j \rightarrow s}$ であることが確かめられる。すなわち、下流水深が小さい場合、II型跳水が形成されるための最小シル高 $S_c (S_c = (S_c)_{j \rightarrow s} = (S_c)_{s \rightarrow j})$ は、式(4)において、与えられた F_1 に対して x_s/L_j が最小 ($(x_s/L_j)_{\min}$) のとき $S/h_1 = S_c/h_1$ となることから、式(5)の関係によって示されるものと推論される。

$$f\left(\frac{S_c}{h_1}, F_1\right) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

なお、 L_j については、大津の提案した実験式⁹⁾を $L_j/h_2 = f(F_i)$ の関係に変換して実測値とともに 図-5 に示す。跳水始端を原点とする流下方向の座標軸を x (図-1) とすると、自由跳水内の最大流速 u_m は $x < L_j$

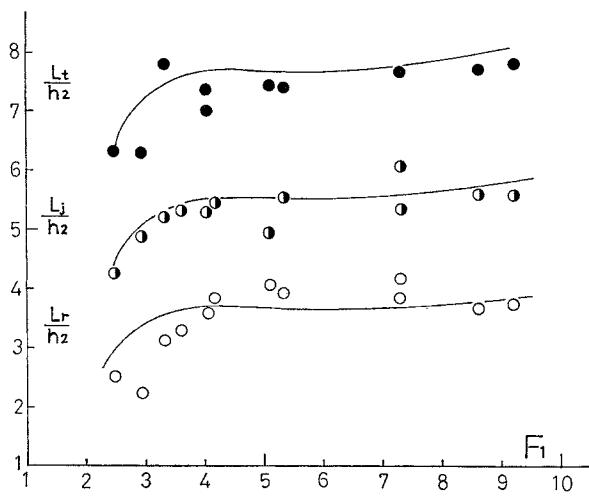


図-5 自由跳水の L_j , L_r , L_t

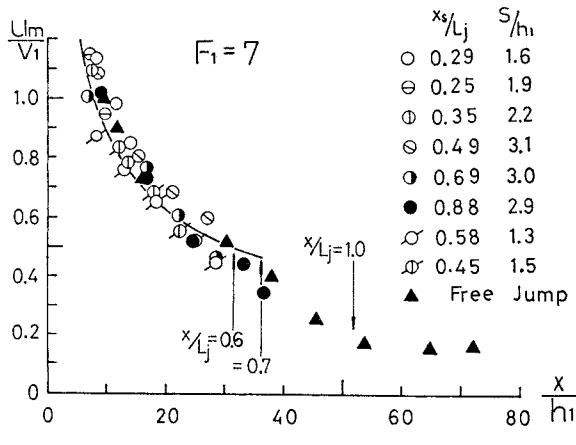


図-6 最大流速の減衰の一例（実線：式(8)）

で大きく減衰し、 $x \geq L_j$ では u_m の流下方向の変化はほとんどない（一例を 図-6（三角印）で示す）。さらに図-5 には、自由跳水のローラーの長さ L_r ($x=L_r$ は常に逆流の観察される終端断面であり、 L_r は剥離領域の長さを示す)について、 $L_r/h_2 = f(F_1)$ の関係で実測値とともに示してある注³⁾。

(2) 流況の分類

与えられた F_1, h_1 のもとで I 型跳水のシル前方における最大流速 u_m の減衰状況は自由跳水の場合と同様である（一例を 図-6 に示す）。 $x_s > L_r$ 、すなわち、 $L_r = 0.7 L_j$ （図-5）であるから $x_s/L_j > 0.7$ の場合は、シル前方に自由跳水と同じ大きさ L_r のローラーが形成され、シル前方において流速は大きく減衰していることが確かめられる。したがって、I 型跳水の x_s の範囲は $x_s/L_j \leq 0.7$ の場合を考察の対象とする。

式(3)に基づき実験値を整理すると図-7のように示され⁴⁾、流況は図-8(概念図)のように分類される。

すなわち、与えられた F_1, h_1 のもとで $S/h_1 < S_c/h_1$ の場合、適切な下流水深 h_t/h_1 のもとでは I 型跳水が形成されているが、 h_t/h_1 が減少すると x_s は減少する。したがって x_s/L_j は減少し（与えられた F_1, h_1 に対する L_j は一定）、ある下流水深 $h_{s \rightarrow s}/h_1$ よりもさらに h_t/h_1 が微小量減少すると飛散流況へ移行する。逆に、飛散流況から h_t/h_1 が増加すると $h_t/h_1 = h_{s \rightarrow j}/h_1$ のとき I 型跳水へ移行し、I 型跳水の形成される限界の下流水深 h_s は $h_s/h_1 = h_{j \rightarrow s}/h_1 = h_{s \rightarrow j}/h_1$ であることが確かめられる（図-8）。

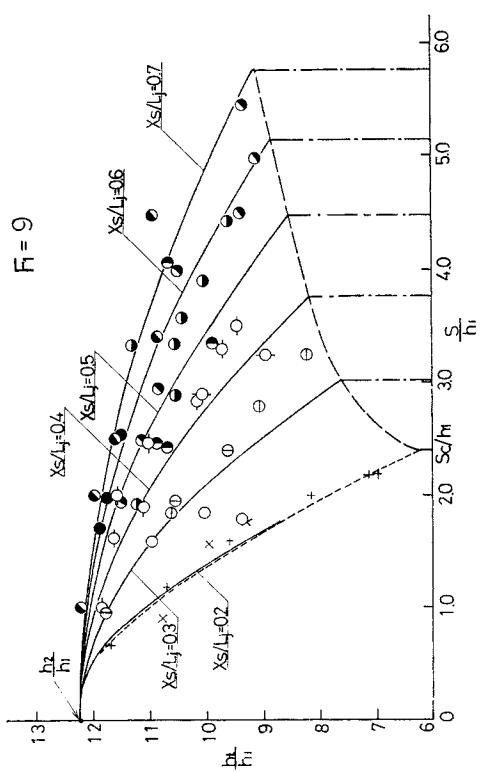
与えられた F_1 , h_1 のもとで $S/h_1 \geq S_c/h_1$ の場合、I型跳水が形成されている状態のもとでは、ある下流水深 h_{*}/h_1 までは h_t/h_1 の減少に従って x_s/L_j は減少し、式(3)の関係によって示される。 $h_t/h_1 < h_{*}/h_1$ の場合は、 x_s/L_j は h_t/h_1 の影響を受けずII型跳水となり、式(4)の関係によって示される(図-8)。

3. 強制跳水を支配する基本水理量間の 関係式

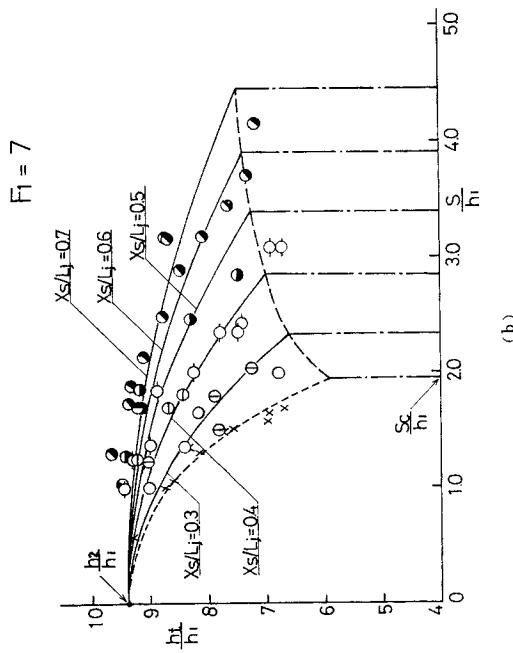
(1) I型跳水

I型跳水では、与えられた F_1, h_1 に対して $h_t < h_2$ であるため、シルによって下流側からの力

注 3) 図-5 における L_r , L_t については 5. 参照.
 4) 図-7 の実線, 一点鎖線については 3. で明ら



(a)



(b)

○ 0.0225 < X_S/L_j ≤ 0.0275	● 0.0475 < X_S/L_j ≤ 0.0525
○ 0.0275 < X_S/L_j ≤ 0.0325	● 0.0525 < X_S/L_j ≤ 0.0575
○ 0.0325 < X_S/L_j ≤ 0.0375	● 0.0575 < X_S/L_j ≤ 0.0625
○ 0.0375 < X_S/L_j ≤ 0.0425	● 0.0625 < X_S/L_j ≤ 0.0675
○ 0.0425 < X_S/L_j ≤ 0.0475	● 0.0675 < X_S/L_j ≤ 0.0725

(× : 大津による h_s/h_1 の実験値 + : Rand* による h_s/h_1 の実験値)

図-7 流況の分類

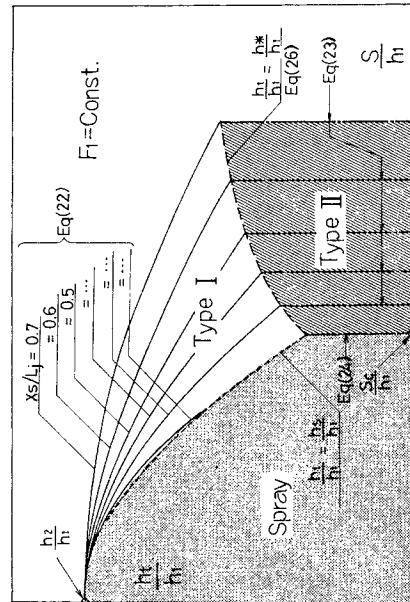


図-8 流況の分類（概念図）

の不足を補っている。したがって、I型跳水上、下流端の水深間の関係については、シルに作用する抗力を検討することが必要である。シルに作用する抗力は主流がシルによって遮られる割合によって変化するものと推定され、シル前方の流速特性を検討する必要がある。

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実験によって確かめられる。すなわち、強制跳水のシル前方および自由跳水の各断面における主流の流速分布を壁面噴流でなされているように式(6)の関係で整理すると、 $0.1 \sim 0.2 < x/L_i < 0.6 \sim 0.7$ の範囲では、 F_1 、

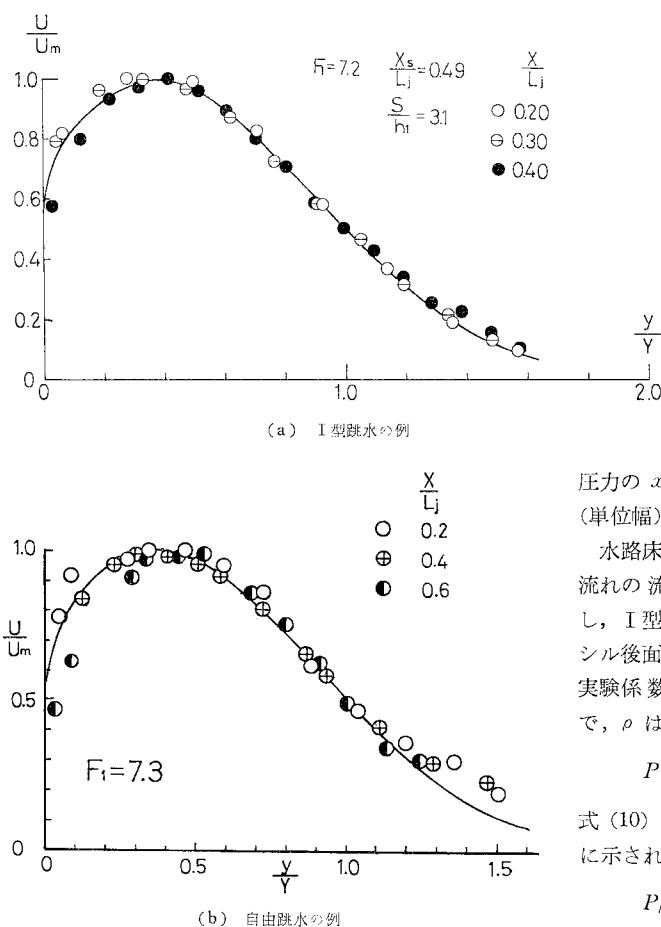


図-9 無次元流速分布（曲線は式(7)を示す）

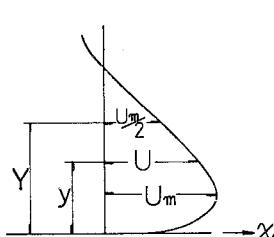


図-10 Y の定義図

x に無関係に相似な分布となり、跳水始端断面において境界層が発達した場合、式 (7.1), (7.2) のように示される⁸⁾ (一例を 図-9 に示す)。ここに、 y は水路床を原点とする鉛直上向きの座標軸、 u は x 方向の流速、 Y は $u=u_m/2$ ($du/dy < 0$) となる y の値 (図-10) である。

$$u/u_m = \exp[-(1/2)\{1.814(y/Y - 0.351)\}^2] \quad \left. \begin{array}{l} \\ 0.351 \leq y/Y \leq 1.4 \sim 1.5 \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (7.2)$$

また、 u_m については式(8)、 Y については式(9)が、自由跳水および強制跳水のシル前方において、 $0.1 \sim 0.2 \leq x/L_j \leq 0.6 \sim 0.7$ の範囲で、近似的に成立する（一例を図-6、11 に示す）。

$$\left. \begin{aligned} u_m/v_1 &= (0.175 F_1 + 1.57) / \sqrt{x/h_1} \\ 3 \leq F_1 &\leq 9.5 \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} Y/h_1 &= (0.370/\sqrt{F_1}) x/h_1 \\ 3 < F_1 &< 9.5 \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

20 以上の点に着目してシルに作用する抗力 P を検討する (P はシル (単位幅) に作用する圧力の x 方向の成分, すなわち, 鉛直シル上, 下流面 (単位幅) に作用する圧力の差である).

水路床から高さ y の位置において、シルへ接近する流れの流速を u 、シル前面に作用する動圧を $\rho u^2/2$ とし、I型跳水の場合、シル前面に作用する静圧の合計とシル後面に作用する圧力の合計とは等しいものとして、実験係数 C を含めて P を次のように表示する。ここで、 ρ は水の密度 ($\rho = w/g$) である。

$$P = C \int_0^s (\rho u^2 / 2) dy \dots \dots \dots \quad (10)$$

式(10)を式(6)を用いて無次元化すると、次式のように示される。

$$P/(\rho u_m^2/2) Y = C \int_0^{S/Y} (u/u_m)^2 d\eta \dots \dots \dots (11)$$

さらに式(11)を変形すると次のように示される.

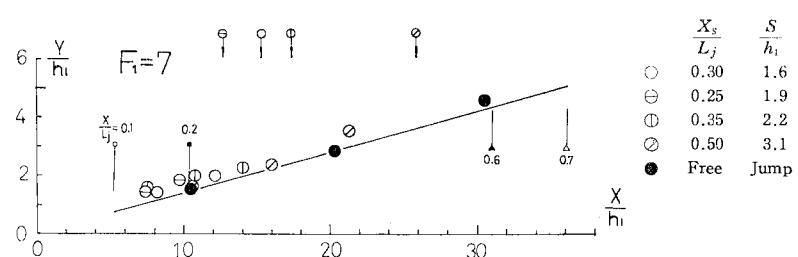


図-11 Y/h_1 の x/h_1 による変化の例 (実線は式(9), 矢印は $x = x_0$ の位置を示す)

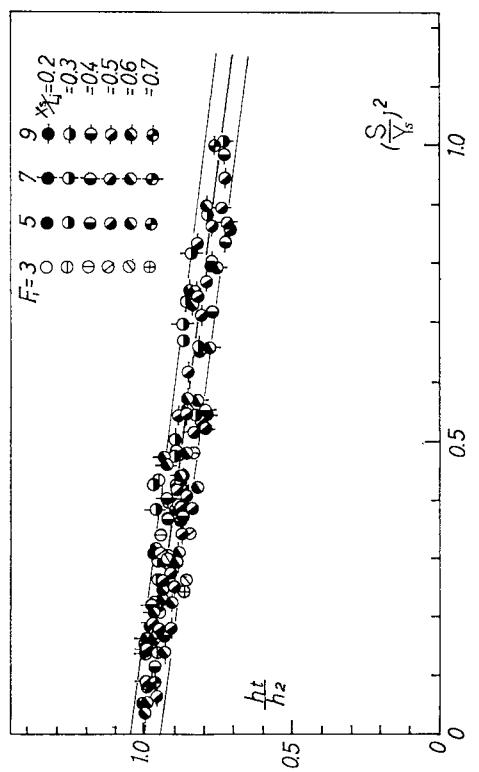
図-12 h_t/h_2 と S/Y_s との関係(実線(中央):式(20))

図-13 C の検討(破線は式(21)を示す)

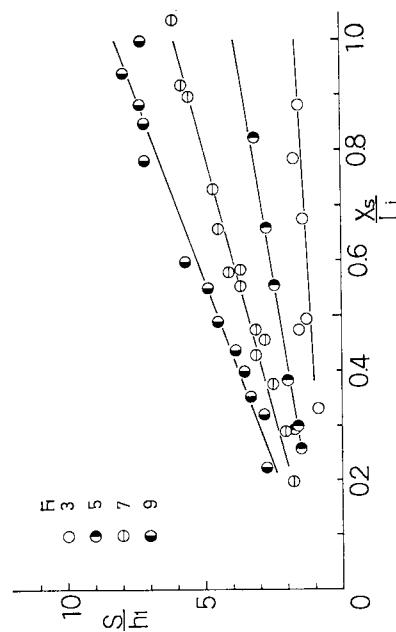


図-14 必要シル高(II型, 実線: 式(23))

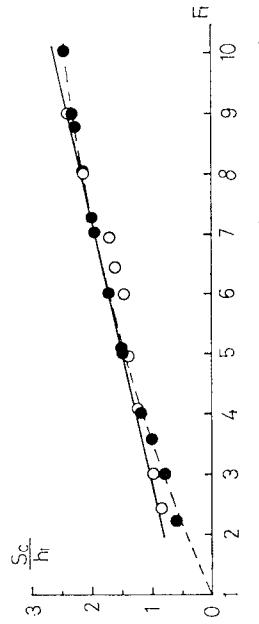


図-15 最小必要シル高(II型, 実線は式(24)を示す, 白丸は大津の実験値, 黒丸(破線)はRandの実験値)である)

$$S_c/h_1 = 0.227 F_1 + 0.349, \quad 2.5 \leq F_1 \leq 9.5 \quad \dots \dots \dots \quad (24)$$

式(23)において $S/h_1 = S_c/h_1$ のとき

$$x_s/L_j = (x_s/L_j)_{\min}$$

であるから、 $(x_s/L_j)_{\min}$ は式 (23), (24) により、次のように示される。

$$(x_s/L_j)_{\min} = (0.1875 F_1 - 0.182)/(F_1 - 2) \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

h_*/h_1 については、式 (22), (23) により、次式のように示される。

$$\frac{h_*}{h_1} = \frac{h_2}{h_1} - 1.90 F_1 \left(\frac{S}{h_1} \right)^2 \left[\left\{ 1 + \left(0.951 \frac{S}{h_1} - 1.03 F_1 + 1.48 \right) \right\}^2 \left(\frac{L_j}{h_2} \right)^2 \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \right] \dots \quad (26)$$

式(26)はI型とII型との境界を示し、これを式(23)、(24)とともに図-7、8(概念図)に示す。

なお、 $x_s \geq 5 h_2$ となるⅡ型跳水が形成されている場合、シル上流側に自由跳水と同様な跳水が形成されることが実験により確かめられる。すなわち、シル上流側で h_1 と共に水深 h_2 は確保され、

$$h_2/h_1 = (\sqrt{8|F_1|^2 + 1} - 1)/2$$

が成立する.

$x_s < 5 h_2$ の場合は、この関係は成立しなくなり、跳水の水面形状も自由跳水の場合とは異なることが確かめられる。

従来、跳水の常流水深確保のための副ダム高の算定式については、岩崎¹⁰⁾によって導かれた式(27)が知られている¹¹⁾。この式は、次の(a)～(e)の仮定のもとに、断面②～③(図-2)の間にベルヌーイの定理、連続の

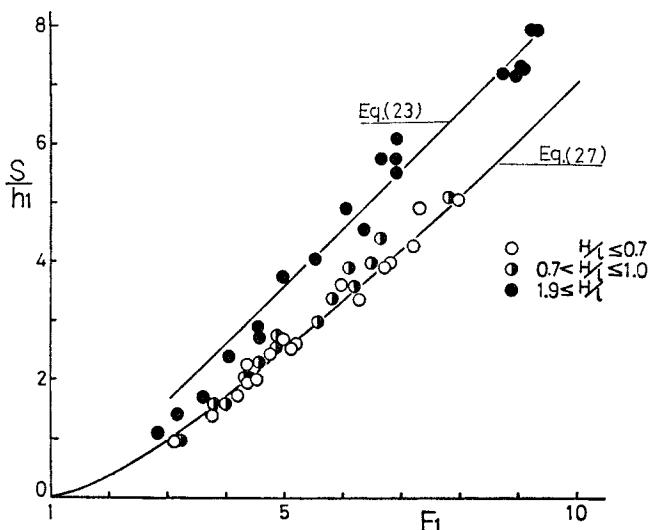


図-16 堤頂幅の検討

式を適用して導かれているが、堤頂幅 l (図-2) については何ら言及されていない。(a) 断面 ② の水深は h_2 である。(b) 断面 ③ (副ダム上) で限界水深 $h_c (= \sqrt{q/g})$ が生じる。(c) ②～③ 間のエネルギー損失無視。(d) ②, ③ 断面で静水圧分布、(e) 断面 ②, ③ のエネルギー係数 $\alpha = 1$ 。

$$S/h_1 = \left[\frac{(1+2F_1^2)\sqrt{1+8F_1^2}-1-5F_1^2}{(1+4F_1^2-\sqrt{1+8F_1^2})} \right] - 3F_1^{2/3}/2 \\ = (\sqrt{8F_1^2+1}-1)/2 + (\sqrt{8F_1^2+1}+1)^2/(32F_1^2-3F_1^{2/3}/2) \quad \dots \dots \dots (27)$$

また、又形せきによるⅡ型跳水の実験については、Forster and Skrind¹¹⁾によって $f(S/h_1, F_i, x_s/h_2) = 0$ の関係を示す実験曲線が示され、この曲線 ($x_s = 5h_2$ の場合) と式(27)とが一致することが述べられている¹¹⁾。しかしながら、与えられた F_i に対して、式(23) ($x_s = 5h_2$ の場合) によって算定される S/h_1 の値(図-16)は、Forster らの実験曲線による S/h_1 の値よりも大きな値を示すことが確かめられ、他の実験資料¹²⁾からも Forster らの実験曲線による S/h_1 の値よりも大きな値を示す傾向が認められる。しかも、Forster らの実験曲線は少ない実験データから定められたものであり、実験範囲も狭く問題があるように思われる注5)。

次元解析的考察によると、長方形副ダムによるII型跳水の場合、跳水現象を支配する水理量間の関係は、堤頂幅 l の効果を示す無次元量 H/l (H は越流水深であり、 $H=3h_c/2$ である) を式(4)に加え、式(28)によって示されるものと推論される。

$$f(S/h_1, F_1, x_s/L_j, H/l) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (28)$$

$x_s = 5 h_2$ の大きさの II 型跳水が形成される場合（このとき、副ダム上流で h_2 は確保される）について、式

(28)に基づき資料を整理すると 図-16 のように示される。与えられた F_i に対して、刃形せきとみなせる場合 ($H/l \geq 1.9$) は式(23)によって算定される S/h_1 が必要であり、堤頂幅が $0.7 < H/l \leq 1$ の場合、式(27)によって算定される S/h_1 よりもわずかに大きい S/h_1 を必要とし、 $H/l \leq 0.7$ の場合、式(27)によって副ダム高が与えられる。これは l が小さくなると副ダム上の流線の曲率が大きくなるため、「副ダム上で水深は h であり、静水圧分布する」という式(27)に含まれる仮定を満足しなくなり、 l が大きくなると、この仮定を満足するようになるためと推定される。

注 5) 4 個の S/h_1 ($S/h_1=1/2, 1, 2, 4$) それぞれに対して, $x_5/h_2=3, 5, 10$ の大きさの II 型跳水が得られるような $F_1(2 < F_1 \leq 7)$ の値を実験によって求めている.

4. エネルギー損失

遷移部始端、終端断面(図-1)にベルヌイの定理を適用すると、

$$H_t = H_t + H_L \quad \dots \dots \dots (29)$$

ここに、 $H_t = v^2/2g + h$ 、 H_L は遷移領域のエネルギー損失であり、添字 t は遷移部終端断面における諸量を示す。ただし、遷移部始端、終端断面において静水圧分布をするものとし、エネルギー係数を $\alpha_1 = \alpha_t = 1$ とした。

相対エネルギー損失 H_L/H_t は、式 (29) および連続の式を用いると、次のように示される。

$$\begin{aligned} H_L/H_t &= (H_t - H_t)/H_t \\ &= 1 - \{2h_t/h_t + F_t^2/(h_t/h_t)^2\} / (2 + F_t^2) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (30)$$

強制跳水が形成されている場合、与えられた F_t に対して $h_t/h_t \leq h_t/h_t$ であるので、この範囲の h_t/h_t に対して式 (30) を図示すると 図-17 のように示される。なお、式 (30)において $h_t/h_t = h_t/h_t$ のとき、自由跳水の相対エネルギー損失⁹⁾に一致する。

一定な q に対して、比エネルギー H_t が最小のときが限界水深 $h_t = h_c$ であり、一般に1つの q 、 H_t に対して2つの h_t が存在し、その大きい方が常流($h_t > h_c$)、小さい方が射流($h_t < h_c$)である。したがって、 h_t 、 q (すなわち F_t 、 H_t) が与えられたとき、1つの H_L/H_t ($= 1 - H_t/H_t$) に対して2つの h_t/h_t の値が対応し、その大きい方が常流、小さい方が射流であり、図-17 の

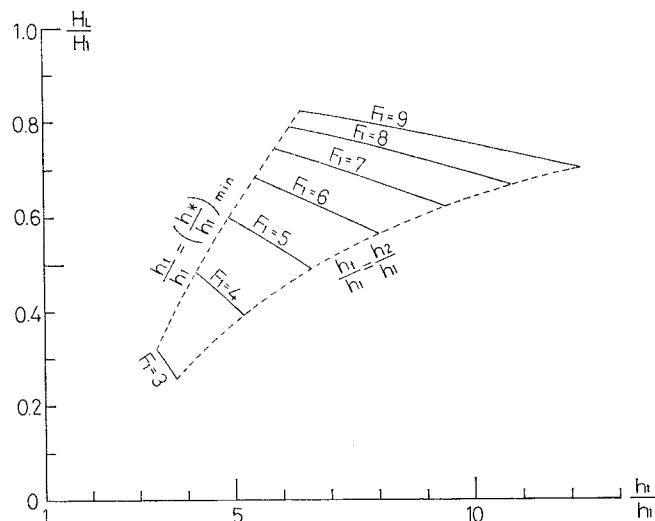


図-18 I型跳水による相対エネルギー損失

実線は $h_t/h_t > h_c$ の場合を示し、点線は $h_t/h_t < h_c$ の場合を示す。さらに、 $h_t/h_t = h_c/h_t = F_t^{2/3}$ のとき、与えられた F_t に対して H_t/H_t が最小、すなわち $H_L/H_t (= 1 - H_t/H_t)$ が最大となり、式 (31) で示される。

$$H_L/H_t = 1 - 3F_t^{2/3}/(2 + F_t^2) \quad \dots \dots \dots (31)$$

また、式 (31) は式 (30) の包絡線であることが証明される。

II型跳水の場合、跳水は h_t/h_t に無関係に形成されるから、与えられた F_t に対する遷移部の相対エネルギー損失 H_L/H_t は各 h_t/h_t に対応する値をとる。

I型跳水の場合は、与えられた F_t 、 S/h_t 、 x_s/L_t に対して、1つの h_t/h_t の値が式 (22) (図-7, 8) から定まり、 H_L/H_t は式 (22), (30) より 図-18 (実線) のように示される。これより、与えられた F_t に対して、I型跳水の H_L/H_t は自由跳水の場合よりも大きいことが理解される。

5. 遷移領域の長さ

I型跳水では、跳水の流況および x_s は h_t によって変化し、1つの h_t に対して1つの L_t が定まる(図-11)。II型跳水では、シル前方の跳水の流況および x_s は h_t の影響を受けないが、シル下流の流況および遷移領域の長さは h_t によって種々変化する(図-2)。ここでは、I型跳水($x_s/L_t \leq 0.7$)の遷移領域の長さ L_t および剝離領域の長さ L_r (跳水始端からシル背後に生じる剝離領域(渦)の終端までの x 方向の長さ)について検討する。

L_t 、 L_r は跳水によるエネルギー損失に関するものと考え、式 (32)、(33) の関係に基づき資料を整理する

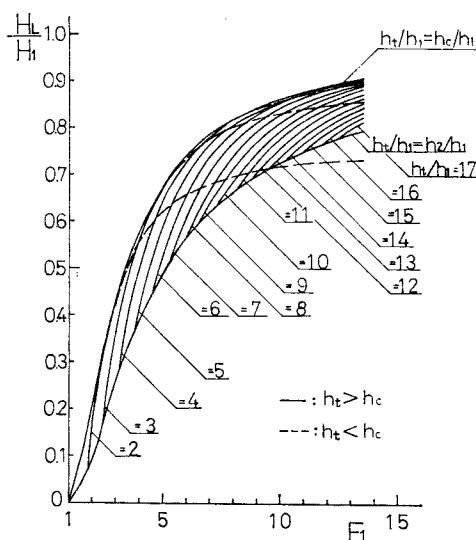


図-17 強制跳水による相対エネルギー損失

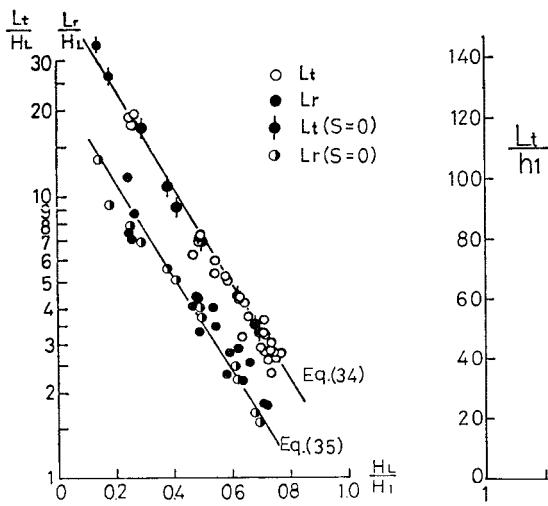


図-19 L_t/H_L , L_r/H_L と H_L/H_1 との関係

と⁹⁾、図-19に示されるように S/h_1 , F_1 , x_s/L_j に無関係によい相関が得られる（実験範囲： $3 \leq F_1 \leq 9.5$, $x_s/L_j \leq 0.7$, S/h_1 あるいは h_t/h_1 の範囲については図-7 参照）。

$$f(L_t/H_L, H_L/H_i) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (32)$$

$$f(L_r/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (33)$$

図-19 は、一定な跳水上、下流端の水理条件、すなわち、一定な H_i , H_t , $H_L (= H_i - H_t)$ に対して、 S にかかわらず一定な L_r , L_t となることを示している。このことは、跳水上、下流端の水理条件を一定にして（したがって、 H_L を一定にして） S を変化させた実験によると、 S が大きい場合 x_s は大きく、シル後方の渦は小さくなり、 S が小さい場合 x_s は小さく、シル後方の渦は大きくなる傾向が観察されることからも理解される。

図-19 より実験式を求める式 (34), (35) のように示される。

$$\left. \begin{aligned} \log_{10}(L_t/H_L) &= -1.71 H_L/H_1 + 1.72 \\ x_s/L_j &\leq 0.7, \quad 3 \leq F_1 \leq 9.5 \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (34)$$

$$\left. \begin{array}{l} \log_{10}(L_r/H_L) = -1.71 H_L/H_1 + 1.40 \\ x_s/L_j \leq 0.7, \quad 3 \leq F_1 \leq 9.5 \end{array} \right\} \dots \quad (35)$$

さらに、式(34)を式(30), (36)を用いて式(37)の関係に変換し、図示すると図-20が得られる。

$$\begin{aligned} L_t/h_i &= (L_t/H_L) (H_L/h_i) \\ &= (L_t/H_L) [(F_1^2/2+1) \\ &\quad - (F_1^2/2(h_t/h_i)^2 + h_t/h_1)] \dots\dots\dots (36) \end{aligned}$$

また、式(34)は自由跳水($S=0$)の場合を含む L_t/h_1 に関する統一的表示であり、この場合、式(34)を式

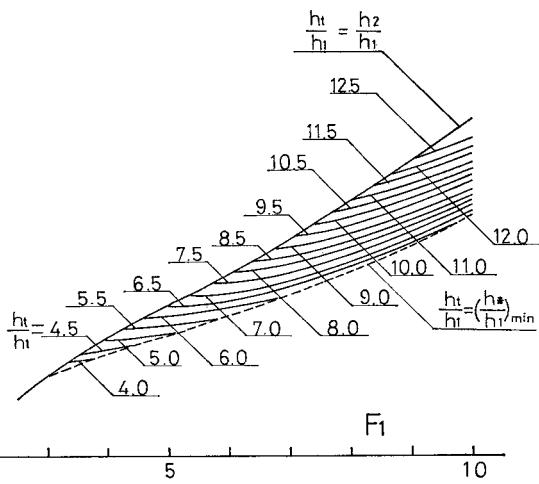


図-20 遷移領域の長さ

(38) の関係に変換して 図-20 に示す注⁶⁾.

これより、与えられた F_i に対して、I 型跳水 ($x_s/L_j \leq 0.7$ の場合) の遷移領域の長さは自由跳水の遷移領域の長さと同程度、あるいは、それよりも短いことが示される。

6. まとめ

水平水叩きに設置された刃形せきとみなせる単一の長方形鉛直連続シルによる強制跳水について、水理実験ならびに水理学的解析によって得られた結果を下記に要約して示す。

(1) I型跳水上、下流端の水深間の関係は、シル前方の流速特性に着目してシルに作用する抗力を検討することによって、一般に式(18)の関係によって示される。さらに、この関係に基づき、I型跳水を支配する基本水理量間の関係式(22)が得られる。

(2) 強制跳水による相対エネルギー損失は式(30)によって示される。I型跳水の場合は、与えられた F_1 に対して自由跳水の場合よりも大きい H_L/H_1 の値を示す。

(3) I型跳水の遷移領域の長さ L_t は、これを H_L と関連づけることによって、一般に式(32)の関係で表示され、実験式(34)を提案した。

(4) I型跳水の剥離領域の長さ L_r について、実験式(35)を提案した。

(5) I 型跳水の水深間の関係を示す式 (22), 相対

注 6) 式(34), (35)は $S=0$ (自由跳水) の場合を含む (図-19). $S=0$ の場合、式(34)を $L_t/h_2 = f(F_1)$ 、式(35)を $L_r/h_2 = f(F_1)$ の関係に変換して図-5に示す.

エネルギー損失を示す式 (30), 遷移領域の長さを示す式 (34) それぞれにおいて $S=0$ とおくと自由跳水の場合となり, 式 (22), (30), (34) は自由跳水の場合を含む統一的表示である.

(6) II型跳水を支配する基本水理量間の関係式は式 (23) によって与えられる. すなわち, 下流水深が小さく $h_t/h_1 < h_*/h_1$ (h_*/h_1 は式 (26) による) の場合, II型跳水が形成されるための必要シル高は式 (23), 最小必要シル高は式 (24) によって与えられる. なお, $x_s = 5h_2$ の II型跳水が形成される場合, h_1 に共役な水深 h_2 は確保される.

(7) 堤頂幅 l が $H/l \leq 0.7$ である長方形副ダムの場合, $x_s = 5h_2$ の II型跳水が形成されるための必要副ダム高は式 (27) によって与えられる.

(8) (1), (6) により, 与えられた単位幅流量, 水叩き始端の水深, 下流水深に対して, 強制跳水が水叩き始端から形成されるためのシル高およびシル設置位置が得られる. また, 与えられた F_1 に対して, 鉛直シルを越える流れの流況は図-8 のように分類され, I, II型跳水の形成される水理条件が明らかにされた.

終わりに, 本研究を行うにあたって, 終始ご指導を賜った日本大学理工学部 栗津清蔵教授に心から感謝申し上げます. また, 協力いただいた, 当時の大学院生 岡

田 仁, 理工学部学生 柳 七郎氏に心から謝意を表します.

参考文献

- 1) Forster, J.W. and R.A. Skrinde : Control of the Hydraulic Jump by Sills, Trans. ASCE, Vol. 115, 1950.
- 2) Rajaratnam, N. : The Forced Hydraulic Jump, Water Power, Jan., 1964.
- 3) Rand, W. : Flow over a Vertical Sill in an Open Channel, Proc. ASCE, Hy. July, 1965.
- 4) 大津岩夫・栗津清蔵・岡田 仁: シル型減勢工の水理特性, 土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集 II-160, 1977.
- 5) 大津岩夫・栗津清蔵・岡田 仁: 強制跳水の特性, 土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集 II-332, 1978.
- 6) 栗津清蔵・大津岩夫・岡田 仁: 傾斜シルによる強制跳水, 土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集 II-333, 1978.
- 7) 栗津清蔵・大津岩夫・丸山勝久: 副ダムに関する実験, 土木学会第 31 回年次学術講演会講演概要集 II-129, 1976.
- 8) 栗津清蔵・大津岩夫・藤巻 寛: 跳水内の流速について, 第 6 回土木学会関東支部年講 II-15, 1979.
- 9) 大津岩夫: 台形および長方形断面水路の自由跳水と潜り跳水, 土木学会論文報告集, 第 246 号, 1976 年 2 月.
- 10) 岩崎敏男: 余水吐の減勢装置について—技術者のための最近の水工学, 土木学会東北支部, 1961.
- 11) 土木学会編: 水理公式集(昭和 46 年), pp. 301~303.
- 12) 田村正秀・川口信幸: 跳水式減勢工のエンドシルの高さ, 土木学会第 27 回年次学術講演会講演概要集 II-92, 1972.

(1979.6.15・受付)