

噴水式水叩の水理について*

正員 荒木 正 夫**

ON THE LEVEL APRON WITH UPWARD WATER JET FROM THE BED

Masao Araki, C.E. Member

Synopsis :

The object of this paper is to clarify functions of the level apron with upward water jet from the bed, which accelerates the hydraulic jump of supercritical flow on the level apron.

For this purpose, the author introduces the jump equation for this type of apron by momentum theory. The results of a model test on this special energy dissipator show the close agreement with the values computed by the author's formulas, and also give some experimental formulas.

要 旨 ここにいう噴水式水叩とは、水平水叩上を流れる射流に底面からの噴出水を合流させ、射流の跳水を促進させる機能を有する、特殊な水平水叩を意味する。本小論においては、この噴水式水叩の水理を運動量方程式より明らかにすると共に、水理実験を行い、ここに誘導された理論に基づく計算値が実験値とよく一致することを示した。

1. 総 論

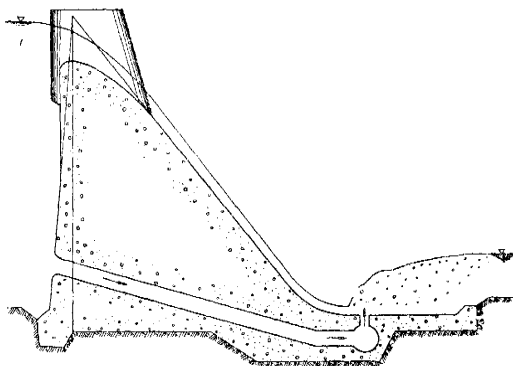
噴水式水叩においては、同一流量に対して水平水叩上の跳水の場合より、かなり低い下流水深でもつて跳水を起させることができるのみならず、跳水長も随分と短くなるものであるから、自然下流水深がひくすぎるため、水平水叩とすれば水叩内で跳水を生じないような場合に利用すれば、はなはだ好適な場合も多いものと思われる。このように比較的突用価値の大きいものと信ぜられるのであるが、従来その水理が明らかにされておらず、従つて突用に供されたこともなかつた。

この噴水式水叩の1設計案としては、図-1に図解するように、放水管により水叩の下に水を導き、この水を水叩幅一杯に開口したスリットを通して上向きに噴出させ、越流水と干渉させて越流水のエネルギーを奪い、かくして跳水を促進させるのである。

以下の所論においては、底面からの噴出水は真上向きに出す場合のみを取扱つているが、この方法に対しては越流水のエネルギーを更に効果的に殺すために、噴出水を上流に向つてある角度をもつて噴出せしめる方法も当然考えられる。たしかに、同一噴出量の場合には、上流に角度をもたした方が効果的であることはいうまでもないが、その反面噴出水は主流の高速射流によつておさえられるために流出し難くなり、同一噴出量を出すためには、真上向きに噴出する場合よりも著しく大口径の放水管を設置しなければならず、結局は経済的とはなり得ないものと判断される。従つて、以下噴出水は底面に直角に出る場合のみを取扱うことにする。

さて噴水式水叩の根本的な機能としては、噴出水による主流の擾乱又は妨害によつて主流のエネルギーを一挙に殺すのではなく、流れの方向には速度を有していない噴出水を加速するために、主流の運動エネルギーのかなりの部分が奪い取られるので、結局主流と噴出水との和全体としては、射流のエネルギーが減少することになり、かくして跳水が促進され、この跳水により一挙に水勢減殺を行うのである。すなわち噴水式水叩においても、最終的にエネルギーキラーとして働くものはやはり跳水現象であり、極言すれば噴出水そのものは、この跳

図-1 噴水式水叩



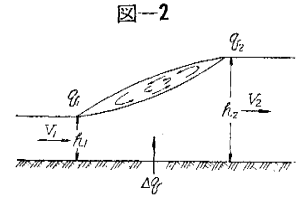
* 第7回日本工学会大会土木部会講演会(昭.31.5.27)において一部発表

** 建設技官、近畿地方建設局

水を促進させるための触媒に似た働きをするものと言える。

2. 噴水式水叩の水理

図-2 に示した水平底面上の2次元流れについて、水路の単位幅当りの流入流量を q_1 、流出流量を q_2 、底面からの噴出流量を Δq 、噴出前の射流水深を h_1 、流速を V_1 、噴出後の共役下水深を h_2 、流速を V_2 、水の密度を ρ とするとき、噴速出流は主流に直角方向に出るのであるから、連続方程式と運動量方程式はそれぞれ次式によつて表わされる。



$$h_1 V_1 + \Delta q = h_2 V_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\rho g h_1^3}{2} + \rho h_1 V_1^2 = \frac{\rho g h_2^3}{2} + \rho h_2 V_2^2 \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2) 式より

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3 - (1+2F_1^2)\left(\frac{h_2}{h_1}\right) + 2F_1^2\left(1+\frac{\Delta q}{q_1}\right)^2 = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}}$$

(3) 式が h_2/h_1 を定める三次方程式である。特に $\Delta q=0$ の場合には、(3) 式は次式のような通常の跳水方程式に書き改められる。

$$\frac{h_2'}{h_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1+8F_1^2}-1) \dots\dots\dots (4)$$

(3) 式は $\Delta q/q_1$ があまり大きい場合、換言すれば、主流の流量に対して噴出量がある限界値を越えると正根を持たなくなるが、このことは流れが図-2 のような水面形を取り得ず、自然下流水位とは無関係に、跳水末端が噴水地点よりも上流側に移つてしまうことを意味するのである。この限界流量比並びに その場合の限界水深比は、それぞれ次式にて与えられる。

$$\left[\frac{\Delta q}{q_1}\right]_{crit.} = \frac{1}{F_1} \left(\frac{1+2F_1^2}{3}\right)^{3/4} - 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$\left[\frac{h_2}{h_1}\right]_{crit.} = \sqrt{\frac{1+2F_1^2}{3}} \dots\dots\dots (6)$$

(3) 式は $\Delta q/q_1$ が (5) 式の限界値よりも大きい場合には解がなく、小さい場合には正の2根を有する。この2正根のうち、小さい方の h_2 は噴出後も流れが射流状態にあることを表わし、大きい方の h_2 は跳水を生じた後の常流水深である。両者共に実在し得るものであるが、噴水式水叩としての水勢減殺効果を期待する場合には、大きい方の h_2/h_1 を対象にすべきであつて、この理由は追つて論ずる。

次に、跳水によるエネルギー減少率を、[(流入水のエネルギー)-(流出水のエネルギー)]÷[流入水のエネルギー]、と定義すれば、この比が流入射流のエネルギーのうち、どれ程のものが消散されたかを示す、重要なパラメーターとなることは明らかである。すなわち

$$\text{エネルギー減少率} = \frac{\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g}\right) - \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g}\right)}{h_1 + \frac{V_1^2}{2g}} = \frac{2\left(1 - \frac{h_2}{h_1}\right) + F_1^2 \left[1 - \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^2 \left(1 + \frac{\Delta q}{q_1}\right)^2\right]}{2 + F_1^2} \dots\dots (7)$$

以上誘導した (3)~(7) 式が、噴水式水叩に関する主たる水理式であるが、これらの公式を実用に便ならしめるために、数値計算を行った。このうち (3), (6) 式の数値計算結果を図-3, (5) 式の数値計算結果を図-4 に示した。また同一の F_1 に対して、(3) 式から計算される大きい方の h_2 と (4) 式から求められる h_2' との比 h_2/h_2' と、 F_1 及び $\Delta q/q_1$ との関係を図-5 に示したが、この h_2/h_2' は Δq なる噴出水による跳水水深の減少度をあらわすパラメーターである。さらに、(7) 式の数値計算結果を図-6 に示した。

図-6 において、 $F_1, \Delta q/q_1$ の一定値に対して、2つのエネルギー減少率が存在するのは、勿論それぞれ上に述べた大小2つの h_2 に対応するものであるが、同一の $F_1, \Delta q/q_1$ に対して、大きい方の h_2 に伴うエネルギー減少率は、小さい方の h_2 に伴うエネルギー減少率よりも、はるかに大きいのである。すなわち、これが噴水式水叩としての水勢減殺効果を期待する場合に、跳水を生じた後の大きい方の h_2 をとるべきであるとする理由である。またこのことが、既に述べたところの、ある意味では底面からの噴出水は、エネルギーキラーの触媒の働きをなすものであるということの内容であつて、小さい方の h_2 に対応するエネルギー減少率は、確かに噴出水による直

図-3 F_1 , $\Delta q/q_1$ と h_2/h_1 の関係

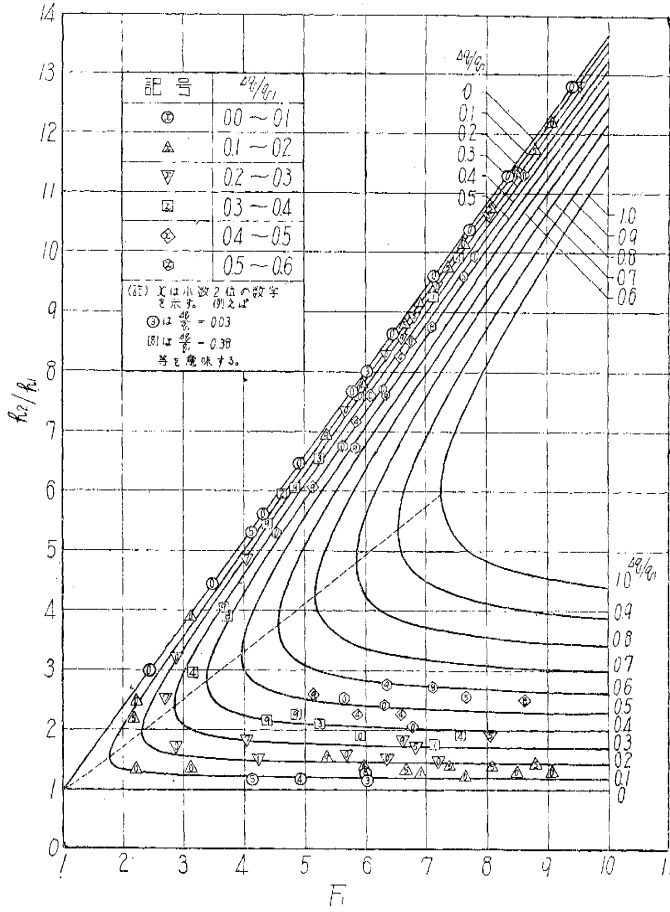


図-4 F_1 と $[\Delta q/q_1]_{crit.}$ の関係

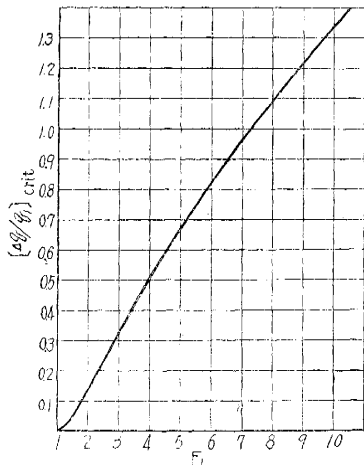
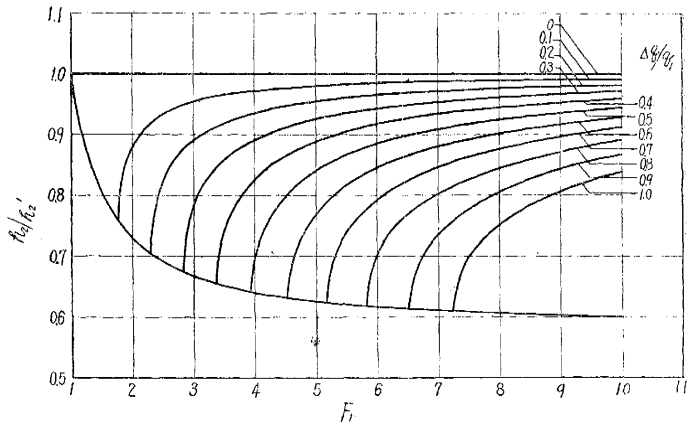


図-5 F_1 , $\Delta q/q_1$ と h_2/h_2' の関係



接効果と言えが、大きい方の h_2 に対応するエネルギー減少率の大部分は、噴出水を触媒として促進された跳水により、生じた水勢減殺に基くものであることは明らかである。

図-3, 5, 6 により、噴出式水叩が有効に働くケースはどのような場合であるかを吟味してみると、まず第一に同一噴出量比 ($\Delta q/q_1 = \text{一定}$) の場合には、 F_1 がなるべく小さい方が跳水水深の低下が著しく、従つてより効果的であることが言える。このことは、噴水式水叩が一般に低ダムから中ダムに適し、高ダムには多少不向きであ

ることを意味することになる。次に同一の F_1 の場合、 $\Delta q/q_1$ が大きい程跳水水深の低下が大きいことがいえるが、これは噴出水量をなるべく多量に出すように設計すれば、効果も急増することを意味するものである。ただし波状跳水を生ずる程多量に噴出させてはならない。

3. 噴水式水叩の実験

(1) 実験方法

以上の理論的考察がどの程度実際と一致するものであるか、また前章の理論では求められていない跳水長はいかになるか、等を検討するために、底面から噴出水のある開水路流れに関する実験を行うことにした。

実験は建設省土木研究所赤羽分室内にある幅1米水路に、図-7 に図解するような装置を設けて行つた。図-7 の平面図において、上流(左側)から流入する流れは、既に1米幅矩形堰によりその流量は測定されているのであるが、この流れは水路の途中から隔壁により2つの水路に分割される。平面図の上側に当る左側水路は幅員50cmであつて、その水路の途中に水位調節板が設けられてあり、この水位調節板を上下することにより、左右両側水路に分割される流量比を任意に調節することができる。平面図の下側に当る右側水路の途中には、20cm幅矩形堰があつて、この堰により右側水路を流れる流量が測定される。かくして全流量と右側水路の流量とが測定されるのであるから、これより左側水路の流量も計算できることになる。

左側水路を流れる水は下流隔壁で一旦貯水され、この貯水された水は高さ2.44cm、幅50cmのスキ間を通つて隔壁の下流側にある幅50cmの水平水路上に、水平射流として放流される。この実験用水平水路の下流端、すなわち上記の隙間から334cm程下流には水位調節板があつて、これにより下流水位を任意に調節することができる。

右側水路を流れる水は、前記の20cm幅矩形堰を越え、同様に下流隔壁で一旦貯水され、この貯水された水は下流隔壁の下端部に開口している直径12cmの彎曲鉄管を通り、左側水路底面に下設された噴出水整流箱に導かれる。噴出水整流箱に入った水は、3段の整流板により一樣な流れに整流され、左側水路底面に切つてある、幅5cm、長さ50cmのスリットを通つて水路上に噴出する。

以上説明したような実験装置によつて得られた実験結果とその解析とについて、以下簡単に論ずる。

(2) 水面形

実験結果によれば、底面から噴出水のある場合における開水路流れの水面形は、本実験の場合図-8 に示すように5種に分類せられることが認められた。図-8 において (I) 波状跳水、(II) 正常跳水、(III) 二段跳水はいずれも前述した大きい方の h_2 に対応する跳水水面形であり、(IV)(V) は噴出後も射流状態を保つ場合である。

大きい方の h_2 に対応するいわゆる跳水のうち、波状跳水、正常跳水は通常の水平水路上における跳水の場合にももちろん見られるものであるが、二段跳水だけはこの底面より噴出水のある場合に独特のものであるのみならず、これが噴水式水叩における最も典型的な水面形であると云える。

次に実験によつて得られた水面形のうち、代表的なものとして $q_2 \div$

図-6 $F_1, \Delta q/q_1$ とエネルギー減少率の関係

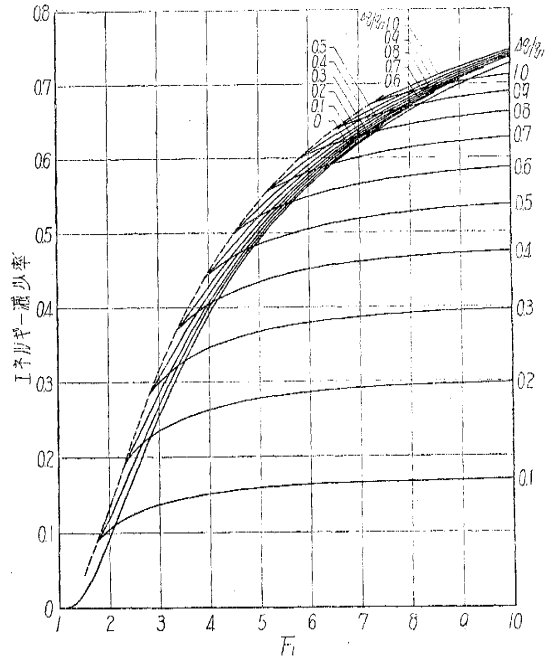


図-8 各種水面形状

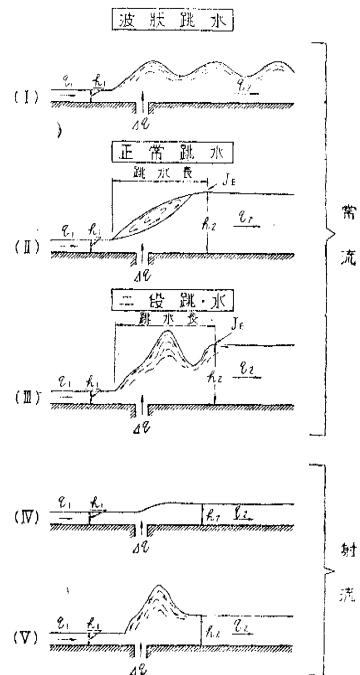
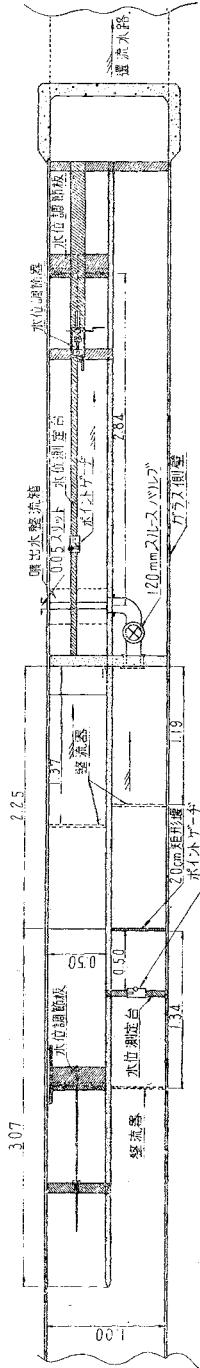


図-7 噴水式水叩模型実験装置図

平面圖 単位、米



左縦断面圖

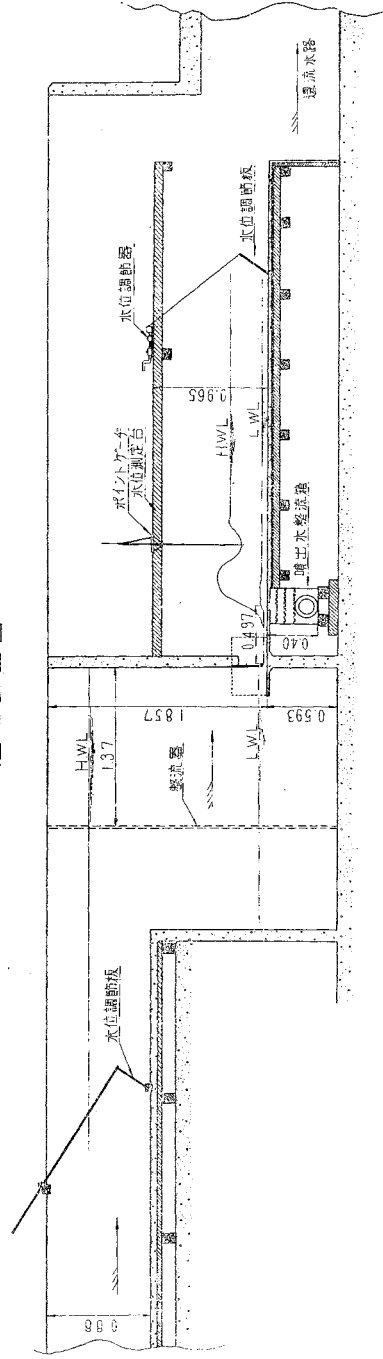
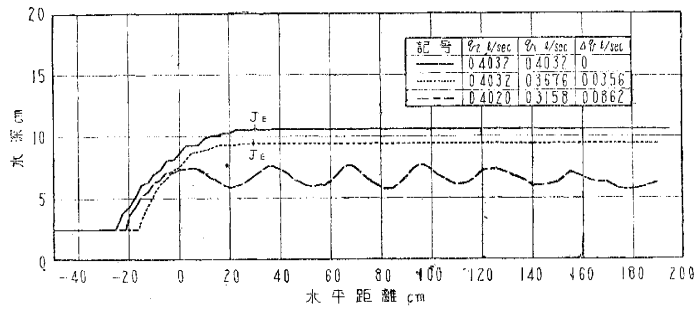
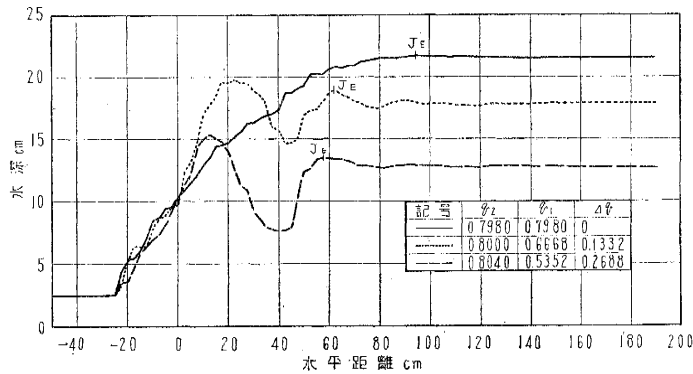


図-9 跳水水面形状

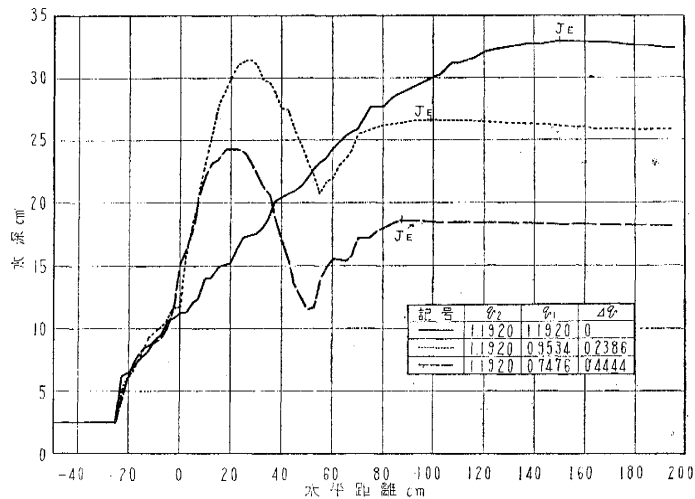
実験-1 ($Q_2=0.4$ l/sec)



実験-2 ($Q_2=0.8$ l/sec)



実験-3 ($Q_2=1.2$ l/sec)



0.4, 0.8, 1.2 l/sec の3種の流量について、各3種の跳水水面形を図-9に示した。図-9の水面形は甚だしく変動している水面形の時間的平均値であるが、上記の3種の跳水水面形をはつきり認めることができる。なを、図-9の水平距離原点Oは、底面スリット中央に当る(図-7)。

(3) $F_1, Aq/q_1$ と跳水域の関係

実験によつて得られた $F_1, Aq/q_1$ と各種跳水域の存在範囲を図-10に示した。図-10に記入してある限界流量比は(5)式の関係であつて、このような曲線をあらかじめ与えることなく行つた実験であるにもかかわらず、この曲線の左側には全然実験点が存在しないことは、前述の理論解の妥当性がある程度立証するものと考えられる。

図-10を吟味することにより、次の諸点を明らかにすることができる。

i) 同一の F_1 の場合, $\Delta q/q_1$ が増加する時, 一般に正常跳水域より二段跳水域に移行する。

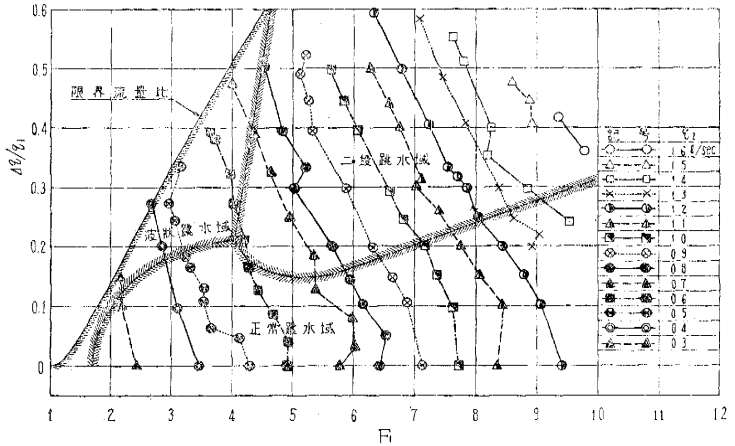
ii) F_1 が小さい場合には, 同一の F_1 の場合, $\Delta q/q_1$ が増加すると正常跳水域より二段水域を経ずに直接に波状跳水域に移行する。

iii) 通常の水平水路における跳水の場合には, 波状跳水を生ずる最大の F_1 はおおよそ 1.7 程度とされているが, 噴水式水叩の場合には $\Delta q/q_1$ が大きくなると, 本実験の場合だけでも波状跳水の F_1 は 4.0 以上にも達することが認められた。

この結果は, 噴水式水叩の設計にとつて比較的重要である。というのは, 波状跳水の場合には射流のエネルギーはなかなか消散し難く, かなり下流まで流れが脈動するものであるから, このような波状跳水が水叩上に生ずることは避ける必要があるからである。

ただし, 図-10 に示した各跳水域の区分曲線の位置は本実験の場合のみに限られ, 別段一般性を有するものではない。というのは, これまでの取扱いに無関係であつた噴出水の噴出速度が, この区分曲線の位置には影響を与えるであろうことは容易に推察されるからである。従つてこの区分域についてはそれぞれの噴水式水叩の場合について, 実験的に定めなければならないが, 噴出水の噴出速度があまり大きくない限り区分域の傾向は似たようなものである。

図-10 $F_1, \Delta q/q_1$ と跳水域区分 (実験値)

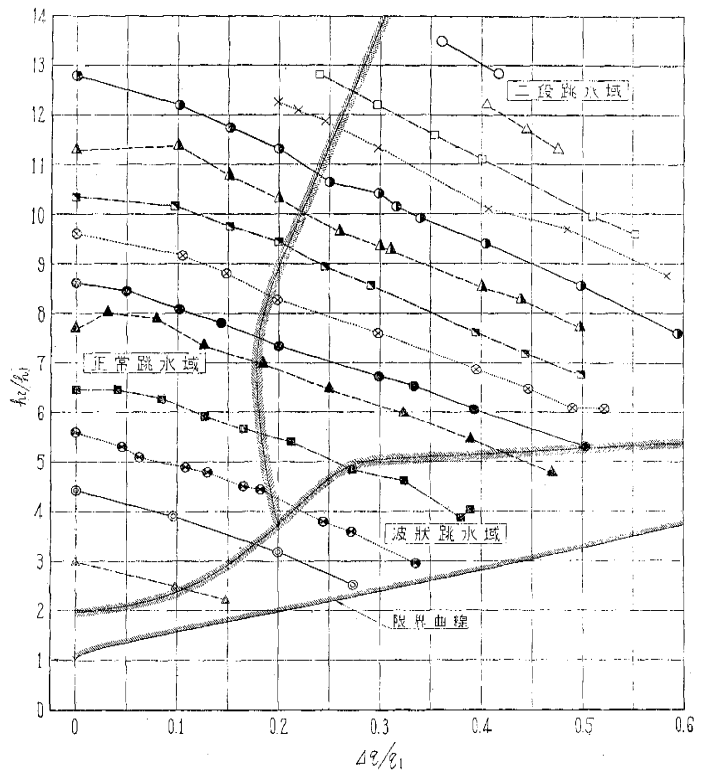


(4) $F_1, \Delta q/q_1$ と h_2/h_1 の関係
 実験によつて得られた $F_1, \Delta q/q_1$ と h_2/h_1 との関係を図-3 にプロットしたが, 同図より実験値は筆者の理論解とほぼ一致していることが言える。

(5) $q_2, \Delta q/q_1$ と h_2/h_1 の関係
 実験より求められた $q_2, \Delta q/q_1$ と h_2/h_1 (大きい方) との関係を図-11 にプロットした。図-11 の記号は図-10 と同一であり, また同図に記入した限界曲線は (5), (6) 式から F_1 を消去することにより得られる式より計算した。この図より q_2 が一定の場合, $\Delta q/q_1$ が増加する程 h_2/h_1 はほぼ直線的に減少すること, 換言すれば, 跳水を生ずるに必要な下流水深が漸減することを明らかに認めることができる。なお, 図-11 には 3 種の跳水域の存在範囲を示す区分域も記入したが, この図より次の事実を指摘することができる。

i) 同一の h_2/h_1 の場合, $\Delta q/q_1$ が増大する時, 一般に正常跳水域より二段水域に移行する。

図-11 $q_2, \Delta q/q_1$ と h_2/h_1 の関係 (実験値)



ii) h_2/h_1 が小さい場合(本実験の場合にはおおよそ5以下)には, 同一の h_2/h_1 の場合, $\Delta q/q_1$ が増加すると正常跳水域より波状跳水域に移行する。

(6) 跳水長

跳水長を知ることは, 水叩の所要長と直接関連するものであるから甚だ重要なことではあるが, この噴水式水叩の場合には, 前述のように水面形が特異な二段跳水形状を呈することが多いので, この場合の跳水末端を正確に定義するのがやや困難である。しかしここでは一応, 跳水末端とは主流の運動エネルギーが位置のエネルギーに転換されつくした地点として, 二段目の上面最上昇点を跳水末端と定義することにした。

従つて統一上, 正常跳水の場合も特に同じ定義に従うことにしたので, 普通に跳水長と取られている測定に便利な表面渦の長さとは多少異なることになる。なお, 波状跳水の場合には跳水長の定義を行わず, すべて論外におくことにした。図-9において J_E と記入した点, この跳水末端に当る。

まず, 実験により求められたこの J_E までの跳水長 l と $q_2, \Delta q/q_1$ との関係を図-12にプロットしたが, 同図の記号は図-10と同一である。図-12より q_2 が一定の場合, $\Delta q/q_1$ が増すほど跳水長が短減すること, すなわち所要水叩長が短くてすむことが言える。

次に, 跳水長を下流水深で割つた値 l/h_2 と, $q_2, \Delta q/q_1$ との関係を図-13に, またこの l/h_2 と $F_1, \Delta q/q_1$ との関係を図-14にプロットした。

図-13, 14 を吟味することにより, 次の事実を見出すことができる。

i) $\Delta q/q_1 = 0$ の場合には, l/h_2 は 5.0~5.5の範囲にあることが言える(ただし表面渦の長さを l とすれば l/h_2 は 4.5程度である)。

ii) 同一の q_2 の場合, $\Delta q/q_1$ が増すほど, すなわち F_1 が減少するに伴い当初は l/h_2 は減少するが, ある所から逆に増加し始める。この極小点における l/h_2 の値は, 本実験の場合にはおおよそ 4.5~4.9 の範囲にあるが, この極小点はほぼ正常跳水域と二段跳水域の境界付近に当ることがわかつた。

iii) かくして二段跳水域に移行すると, $\Delta q/q_1$ が増加するに伴い (F_1 は減少する), l/h_2 は6程度まで増大してくる。

iv) 従つて, 噴水式水叩の設計に当つては, 正常跳水域と二段跳水域の境界近傍を目途として設計するのが, 噴水量と跳水長との相互関係

図-12 $q_2, \Delta q/q_1$ と跳水長の関係(実験値)

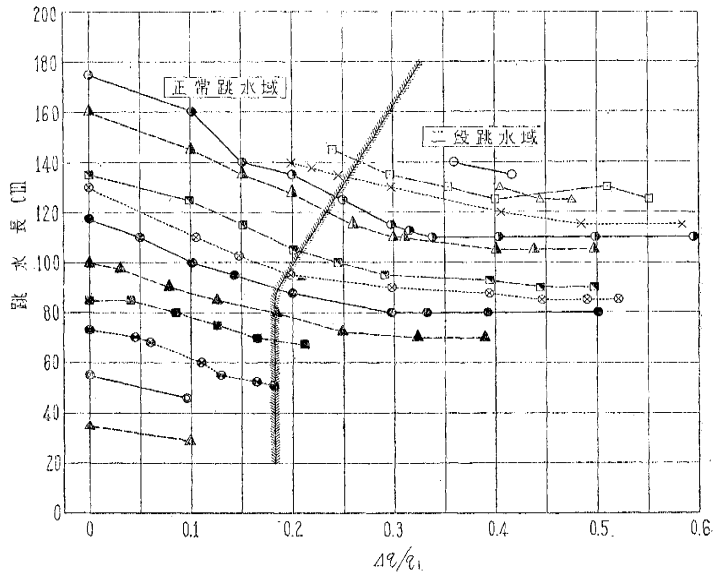
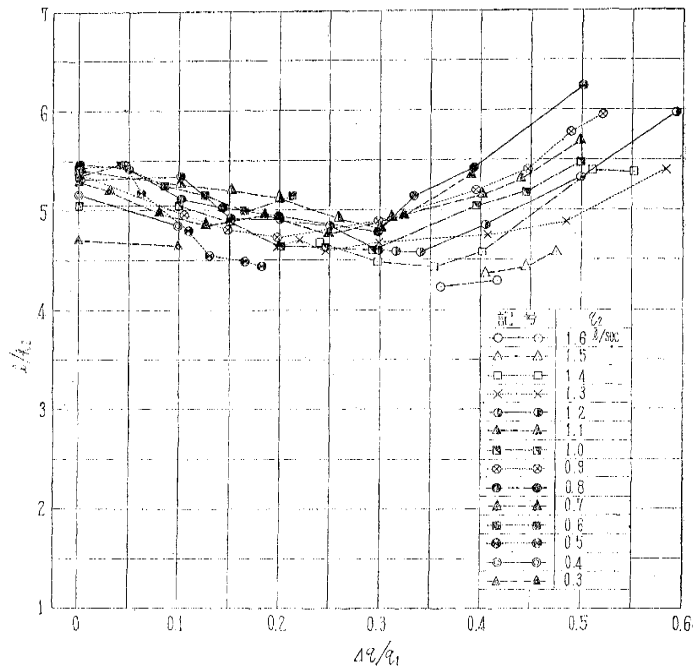


図-13 $q_2, \Delta q/q_1$ と l/h_2 の関係(実験値)



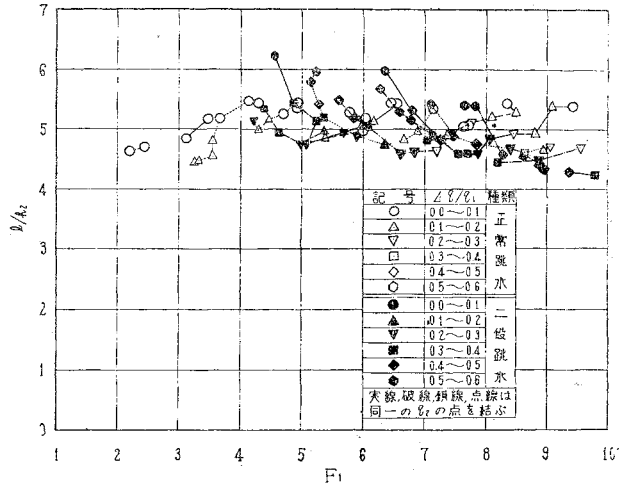
のみに関して言えば、最も合理的であると考えられる。

ただしここに述べた跳水長に関する数値的考察は厳密には本実験の場合に限られるのであつて、噴出水の位置、噴出速度が変れば多少変化することは当然である。従つて噴水式水叩の設計に当つては、その都度実験によつて検証した方が確かであるが、大体の傾向は上述とあまり変わらないであろうと考える。

4. 結語

以上、噴水式水叩の水理を、理論及び実験の両面よりほぼ明らかにすることができた。以上に示した図-3~6と跳水長関係に関する実験結果を適用すれば、噴水式水叩を設計することは一応容易となるはずである。終りに本研究に当り、多大の御助力をいただいた永井圭三郎君、清田市郎君に深く感謝の意を表す。

図-14 F_1 , $4q/q_1$ と l/h_2 の関係 (実験値)



(昭.32.5.6)