

台形断面水路における跳水特性とその新計算図表

Hydraulic Jump and Its New Nomograms in Trapezoidal Channels

財団法人 電力中央研究所 正 員 河 西 基
財団法人 電力中央研究所 正 員 丸 岡 計
財団法人 電力中央研究所 正 員 白 砂 孝 夫

1. まえがき

跳水現象はダム洪水吐の減勢工型式の1つとして重要な役割を果たしており、古くから実験および運動量理論に基づく研究などが数多くなされ、長方形断面水路の跳水特性についてはかなり明らかにされている。一方、ダムの立地条件は近年ますます厳しくなっており、経済性の観点からも減勢工水路断面形状として台形など長方形以外の断面を採用する必要性が増加している。しかしながら、現象そのものが流れの特異点あるいは剝離を伴う不安定なものである上、このような台形断面水路における跳水特性に関する研究は比較的^{1)~3)}少なく、跳水長あるいは潜り効果などについて研究の余地が残されている。

本論文は、水平の台形断面水路における自由跳水と潜り⁴⁾跳水の基本的特性に関して従来の古典的理論を応用した二、三の検討を行ったものである。すなわち、Raoらが長方形断面水路において提案している相対減勢効果指標を台形断面水路に拡張して用いることにより、台形断面水路における潜り跳水の減勢効果特性を定量的に提示した。また、跳水長に関しては過去に多くの実験式が提案されているので、それらの主なものについて本実験結果との比較検討を行うとともに、エネルギー損失と流入フルード数に關与すると解釈した実験式を提案した。一方、跳水特性を設計の現場などで実際に試算するのを簡便にするために、台形断面水路における自由跳水と潜り跳水における共役水深比、かぶり水深比、相対エネルギー損失、最大減勢効果指標とそれをもたすもぐり度などについて理論的に得られた結果をもとに新しい計算図表を開発した。

2. 基礎理論

本論文で対象としている台形断面水路における跳水の内部においては、ほとんどの損失エネルギーは複雑な渦動で構成される鉛直および水平方向のローラーによって消費される。しかし、このようなエネルギー逸散過程は現在のところ十分に解明されておらず、跳水現象の全体的な特性を把握するのが本論文の目的でもあり、従来からよく用いられているように内部的な流れの構造に關与しない運動量保存則に基づいた定式化を以下のように行なった。なお、跳水の基本的な諸元については図-1のような定義⁴⁾に従っている。

2-1 共役水深比とかぶり水深比

まず、定式化をする上で次のようないくつかの仮定をしておく。

- i) 定常流を対象とする。
- ii) 水路床は水平であり、また断面形状が一様である。
- iii) 圧力分布は静水圧的であって、乱れの変動項は寄与しない。
- iv) 跳水によるエネルギー損失に比較して跳水区間での摩擦損失は十分無視できる。
- v) 運動量補正係数 $\beta_1 \neq \beta_2 \neq 1$ とする。

以上の仮定をもとに、跳水区間を支配体積として連続の条件および運⁵⁾動量保存則から、水平水路における跳水の運動量方程式は次式となる。

$$\gamma (A_1 Y_{g1} - A_2 Y_{g2}) = \frac{\gamma Q^2}{g} \left(\frac{\beta_2}{A_2} - \frac{\beta_1}{A_1} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 γ : 水の単位体積重量、 A_1, A_2, Y_{g1}, Y_{g2} : 跳水前後の流積および水面から図心までの距離、 Q : 流量、 g : 重力の加速度、 β_1, β_2 : 運動量補正係数である。自由跳水と潜り跳水とは(1)式の左辺第1項における跳水始端外力項により差異が表現され、図-1を参照して(1)式はそれぞれ次のように書き改められる。

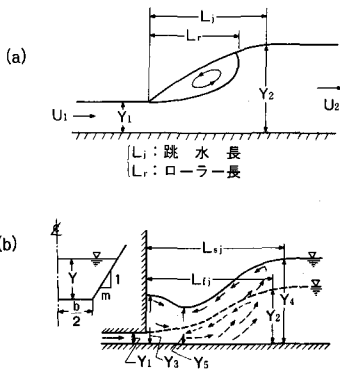


図-1 跳水諸元の定義

$$\text{自由跳水: } A_1 Y_{g1} - A_2 Y_{g2} = \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) \cdots (2a) \quad \text{潜り跳水: } A_3 Y_{g3} - A_4 Y_{g4} = \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{A_4} - \frac{1}{A_1} \right) \cdots (2b)$$

ここで、次のような定義による無次元量を導入する。ただし、呼称については必ずしも一般化されていない。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{i) 流入口台形度: } \delta_1 = \frac{m Y_1}{b}, & \text{ii) 流入フルード数: } F_1 = \sqrt{\frac{Q^2}{A_1^2 g D}} = \sqrt{\frac{Q^2 (1+2\delta_1)}{g b^2 Y_1^3 (1+\delta_1)^3}} \\ \text{iii) 共役水深比: } \phi = Y_2 / Y_1, & \text{iv) 潜り度: } S = (Y_4 - Y_2) / Y_2, \quad \text{v) かぶり水深比: } \phi = Y_3 / Y_1 \end{array} \right.$$

ここに、 b : 水路床幅、 m : 水路側壁の傾きであって、 $\delta_1 \rightarrow 0$ とすれば長方形に、また $\delta_1 \rightarrow \infty$ とすれば三角形断面の場合に相当したものに成る。これらの定義を用いて(2)式を展開した結果は次の式である。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{自由跳水: } \delta_1^2 \phi^4 + \delta_1 (2.5 + \delta_1) \phi^3 + (1.5 + \delta_1) (1 + \delta_1) \phi^2 + \left\{ (1.5 + \delta_1) - \frac{3\delta_1 (1 + \delta_1)^2}{(1 + 2\delta_1)} F_1^2 \right\} \phi \\ \quad - \frac{3(1 + \delta_1)^3}{(1 + 2\delta_1)} F_1^2 = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (3a) \\ \text{潜り跳水: } \delta_1 \phi^3 + 1.5 \phi^2 - \delta_1 \phi^3 (1+s)^3 - 1.5 \phi^2 (1+s)^2 - \frac{3F_1^2 (1+\delta_1)^2}{(1+2\delta_1)} \left\{ \frac{(1+\delta_1)}{\phi \{1 + \phi \delta_1 (1+s)\} (1+s)} - 1 \right\} = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (3b) \end{array} \right.$$

上式は台形断面水路の自由跳水における ϕ および潜り跳水における ϕ に関する代数方程式であり、 S_1, F_1 あるいは S が与えられれば解を得ることができる。一方、 $\delta_1 = 0$ とすれば次のような長方形断面水路にお

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{自由跳水: } \phi = (1/2) \cdot \{ \sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1 \} & \cdots \cdots \cdots (4a) \\ \text{潜り跳水: } \phi = \sqrt{(1+s)^2 \phi^2 + 2 F_1^2 \{ 1/(1+s) / \phi - 1 \}} & \cdots \cdots \cdots (4b) \end{array} \right.$$

る式となる。上式はいずれもよく知られたものであり、特に(4a)式は“Belangerの式”として有名である。⁶⁾

2-2 エネルギー損失と相対エネルギー損失

跳水の始端と終端における水深の関係が前節のように求められると、その跳水区間において失われるエネルギーは以下のようにして求められる。すなわち、次式で定義される比エネルギー

$$E = Y + \alpha Q^2 / A^2 / (2g), \quad [A: \text{流積}, \alpha: \text{エネルギー補正係数} \neq 1] \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

を用いるとエネルギー損失 E_L は次のように表わされる。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{自由跳水: } (E_L)_f = E_1 - E_2 = (Y_1 - Y_2) + Q^2 (1/A_1^2 - 1/A_4^2) / (2g) & \cdots \cdots \cdots (6a) \\ \text{潜り跳水: } (E_L)_s = E_1 - E_4 = (Y_3 - Y_4) + Q^2 (1/A_1^2 - 1/A_4^2) / (2g) & \cdots \cdots \cdots (6b) \end{array} \right.$$

したがって、相対エネルギー損失 (E_L/E_1) はそれぞれ次のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{自由跳水: } \left(\frac{E_L}{E_1} \right)_f = 1 - \frac{\{ \phi + F_1^2 (1 + \delta_1)^3 / (1 + 2\delta_1) / (1 + \phi \delta_1)^2 / (2\phi^2) \}}{\{ 1 + F_1^2 (1 + \delta_1) / (1 + 2\delta_1) / 2 \}} & \cdots \cdots \cdots (7a) \\ \text{潜り跳水: } \left(\frac{E_L}{E_1} \right)_s = 1 - \frac{\{ \phi (1+s) + F_1^2 (1 + \delta_1)^3 / (1 + 2\delta_1) / \{ 1 + \phi \delta_1 (1+s) \}^2 / (1+s)^2 / (2\phi^2) \}}{\{ \phi + F_1^2 (1 + \delta_1) / (1 + 2\delta_1) / 2 \}} & \cdots \cdots \cdots (7b) \end{array} \right.$$

2-4 相対減勢効果指標

Rao⁴⁾らは長方形断面水路における自由跳水の相対エネルギー損失に対する潜り跳水のそれとの比を相対減勢効果指標 η として定義し、与えられた F_1 に対する η の最大値 $\eta_{\max}$ とそれをもたらす潜り度 S_0 は、 $F_1 = 2$ における $\eta_{\max} = 2.75$ ($S_0 = 0.7$) から $F_1 = 7$ における $\eta_{\max} = 1.02$ ($S_0 = 0.1$) まで急激に減少し、 F_1 がさらに増大しても $\eta_{\max}$ はほぼ一定となることを定量的に示した。ここでは、台形断面水路においても同様の定義が適用できるとして、(7)式の関係から台形断面水路における相対減勢効果指標 η を次のように定義する。

$$\eta = (E_L/E_1)_s / (E_L/E_1)_f = f(\delta_1, F_1, s) \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

3. 実験結果との比較検討

実験は図-2に示すような幅 0.4 m、高さ 0.5 m、長さ約 5.5 m の塩化ビニール製二次元水路を用いて行なった。水路を台形断面とする場合は、ラッカー塗装仕上げのベニヤ板製傾斜壁を片側のみに設置し、ほとんどのケースにおいてこのような半台形断面水路を用いた。ただし、データの解析にあたっては等脚台形断

面における軸対称流れと仮定して整理を行なった。表-1は本実験の主な条件をまとめたものである。

このような装置、条件のもとで実験を行なった結果とその考察を以下に述べる。

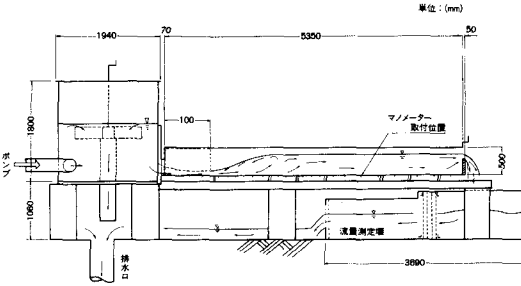


図-2 実験装置

表-1 実験条件

断面形状	実験シリーズ	Y_1	跳す式	実験ケース数	F_1
矩形断面	A	3	f	3	3.7-8.7
			s	3	3.7-8.6
			$3 \times 2 = 6$		
	B	2	f	4	3.1-10.4
			s	4	3.0-10.0
	C	4.1	f	4	4.1-7.1
断面形状	D	2.1	f	14	2.3-11.1
			s	32	3.1-10.9
	E	4.1	f	5	4.2-6.9
			s	5	4.2-6.9
	F	2.1	f	5	5.8-10.8
			s	4	5.6-10.7
	G	3.1	f	5	4.7-8.9
			s	3	4.7-6.8
断面形状	H	2.1	f	3	5.4-9.6
			s	2	5.5-9.9

(単位: b, Y_1 (cm), f : 自由跳水, s : 潜り跳水)

3-1 跳水位置の定義

図-3は、長方形、半台形および等脚台形断面の各水路における跳水を染料などを用いて上と横から見た場合の流況パターンを模式的に示したものである。長方形断面水路においては表面部においてローラーが見られるが、台形断面水路においては他に水平渦も組み合わされたものになっている。半台形断面における流況は等脚台形断面を中心軸上で分割した半断面内のものと類似しており、上述したような実験データを整理する上での軸対称流れと仮定することによる二次元的な取扱いにはほぼ妥当であると推察される。また、大津が指摘しているように、自由跳水においては側壁の傾きが大きくなるほど主流の偏向度合は大きくまた跳水始端の位置は不安定となる。一方、潜り跳水においては流れはほぼ対称であり、また跳水位置は容易に固定されて比較的安定している。

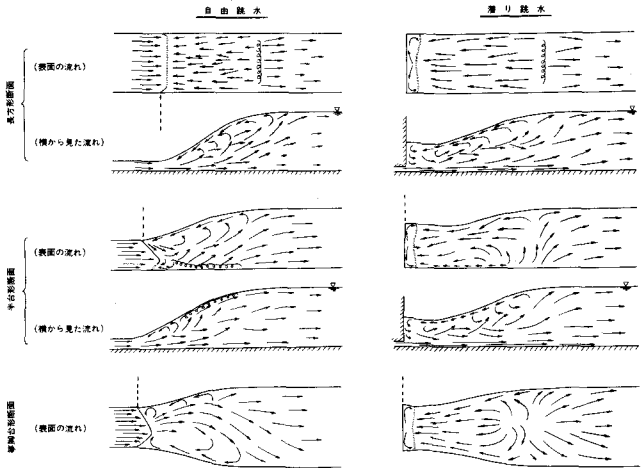


図-3 跳水流況 (Plan View)

跳水は不規則に変動している複雑な現象であるので、実験を行なう上で跳水の位置(始端、終端)を客観的に決定するのはそれほど容易でないが、本実験においては跳水始端を図-3における点線の位置のように定義し、また跳水終端位置は水面形がほぼ水平になる最短距離として定義した。

3-2 共役水深比とかぶり水深比

図-4は(3a)式で得られた自由跳水における共役水深比の理論値と実験値とを比較したものである。前者に比較して後者は全体的にやや小さな値となっているが、 F_1 が増大したりあるいは δ_1 が減少するにしたがって ϕ が増大する傾向など比較的よく一致した結果を示している。この中で、実験シリーズD($\delta_1=0.028$)とH($\delta_1=0.026$)の場合ほぼ同一の特性を示しており、このことと後述

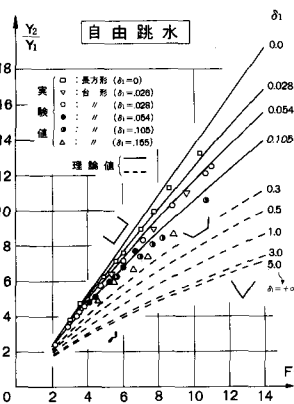


図-4 共役水深比

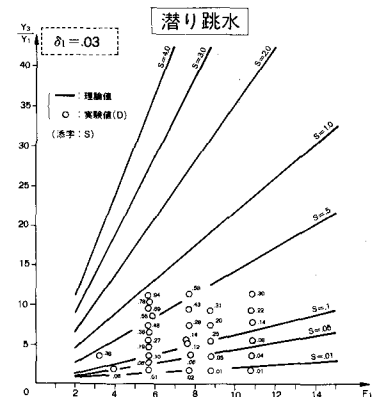


図-5 かぶり水深比

する他の実験結果からも本実験における軸対称流れとしての半台形断面の仮定は妥当であると思われる。

図-5は(3b)式で得られた潜り跳水におけるかぶり水深比の理論値と実験値とを $\delta_1 \neq 0.03$ (Dシリーズ)を一例として図示したものである。水面変動がやや大きい領域での測定結果であるけれども、両者はほぼ一致した傾向を示している。すなわち、 F_1 が増大するにともなって ϕ は増大するが、この増大する割合と全体的な ϕ の値は共に S が大きくなるほど増大している。一方、図では示されていないが、同一の F_1 あるいは S に対して δ_1 が大きいほど ϕ の値は全体的に減少する結果が得られている。

3-3 相対エネルギー損失

図-6は、自由跳水と潜り跳水における相対エネルギー損失について、(7)式の理論値と実験値とを比較したものである。自由跳水においては、 F_1 が大きいかほど E_L/E_1 は増大し、またわずかつづではあるが δ_1 の増大にともなっても E_L/E_1 は大きくなる。

また、潜り跳水においては S が0(自由跳水)からしだ

いに大きくなるにしたがって 図-6a 相対エネルギー損失(f) E_L/E_1 は始めに少し増加してから減少してゆく傾向を示している。これらの特性は2-3節で述べた長方形断面水路における Ra_0 の結果(図-6bの $\delta_1=0$ の場合に相当)とほぼ同じである。一方、 δ_1 の増大に伴ない E_L/E_1 は全体的に少しづつ増加する傾向が示されており、大津が報告しているように潜り度によっては自由跳水の場合よりも大きなエネルギー損失が得られることを確認できた。本実験値は理論値よりもわずかに大き目の傾向であるが、ほぼ妥当な一致性を示している。

3-4 相対減勢効果指標

前節において、相対エネルギー損失に着目することによる自由跳水に対する潜り跳水の減勢効果としての有効性が定性的に把握された。こ

こ
では2-
3節で述
べたよう
に、 Ra_0
の提案に
よる相対
減勢効果
指標 η を
台形断面
水路に拡
張して定

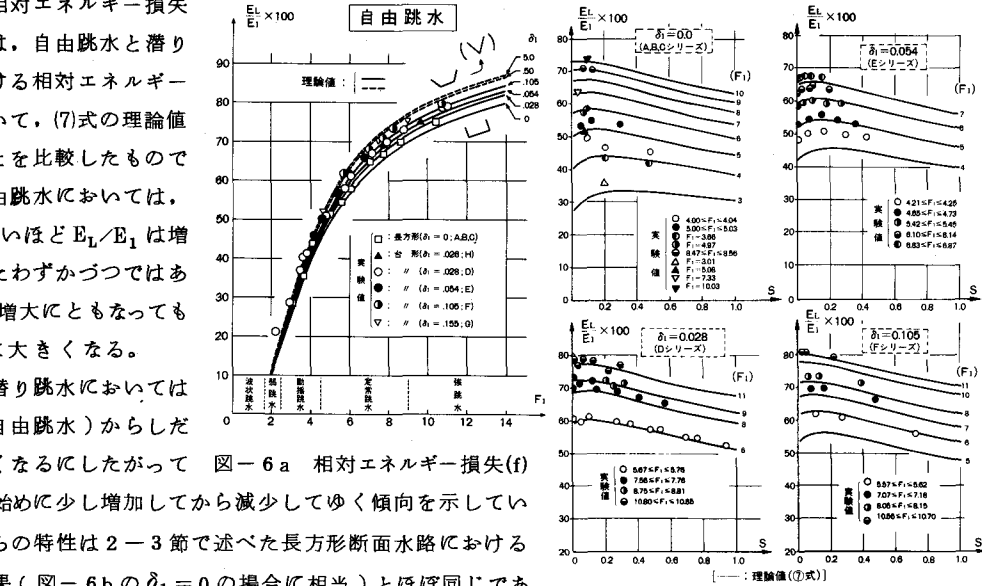


図-6b 相対エネルギー損失(s)

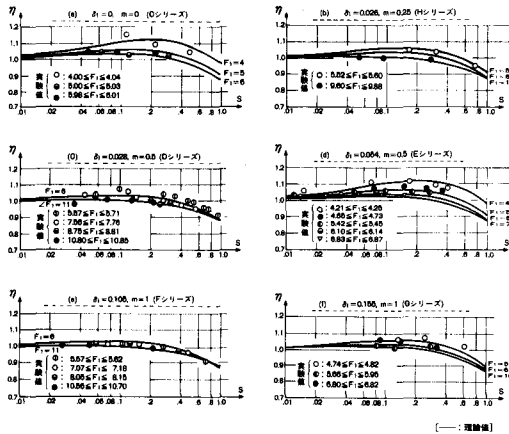


図-7 相対減勢効果指標

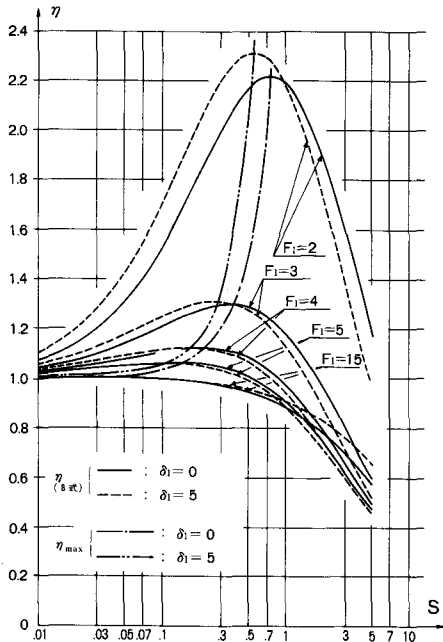


図-8 最大減勢効果指標

義した(8)式を用いることによって、潜り跳水の減勢効果をより定量的に提示する。

まず、図-7は η の理論値と実験値とを比較したものであり、両者は比較的良好に一致した特性を示している。これらの特性をより明確にするために、図-8では $\delta_1=0$ および5に対する η の理論計算結果を示している。またこの図では、 F_1 の各値に対する η の最大値を $\eta_{\max}$ とし、 $\eta_{\max}$ とそれをもたらす S_0 の座標位置の関係を1点鎖線と2点鎖線で示した。ただし、この $(\eta_{\max}, S_0)$ の算出にあたっては、 δ_1, S および F_1 に対する数値計算による数表から求めており、Raoらのように(8)式の微分演算による方法は用いていない。 $\delta_1=0$ においては $(\eta_{\max}, S_0; F_1)=(2.22, 0.7; 2)$ から $(1.01, 0.05; 9)$ まで急激に減少し、一方 $\delta_1=5$ においては $(\eta_{\max}, S_0; F_1)=(2.31, 0.5; 2)$ から $(1.01, 0.04; 9)$ まで急激に減少して、 F_1 がさらに増大しても $\eta_{\max}$ はほぼ一定となっている。このように、長方形断面に比較して δ_1 が大きくなるほど $\eta_{\max}$ は全体的に大きくなり、また S_0 は小さくなる傾向が示されている。したがって、大津が指摘しているように、適度に潜らすことにより潜り跳水を減勢工として有効に利用できることが確かめられた。特に、 F_1 が8前後より小さくなるほどまた δ_1 が大きいほどこの傾向が増すことを、ここでは指標 η および $\eta_{\max}$ を用いて定量的に示すことができた。

4. 跳水長について

跳水は流れの剥離あるいは不規則に変動する渦動などをともなう複雑な現象であるために、特に跳水長については解析的な取り扱いが非常に難しい問題となっている。壁面噴流としてのアナロジーによる理論を展開したNarayananの研究や、ローラーの大きさをその中に含まれる渦の特性長と関連づけたMehrotraの理論的研究なども見られるが、いずれもまだ一般的なものとなっていない。これに対して、跳水長に関する実験式はこれまでに非常に多くの提案がなされている。

そこで、図-9においてこれらの主な実験式と本実験結果との相関性を調べた。引用した実験式を以下に掲げる。

(i) 自由跳水(長方形断面)

$$\begin{cases} \text{Safranez: } L_j = 4.5 Y_2, & \text{Smetana: } L_j = 6(Y_2 - Y_1), & \text{Woycicki: } L_j = (8 - 0.05 Y_2 / Y_1)(Y_2 - Y_1) \dots (9a) \\ \text{U.S. Bureau of Reclamation: } L_j = 6.1 Y_2, & \text{Bakhmeteff and Matzke: } L_j = 4.8 Y_2 \end{cases}$$

(ii) 自由跳水(台形断面): Posey and Hsing (1938)

$$L_j = 5 Y_2 \{1 + 4 \sqrt{(W_2 - W_1) / W_1}\}, \quad [L_j = 5 Y_2 \{1 + 3((W_2 - W_1) / W_1)^{0.7} \sim 6((W_2 - W_1) / W_1)^{0.3}\}] \dots (9b)$$

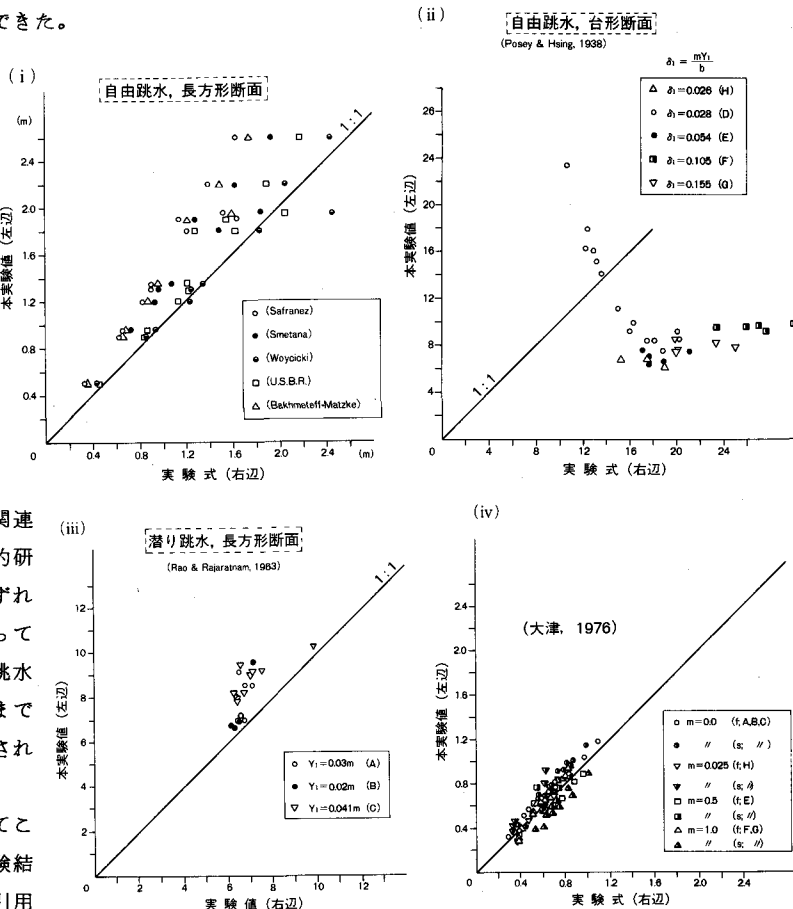


図-9 既往実験式との比較

(iii) 潜り跳水（長方形断面）：Rao and Rajaratnam(1963)⁴⁾

$$L_{sj}/Y_2 = 4.9s + 6.1 \quad \dots\dots\dots (9c)$$

(iv) 自由・潜り跳水（台形断面）：大津³⁾(1976)

$$\log_{10}(L_j/E_L) = -1.71(E_L/E_1) + a \cdot m + 1.58, \quad [a = 0.315 \text{ (自由)}, 0.187 \text{ (潜り)}] \quad \dots\dots\dots (9d)$$

ここに、(9b)式におけるWは水面幅である。これらの結果をみると、本実験値は全体的に他の実験結果に比べて多少大きな値となっているようである。この理由としては、3-1で述べた跳水位置の定義の中でも特に跳水終端を実験上で判定する場合、変動幅の中央よりもむしろ最大跳水長に近いところを跳水長の判定基準とした結果であろうと考えられる。したがって、不安定な跳水位置の変動が比較的大きな自由跳水においてそのことがより大きく影響していると思われる。この中では、Posey and Hsing¹⁾の実験式と本実験値との相関性はきわめて悪く、大津が指摘しているように、ばらつきの範囲が大きい実験値を用いていることからあまり妥当な実験式とはいえないようである。この他の実験式に対してはある一定の相関性がそれほどのばらつきもなく得られており、本実験における跳水位置の判定に関してはほぼ統一的行なわれたと考えられる。一方、大型実験水路の実験に基づくU.S.B.R.⁶⁾と大津の実験式³⁾に関しては、本実験値との相関性がかなり1に近い結果となっており、本実験で得られた跳水長は従来の実験結果に比べて多少大き目ではあるが、ほぼ妥当な結果が得られていると考えられる。

大津³⁾は跳水長をエネルギー損失 E_L の達成される長さとして実験式(9d)を提案し、広範囲の実験結果に対する適用性を示した。著者らは、同様の考え方を踏襲しつつも、実験式の両辺共に E_L が含まれることを避けるとともに F_1 の効果も重要な支配因子であると解釈することにより、図-10に示すように比較的良好な相関性で実験結果を整理することができた。自由跳水に比較して潜り跳水の場合の方が同じ

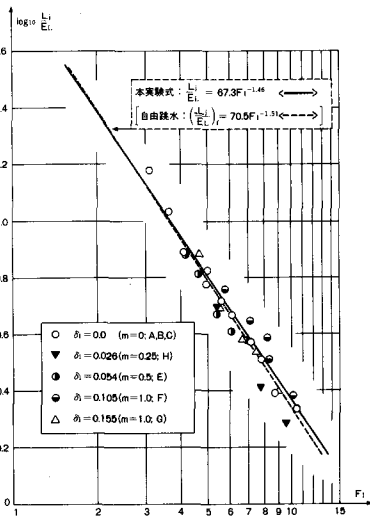


図-10 a 跳水長（自由）

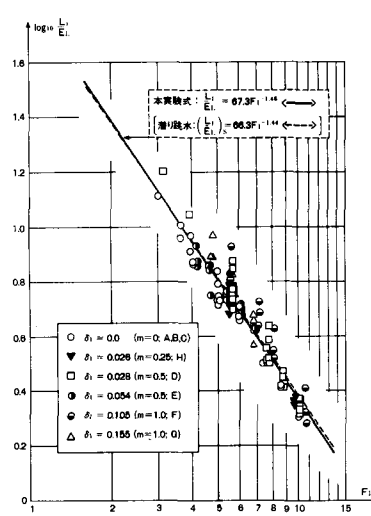


図-10 b 跳水長（潜り）

F_1 に対して相対的にやや大きな値となっているが、両者の差異はそれほど大きくなく、次のような自由跳水と潜り跳水に共通な関係式として本実験における跳水長の実験式を提案する。

$$L_j/E_L = 67.3 F_1^{-1.46}, \quad (3 \leq F_1 \leq 11, 0 \leq m \leq 1, 0 \leq \delta_1 \leq 0.16, 0 \leq S \leq 1) \quad \dots\dots\dots (10)$$

本実験式においては、 δ_1 （あるいは m ）の変化による跳水長特性への影響は小さく、結果的にその効果を陰に(10)式で含ませることができ、また比較的簡明な関係式としてまとめられたと考える。しかしながら潜り跳水においては、同じ F_1 に対して本実験式の前線で S が大きいほど若干大きな値となる傾向があり、それを平均化した結果となっているが、それほど顕著な差異はないと思われる。ここで、本論文で取り上げている跳水長とは図-1 aにおける L_j のことであり、転回流最終端までの距離 L_r （ローラー長）とは明確に区別しておく必要がある。このローラー長については紙面の都合もあり本論文では特に触れないことにする。

以上述べてきた跳水特性の他では流速分布特性が比較的重要と異われるが、この点については大津³⁾の詳細な実験結果がほぼ確認されており、やはり紙面の都合からここでは省略させて頂いた。

5. 計算図表

各跳水特性の理論値を求めるには多少めんどろな計算が必要であり、台形断面水路の ϕ に関するJeppson¹⁰⁾の計算図表のようなものがあれば便利と思われる。そこで、 F_1 と δ_1 あるいは S などを与えるだけで ϕ , ϕ , E_L/E_1 , $(\eta_{\max}, S_0)$ および L_j/E_L が簡単に求められる計算図表を作成し、図-11に示した。これらの図表は各特性量 $\sim F_1$ の理論値がほとんどの場合において相関係数 $=0.98\sim1.0$ で関数近似される基本的な性質に着目し、他のパラメーターとも少なくとも相関係数0.95程度の近似関係を求め、これらを図表化したものである。この結果、いずれの場合も理論値との誤差5%前後で近似値がほゞ得られる計算図表が得られ、工学的にも十分な精度であろうし、特に設計の現場などでの簡単な試算方法として有用と思われる。ただし、跳水長に関する図表のみは本実験式(10)を採用している。

ここでは、 $\delta_1=0.1$, $F_1=4$, $S=0.2$ の場合を例題として図-11の矢印の順番に沿って説明をしよう。

- (i) ϕ , L_j/E_L ; ① $\delta_1=0.1$ 線上での $(\phi)_a$ 曲線と $(\phi)_b$ 曲線との交点をそれぞれ常に水平に $F_1=1$ (②), $F_1=10$ (③)の線上まで平行移動し、各交点を結ぶ直線④がこの場合の $\phi \sim F_1$ 関係を与える。⑤ $F_1=4$ の線上と直線④および (L_j/E_L) 直線との交点から $\phi \div 4.6$ (⑥), $L_j/E_L \div 8.9$ (⑦)を得る。
- (ii) ϕ ; ① $\delta_1=0.1$ の線上において、 $S=0.2$ に対応する $(\phi)_a$ 曲線と $(\phi)_b$ 曲線の交点から(i)と同じ要領(②, ③)による直線④が $\phi \sim F_1$ の関係となる。したがって⑤ $\rightarrow$ ⑥によって $\phi \div 3.4$ が得られる。
- (iii) E_L/E_1 ; ① $S=0.2$ の線上での(a)および(b)曲線との交点から上述と同じ要領(②, ③)で直線④を準備しておく。次に、 $\delta_1=0.1$ の線上で(c)曲線における $S \div 0.2$ の点を求めた後(⑤), δ_1 軸に沿って平行移動し(⑥), $\delta_1=1$ の線上での交点と点 $(\delta_1, S) = (0, 0)$ とを結ぶ直線⑦を補助線として常に用いる。この後は $F_1=4$ から⑧ $\rightarrow$ ⑨ $\rightarrow$ ⑩と座標軸に平行な移動を行なうことによって $E_1/E_L \div 0.46$ を得る。
- (iv) $\eta_{\max}, S_0$; ①(i), (ii)と同様に δ_1 の線上で $(\eta_{\max})_a$ および $(\eta_{\max})_b$ の曲線との交点(②, ③)から $\eta_{\max} \sim F_1$ の関係④を、また同じ要領で⑤, ⑥から $S_0 \sim F_1$ の関係⑦を得る。これらの直線と $F_1=4$ の線上との交点からそれぞれ $\eta_{\max} \div 1.12$ (⑧ $\rightarrow$ ⑨), $S_0 \div 0.2$ (⑧ $\rightarrow$ ⑩)が得られる。

以上の図表から求められた近似値はいずれも理論計算値等に対してはほぼ1%の誤差範囲内に入っている。

6. あとがき

本論文においては、水平台形断面水路における自由跳水および潜り跳水に関する実験と従来の古典的理論に基づく検討を行なった。この結果、とくにエネルギー損失の観点において、適度に潜らせることにより潜り跳水が自由跳水に比べて必ずしも不利でないことが確認され、この特性を定量的に表わす指標として R_{ao} ⁴⁾による $(\eta_{\max}, S_0)$ の定義を台形断面水路に拡張したものを提案した。また、跳水長に関しては、既往のいくつかの実験式と本実験値を比較検討した上で、本実験式として(10)式を提案した。さらに、各跳水特性を比較的精度良くかつ簡便に求めることができる新しい計算図表(図-11)を提案した。

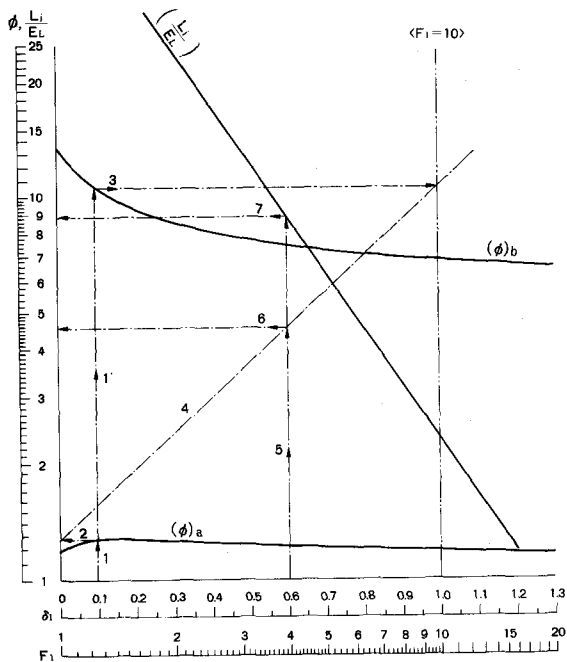
これらの跳水特性を実際の減勢工設計に適用する際には、実験と現場とのスケール効果の問題や圧力変動など総合的な視点からの検討も必要であり、今後の研究課題としたい。

最後に、本実験を遂行するにあたり鶴田謙次氏(当時、(株)電力技術整備)と堆朱俊文氏(当時、東海大学学生)の両氏には多大の御協力を載いた。ここに、記して心よりの謝意を表する。

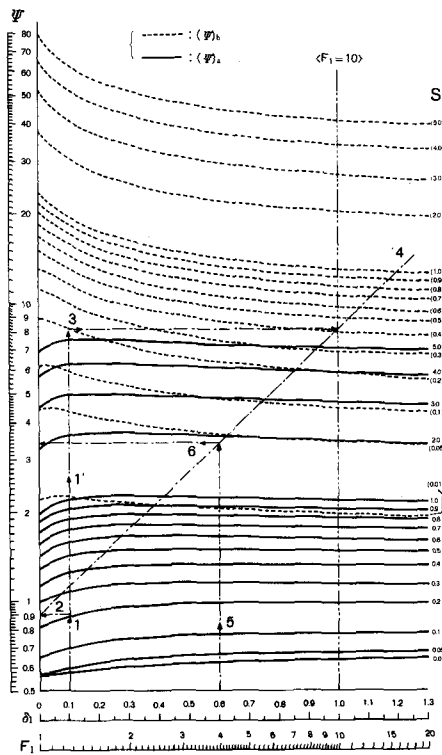
<参考文献>

- 1) Posey, C.J. and Hsing, P.S.; 「Hydraulic Jump in Trapezoidal Channels」, Engineering News-Record, 1938-12, pp.797~798.
- 2) Silvester, R.; 「Hydraulic Jump in Allshapes of Horizontal Channels」, Proc. of ASCE, vol.90, HY1, 1964-1, pp.23-55.
- 3) 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, 1976-2, pp.57-72.
- 4) Rao, N.S.G. and Rajaratnam, N.; 「The Submerged Hydraulic Jump」, Proc. of ASCE, vol.89, HY1, 1963-1, pp.139-162.
- 5) Bhowmik, N.G. and Swain, A.; 「Discussion of Graphical Solution to Hydraulic Jump」, Proc. of ASCE, vol.96, HY7, 1970-7, pp.1647-1656.
- 6) Chow, V.T.; 「Open-Channel Hydraulics」, McGRAW-HILL, 1959, pp.393-438.
- 7) Narayanan, R.; 「Wall Jet Analogy to Hydraulic Jump」, Proc. of ASCE, vol.101, HY3, 1975-3, pp.347-359.
- 8) Mehrotra, S.C.; 「Length of Hydraulic Jump」, Proc. of ASCE, vol.102, HY7, 1976-7, pp.1027-1032.
- 9) 例えば、荒木正夫・椿東一郎; 「水理学演習(下)」, 森北出版, 1962, pp.60-72.
- 10) Jeppson, R.W.; 「Graphical Solution to Hydraulic Jump」, Proc. of ASCE, vol.96, HY1, 1970-1, pp.103-108.
- 11) Narayanan, R.; 「Pressure Fluctuations Beneath Submerged Jump」, Proc. of ASCE, vol.104, HY9, 1978-9, pp.1331-1342.

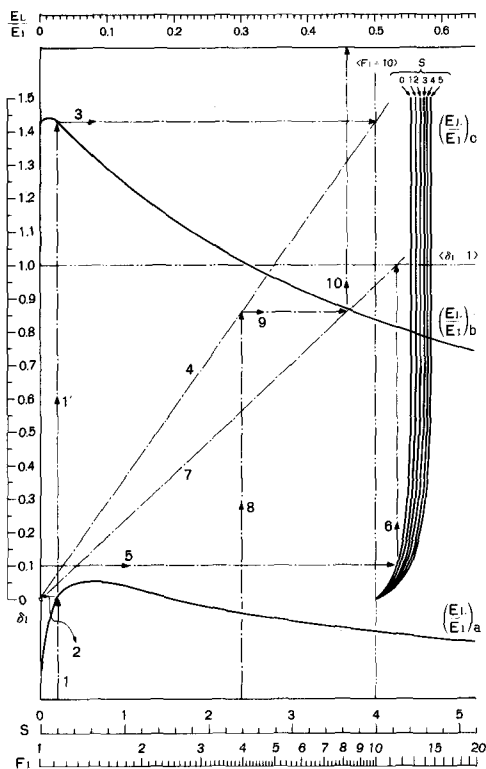
(i) 共役水深比, 跳水長



(ii) かぶり水深比



(iii) 相対エネルギー損失



(iv) η_{max}, S_0

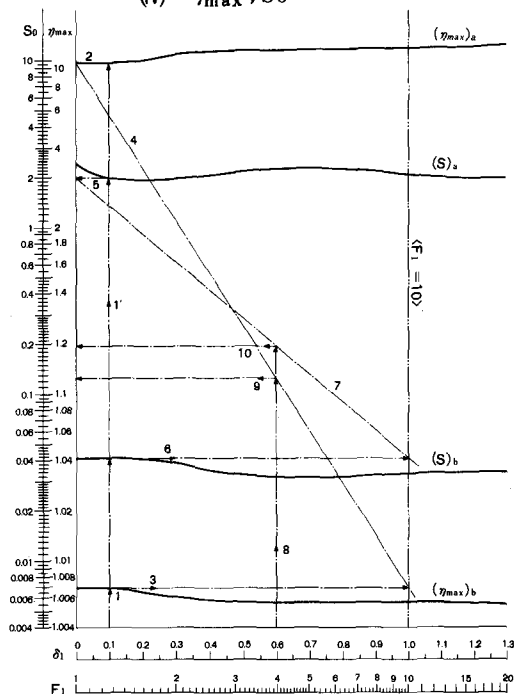


図-11 跳水特性の計算図表