

鉛直落下水を伴う跳水の減勢効果について

ON ENERGY DISSIPATION DUE TO HYDRAULIC JUMP
ACOMPANIED WITH A VERTICAL JET

村重 宏*・福井 吉孝**・吉川 秀夫***

By Hiroshi MURASHIGE, Yoshitaka FUKUI and Hideo KIKKAWA

1. まえがき

ダムの洪水吐および河川の水門からの高速流出の減勢工として跳水現象を利用することが広く行われている。この跳水をそれぞれの水理条件に対して強制的に起こさせるため、また跳水を起こすように条件を整えるために種々の方法が研究され、また実用化されており、さらに研究を行う必要はないように思われる。

しかし、最近では水資源開発のために河口堰が設けられ、干潮時にも水門を開いて放流する必要が生じたり、また遊水地による洪水制御機能を増すために排水門扉を開いて洪水を地内に流入させることが試みられるようになってきた。このような場合には、水門の下流水位が上流側水位に対して非常に低いところへ、水門から射流状態で放流しなくてはならないことが起こる。このとき、水門からの射流を跳水により減勢するためには、水門下流側エプロンを水門敷高より相当低く設けるか、あるいは、相当な高さのシルを設けるかする以外にはない。また、射流のまま高速流で放流する場合には河床洗掘により水門自体の安全性が損なわれたり、また水門下流側の河岸あるいは構造物に損害を与えることになる。安全性確保のためには上述の減勢工は大部分の状況下では実施は困難であるし、また実施可能としても多額の費用を要するであろう。

このように射流に対して下流水深が低すぎる場合に減勢を経済的かつ効率的に行う一つの方法として、本文では一般的に水平方向に流れる射流に対して鉛直方向に水を落下させることにより跳水を生じさせ、この方法がこのような場合に有効な減勢工であるかどうかについて、理論的、実験的に検討を行う。

この考え方に似た方法として、ダム底部に噴出管を設置して、ダム頂からの余水吐の流れに、水叩部から噴流を鉛直上方に噴き出すことにより、越流水の減勢を行う方法が、すでに荒木²⁾により研究されている。

しかし、この方法では越流流れに対して水路床に凹みを作ることになり、噴出流の少ない場合にはキャビテーションを生じる危険がある。さらに、この噴出流を作るための装置に費用がかかり、また高圧ゲートを設置して、流量調節を行わなければならないから、技術的にも経済的にも問題がある。

また、E.H. Wilson³⁾も、同様の研究を行っているが、上の場合と同様、多額の費用を要して、実用上、問題がある。

これらの考え方は、跳水内およびその下流で水位を上げることにより跳水を起こそうというものである。しかしながら、もし上流流出水のフルード数が大きくなり、噴出部が射流である場合、噴出流の動水圧を上げるとは困難である。したがって、射流内に水を噴出するときは、噴出流量を大きくすることは底面圧を上げることには有効ではなく、特に下流水位が非常に低いときには、あまり有効ではなくなる。

また、下方より水を噴出するときには底面圧が低くなり、流れの separation を引き起こす場合も生じ、流れが不安定になりやすい欠点もある。

そこで、ダムおよび水門に適用でき、かつ、比較的経済的に、確実に減勢する方法として、本文に示す、落下水を利用して減勢する方法を考えた。たとえば、ダムの場合には、越流型余水吐の越流水をダムの下流面に、写真-1のようなジャンプ台型の突起を部分的に設けることにより、構造的にはダム本体に危険を与えないで簡単に落下水を作ることができるし、その他種々の実用的方法が考えられるであろう。

前述の2つの研究では、主として跳水による減勢効果を主眼としているが、ここでは、それはもちろんのこ

* 学生会員 早稲田大学理工学部大学院

** 正会員 工修 東洋大学講師 工学部

*** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部



写真-1 ダムにおける鉛直落下水流式減勢工の実用例

と、跳水を生じない場合、および潜り流出（あるいは噴流）に対しても有効な減勢を考えた。当然のことながら、理論は両者の理論と重複する点もあるが、説明の都合上、あえて重複を避けなかった。

本研究の基本的な考え方は射流の方向に対して運動量をもたない流量を加えることにより、開水路の横流入のエネルギー損失と同様の効果を期待するもので、射流とそれに直角方向の落下水によって生じる跳水のエネルギー損失、およびその現象の減勢工としての特性を明らかにしようとするものである。

これに幾分似た考え方をを用いた方法としては、ダムからの2つの ski jump spillway の放流水を空中で衝突させてエネルギー減殺を行う方法もある⁹⁾。

2. 理論的考察

射流がその流れの方向に運動量をもたない水を連行する場合について、運動量保存の法則を用いて跳水を生ずる条件、ならびに跳水に伴うエネルギー損失を理論的に検討してみる。

(1) 跳水の共役水深関係

ここでは二次元流れを取り扱い、図-1 に示す概念図に従って、図中の断面 I、II について運動量保存則を適用する。ただし、計算の簡便化のために、水路は水平床として、断面 I、II においては一様流速分布、静水圧分布であり、断面 I ~ II 間での底面摩擦損失は無視し得るものと仮定する。したがって、

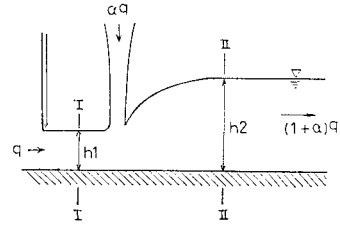


図-1 跳水の概念図 (I)

$$\rho g \frac{h_1^2}{2} + \frac{\rho q^2}{h_1} = \rho g \frac{h_2^2}{2} + \rho(1+\alpha)^2 \frac{q^2}{h_2} \dots\dots (1)$$

となる。ここに、 ρ は流体の密度、 q は単位幅当たりの水門あるいはダムよりの流出流量であり、 α は単位幅当たりの落下水流量と q との比であり、 αq は単位幅当たりの落下水流量である。

跳水前 (断面 I) の流れのフルード数 Fr_1 を用いると、式 (1) は次のように変形される。

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3 - (2 Fr_1^2 + 1) \left(\frac{h_2}{h_1}\right) + 2 Fr_1^2 (1 + \alpha)^2 = 0 \dots\dots (2)$$

式 (2) において $\alpha=0$ とすれば、

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} (-1 + \sqrt{1 + 8 Fr_1^2}) \dots\dots (3)$$

となり、式 (3) はよく知られた自由跳水の共役水深の関係を表わす式である。式 (2) より 図-2 に示す落下水を伴う場合の Fr_1 と h_2/h_1 の関係が得られる。図中 $\alpha=0$ の場合は落下水流のない普通の自由跳水の関係を表わす。図-2 より、射流に落下水流を加えることにより、落下水流のない自由跳水の場合に比して、下流 (断面 II) において流量が増大しているにもかかわらずより低い共役水深 h_2 で跳水を起こすことが知られる。言い換えると、同じ h_1, h_2 に対して射流部のフルード数 Fr_1 を大きくすることができる。また、 α の値が大きくなるに従い、射流部の Fr_1 を大きくしないと跳水しなくなり、たとえば $\alpha=1.0$ の場合には Fr_1 が 7 以下では潜り跳水となってしまうことが知られる。

一方、下流水深が共役水深より低くて射流のまま落下水流部を通過する場合にも落下水流により射流水深 h_2 を大きくすることができる。なお、図中には下流側のフルード数 Fr_2 が限界値、すなわち $Fr_2=1$

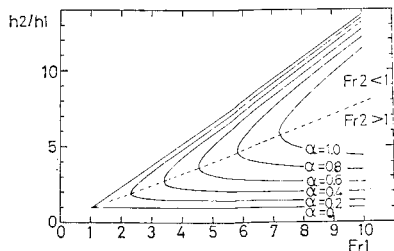


図-2 h_2/h_1 と Fr_1 との関係

の線が破線で示されている。

(2) エネルギー損失

図-1 に示す断面 I, II 間の比エネルギーの損失を上記の関係を用いて調べる。比エネルギーの損失 ΔE は次式で与えられる。

$$\Delta E = \left(\frac{q^2}{2gh_1^2} + h_1 \right) - \left[\frac{\{(1+\alpha)q\}^2}{2gh_2^2} + h_2 \right] \dots (4)$$

式(1)の関係を用いて、式(4)中の q を消去すれば

$$\Delta E = \frac{(h_2+h_1)^2(h_2-h_1)^2}{4h_1h_2\{h_2-(1+\alpha)^2h_1\}} - (h_2-h_1) \dots (5)$$

となり、これにより潜水跳水以外の完全跳水および射流のまま流下する場合のエネルギー損失 ΔE を求めることができる。

ここで、断面 I における比エネルギー E_1

$$E_1 = \frac{q^2}{2gh_1^2} + h_1 \dots (6)$$

を基準にして式(5)を無次元化すると次式が得られる。

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{1}{2+Fr_1^2} \left[2 \left(1 - \frac{h_2}{h_1} \right) + Fr_1^2 \left\{ 1 - (1+\alpha)^2 \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^2 \right\} \right] \dots (7)$$

式(5)より α が大きくなるに従い ΔE は大きくなり、式(7)からは $\Delta E/E_1$ は小さくなると思われるが、 α の変化に伴い h_2/h_1 も変化するので ΔE の α についての関係は明瞭には把握しにくい。そこで、跳水を起こす場合には式(2)の関係を用いて式(7)の計算を行い、 Fr_1 と $\Delta E/E_1$ との関係を図示すると図-3の実線のようになる。これより、普通の自由跳水 ($\alpha=0$ の場合) に比べて落下水量が多いほどエネルギー損失が大きくなるが、落水水による $\Delta E/E_1$ の増加分はあまり大きくないことが知られる。

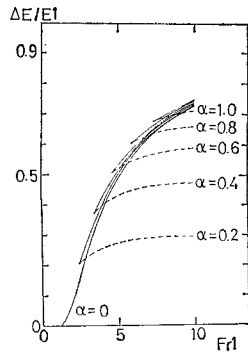


図-3 $\Delta E/E_1$ と Fr_1 との関係

(3) 上流よりの全流下流量の一部を鉛直落下させる場合

以上、(1)、(2) で述べた計算は水平方向の射流に対して別に上方から水を補給して強制的に跳水を起こさせる場合についてである。しかし、実用上はダムもしくはゲート上流より流下する流量あるいは貯留水を放流することになり、別に落水水の補給があるとは限らないので、総放流量を水平射流と鉛直落水流に分けて放流する必要がある。このとき跳水がどのようになるかを知ってお

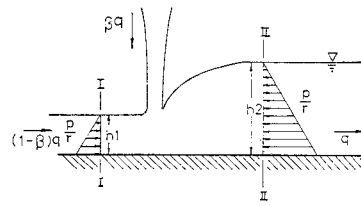


図-4 跳水の概念図 (II)

くことが便利である。すなわち、この場合には図-4に示すような概念で考える必要がある。

このとき、 $\beta = \frac{\alpha}{1+\alpha}$ の関係を用いて、 α を β に換算すれば前述の式ならびに図はすべてそのまま用いることができることは明らかである。ただし、この場合には上流の射流部のフルード数 Fr_1 および比エネルギー E_1 は β の値により変化するので、図-3 の関係を用いることは不便である。

この場合、跳水後の常流部における流量が β の値いかにかわらず一定であるので、断面 II における比エネルギー E_2 、およびフルード数 Fr_2 を用いる方が便利である。

すなわち、式(7)と同様の計算を行うと

$$\frac{\Delta E}{E_2} = \frac{2 \left(\frac{h_1}{h_2} \right) - 2 + Fr_2^2 \left\{ (1-\beta)^2 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 - 1 \right\}}{2 + Fr_2^2} \dots (8)$$

となり、共役水深の関係および Fr_1 と Fr_2 の関係をこれに代入して、 $\Delta E/E_2$ と Fr_2 の関係を計算すると図-5に示すようになる。同図より Fr_2 が小さくなると $\Delta E/E_2$ は急激に増加する傾向にあり、また落下流量の比率が大きいほどエネルギー損失が大きくなるのがわかる。図-3 と比較すると、この表示の方が $\Delta E/E_2$ の変化が顕著に現われるが、これは E_2 が E_1 に比して相当小さく、また跳水を起こす場合には Fr_1 の変化が Fr_2 の変化に比して著しいためである。なお、参考までに跳水前後のフルード数の関係は次式と式(2)との連立方程

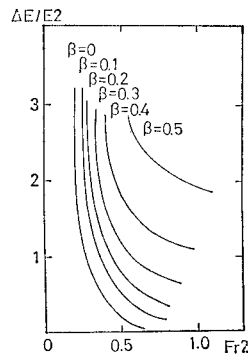


図-5 $\Delta E/E_2$ と Fr_2 との関係

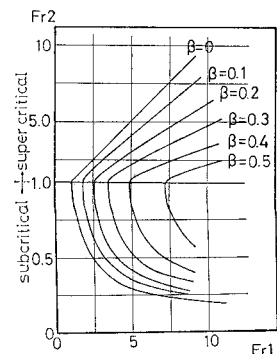


図-6 Fr_1 と Fr_2 との関係

式の解として与えられる。

$$Fr_2 = (1 + \alpha) Fr_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{-3/2} = \frac{Fr_1}{1 - \beta} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{-3/2} \dots\dots\dots (9)$$

式(2)と式(9)を用いて Fr_1 と Fr_2 の関係を求めると図-6に示すようになる。同図中 Fr_2 についてはみやすさのため、射流と常流の場合ではスケールを変えてある。図-6より跳水後のフルード数を小さくするためには射流部のフルード数 Fr_1 を落水のない場合より大きくする必要のあることがわかる。特に鉛直落下流量の割合が大きくなると、 Fr_1 が大きくなると Fr_2 は小さくならないし、また Fr_2 の小さくなる割合も小さく、 Fr_1 が十分大きくない場合には潜り跳水あるいは潜り流出になってしまうことが知られる。

(4) 跳水の共役水深関係を満足しない場合

以上は水平射流に対し鉛直落水水を補給して水流の落水地点近傍で完全跳水を生ずる場合について取り扱ったが、図-2あるいは図-6よりわかるとおり、 $Fr_2 > 1$ の場合には射流のまま落水地点を通過してしまうし、また下流が常流の場合でもそれぞれの β に対して Fr_1 が共役関係を満足するものより小さすぎれば跳水はおぼれてしまって潜り跳水あるいは潜り流出となってしまう。減勢工としては、 $\alpha=0$ の場合に跳水を生じない場合でも落水水を加えることにより、強制完全跳水を起こさせ、エネルギーを減殺することができることを利用しようとするのであるが、それ以外の場合にどのようなかを知っておくことは種々の状況下で有効にエネルギー減殺を行うのに必要であると考えられるので、ここで考察をしておく。

a) 跳水を起こさず、射流のまま通過する場合

一般に自由跳水を生じている場合に下流水位を前述の共役関係で定まるものよりも低くすると、跳水位置は下流に移動し、射流域での流れの底面摩擦によりエネルギー損失を生じ、射流水深を増し、フルード数が小さくなって、下流の常流水深と跳水の共役関係に射流水深がなった所で跳水を生じる。しかし、鉛直落水のある場合には水平方向に運動量をもたない落水水を水平方向の射流が連行すること、および底面摩擦損失により、摩擦損失だけによるものより短距離で水深が増大し、小さいフルード数になり、下流の常流のフルード数と共役関係になる所で跳水を起こすことになる。したがって、下流の常流水深が流量に対し一義的に定まる場合には、下流常流水深に対して共役な落水地点通過後の射流水深となるよう β を定めて、下流の常流に対して跳水を起こさせることができる。このようにすることにより射流区間の長さを落水水を伴わない場合よりも短縮することがで

き、エプロン長さを短縮することができる。

この場合の比エネルギーの損失は式(2)により下流が射流の場合の h_2 を求め、計算することができ、その結果を図-3に破線で示してある。同図より、跳水しないで射流のまま落水地点を通過する場合には、同じ条件で跳水を起こす場合に比べて比エネルギーの損失は Fr_1 が大きいときには相当小さくなり、減勢効果は小さいが、落水水なしで射流のまま通過するものに比べて落水水の連行により相当なエネルギー損失を生じていることがわかる。すなわち、落水水の連行により、落水水地点を通過した射流は、フルード数が小さくなり、さらに水路床抵抗等により射流水深が増大し、ついには下流の常流水深と共役になった地点で跳水を起こす。したがって、落水水なしに水路床の摩擦抵抗等のみにより跳水を起こす場合に比べて、エプロン長さを短くできる利点がある。

b) 潜り跳水の場合

水門からの流出水は下流水深が高い場合には水門下流に射流が現われず、潜り流出になってしまう。式(3)の関係を満足する自由跳水の場合に水門直下流に鉛直落水水を加えると、跳水は上流に移動し潜り流出になる。実際上はこのような場合も発生し、そのときに減勢が有効に働くかどうかを明らかにする必要があり、理論的に調べてみる。

潜り流出あるいは潜り跳水は図-7に示す概念図によって、次のように現象を分けて考えることができる。水門上流の貯留水の水深を H_0 、水門開度を a とし、下流での総単位幅流量を q とする。水門よりの流出水が露出射流であれば、門扉下端より縮流を起こし、水門よりある距離の所で縮脈を完了し、水面勾配は0となる。この縮脈の割合は流体力学でよく知られているように

$$h_0/a = \frac{\pi}{2 + \pi} = 0.611 \dots\dots\dots (10)$$

である³⁾。潜り流出の場合も流出水脈の表面に沿っての圧力差はほとんどなく、かつ水門より最終縮脈までの距離が短いので、潜り流出のときの流出水脈の形状は露出射流の場合とほとんど同じと考えてよいであろう。その後は底面摩擦および流出水脈と上層の水との間のせん断

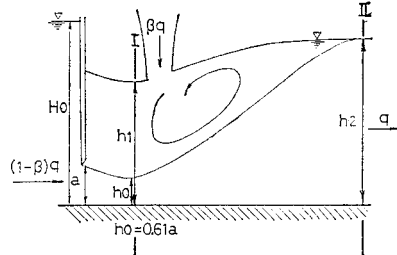


図-7 潜り跳水の概念図 (III)

力により徐々に流出水脈の水深が増し、図-7 に示すようになるものと考えられる。

したがって、単位幅当たりの流出流量 $(1-\beta)q$ は Bernoulli の定理を用いて、

$$(1-\beta)q = 0.61 a \sqrt{2g(H_0 - h_1)} \dots\dots\dots (11)$$

により求めることができる。

次に、最終縮脈の位置に断面 I、流れが鉛直方向に一樣になる位置に断面 II をとり (図-7 参照)、I、II 断面間で運動量保存則を適用すれば、前と同様にして

$$\frac{h_1}{h_2} = \sqrt{1 + 2 Fr_2^2 - 2 Fr_2^2 \frac{(1-\beta)^2 h_2}{0.61 a}} \dots\dots\dots (12)$$

となり、 h_1 と h_2 との関係が得られる。これより、 h_1/h_2 は普通の自由跳水の場合と異なり、 Fr_2 (あるいは Fr_1) と β (あるいは a) によるほか、 h_2/a の比に関係することが知られる。ただし、断面 I において h_0 の部分で一樣流速分布をもち、その上層の水は流速 0 と仮定しているが、実際には上層には循環流があり、流出水脈は上層の水および水路底面によるせん断力を受けるので、上記の結果は実際とは多少異なるものと思われる。

次に、水門よりの流出水のもつ全エネルギー \dot{E}_1 および断面 II の全流量のもつエネルギー \dot{E}_2 を計算すると

$$\dot{E}_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho(1-\beta)^3 q^3}{(0.61 a)^2} + \rho g h_1 (1-\beta) q \dots\dots\dots (13)$$

$$\dot{E}_2 = \frac{1}{2} \frac{\rho q^3}{h_2^2} + \rho g h_2 q \dots\dots\dots (14)$$

となり、 $\Delta \dot{E} = \dot{E}_1 - \dot{E}_2$ とし、式 (12) の関係を用いれば

$$\frac{\Delta \dot{E}}{\dot{E}_1} = 1 - \frac{Fr_2^2 + 2}{\left[(1-\beta)^3 Fr_2^2 \left\{ \frac{h_2}{0.61 a} \right\}^2 + 2(1-\beta) \right] \times \sqrt{1 + 2 Fr_2^2 - \frac{2 Fr_2^2}{0.61 a} h_2 (1-\beta)^2}} \dots\dots\dots (15)$$

となる。これを $h_2/0.61 a = 3$ および 5 について、 Fr_2 および β を与えて計算すれば図-8 (a), (b) に示すようになる。同図には縦軸を $\Delta \dot{E}/\dot{E}_1$ のほか $\Delta \dot{E}/\dot{E}_2$ についても表示してある。これは \dot{E}_1 が β の値により変動するので、 β により変化のない \dot{E}_2 の方がより使いやすいためである。

図-8 によれば Fr_2 によってエネルギー減殺の面から最も有効な β の値があること、ならびに h_2/a の値が大きいほど減勢工としては有効であることが知られる。

なお、上述の議論は水平射流に対し鉛直方向よりの落下水のある場合について行われたが、実際には必ずしも鉛直とは限らず、鉛直方向とある角度をもって落下水が加えられることもあり得る。この場合には水平射流に対し落下水が正あるいは負の運動量を与えることになるが、落下水の射流に対する入射角がわかれば上記の考え方により容易に解析することができることを付記しておく。

3. 実験結果とその考察

以上の理論的考察を実験により確かめるとともに、鉛直落下水を伴う跳水の水利特性を実験により明らかにする。

実験の水路は水平床で、長さ 2 m、幅 7 cm、高さ 60 cm のアクリル製である。流量および水門の開度 a を調節することにより、種々のフルード数の射流をつくり、水路下流端にせきを設け、下流水深を調節する。これにより、いろいろな型の跳水が生じるが、そのおもな型については次に述べる。なお、全体流量は、水路下流端に接続したタンクについている三角せきにより、また落下水流量は、導管に接続した流量計により測定した。なお、落下水地点は、水門より下流 30 cm の位置である。

上流側の射流のフルード数、鉛直落下水流量 aq 、および下流側常流水深の組合せにより、水門よりの流出流量 q に対して図-9 に示すような跳水の型が発生する。(a) の型では下流の常流水深 h_3 が低いため、水門より流出した射流に落下水が合流して射流のまま下流し、落下水の連行のため射流水深が増大し、射流水深 h_2 になった後、下流常流水深 h_3 と共役関係になり跳水を起こすもので、この跳水は普通の自由跳水である。この型は 3. (4) a) において述べたもので、実際には落下水の連行によるエネルギー損失と底面および側壁による摩擦損失により射流水深は急激に上昇する。(b) の型では落下水の地点で跳水を開始し、減勢工としては最も望ましいものである。(c) の型では落下水流の水路底面への衝突による底面における圧力上昇により、落下水の地点より上流で跳水を開始し、落下水の地点直後で水面低下を生じ、その後急激に水面上昇を生ずる。これは水門の流出点よりある程度下流で落下水を合流させ、かつ落下水流の流速の大きいときに生じ、下流常流水深が低い場合には落下水流の合流後射流に戻ることもある。下流の常流水深 h_2 が式 (2) に示す共役関係にあるときは、理論的には図に示すように I、II 断面をとれば (b) の場合とま

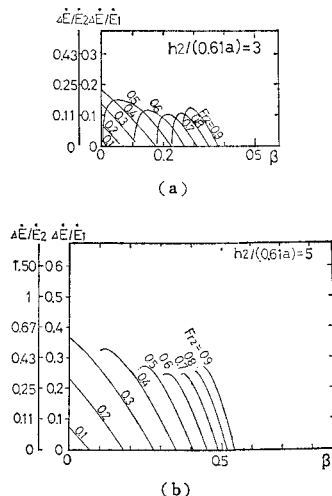


図-8 β と $\Delta \dot{E}/\dot{E}_1$, $\Delta \dot{E}/\dot{E}_2$ との関係 (潜水跳水の場合)

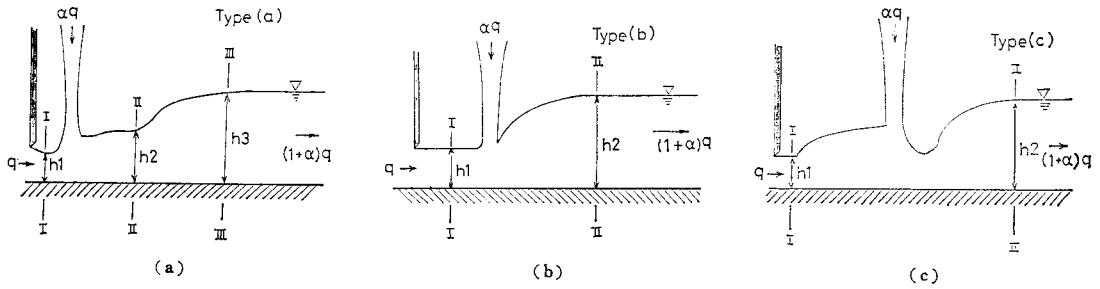
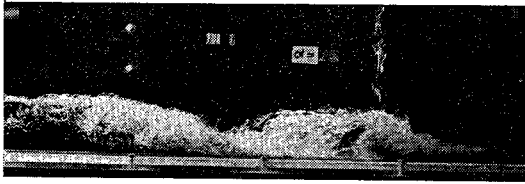
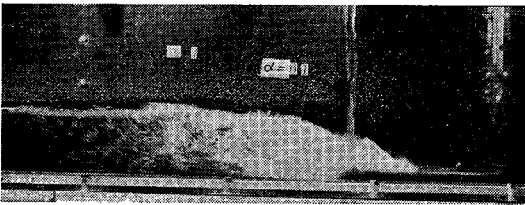


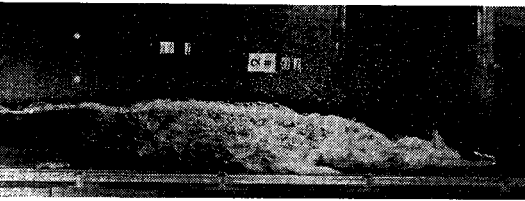
図-9 跳水の型の分類



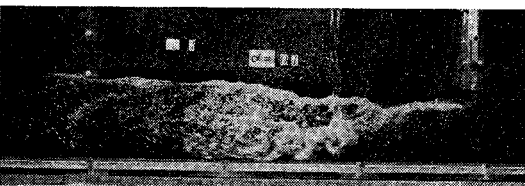
Type (a) $\alpha=0.2, q=21.43(l/min)$



Type (b) $\alpha=0.1, q=21.43(l/min)$



Type (c) $\alpha=0.1, q=21.43(l/min)$



submerged flow $\alpha=0.1, q=21.43(l/min)$

写真-2 跳水の型の分類

まったく同じになり、また実験でも跳水の共役水深関係にはほとんど差異は認められない。

このほかに図-7に示す潜水跳水が生じるが、この型は下流の常流水深が式(2)によって示される値より高い場合に生じ、水門開口部では水深が α より大きくなり、いわゆる潜水流出の現象となる。

(1) 跳水の共役水深および跳水長

水門よりの射流流出流量一定の条件下で、鉛直落下流

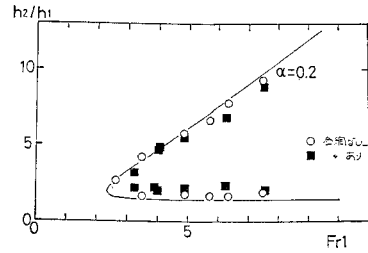


図-10 共役水深の関係 ($\alpha=0.2$ の場合)

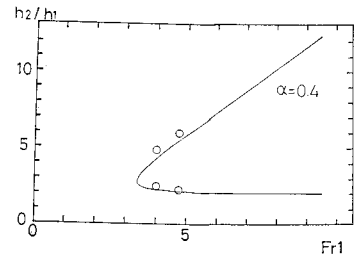


図-11 共役水深の関係 ($\alpha=0.4$ の場合)

量を変化させた場合に図-9の(b)の型の跳水について共役水深関係を実験により調べ、前述の理論との比較を行う。また、現在のところ理論的解析の可能でない跳水長について種々の条件下で実験により調べた。

実験より求めた落水を伴う跳水の共役水深関係の実測例を $\alpha=0.2$ と 0.4 について図-10, 11に○印で示す。なお、それぞれの図中の実線は図-2に示した理論曲線である。これらの図から、共役水深の理論値と実測値は比較的良好に合っていることがわかる。なお、この実験では鉛直落下水の流量は精度よく制御されているが、落水の流速および水路横断方向の流量のばらつきはあまり精度よく制御されていない。このことによる実測値のばらつきはほとんどなく、実験結果のばらつきは水面の動揺等による水深の測定誤差によるものである。実際に水門扉を二段ゲートにして、最下端よりの流出射流に対し、上端よりの越流水を落下させるような場合には水脈にはさまれた部分の空気圧が変動し、流出量の一定性を害し、ゲートの振動、騒音等の問題を生ずる可能性が高いため、実際にはゲート上端よりの越流水脈を部分的に切ることが行われるが、上記のことはこのような処置は

理論的考察結果にほとんど影響を与えないと考えてよいことを示している。

以上のことから、跳水の共役水深関係の変化は理論の示すとおり、射流の流れ方向に運動量をもたない流量の連行によるものであり、鉛直落下水の鉛直方向の運動量によるものでないことは明らかである。このことを一層明瞭にするために、鉛直落下水を多段の金網の層を通して水平射流に加える実験を行ってみた。すなわち、落下水を金網の層により減速し、より広い範囲に分布させた。このときには図-10に■印で示す結果となり、前述の○印とほとんど差異は認められないので、前述の議論が正しいことがわかる。

次に跳水長 L について実験結果を整理してみると、図-12に示すようになり、鉛直落下水のある場合 ($\alpha > 0$) には普通の自由跳水 ($\alpha = 0$) の場合に比べて50%程度跳水長を短くすることができる。さらに、 α の値が大きくなるに従って若干跳水長は短くなり、 Fr_1 が大きくなるに従い幾分長くなるように見受けられるが、水面動揺による測定誤差のため、あまり明瞭ではない。

この跳水長を普通の自由跳水の場合の Smetana の実験式

$$L = 6.0(h_2 - h_1) \dots \dots \dots (16)$$

と比較すると、普通の自由跳水の実験結果は式(16)に従うと考えてよいが、式中の係数はこの実験の場合幾分小さくなっている。しかし、落下水のある場合にもこのような関係が成立するものとすれば、式(2)より h_2/h_1 の値が小さくなることから知られているので、 L は普通の自由跳水の場合より短くなることは予想されることである。なお、落下水を金網の層を通して加えた場合の実験値が同図に示されているが、これより跳水長は落下水の速度にはほとんど影響されないと考えてよい。したがって、落下水を伴う跳水では L が短くなり、減勢工としては有利であることが知られる。

(2) 底面流速

流れが水路底面に及ぼす影響の一つの目安として底面流速分布を実験的に調べ、落下水流を伴う跳水による減

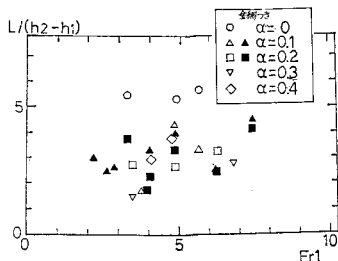


図-12 跳水長 L と Fr_1 との関係

勢効果を検討する。

流れの縦断方向の底面流速の分布は滑面底面上 3 mm の高さの位置でピトー管により測定した。なお、この実験では水の落下点近傍でも底面までは空気は混入されていなかった。

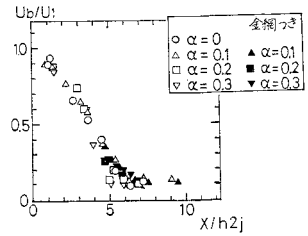


図-13 底面流速の分布 (完全跳水の場合)

底面流速を U_b で表わし、上流部の射流の平均流速を U_1 とすれば、測定結果は図-13に示すようになる。ここに h_{2j} は式(2)で表わされる跳水を起こす場合の下流水深 h_2 を表わす。同図より、跳水を起こしている場合には U_b/U_1 は下流水深 h_{2j} で標準化された縦断距離 x/h_{2j} に対して種々の条件の場合にほとんど同じ関係で表わされることがわかる。また、流下に伴い最終底面流速(下流の常流部の底面流速)に達する位置は $x = (5 \sim 6)h_2$ の所であることが知られ、ほぼ跳水長 L と同じ程度と考えてよく、またこの関係は α の値にはほとんど影響されないが、 α の値が大きくなると $x = 5h_2$ の所で最終底面流速となるように見られる。この関係は前述の跳水長 L が α により短縮したほど顕著ではないが、同じ h_1 に対しては α の値により h_2 は式(2)の関係より小さくなるので、落下水のある場合には普通の跳水 ($\alpha = 0$) の場合よりも跳水長は底面流速の面からみても実質的に短くなると考えてよく、また α の値が大きいほどより短くなると考えてよいことが知られ、減勢工として有効であると判断される。

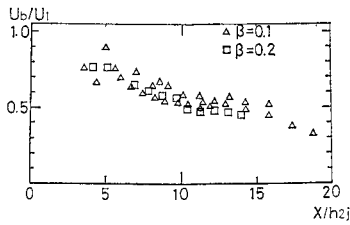
なお、前述の金網の層を通して落下流量を与えたときの底面流速の分布を実験により調べると図-13中に示されているようになり、同じ α の場合に対し落下流速が小さくなると幾分底面流速の低減の割合が小さいことが知られ、底面流速の減殺は落下水の底面への衝突による動水圧の増加、すなわち底面圧の上昇がおもな原因であると考えられる。

(3) 完全跳水以外の場合

この場合について理論的に2.(4)において考察を行ったが、それに対して実験的に検討するとともに、水理特性を明らかにする。

a) 射流のまま通過する場合

下流水深を式(2)の共役水深以下にすると、落下水の地点を射流のまま通過し、落下点の下流では水面付近に多量の空気を混入し、流れの上層は白濁のままで相当距離流下する。この場合の上下流の水深関係は式(2)の $Fr_2 > 1$ の場合の解として理論的に求められるが、これ



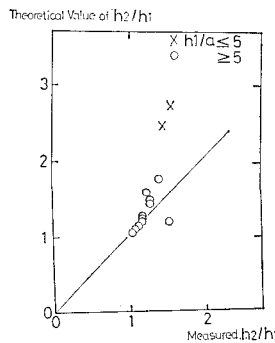
図—14 底面流速の分布 (射流の場合)

を実験により確かめてみると、図—10, 11 中の h_2 の射流側の領域に対応するものとなり (図—2 参照), 完全跳水の場合と同程度の精度で理論値に適合するが、実験値を詳細にみるとデータは理論曲線より若干大きいようである。これは理論では底面摩擦を無視しているが、この場合には流速が速く底面摩擦により射流水深が理論値より大きくなると考えられる。なお、この場合の比エネルギーの損失は h_1, h_2 の精度によるわけであるから、当然のことながら図—3 に破線で示す理論値とほぼ一致するものと考えてよい。

底面流速の流れ方向の分布は 図—14 に示すようであり、同図中の h_{2j} は前と同様跳水を起こす条件のときの h_2 、つまり式 (2) から計算される h_2 であり、実験に現われた h_2 ではない。完全跳水を起こす場合 (図—13 参照) と比べると流速の低減は非常に悪いことがわかり、従来知られているとおり跳水を起こさない場合には減勢としては有効ではない。しかし、落水水のない場合には底面摩擦のみによって流速の減少が定まるが、この場合にはそれに比して底面流速の流れ方向の減少は相当よくなるし、また下流の常流水深に対してより短い距離で跳水を起こさせることができる利点があるので、落水水を加えることは有効な減勢方法である。

b) 潜り跳水の場合

この場合には式 (12) の関係で理論的に上下流の水深関係が定まるが、この関係を理論値と実測値について比較すると 図—15 に示すようになる。これから理論の実験値に対する適合度は完全跳水の場合に比して若干悪いが、これは理論に用いた仮定によるものと考えられる。また、図からわかるように h_1/a の値が 5 以下の場合には特に理論の適合度が悪いことが知られる。これは流出水脈に対して上層水のかぶり水深が比較的小さい場合に相当し、上層水が流出水脈によるせん断

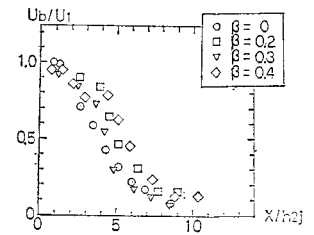


図—15 h_2/h_1 の理論値と実験値の比較 (潜り跳水の場合)

力により押し流し、それに応じて下流水深が増大し、下流側の水圧の増加のため再び上層水が流出水脈部に流れ込み、これを繰り返すことが実験で認められ、この場合には非常に不安定な流況であることが知られる。このような状況では h_1 の変動が激しく、このために水門よりの流出流量もこれに伴い変動するのでより不安定となる。言い換えると h_2/h_1 の値が大きくなる場合であり、このときは上層水の下流に向けての水面上昇が大きい場合であり、このことは上層水の循環が激しいことを意味し、式 (12) を導く仮定に問題があることになる。

実用上はなるべくこのような状態になる水門操作をしないことが望ましいと考えられる。このような特殊な場合を除けば、実用的には式 (12) により潜り流出の程度を算定できるものと思われる。

底面流速に関しては 図—16 に示すような実験結果となり、図中 U_1 は平均水門流出速度とし、 h_{2j} は前述のように式 (2) で定まる完全跳水後の水深 h_2 である。同図より、この場合には完全跳水の場合よりは底面流速の減少が若干悪くなるが、底面流速を減殺するには相当効果があり、射流のまま通過するものに比べて減少率は非常に大きく、減勢工としてはある程度有効なものと考えられる。また、水面に現われる潜り跳水の長さ L は実験では判定が難しいが、減勢の面で潜り跳水長ともいうべき底面流速が下流の最終底面流速になるまでの長さ L を同図より求めると $L = (7 \sim 9)h_2$ となり、明らかに完全跳水の場合よりは長くなるが、ある程度有効な減勢方法といえ、またこれにより比較的精度よく河床保護工の程度を見積るのに役立つものと思われる。また、この場合には落水水の影響はあまり顕著ではない。

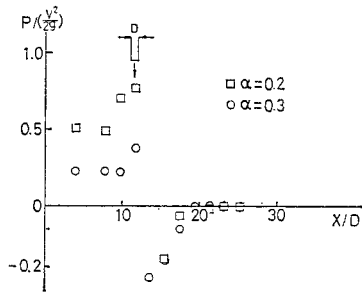


図—16 底面流速の分布 (潜り跳水の場合)

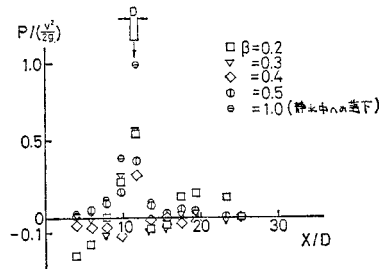
(4) 底面圧力

次に、落水水を伴う場合の重要な水理的因子と考えられる水路の底面圧について実験結果より調べてみる。

跳水を起こす場合には 図—17 に、潜り流出の場合には 図—18 に示す底面圧の縦断分布となる。両図において、底面圧 P は底面に作用する動圧であり、測定された全底面圧からその点の水深に相当する静水圧を差し引いた圧力水頭である。これらの図の縦軸は圧力 P を落水水の水頭で無次元化したもので、横軸は流下距離 x を落水水脈の流れ方向幅 D で無次元化した x/D で表わしてある。なお、図—18 には $\beta = 1.0$ 、すなわち静水



図一17 底面圧力の分布 (完全跳水の場合)



図一18 底面圧力の分布 (潜り跳水の場合)

中への落下水脈を加えた場合の圧力分布も併せて示してある。この場合には底面圧 P は静水の水深が比較的浅いため、落下流速の減衰がなく落下水の動水圧にほとんど近い圧力を示している。また、跳水を起こしている場合には特に水中に空気を連行する割合が著しく、静水圧の見積りが不正確になるため、データのばらつきが著しい。

全体的にはこれらの図より落下水による動水圧は落下流速が大きいほど大きく、水路の水深が浅いほど大きくなるが知られる。また、 β が大きいほど落下点より上流まで動圧が及ぶこと、逆に β が小さいほど圧力上昇が下流に及ぶことが知られる。すなわち、流出水の速度が速くなるほど落下水脈は流出水中を進行する間に下流に押し流され、底面に衝突する角度が小さくなるため、底面に及ぼす動圧は低くなり、圧力上昇は下流に及ぶと考えてよい。したがって、減勢効果を発揮するため、底面流速を減衰させるには流出水流の流速に対し落下水速度を水深を考慮して十分大きくすることが望ましい。

また、水平射流の減勢工として落下水を利用する以外に、落下水の底面に対する衝撃圧が問題となるような場合に、水平噴流を利用して衝撃圧を減少させることにもこの考え方は利用できるであろう。

落下水による水路底面圧の算定については今後さらに検討する予定である。

4. あとがき

鉛直落下水により跳水を強制的に起こさせ、射流の減勢工としての水理特性について、理論と実験により検討を行った。なお、鉛直落下水により完全跳水を起こさない場合、すなわち、射流のまま流下する場合および潜り跳水の場合についても検討を行った。

これらの検討により、次のような事項を明らかにすることができ、適切に落下水を利用することにより減勢工として有効であることが知られた。

(1) 普通の跳水の共役水深関係よりも低い下流水深でも、鉛直落下水を加えることにより完全跳水を起こさせる可能性がある。

(2) 射流のエネルギーを落下水を加えることにより普通の跳水の場合よりも余分に減殺することができる。

(3) 落下水を加えることにより、完全跳水の場合はもちろんのことそれ以外の場合にも底面付近の流速を底面圧の上昇により、より短い距離で減少させることができる。

(4) 跳水長および潜りの場合、跳水長に相当する長さを落下水を加えることにより、短縮することができる。

(5) 跳水を起こさないで射流のまま流下する場合にも、流速をある程度減少させることができ、また最終的に下流常流水深に対して自由跳水を起こす位置を落下水を加えることにより、より上流に移すことができる。

最後に、本研究の遂行にあたり西山勝榮君（早稲田大学理工学部4年）の協力を得た。

なお、本研究は文部省科学研究費（自然災害特別研究（1）都市河川の治水トータルシステムの信頼性に関する研究、代表者：吉川秀夫）の補助を受けた。

記して謝意を表します。

参考文献

- 1) V.T. Chow : Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, pp. 393~429.
- 2) 荒木正夫：噴水式水叩の水理について，土木学会論文集，第51号。
- 3) E.H. Wilson : Stabilisation of the hydraulic jump by jet, Water Power & Dam Construction, March 1977.
- 4) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，p. 59.

(1983.8.24・受付)