

瀑布式減勢装置について

齊 藤 隆, 椿 東 一 郎

1. 序 言

錦川総合開発の一環である徳山発電所に於ては、発電中止時の水を By-pass として山腹に沿って設けられた急勾配の余水路を流下させ、発電所より75m下流の地点に於て、地下約30m下の放水路に流入させる計画である。この Energy 減勢装置として、開発局では瀑布式の立坑が計画され、吾々はこの新しい型式の減勢装置について水理模型実験を行なう機会をもった。実験の結果は発表されているが¹⁾、この減勢装置は管路式立坑のように Cavitation を生ずる恐れがないなど、水理的に優れた長所をもち、水資源の活用が重視され各地で総合開発計画の進められている今日、注目に値する型式の一つであろうと考えられる。本文は前報にひきつづき瀑布式減勢装置の水理的な性質を調べるために行なった一連の実験結果について述べたものである。

さて、瀑布式余水吐の概略は次のようである。まず、山腹に沿う急勾配の余水路を流れる射流の流れは、立坑の前方に設けた水平水路に於て、跳水により緩やかな常流流れに変えられ、四角堰 I より越流して、その Nappe は立坑の相対する一辺に衝突し、その壁に沿って流下する。この際、越流巾は立坑巾より小さくし（実験では6割）越流 Nappe と立坑側壁との間を通して、立坑内は常に大気圧に接するようにしてある。流下した高速流水

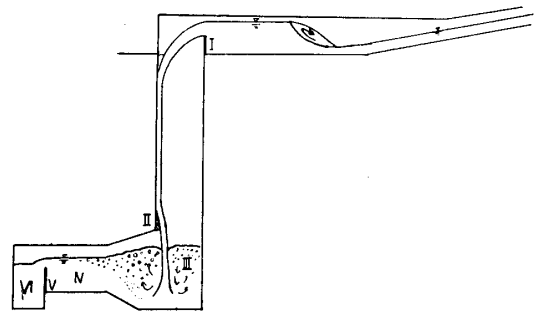


図-1 瀑布式減勢装置概略図

は II の水吻ねによって僅かに方向を変えられ、落下水槽 III に瀑布状をなして突入し、静水槽 IV で整流された後、堰頂が放水路の等流水面と一致する横越流堰 V より放水路 VI に流入する。

この型式に於て、問題となるのは次の諸点であろうと考えられる。すなわち、

(1) 余水路の水平部に於ける跳水およびその後の常流流れを安定させるに足る四角堰の諸元を決め、同時に水面形より水路壁の高さを決めること。

(2) 高速の落下水が落下槽底面に及ぼす衝撃を緩和するために、落下槽に適当な水深を与えること。

(3) 落下槽及び静水槽は jet の突入およびそれに伴う混入気泡のために、横越流堰の越流水位以上に水位の上昇を来すことが予想される。この量を評価し、落下水槽の諸元を決めること。

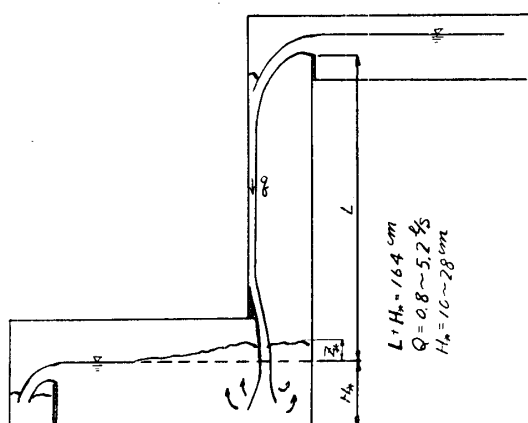
(4) 横越流堰による流入のために生ずる放水路の局所的な水面変化を評価すること。

(5) この種構造物では、放水路が何等かの原因で閉塞した場合を考え、空気抜きを設置するのが普通である。前述したように、本型式では、立坑内は常に大気圧に保たれているが、落下槽と静水槽との間は瀑布状の落下水によって遮断されている。従って放水路が閉塞した状態では、静水槽内の空気は混入気泡の供給のために圧縮され、圧力の上昇を来すことが考えられる。これを避けるために、両水槽を適当な空間によって連結することが必要である。

以上の諸点のうち、(1)及び(4)の問題は計算によって求めることができ、模型実験の結果も計算結果とほぼ一致したものであった。従って、瀑布式余水吐の設計に対しては、高速落下水に関する(2)、(3)の問題及び落下水脈による閉塞の問題(5)が焦点であり、また本文の課題である。

2. 実験装置とその方法

前報の模型実験に於て、落下槽への突入 jet の流れや異常水面上昇高は、落下槽と静水槽との間に設置した静水板や、側方水吻ねや中央桁水吻ね（落下水脈の一部を破り、両水槽の空気交流のために設けたもの）などに殆んど無関係であり、さらに立坑面積や静水槽巾あるいはその形状によっても大きな差異がみられないことを知った。従って本実験には、図一2のように単純化した模型を用い、流量及び横越流堰の越流水深 H_* を系統的に変化させて、主として落下 jet が底面に衝突する際の最大速度 v_* 及び水面の異常上昇高 z_* について系統的な資料を得るようにつとめた。

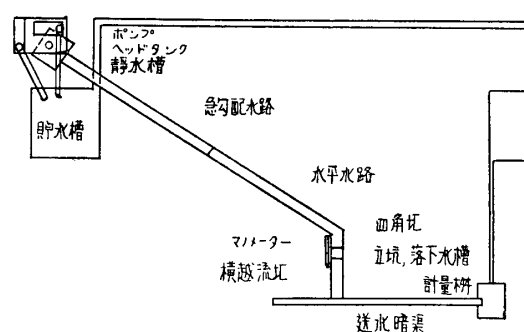


図一2 実験装置概略図

$$L + H_* = 16.4 \text{ cm}$$

$$Q = 0.8 \sim 5.2 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

$$H_* = 1.0 \sim 2.8 \text{ cm}$$



図一3 実験装置配置図

模型はブリキ製で角材によって支持され、立坑、静水槽及び横越流堰の一面は透明な有機ガラスで作られ、内部の流れの様子が観測できるようになっている。なお、実験装置の配置を図一3に示した。

底面の衝撃圧力及び水位を測るために、落下槽及び静水槽の底面に垂直に内径 1.4mm の注射針を計21本壁面に垂直に埋め込み、とくに jet の最大衝突速度を求めるために、jet の衝突部附近の針の密度を大きくするとともに、jet 流中の底部附近に1本の静圧管を挿入して、マンノメーターに導いている。このとき、jet 衝突部附近のマンノメーター水柱は激しく動揺するので、途中で毛細管を入れて動揺を減衰させ、平均値が読みとれる様にした。つぎに、水面も激しく動揺し、且つしぶきが飛ぶので水深の正確な読みとりは不可能であった為、精度は望めないのであるが硝子面に於ける最大、最少値の平均より、水位の異常上昇高 z_* を求めた。なお外径 1mm のピトー総圧管と静圧管を並べて jet 流中に挿入し、横方向に移動させて、jet 流が落下槽に突入した後の流れの様子の変化をしらべた。

3. 実験結果

落下槽及び静水槽に於ける水面形と底部の圧力測定孔より取り出したマンノメーターの水柱高を示したものが図一4である。マンノメーター水位は jet の底面衝突部に於てはほぼ総圧を表わし、垂直流の顕著でない他の部分ではその点の静圧を示すものと考えられるが、静水槽下流部ではほぼ水面に等しく、底面衝突部を除く落下水槽入口では平均水面よりかなり低い。これは、写真一1に示すように、落下水槽がおびただしい混入気泡に満されるためである。いま、簡単に衝突部右方の落下水槽に於ける圧力が静水圧分布に従うと仮定すると、マンノメーター水深 h_m と平均水深 h との比は気泡の混合率を c 、空気及び水の密度を ρ_a , ρ として次式

$$\frac{h_m}{h} = (1 - c) + c\rho_a \div \rho = 1 - c \quad (1)$$

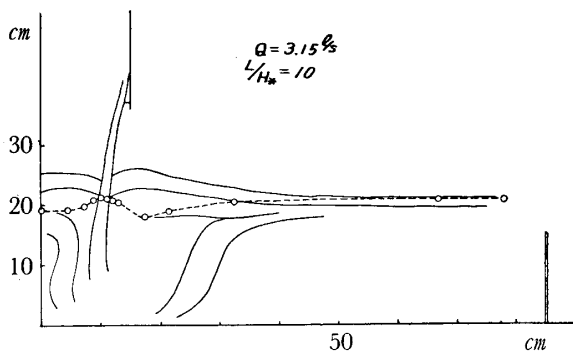


図-4(a) 静水槽, 落下槽, 水面形及び
マンメーター高

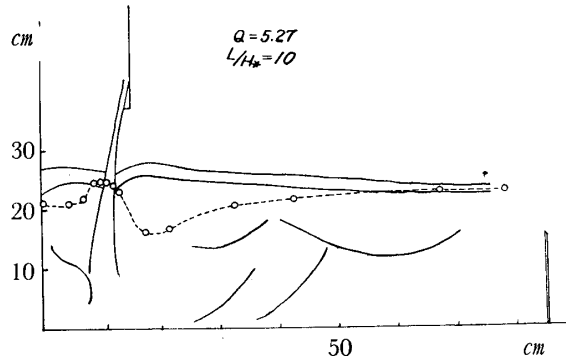


図-4(b) 静水槽, 落下槽, 水面形及び
マンメーター高

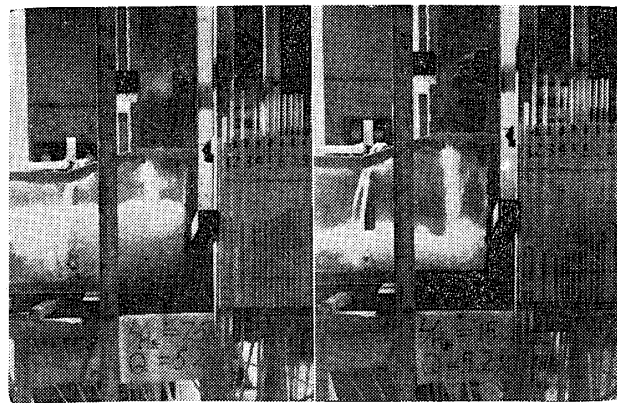


写真-1(a)

写真-1(b)

で与えられ, 気泡混合率の概略値を見積ることができる。

図-5は $L/H_* = 7.5$, 流量 $Q = 3.21/s$ の場合について, 落下槽中の各深さに於ける横方向の流速分布を示したものである。図より jet 流は落下槽に進入するにつれて, 激しい乱れの攪乱作用をうけ, 最大速度を減少させると同時に jet の巾が増加してゆくことがわかる。

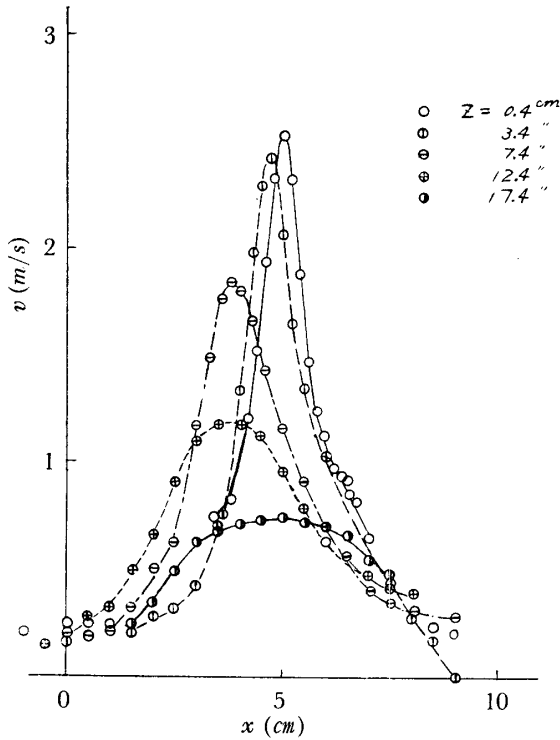
さて, 静止流体中に噴出する jet の流れについては多くの研究があり, とくに M.L. Albertson 等によって詳しい実験が行なわれている。それによると噴流は zone of flow establishment と zone of established flow の2領域に分けられ, とくに巾 B の slot より噴出する2次元噴流の established flow の領域における最大速度及び速度分布は, slot における速度を v_0 とし, 流れの方向に x 軸, それに垂直に y 軸をとるとき, それぞれ次式

$$\frac{v_{\max}}{v_0} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\pi} c_1} \frac{B_0}{x}} \quad (2)$$

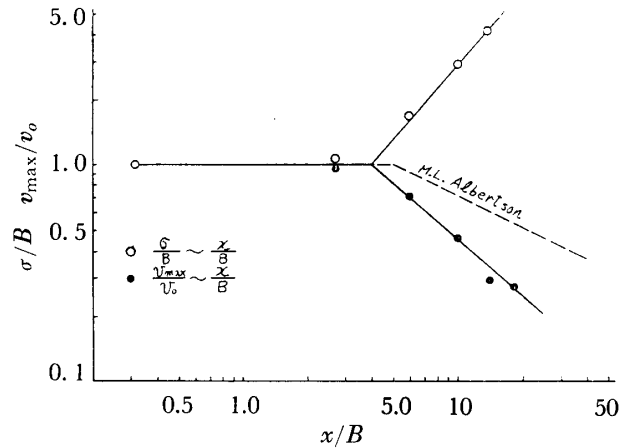
$$\frac{v}{v_{\max}} = \exp\left\{-\frac{y^2}{2c_1^2 x^2}\right\} = \exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

で表わされる。ここに, σ は噴流の巾を示し, 実験によると $\sigma/x = c_1 = 0.109$ である。

いま, 図-5の流速分布が近似的に誤差曲線(3)式で表わされると考え, $v/v_{\max} = 0.605$ に対応する y の値より σ を求める。また, 2次元噴流との関係を求めるために, 水表面における鋭い peak をもつ誤差曲線を速度 $v_0 (= v_{\max})$, 巾 $B = 2\sigma$ の一様流でおきかえ, σ/B 及び v_{\max}/v_0 と x/B との関係プロットすると図-6の実線のようになる。なお, 同図には自由噴流の場合の実験結果も記入されている。図から明らかなように, 自由噴流程明確ではないが, σ/B 及び v_{\max}/v_0 は浸入深さ x/B によって zone of flow establishment と zone of established flow の



図一五 落下槽内の jet の横方向流速分布

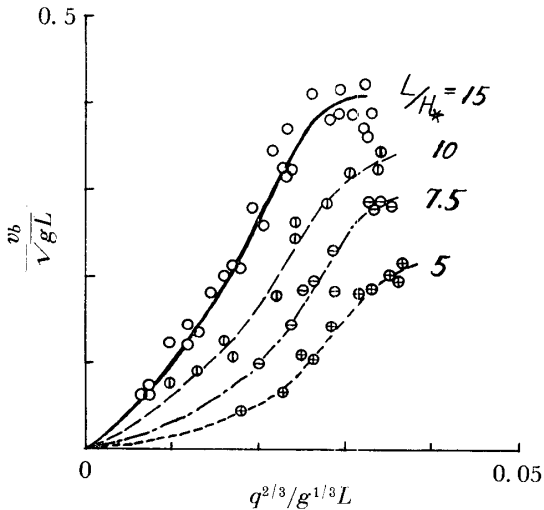


図一六 落下槽内の jet 最大流速分布および jet 巾の変化

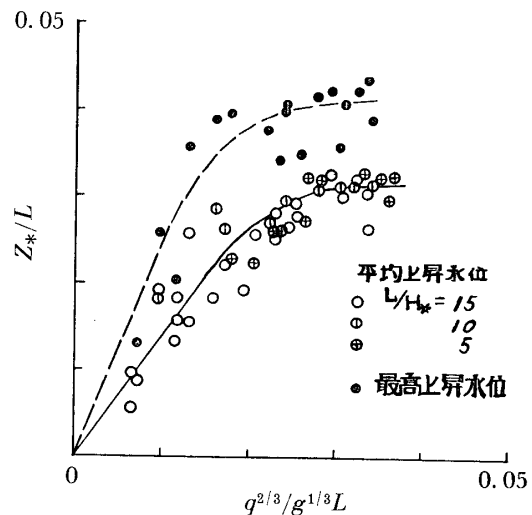
2つに分けることができ、両者の限界は $x/B \doteq 4.0$ の附近にある。また v_{max}/v_0 の減少の割合及び噴流巾 σ/B の拡がりの割合は自由噴流に較べてかなり著しい。これは jet 流が底面との接触によって左右に分かれて、上昇流を誘起することと混入気泡とのために、乱れによる渦動粘性の作用が強められていることによるものと思われる。

このように、突入 jet の性質は複雑であるが、瀑布式減勢装置の設計に於て問題となるのは内部の流れよりも jet 流の衝突速度 v_b と水面の異常上昇高 z_* である。これらの量及び気泡混合率 c に影響を及ぼす主な要素は、立坑を流下する単位巾流量 q 、上方堰より静水槽越流水位までの距離 L 、及び落下水槽の高さ H_* であると考えられる。さらに現象が重力の作用下に行なわれることを考慮すると、次元解析より次の関係が予想される。

$$\frac{v_b}{\sqrt{gL}}, \frac{z_*}{L}, c = f\left(\frac{q^{2/3}}{g^{1/3}L}, \frac{L}{H_*}\right) \quad (4)$$



図一七 jet 衝突流速



図一八 落下槽異常上昇水位

実験結果を整理したものが、図-7, 8であって、 v_b/\sqrt{gL} の値は $q^{2/3}/g^{1/3}L$ の値とともに増加し、同一の横軸に対しては L/H_* が小さい程小さい、これは jet の浸入深さが増す程激しい乱れのために底面衝激力が緩和される模様を明瞭に表わされたものである。また z_*/L の値は $q^{2/3}/g^{1/3}L$ とともに増加するが、その値が0.03を越えるほぼ $z_*/L=0.03$ に収斂し、 L/H_* は大きな影響を持たない様に思われる。なお、図は平均上昇水位であるが、実際には水面動揺が著しく、静水槽入口部の壁の高さは平均上昇水位に水面動揺を加えて決める必要があるので、同図中には黒円で最高上昇水位を記入してある。

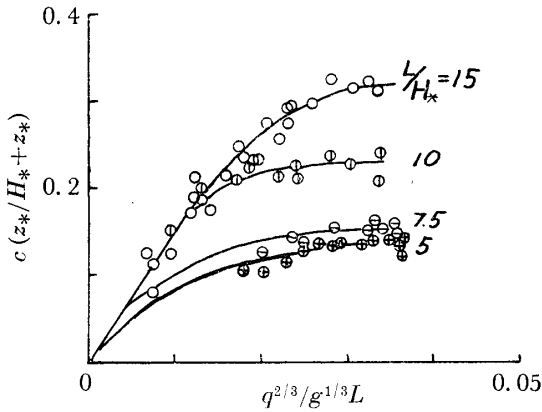


図-9 落下槽気泡混合率

最後に前述の(1)式より混合率 c を計算した結果が図-9である。気泡混合率 c は $q^{2/3}/g^{1/3}L$ の値とともに増加し、同一横軸に対して L/H_* が大きい程大きい。これは落下槽水深が同じならば落下高の大きい程気泡混合率が大きくなることを表わしている。

4. 閉塞実験

序言の(5)に述べたように、放水路閉塞時における静水槽室の圧力上昇については、落下水によって連行される空気量が重要な役割をしめることは云う迄もない。然しながら、この問題について一般的な考察を加えることは困難であるから、ここでは徳山発電所余水路1/20縮尺模型($Q=3.15\text{ l/s}$, $L+H_*=149\text{ cm}$)について行なった実験と空気抜き容積の決め方について述べよう。

実験には、送水路下流端の堰を操作して送水路を満流の状態に保ち、静水槽上面を径4mmφおよび7mmφの多数の孔をうがった蓋で覆い、隙間がないようにエバーシールで密閉する。まず、孔面積が大きいときには、この孔を通じて静水槽の空気圧はほぼ大気圧に等しい。孔を順次つぶし、孔面積を減少させるにつれて、静水室の空気圧 p (ゲージ圧)は上昇し、静水室底からとり出したマンロー水面と静水室水面との差が、静水室空気の圧力水頭($p/\rho g$; 水柱)を与える。このようにして $p/\rho g$ と孔面積 A との関係をプロットしたものが図-10である。

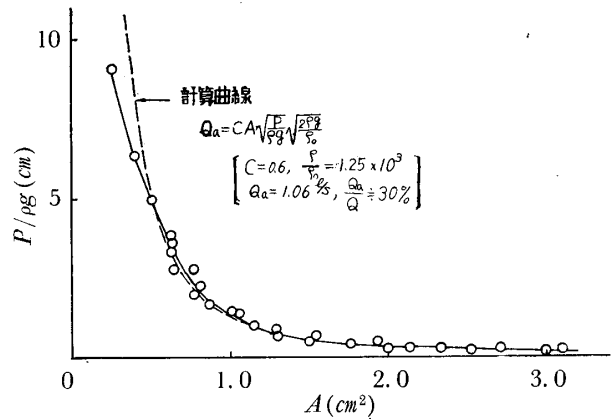


図-10 閉塞実験

定常状態を考えると、落下 jet によって連行発生し、落下槽から静水槽に流入する空気量 Q_a は、静水槽と大気との圧力差により面積 A の孔を通じて逃げてゆく空気量に等しい。従って、空気の密度を ρ_a 、空気の噴出速度を v_a 、その縮流係数を C とすると、

$$Q_a = CA v_a = CA \sqrt{\frac{2p}{\rho_a}} = CA \sqrt{\frac{p}{\rho g}} \sqrt{\frac{2\rho g}{\rho_a}} \quad (5)$$

となる。いま、 $C=0.6$, $g=980\text{ cm/s}^2$, $\rho_a/\rho=1.25 \times 10^{-3}$ とおき、図-10より $A=0.5\text{ cm}^2$ のときの圧力測定値 $p/\rho g=5\text{ cm}$ を用いて Q_a を逆算すると、 $Q_a=1.06\text{ l/s}$ となり、水との流量比は

$Q_a/Q \doteq 30\%$ となる。つぎに、この Q_a の値を用いて $p/\rho g$ と A との関係を(4)式より計算した結果が図-4の点線であって、 $A > 0.5\text{cm}^2$ の計算結果は実測値とよく一致し、 $A < 0.5\text{cm}^2$ では実測値に較べて大きい。 $A < 0.5\text{cm}^2$ におけるこの不一致は、静水室圧力が大きくなると圧力差のために落下水脈がおされ間歇的に流入空気量 Q_a の一部が立坑を通じて外部に逃げるためと考えられる。さて、図-10の実験曲線及び(4)式によると、圧力上昇は A が小さくなると急激に上昇し、 A がある値以上になれば無視して差支えない。この限界として、例えば $A = 2\text{cm}^2$ とおこう。模型と原型とで Q_a/Q の値が相似に保たれるものとする、この1/20模型の値は原型に換算して $A_p = 0.08\text{m}^2$ にあたる。

以上のことから、この型の余水吐の空気抜きは連結すべき両槽間の距離が短かく、かつその容積も大きいものではないことが知れる。中央水吻ね、側壁水吻ねなどにより落下水槽巾を立坑巾より大きく作るなどして簡単に目的を達することができよう。

終わりに、この特異な問題に対して研究の機会を与えられた錦川総合開発局長属秀三氏、徳山工事々務所長寺坂勝氏及び同所の方々に厚く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 山口県錦川総合開発局 瀑布式減勢装置の水理模型実験
- 2) M. L. Albertyson, Y. B. Dai, R. A. Jensen and H. Rouse.; Diffusion of submerged jet proc. A. S. C. E.