

制水ゲート直下流の圧力変動特性

長 勝 史

(農業水利学研究室)

昭和54年 8月20日 受理

Characteristics of Pressure Fluctuations at the Downstream of the Control Gate

Katsushi CHO

(Laboratory of Irrigation and Drainage Engineering)

緒 言

ダムの放水管内に設置された高圧ゲートや、農業用管水路の流入口付近に設けられた制水ゲートやバルブを流量調節のために部分開放した時、その直下流側の流況はゲートの開度、管径、上下流の圧力水頭の大きさなどによって複雑な様相を呈する。特にゲートの開度が小さくて、その直下流が負圧となる流れの時には、キャビテーション現象や振動など操作上好ましくない原因を制御するために、空気孔 (air vent) を設置するように定められているが、その効果や流れ特性との関係など未知な点が多く残されているようである。

ここでは、農業用のファームポンドのような比較的低水頭の貯水槽から、管水路に流入する付近に設置された制水ゲートあるいはバルブの下流側の流れを対象に考え、空気孔が設けられている場合の流れの分類を行なった。その中で、ゲートを部分開放した時に、その直下流で自由跳水を生じた場合の管壁底部での圧力変動の大きさを測定し、統計的な処理を行なった。また空気孔が設けられていない場合すなわちゲートの背面で負圧が発生した時でも、管内は満流状態で流下している時の圧力変動をも測定し、空気孔の有無の圧力変動におよぼす影響についての実験的な検討を行なった。このことはゲート設置付近の振動に対する合理的な管路の設計法と、適切なゲート操作方法の確立のための指針になるものと思われる。

ゲート下流側の流れの分類

農業用管水路の流入口のゲートやバルブの後方には、空気を排除または供給するための通気孔を設ける必要があると設計基準にも明記されている¹⁾。一般にゲートを部分開放した時でも、Fig. 1の (a) のようにゲ

ト背面での動水コウ配線が管上壁より上部にある条件の時には、空気孔の有無にかかわらず管水路は満流することになる。しかし同図の (b) のごとく動水コウ配線が管上壁より下方になる条件の場合でも、空気孔が設けられていない時には一般的に管内は満流する。その際、ゲートの背面に発生した負圧によって、キャビテーション現象や振動などを誘発する危険性がある時には、管内の負圧を軽減するために空気孔が設置される。この時のゲート下流側の管路内の流況はゲートの開度、上下流の圧力水頭、管径および空気孔の大きさなどによって異なる。

Fig. 1の (c) はゲートの下端と管上壁との間で潜り跳水 (submerged jump) が生じている場合で、開度が大きくて負圧の程度が比較的小さい時などの流況である。

(d) はゲート直下流のベナコントラクタ (vena contracta) での水深が、さらに下流の圧力水頭と丁度共役水深の関係になっている状態で、その位置で自由跳水 (free hydraulic jump) が生じている時である。

ベナコントラクタでの水深が小さい時には Fig. 1 (e) のように、下流側の圧力水頭と共役水深になるまで管路内を露出射流をなして不等流で流下し、共役関係になった地点で跳水が形成される流況となる。

ダム放水管のように管路が比較的短かくて、ゲートの開度が小さい時などには、Fig. 1 (f) のごとく射流状態で開水路流をなして流下することもあり得る。

いま Fig. 1 (b) のように負圧が生じるような条件 (開度、圧力水頭、管径など) の時にゲートの背面に空気孔を設けるならば、農業用管水路では一般に (c)、(d)、(e) のいずれかの流況となる。この時、上記の条件が全く同じでも空気孔の大きさによってその流況は異なる。すなわち空気孔が小さいと (c) の流況となる

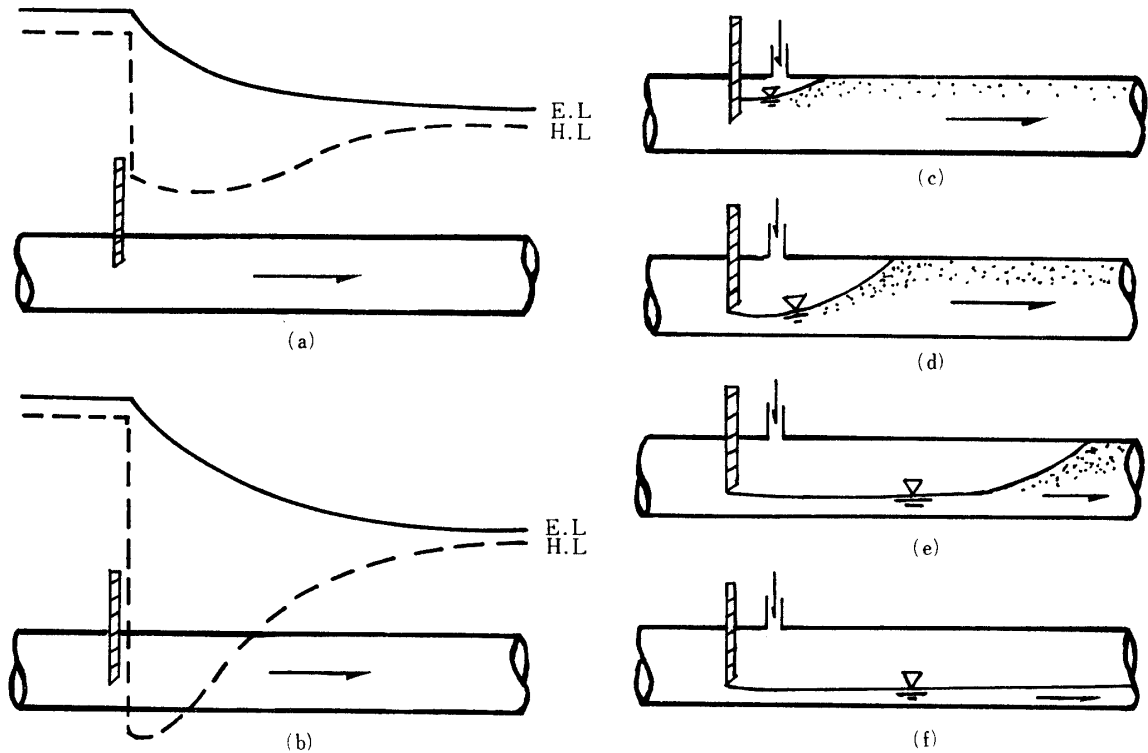


Fig. 1. Classification of flow patterns in gated pipeline.

条件の場合でも、空気孔の内径を大きくするにしたがって (d) や (e) のような流れとなる。それは空気孔の大きさによってゲート背面での負圧の軽減の程度が異なるためである。この事は空気孔の設計時に充分注意すべき事柄であると思われる。

なお今回の圧力変動の測定時の流況は主に Fig. 1 の (b) および (d) の場合である。

実験装置および方法

本実験に当たっての測定部の概要を Fig. 2 に示している。実験管は内径 150 mm の透明なアクリル製円管を使用した。空気孔はゲートから $D/2 \sim D$ (D は管径) の位置に 10 mm の穴 1 ~ 3 個を流量に対応して適時開放することによって代用させた。実験用のゲートは図のように先端が標準オリフイス型をしたアクリル板の高さを順次変えることによって行ない、ここで言う開度とは h/D のことで面積比ではない。ゲートの直下流で自由跳水を生じさせるために必要なゲート上、下流の圧力水頭の調節は、さらに上下流に設置した制水弁によって行なった。

静水圧は管底部に 10 cm 間隔に設けたマンオメータによって測定した。瞬間的な圧力変動は同位置に拡散型小型圧力変換器を設置し、その出力を増幅したのち、電磁オシログラフに記録することによって検出した。

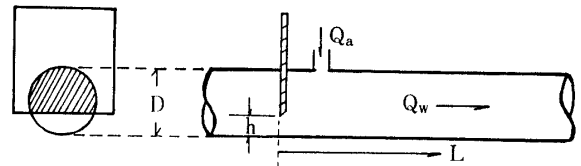


Fig. 2. Test pipe equipped with a gate and air vent.

なお流量は直角三角堰で測定した。

データ処理方法

Fig. 3 に示すようなオシログラフに記録された圧力の時間的変動は、一つのデータについて 0.02 sec 間隔に 200 ~ 400 個がサンプリングされた。瞬間圧力を p 、時間的平均圧力を \bar{p} とすると変動圧力 p' は、

$$p' = \bar{p} - p \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。またここでは、圧力変動の大きさを p' の標準偏差をもって表わすものと定義する。すなわち

$$\sqrt{\bar{p}'^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{p} - p_i)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i'^2}{n}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

とする。

このように定義されたゲート直下流の圧力変動の大きさ $\sqrt{\bar{p}'^2}$ は、ゲート通過時の平均流速 v 、水の密度 ρ 、重力の加速度 g 、ゲートの開度高 h 、管径 D 、ゲートか

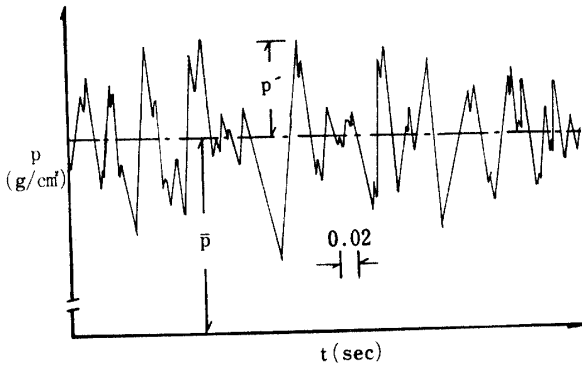


Fig. 3. Sample of oscillograph recorder.

ら変動測定点までの距離 L などの水理量に関するものとする。すなわち

$$\sqrt{\bar{p}'^2} = \Phi(v, \rho, g, h, D, L) \quad \dots\dots(3)$$

となるが、これを π 定理により次元解析すると次式のような無次元量にて表わされる。

$$\frac{\sqrt{\bar{p}'^2}}{\rho v^2 / 2} = \phi\left(\frac{L}{D}, \frac{h}{D}, \frac{v}{\sqrt{gh}}\right) \quad \dots\dots(4)$$

$$\text{ここで } \frac{\sqrt{\bar{p}'^2}}{\rho v^2 / 2} = \frac{\sqrt{\bar{p}'^2} / w_0}{v^2 / 2g} = C_p \quad \dots\dots(5)$$

とし、この C_p を圧力変動の強さと呼ぶことにする。ただし w_0 は水の単位重量。したがって本実験では C_p の値をゲートからの距離 L/D 、ゲート開度 h/D 、フルード数 F_r によって整理することにした。

なお Fig. 4 のように実験によって得られた変動圧力 p' はほぼ正規分布をなし、統計処理の妥当性を示

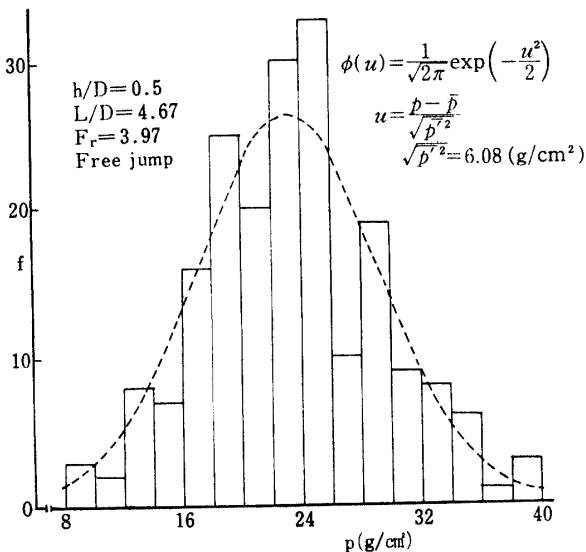


Fig. 4. Normal distribution of temporal pressure.

している。

実験結果および考察

(1) ゲート背面の圧力

管水路に設置されたゲートを部分開放した時、Fig. 1 の (a) のようにゲートの背面が正圧になるか、あるいは (b) のように負圧が生じるかは、運動量方程式と連続の式から求められる次式によって予測されるであろう。

$$\frac{p_1}{w_0} = \frac{p_2}{w_0} - \frac{Q^2}{gA} \left(\frac{1}{a \times c} - \frac{1}{A} \right) \quad \dots\dots(6)$$

ここで p_1 ; ゲート背面での圧力, p_2 ; ゲートより下流側での最大圧力(回復圧力), Q ; 流量, A ; 管の断面積, a ; ゲートの開き面積, c ; ゲートによる収縮係数。

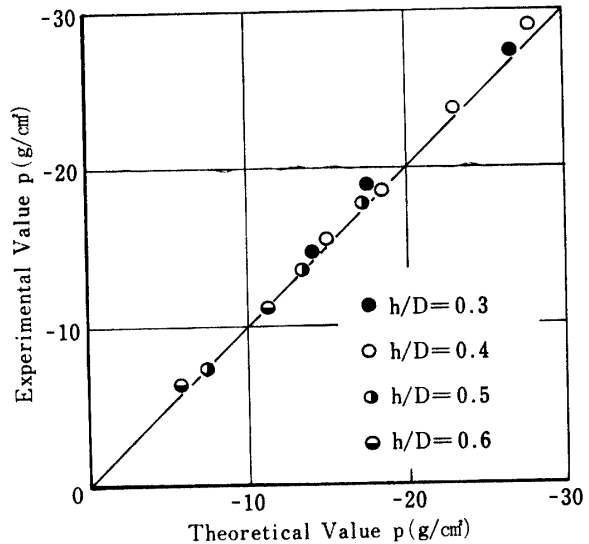
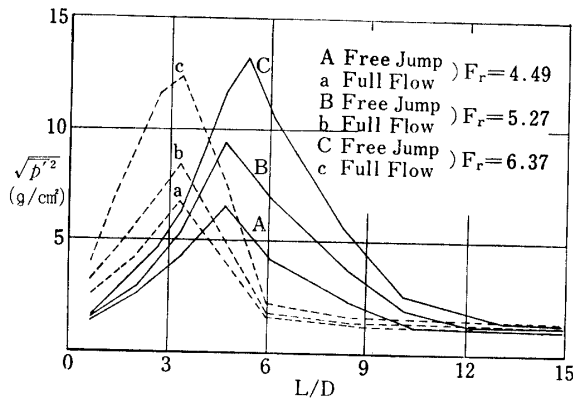


Fig. 5. Pressure behind the gate.

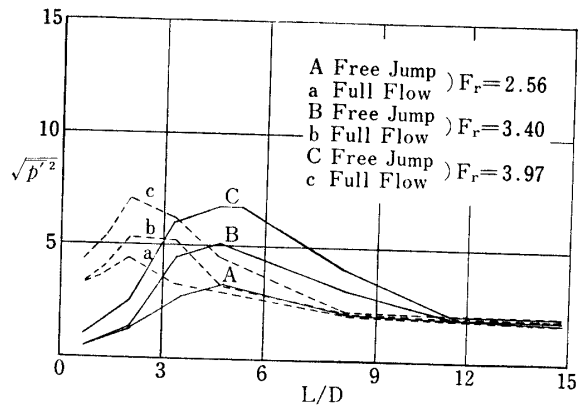
したがって (b) 式より求めた p_1 が負の値となる条件の時に、ゲートの背面に空気孔が設置されているならば、流水は空気を連行して空気混入流をなすことを意味している。Fig. 5 は、 p_1 の実験値と (6) 式より求めた理論値との対比を表わしているが、ほぼ直線上にあり、(6) 式は妥当であると思われる。

(2) 圧力変動の大きさ $\sqrt{\bar{p}'^2}$

圧力変動の大きさ $\sqrt{\bar{p}'^2}$ とゲートからの距離 L/D との関係を示している。図から明らかのようにいずれの開度とも、本実験条件では、ゲートの背面で負圧が生じている時に空気孔が無くて一種の潜り跳水をなして満流状態で流下する場合 (Fig. 1-b) と、空気孔が有りゲート直下流で自由跳水を形成している流況の場合 (Fig. 1-d) とで、ゲート下流の管底部の圧



(a) Gate opening $h/D=0.3$



(b) Gate opening $h/D=0.5$

Fig. 6. Relationship between pressure fluctuation and distance from the gate for various Froude number.

力変動の大きさ $\sqrt{\bar{p}'^2}$ に顕著な差はない。他の開度の時も同じ傾向を示す。ただし最大値の生じる位置にかなりのズレがあるのは、潜り跳水の時にはゲート直下流の短い距離でエネルギー減殺すなわち激しい乱れが完了するのに反し、自由跳水ではその距離が長く圧力回復が遅れるためである。またフルード数の増加に伴って $\sqrt{\bar{p}'^2}$ の値が大きくなるのは、ゲート直下流の乱れの規模が流速に比例的であることを考慮すれば当然な結果といえる。

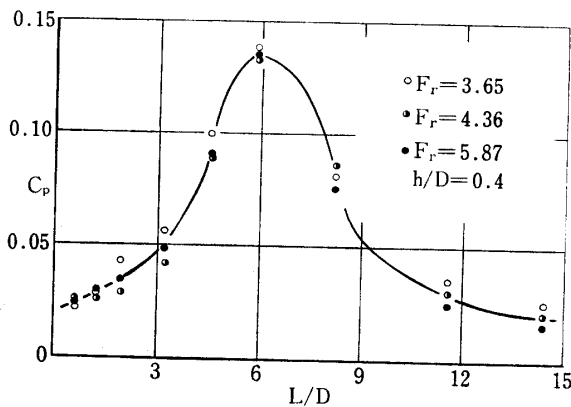
(3) 圧力変動の強さ C_p

上記のように $\sqrt{\bar{p}'^2}$ の値はフルード数すなわち流量に大きく左右されるが、これを前述の次元解析で求めた無次元量の C_p で整理すると、Fig. 7 (4割開度) に示すように同じ開度および位置では、 C_p の値はフルード数に関係なくほぼ一定となる。他の開度の時も同様な事が言えたので、Fig. 8 に2~7割開度の C_p を平均した値を図示した。同図から明白のように両方の流

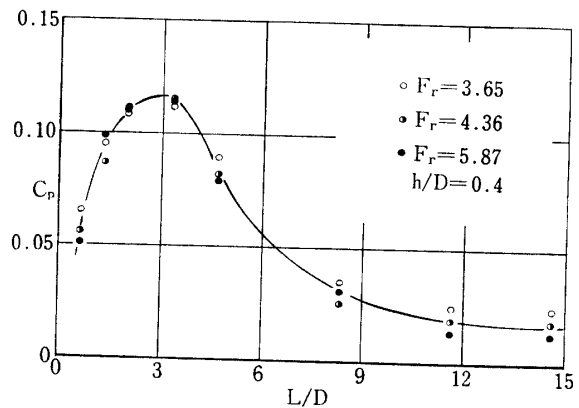
況とも、ゲートの開度が3割前後(高さの比)の時に C_p の値は最大となり、それ以上の開度になると段々と減少する。ただゲートからの距離が Fig. 8 の (a) で約 $L/D=12$, (b) の時で $L/D=7$ 程度以下(跳水による激しい乱れが治まる地点)の下流になると逆に開度が大きいほど C_p の値が僅かながら大きくなるのは $C_p = \frac{\sqrt{\bar{p}'^2}}{\frac{\rho v^2}{2}}$ の v をゲート直下の流速で計算しているた

めで、開度が大きいということは同じ流量でも v の値が小さくなり、結果的には C_p の値が大きくなることに原因している。また最も圧力変動が激しいのは、ゲートから管径の3~6倍の下流地点に集中しており、その時の C_p の最大値は乱れが治まる地点での C_p の値の10倍近くに達することもあり得る。

なお Fig. 8 の (a) と (b) 図を比較した時、前述の (2) 項でも記したように、同じ開度では C_p の値に大差はなく、(b) 図の自由跳水(空気孔が有る場合)の



(a) Free jump



(b) Full flow

Fig. 7. Relationship between intensity of pressure fluctuation and distance from the gate.

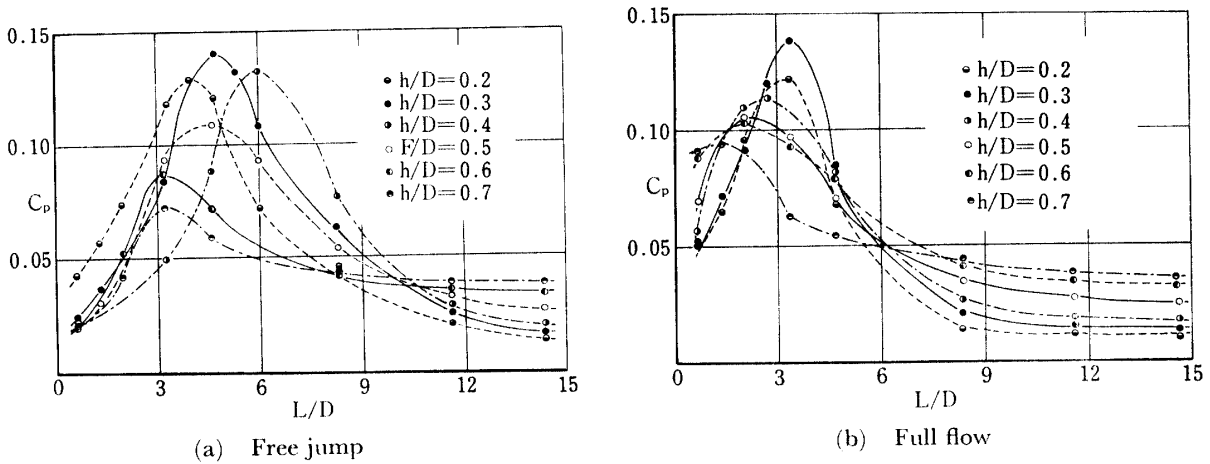


Fig. 8. Relationship between intensity of pressure fluctuation and distance from the gate for various gate opening.

方が激しい圧力変動の範囲が長く継続することが再確認出来る。

以上のような結果を考慮するならば、いずれの流況の場合でも、ゲート直下流の振動に対する適切な安全対策が必要であろう。

(4) 開水路における跳水との比較

開水路におけるゲート下流側の水路床の圧力変動について Narasimhan²⁾ らが同様な研究を行なっているので今回の結果と対比してみた。

まず自由跳水（ゲートの直下流で完全跳水が生じている場合）の時の比較を Fig. 9 に示しているが、いずれの場合ともフルード数は $F_r=4\sim 5$ と大体同じ大きさであった。図で見ると、管水路と開水路とで床面に沿った C_p の分布状態はかなり類似した傾向にあり、特に6割開度の場合は良く似ている。ただ管水路における自由跳水の方が大きな値となっているが、これは開水路の場合はエネルギー発散の場所が開放的である

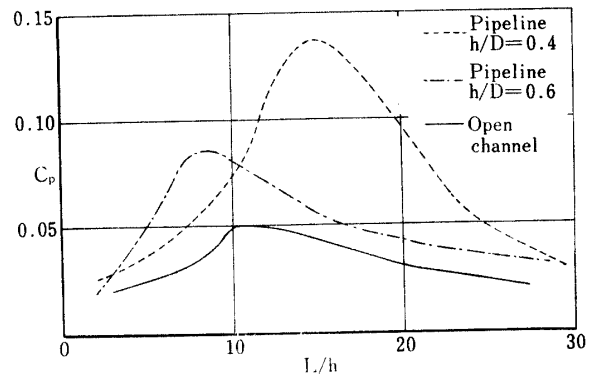


Fig. 9. Intensity of pressure fluctuation beneath free jump.

のに反し、管水路では閉鎖的であるので管壁に対する圧力変動すなわち振動も倍加されるものと思われる。

また管水路の満流状態（ゲートを部分開放しているので一種の潜り跳水と言え）と開水路における潜り

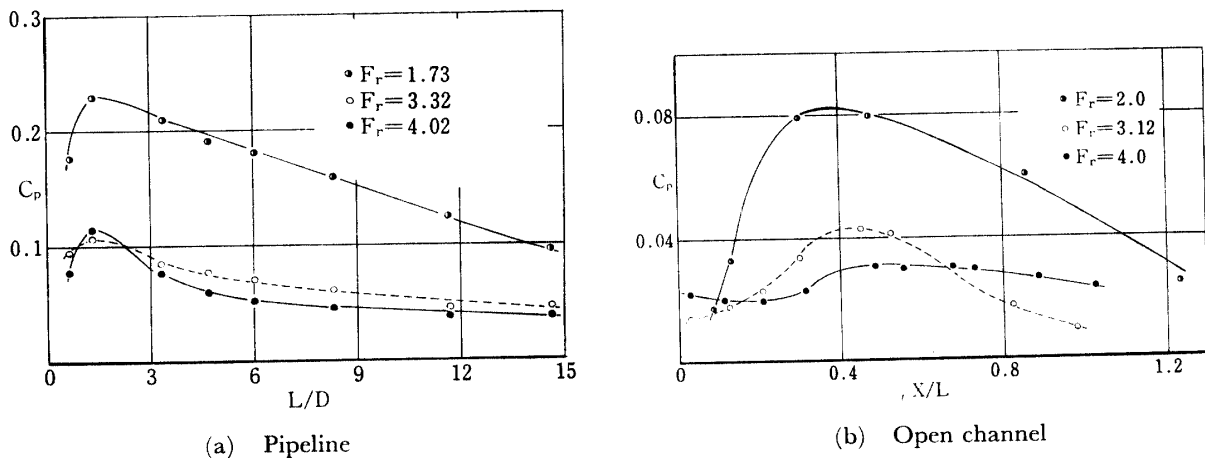


Fig. 10. Intensity of pressure fluctuation beneath submerged jump.

跳水と対比したのが Fig. 10 である。ただし開水路の時の横軸の X はゲートの開度高, L は跳水の長さであるので, 直接比較するには無理があるけれども, 傾向としてはやはり類似な分布状態を示しており, フルード数が 2 付近以下では C_p の値が大きくなる所まで酷似している。しかし自由跳水の場合と同様な理由で絶対的な C_p の値には 2~3 倍の相違がある。

要 約

管水路の流入口付近に設置されたゲートやバルブを部分開放した時には, その直下流で激しい圧力変動や振動が生じる。その際の過大な負圧防止のために設けられる空気孔の有無によって, ゲート下流側の流況は色々な様相を呈する。ここでは Fig. 1 の (b) および (d) の流況時の, ゲート直下流の管底部における圧力変動について実験的な検討を行ない, 次のような定性的な結果が得られた。

(1) 同一条件の下では, ゲートの直下流が満流している場合と, 自由跳水が生じている場合とで, 圧力変動の大きさ $\sqrt{\bar{p}'^2}$ の値に大差はなく, その位置が多少ズレる程度である。

(2) 圧力変動の強さ C_p は, 同一開度および位置であれば, フルード数にかかわらず, ほぼ一定の値を示す。

(3) C_p の値はゲートの開度が 3 割前後の時に最も大きくなり, その時の最大値は乱れが治まった地点での C_p の値の 10 倍近くにも達することもある。また一般にその最大値が生じる位置はゲートから管径の 3~6 倍下流である。

(4) ゲート直下流が満流している場合 (一種の潜り跳水) および自由跳水が生じている場合のゲート下流の管底部に沿った C_p の分布状態は, 開水路と同様な跳水が生じた場合の C_p の分布状態と良く似た傾向を示すが, 管水路の時の C_p の値は開水路の値の 3 倍近い値となる。

なお今回は制約された実験条件の下での結果であるので, より普遍性あるものにするには, 種々な管径を用いたより多くの実験を行なう必要がある。

最後に本研究を行なうにあたって, 終始ご協力いただいた大学院卒業生, 吉嶺彰二君および学部卒業生, 清水義文君へ深く感謝する次第である。

文 献

- 1) 農林水産省構造改善局編: 土地改良事業計画設計基準, 設計, 水路 (その 2), パイプライン. 95-96 (1977)
- 2) Narasimhan, S. and Bhargava, Ved P.: Pressure Fluctuations in Submerged Jump. *HY3. Proc. Am. Soc. Civil Engrg.*, **102**, 339-350 (1976)

Summary

When the gate established near the intake of pipeline is partly opened, severe pressure fluctuation, vibration and subatmospheric pressure are likely to occur at the downstream of the gate. To avoid severe subatmospheric pressure which may lead to cavitation and vibration, air vent is usually located behind the gate. However the flow-patterns in pipeline downstream of the gate vary due to the pressure difference across the gate, the pipe diameter, the gate opening, the size of vent and so on.

This time, experimental investigation of pressure fluctuation at the downstream of the gate was carried out in case of the flowing types as shown Fig. 1(b) and (d), and the following qualitative conclusions were obtained.

(1) Under the same conditions, concerning maximum of $\sqrt{\bar{p}'^2}$ there is little difference between the case of full flowing and the free hydraulic jump, excepting the fact that the position at which the maximum occurs somewhat shifts.

(2) Intensity of pressure fluctuation C_p keeps itself almost constant in spite of the Froude number-variation at the fixed gate opening and position.

(3) Value of C_p becomes largest when the gate is opened at about 30% in height, and the maximum value at the downstream of the gate attains nearly as large as that of the part situated far-off from the gate. Generally the position where the maximum value is produced, lies in the section away from the gate from three times to six times as long as the pipe-diameter.

(4) In both the cases of full flow (that is submerged jump) and free hydraulic jump in pipeline, distribution-patterns of pressure fluctuation C_p at the downstream of the gate are quite similar to those of C_p in case of the open channel flowing. But the maximum value of C_p in pipeline becomes nearly three times as large as that in the open channel.