

## 管水路における制水ゲート直下流の圧力変動特性

長 勝史・河原田礼次郎

(農業水文学研究室)

昭和57年8月10日 受理

### Characteristics of Pressure Fluctuations at the Downstream of the Control Gate in Pipeline

Katsushi CHO and Reijiro KAWAHARADA

(Laboratory of Irrigation and Drainage Engineering)

#### 緒 言

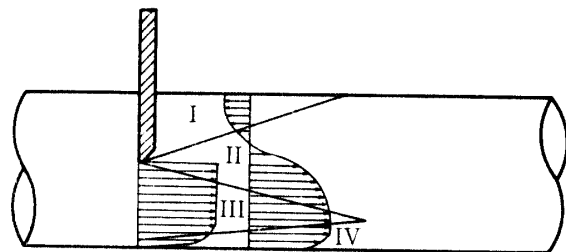
農業用管水路の途中に設置された制水ゲートやバルブを流量調整や圧力制御のために、その一部分のみを開く、いわゆる部分開放することはごく一般的に行われる。またダム放水管内に設けられた高圧ゲートなどでも、しばしば同様な操作が行われる。このような場合その操作時の水理条件によっては、ゲート直下流での激しい圧力変動やキャビテーション現象は管路本体および付帯構造物に振動を誘起し、ひいては管路の破損にも発展する危険性を伴っている。しかしながら断面急拡によるゲート直下流の激しい乱れの結果として生じる管壁面における圧力変動の大きさと、それに及ぼす水理的な特性値との関係については、いまだ明確にされていないのが現状である。これは本現象に関する従来の研究の多くが、圧力や流速などの水理量の平均値のみの把握にその主眼を置き、その瞬間的な変動成分の解明に欠けていたためであろう。このことは乱流場における圧力や流速が不規則かつ偶然的な変動をなしているため、その特性を理論的な手法で解明することが極めて困難で、統計的な取扱いに頼らざるをえないことにも原因していると思われる。しかしこの統計的な手法でさえもこのような不規則な現象の特性は、定性的に説明されるにとどまり、定量的解析についてはほとんど不可能に近いときえいわれている<sup>2)</sup>。

そこでここでは、管水路に設置された制水ゲートやバルブを部分開放したときに、その直下流で生じる激しい乱れに起因する管壁面での圧力変動の大きさを実験的に求め、統計的な処理によってその特性を多少とも定量的に解析し、検討を加えた。これらはゲート設置付近の構造物の振動に対処する合理的な管水路の設

計法と、適切なゲート操作方法の確立のための基礎資料となろう。

#### ゲート直下流の内部機構と次元解析

管路に設けられたゲートやバルブを部分開放したときに、その直下流の管壁面での圧力が激しく変動するのは、断面急拡に伴う水流の異常な乱れの発生に起因していることは明白である。ゲート直下における流れの内部構造を模式的に領域区分したものを Fig. 1 に



- I: Reverse flow region.
- II: Mixing flow region.
- III: Normal flow region (Potential keeping region).
- IV: Boundary layer region.

Fig. 1. Regional division of flow at the downstream of the gate.

示している。その形状は一種のもぐり跳水的な流況を示しており、ゲートからの高速噴流と、周囲が拘束された低速水流との間に生じる大きな剪断が激しい乱れ発生の主要原因であると考えられる。したがってその乱れの結果として生じる管壁面における圧力変動の強度を理論的に見積るには、乱れ内部の流速や圧力などの平均量のみではなく、それらの時間的な変動成分の定量化が要求される。

しかしながら、同一地点でも正反両方向の平均流が混存する乱れの場合の変動量を正確に測定するには、測定器の精度からしてかなり困難なことであり、その変動量と平均場の特性とを結びつける方法にも問題がある。さらには管内部での乱れと、粘性底層を介した管壁面での圧力の変動との関連についても判然としていない。そこでここではゲート直下流の管壁面での圧力変動の特性を実験的に解明するために、まず本現象に関与すると思われる水理量について次元解析を行い、それを基に実験を進めることとした。

一般にゲート直下流の管壁面での瞬間圧力  $p$  は、時間的平均圧力を  $\bar{p}$ 、その変動圧力を  $p'$  とするならば、

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

となる。Fig. 2 はゲート直下流の管壁面における圧力の有限時間内 (0.01秒間隔でサンプリングされた3000個すなわち30秒間) での平均値  $\bar{p}$ 、最大値  $p_{max}$  および最小値  $p_{min}$  をゲートからの距離に対して示した一

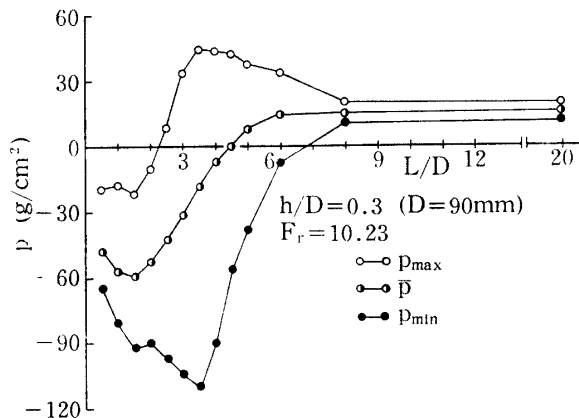


Fig. 2. Distribution of mean, maximum and minimum pressure along the distance from the gate.

例であるが、明らかに乱れの激しい測点では平均値の回りに大きく変動している。そこでこの圧力変動の強さを規定する方法として、変動圧力  $p'$  の標準偏差をもって定義することとする。すなわち

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

とする。ただし  $p_i$ : ある読取り間隔でサンプリングされた瞬間圧力値,  $\bar{p}$ : その平均値,  $N$ : 読取り個数。

このように定義されたゲート直下流の圧力変動の強さ  $\sqrt{p'^2}$  は、ゲート通過時の平均流速  $v$ 、水の密度  $\rho$ 、

重力の加速度  $g$ 、ゲートの開度高  $h$ 、管径  $D$ 、ゲートからの距離  $L$  などの水理量に關与するものとする。すなわち

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

となる。これを  $\pi$  定理により次元解析すると次のような無次元量にて表わされる。

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

またここで上式の左辺の値を  $c_p$  と置き、これを圧力変動係数と呼ぶこととする。すなわち

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

とし、変動圧力水頭をゲート部分での流速水頭で割った値が圧力変動係数  $c_p$  である。なお  $w_0$  は水の単位重量である。

これらの結果から、実験では (4) 式中の無次元量を変量として進めることとした。

実験方法およびデータ処理方法

実験には内径 90mm および 150mm の2種類の透明なアクリル製の管水路を使用し、その途中に Fig. 3 に示すような先端が水平な標準型オリフィスのリップ

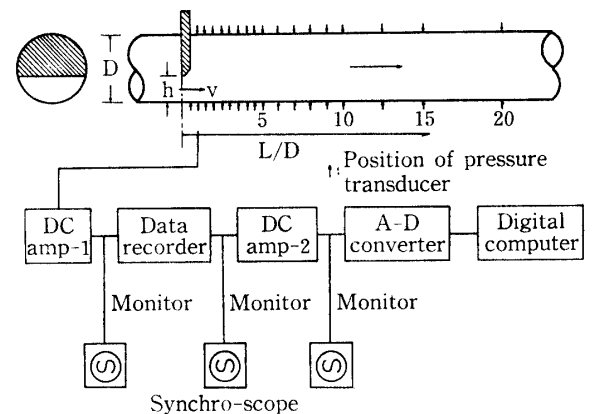


Fig. 3. Experimental setup and block diagram of data reduction system.

を有するゲートを設置した。またゲート下流側の管路の壁面には圧力取り出し用の孔を多数設けている。圧力測定は拡散型小型圧力変換器をゲート下流側の圧力取り出し孔に順次設置し、その電気的な出力を増幅したのち、データレコーダで磁気テープに記録させる方法で行った。そのデータレコーダからの出力はさらに増幅したのち、A-D 変換器によって一定の時間間隔

でサンプリングされたデジタル量に変換され、デジタル計算機で直接処理されるようシステムを構成した。

このさい圧力変動の様子をシンクロスコープで監視したところ、その周波数は最高で約 50Hz 程度であったので、1 Hz を最低 2 回読み取ることが出来るように読み取り間隔は主に 0.01秒で行った。なお Fig. 4 は読み取り個数  $N$  と平均圧力  $\bar{p}$  および圧力変動の強

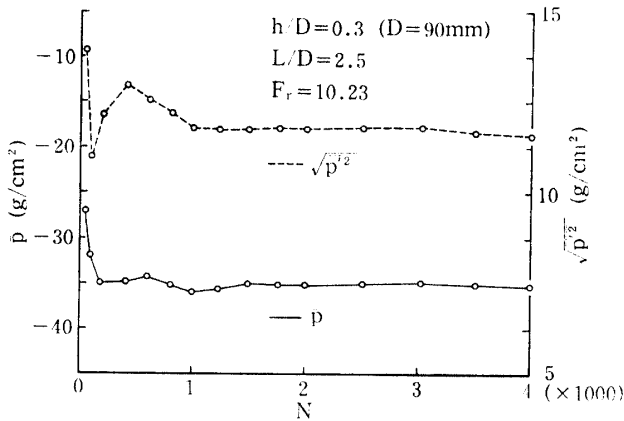


Fig. 4. Variation of mean pressure and root mean square of pressure fluctuation with sampling number.

さ  $\sqrt{p'^2}$  との関係を示した一例である。いずれも 1500~2000個程度でほぼ一定値に収束しているが、処理個数としては3000個 (30秒間) とした。また0.01秒間隔でサンプリングした圧力値のヒストグラムを Fig. 5 (90 mm 管) に示しているが、前報<sup>1)</sup> の 150mm 管での結果と同様、非等方性乱流場と考えられる管壁面での圧力変動でも、ほぼガウス分布が成立している。

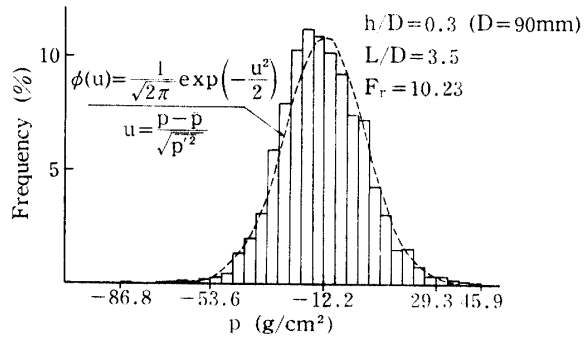


Fig. 5. Distribution of temporal pressure.

実験結果および考察

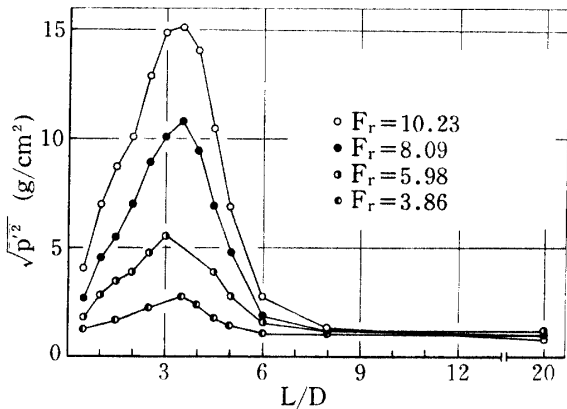
1. 圧力変動の強さ  $\sqrt{p'^2}$

ゲート直下流の管底部壁面における圧力変動の強さ  $\sqrt{p'^2}$  とゲートからの距離  $L/D$  との関係を 90 mm 管のゲート開度  $h/D=0.3$  および  $h/D=0.5$  の場合について Fig. 6 に示している。図から明らかなように同一開度ではゲート部分でのフルード数  $F_r$  が大きいほど、すなわち流速の増大に伴って変動の強さ  $\sqrt{p'^2}$  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から当然な結果といえる。詳細な考察については、圧力変動係数  $C_p$  との関係として次節以下で行うこととする。

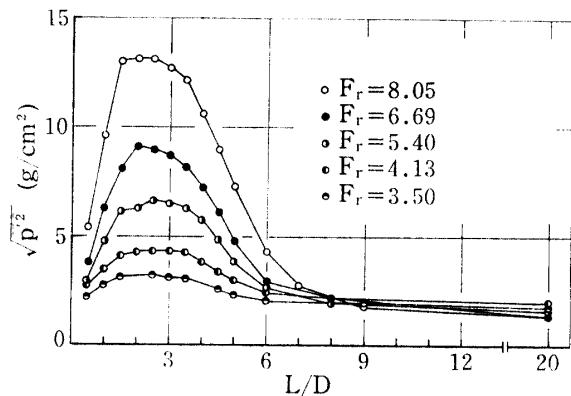
2. 圧力変動係数  $C_p$

(1) フルード数  $F_r$  と  $C_p$  との関係

ゲート直下流の管底部壁面での圧力変動の強さ  $\sqrt{p'^2}$  をゲート部分での流速水頭で除した値の圧力変動係数  $C_p$  とゲートからの距離  $L/D$  との関係を、90 mm 管のゲート開度  $h/D=0.2$  および  $h/D=0.4$  の場



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



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

Fig. 6. Relation between intensity of pressure fluctuation and distance from the gate for various Froude number, ( $D=90$  mm).

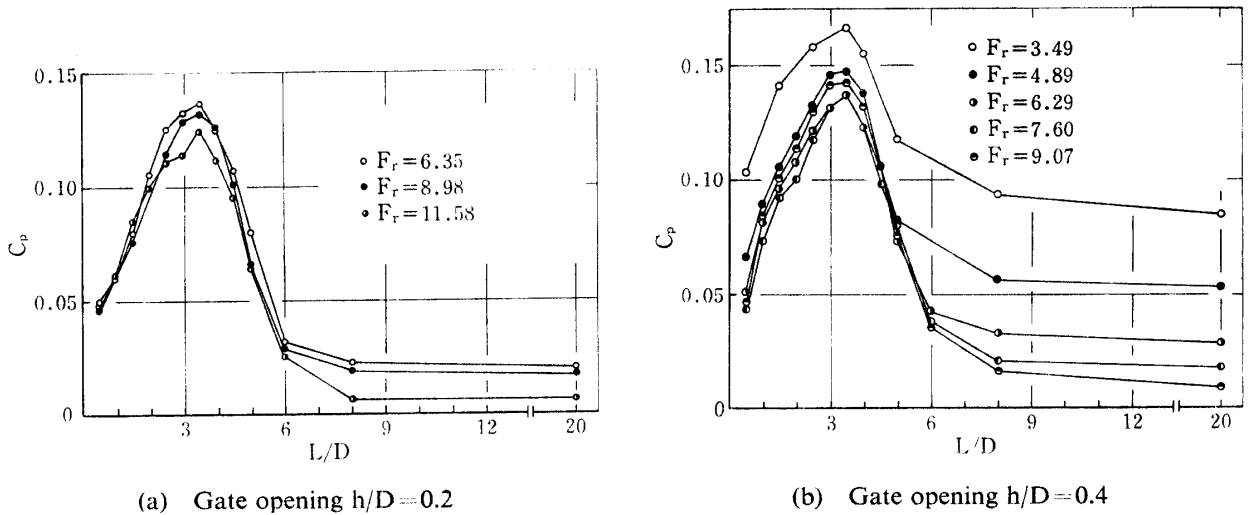


Fig. 7. Relation between coefficient of pressure fluctuation and distance from the gate for various Froude number, ( $D=90$  mm).

合について Fig. 7 に示している。同図から明白なごとく、フルード数  $F_r$  が 5~6 以上の流況時には、ゲートの部分開放によって生じた水流の乱れが激しい場所 ( $L/D=2\sim5$  付近) では、フルード数  $F_r$  に無関係に圧力変動係数  $C_p$  は、多少のばらつきはあるものの同一測点ではほぼ一定値を示している。すなわち圧力変動の強さ  $\sqrt{p'^2}$  はゲート部分での平均流速  $v$  の 2 乗に比例的であり、乱れの影響が管壁面まで完全に伝達されていることを表わしている。

しかしながらフルード数  $F_r$  が 3~4 以下のような乱れの規模が小さいときや、ゲートによる水流の乱れが収まったおよそ  $L/D=8$  以降の場所では  $C_p$  は一定値とはならず、フルード数の減少に伴ってその値は段々増大している。これはもぐり跳水的なゲート直下流の乱れが小規模であったり、減衰してしまっているために、壁面での圧力の変動としての影響は軽減され、 $\sqrt{p'^2}$  の値が  $v^2$  に比例的でなくなるためである。

このことはゲートを全開状態にして、単に水流が管内に流下するときの壁面における圧力変動を測定した結果を示した Fig. 8 から明白である。同図はゲートを部分開放したときに生じる激しい乱れの影響が収束するおよそ  $L/D=8$  以降の圧力変動に相当するが、明らかに圧力変動係数  $C_p$  の値はレイノルズ数  $R_e$  と一義的な関係にあり、定数値を示していない。これは壁面付近で発生する剪断乱流による圧力変動であることから、壁面付傍の層流底層の存在による粘性の影響が顕著となることを考慮すれば当然な結果といえる。

なおこのさいの瞬間圧力変動の値  $p'$  は極めて微小であることから、測定値に多少の誤差が考えられるこ

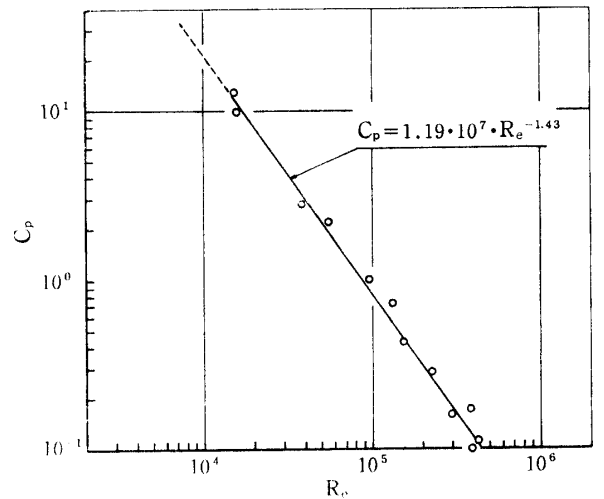


Fig. 8. Relation between coefficient of pressure fluctuation and Reynolds number under full opening of the gate, ( $D=150$  mm).

と、管路の最下流端での流出時に発生する脈動が管路系の固有周期によって上流に伝播し、変動圧力に加算されている可能性があることから、同図中に示している式の数値については、さらに吟味を要すると考えられる。

しかしいずれにしてもゲートの部分開放による乱れが極めて激しい場所での圧力変動の強さ  $\sqrt{p'^2}$  はゲート部分での平均流速  $v$  の 2 乗に比例し、それ以外の場所や乱れが強い流況時の  $\sqrt{p'^2}$  の値は、その状況により 2 乗以下の指数に関係するものと判断できる。

(2) 最大圧力変動が生じるゲートからの距離

ゲートをおある開度で部分開放したとき、その直下流側の壁面での圧力は激しく変動するが、最も大きな圧力変動係数  $C_p$  が生じるゲートからの距離  $L/D$  を開度  $h/D$  ごとに、フルード数  $F_r$  との関係で示したのが Fig. 9 である。圧力の測定間隔が  $L/D=0.5$  ごとで

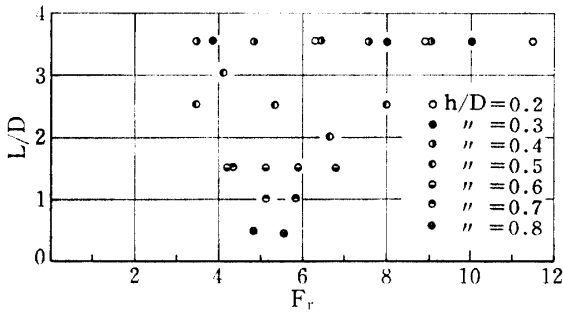


Fig. 9. Distance from the gate occurring the maximum of  $C_p$ , ( $D=90$  mm).

あったことや、装置の制約で開度が大きい時に幅広いフルード数の測定が不可能であったことから、厳密さには欠けるが本実験条件の範囲内では、開度が比較的小さな  $h/D=0.2, 0.3, 0.4$  の場合には、最大圧力変動の発生地点は全て  $L/D=3.5$  となっているのは注目し得る。中間の開度である  $h/D=0.5$  ではばらつきがあるがほぼ  $L/D=2.5$  付近（ばらつきの原因は  $L/D=2.0, 2.5, 3.0$  での  $\sqrt{p'}^2$  の値にほとんど差がないためである）、それ以上の開度では開度の増加に伴ってゲート方向すなわち上流側に近づいてくる。また全体的にみて、最大圧力変動が生じる場所はフルード数  $F_r$  にはほとんど影響されず、開度  $h/D$  だけに依存している。これらのことは、小開度のときにはゲートからの水流が *wall jet* あるいは自由噴流的な流況であるため、

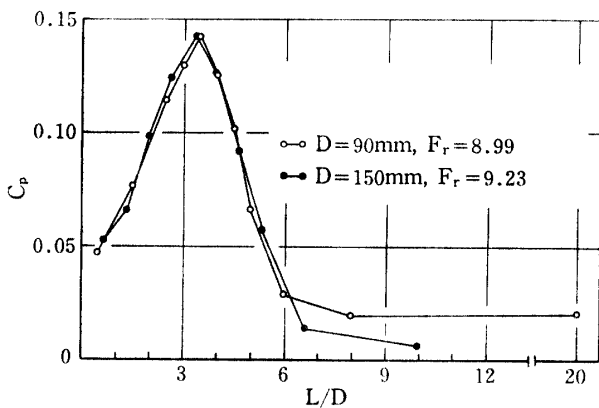
ゲート部で有している最大速度の通減の程度が小さく、高流速が長く存在して乱れの中心が  $L/D=3.5$  付近とかなり下流となり、一方開度が大きい場合にはゲート部での流速とその下流側の流速と大差がないため、速やかに下流側の流況に同化してしまい、乱れがゲートのごく近傍で生じることになるのであろう。しかしながら、ゲートを部分開放したことによる乱れの影響が完全に収束するのは、いずれの開度とも大体  $L/D=8$  付近であることは特記すべきことであらう (Fig. 6 および Fig. 7 参照)。

(3)  $C_p$  に及ぼす管径の影響

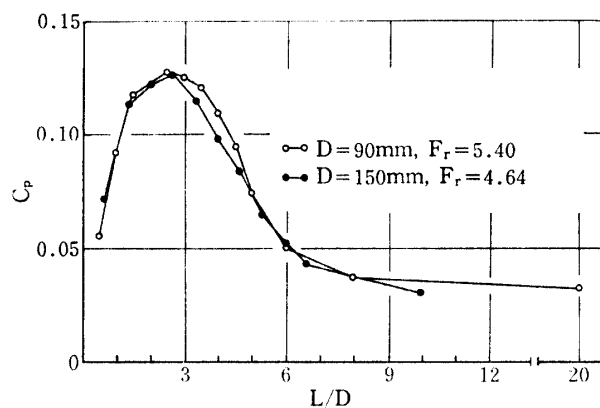
前記のごとく、ゲート部でのフルード数  $F_r$  が 5 ~ 6 程度以上の流況時には、ゲートによる乱れの激しい測点での圧力変動係数  $C_p$  は、ほぼ一定値を示すことが判明した。そこで内径 90 mm 管と 150 mm 管とで、同じ型式のリップを有するゲートを設置した時のゲート直下流の管底部における圧力変動係数  $C_p$  の値を、同じようなフルード数  $F_r$  で比較したのが Fig. 10 である。同図から明白なように、同一開度であれば両管径の  $C_p$  の値は、ゲートからの距離  $L/D$  に対してもかなり良好な一致をなしており、寸法効果 (*scale effect*) の影響は見受けられない。またこのことから次元解析によって求められた (4) 式で示された無次元量を変量としての実験手順は適切であったといえよう。

(4) 管底部壁面と上部壁面における  $C_p$  の比較

前述までのゲート直下流の圧力変動係数  $C_p$  は管底部壁面に沿って測定された値によって整理されてきたが、開度が小さいときと大きいときで同じようなフルード数でも、その最大変動値にかなりの差があることが指摘された。そこで同一  $L/D$  の測点においても管底部と上部とで圧力変動の特性に差異があるのでは



(a) Gate opening  $h/D=0.2$



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

Fig. 10. Comparison between  $C_p$  of 90 mm pipeline and that of 150 mm.

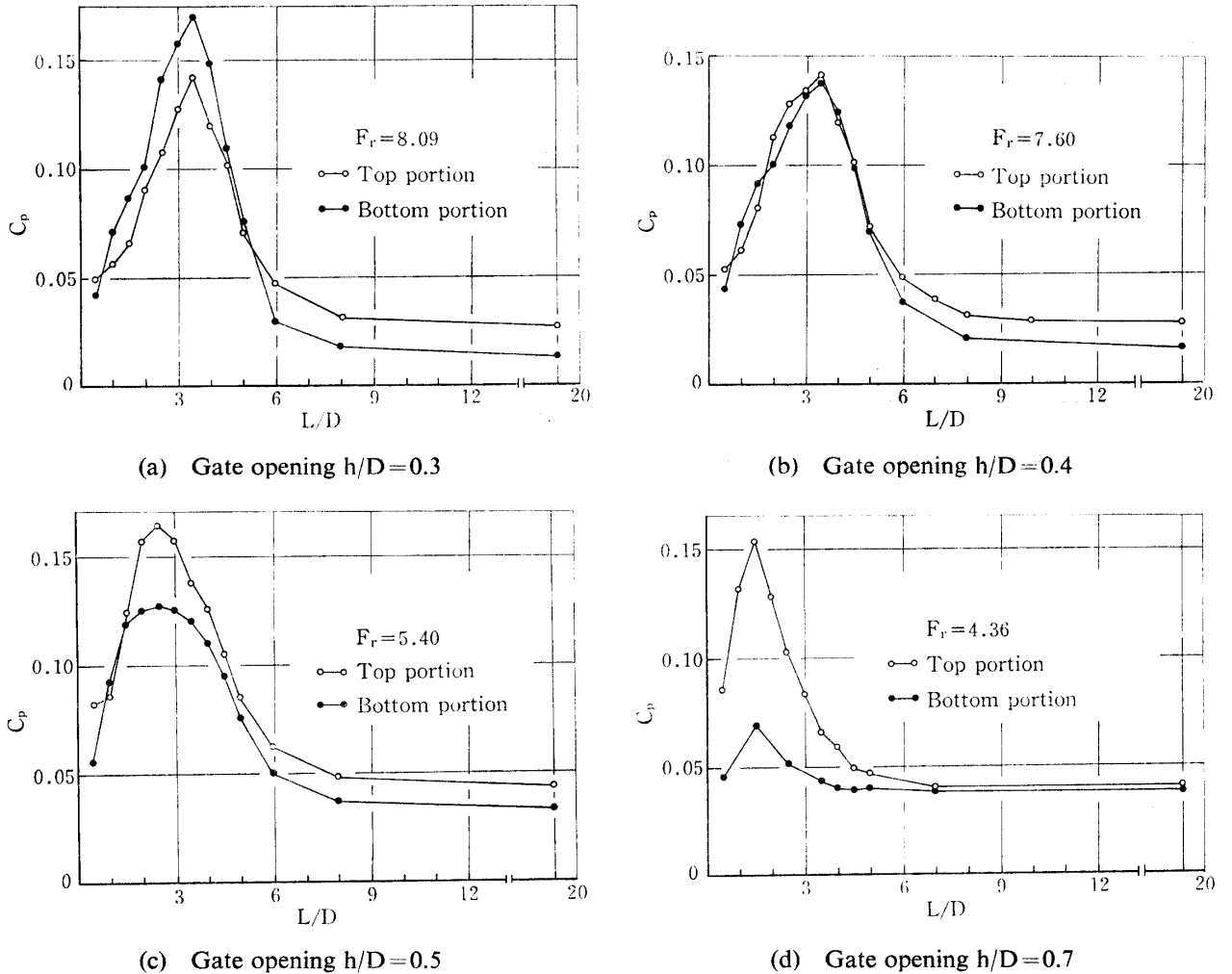


Fig. 11. Comparison between  $C_p$  at bottom portion of pipe section and that of top portion, ( $D=90$  mm).

ないかと推察し、その比較検討を行った。Fig. 11 は開度別に、同一流量すなわち同じフルード数での結果を表わしたものである。乱れが激しい測点での  $C_p$  の値は、開度が小さい  $h/D=0.2\sim 0.3$  のときには管底部での値の方がやや大きい程度で、 $h/D=0.4$  開度でほぼ等しくなり、それ以上の開度のときには逆に管上部での  $C_p$  の値が大きくなり、開度の増加に伴ってその差が増している。これは開度が比較的小さいときには、ゲートからの噴流が攪乱される中心の位置が管断面中央よりもやや下方寄りである程度なのに対して、開度が大きくなるにつれて乱れの中心が管上部方向に片寄り、乱れの中心から管壁面までの距離の相違により、圧力の変動の散逸に差が生じるためであると推定できる。

(5) 最大圧力変動係数  $C_{p\max}$

前記の結果から圧力変動係数  $C_p$  は、開度によっては管の底部と上部とでその値にかなりの差があること

と、ゲート部でのフルード数  $F_r$  が 5～6 以上の乱れが充分激しい場合には、 $C_p$  の値はほぼ一定値を示すことの両者を考慮した上で、ゲートを部分開放した時にその下流側で最も圧力変動の強さが大きい  $C_{p\max}$  の値を、開度ごとに列記したのが Table 1 である。すなわち同一開度では管底部を上部とで  $C_{p\max}$  の大

Table 1. Maximum values of  $C_p$ , and the positions where those occur

$h/D$	Position of piezometer	$L/D$	$F_r$	$C_{p\max}$
0.2	Bottom	3.5	8.98	0.132
0.3	"	3.5	5.98	0.159
0.4	"	3.5	9.07	0.143
0.5	Top	2.0	5.40	0.156
0.6	"	2.0	5.98	0.153
0.7	"	1.5	4.37	0.153
0.8	"	1.0	4.83	0.141

きい方の値を記載している。圧力測定の間隔が  $L/D=0.5$  であることや、測定機器システムの精度などからして、その値に多少のばらつきがみられるが、全ての開度にわたって  $C_{p \max}$  はかなり一致する結果を示している。つまりゲート直下流の壁面での圧力変動係数の最大値  $C_{p \max}$  は、フルード数や開度には無関係にほぼコンスタントな値  $C_{p \max}=0.14\sim 0.16$  になることを意味している。すなわち

$$C_p = \frac{\sqrt{p'^2}}{\rho v^2 / 2} = 0.14 \sim 0.16 \quad (7)$$

$$\therefore \sqrt{p'^2} = (0.14 \sim 0.16) \frac{\rho v^2}{2} \quad (8)$$

となり、ゲート部での流速を知ることは容易なことから、(8) 式より圧力変動の強さ  $\sqrt{p'^2}$  を予測することが可能であるといえる。

### 3. 圧力変動の周波数分析

#### (1) 卓越周期の有無

ゲートを部分開放したとき、その直下流での管壁面における不規則な圧力変動の中に、何らかの卓越した周期性が存在するか否かを察知するためにスペクトル分析を行った。Fig. 12 に一例として、150mm 管での開度  $h/D=0.4$  のときの圧力変動のスペクトル分布を示している。図には  $\sqrt{p'^2}$  の値が最も大きなゲートからの距離  $L/D=3.33$ 、その上流の  $L/D=1.33$  および変動がかなり収まった  $L/D=6.67$  の各地点でのパワースペクトルを表示しているが、いずれの測点とも顕著な卓越した周期は見受けられず、ゲート直下流の激烈な乱れに起因する種々な周波数が混在していて、卓越周期の存在は否定的である。なお乱れが収まった  $L/D=6.67$  地点のスペクトルに、10.5 Hz 付近にやや小さな山が見られるが、これは実験に使用した管水路系の固有振動数であり、乱れの激しい測点ではこれすらも埋没してしまっている。また開水路における跳水現象には 4.5 Hz 程度の固有振動周期が存在するともいわれているが<sup>4)</sup>、この場合も実験的に用いた開水路の系としての固有振動が表面に突出した可能性も考えられる。

#### (2) 高周波領域の分析

管壁面における圧力変動は、管内の乱れと一義的な関係にあることは当然な推論であるが、その乱れと圧力変動との結び付きについてはまだ不明な点が多い。一般の剪断流による乱流現象においては、レイノルズ応力 (Reynolds stress) による乱れの発生と粘性散逸とが総量において一致し、乱れの発生では波数が小さくて、大きなスケールを持つ渦が平均流から乱れのエネ

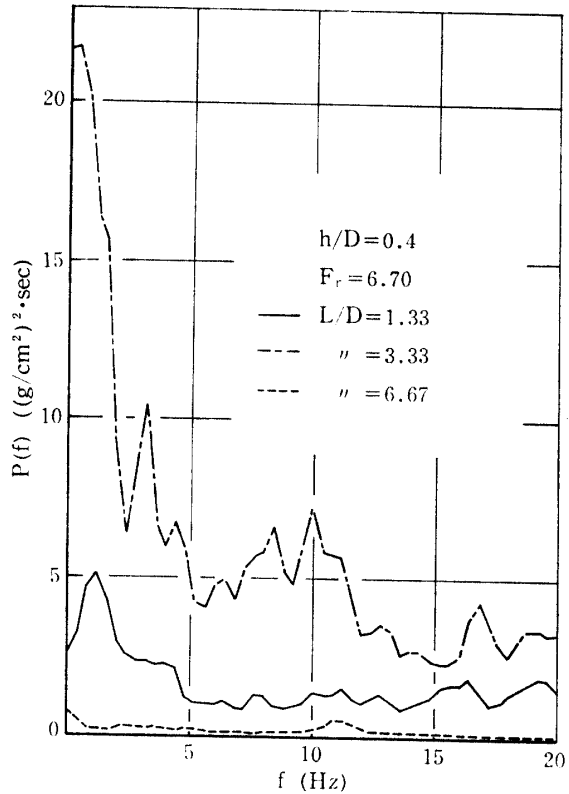


Fig. 12. Power spectra of low frequency region, (D=150 mm).

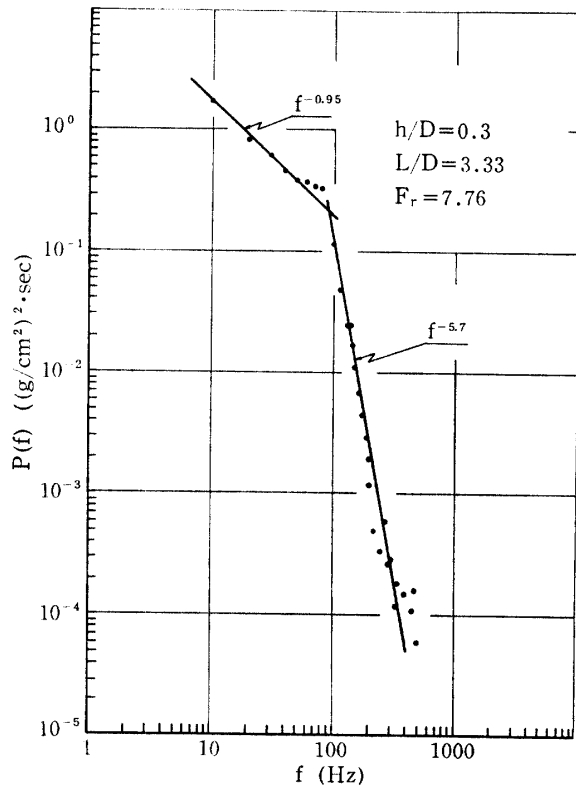


Fig. 13. Power spectra of high frequency region, (D=150 mm).

ルギーを受け取り、それが波数の大きいスケールの小さな渦に順次手渡されてゆくような機構によって散逸していく過程が存在するといわれている<sup>3)</sup>。

またパワースペクトルにおいて、乱れ発生の規模をもつスケールの波数と粘性散逸が卓越し始める波数との間に、ほぼ散逸率に等しいエネルギーが順次波数の大きい渦に手渡されていく慣性領域が存在することも知られている。さらにその慣性領域においては、スペクトルと周波数との関係は  $-5/3$  乗則が成立することが広く認められているのに対して、粘性領域については  $-7$  乗則や  $-3$  乗則など色々な論説があり、不明な点が多いとされている。

今回のゲート直下流の管壁面における圧力変動についても高周波領域の分析を行ってみた。Fig. 13 は管径 150 mm, ゲート開度  $h/D=0.3$  の状態で圧力変動が最も激しい  $L/D=3.33$  測点での高周波領域の分析結果を示している。明らかに単なる壁面における剪断流による乱流現象とゲートの存在によって生じた乱流とでは、その乱れエネルギーの散逸状況を異にするようであり、上記の慣性領域も判然としていない。これはやはり壁面での粘性底層を介した圧力変動は、管の中心付近における乱れの変動形態とかなり大きな相違があることを示唆しているものであり、今後さらに追究していきたい。

### 要 約

管水路に設置されたゲートやバルブを部分開放したとき、水理条件によってはその直下流の壁面における圧力は激しく変動する。これはゲートからの高速流と、

その直下流の低速流との間の大きな剪断に起因する乱れ発生によることは明白であるが、管壁面での圧力変動を理論的に見積ることは困難であるので、ここではゲート直下流の管壁面における圧力変動特性について実験的な検討を行い、次のような結果を得た。

1. 圧力変動係数  $C_p$  は、乱れが激しいときにはフルード数に関係なく一定値を示す。
2. 最大圧力変動が生じるゲートからの距離は開度によって異なるが、フルード数にはほとんど無関係である。
3. 90 mm 管と 150 mm 管における  $C_p$  の分布状態を対比したところ、その差はほとんどなく寸法効果に対する修正を必要としない。
4. 同一条件の下でも管断面の底部と上部とで  $C_p$  の値に相違がある。これは乱れの中心から壁面までの距離の相違により、変動の散逸が異なるためであろう。
5. 圧力変動には卓越周期は見受けられない。また高周波領域の分析では、壁面剪断流による変動流速の場合と異なる分布状態をなす。

### 文 献

- 1) 長 勝史：制水ゲート直下流の圧力変動特性。鹿大農学術報告, No. 30, 239-244 (1980)
- 2) 石原藤次郎編：水工水理学。p. 141-148, 丸善, 東京 (1972)
- 3) 椿 東一郎：水理学 II。p. 151-159, 森北出版, 東京 (1974)
- 4) Vasiliev, O. P.: Statistical characteristics of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump. IAHR, 1-8 (1967)

### Summary

When a gate or a valve established in a pipeline is partly opened, the pressure coming at the wall of its downstream fluctuates severely in case of an excessive hydraulic condition.

It is apparent that the intense shear between the high velocity flow from the gate and the low velocity flow at its downstream should give rise to a generation of turbulence, but it is very difficult to estimate the magnitude of the fluctuation at the wall by means of theory. Therefore some investigations on the characteristics of pressure fluctuation at the downstream of the gate was carried out by experimental approach, and the following conclusions were obtained.

1. In case of intense turbulence coefficient of pressure fluctuation,  $C_p$  keeps itself almost constant in spite of the Froude number-variations at the fixed gate-opening and its position.
2. Due to the height of the gate-opening, the distance from the gate where the maximum pressure fluctuation occurs, varies but is independent of Froude number.
3. Distribution-patterns of  $C_p$  at the downstream of the gate for 90 mm pipeline and 150 mm pipeline are quite similar, so accordingly no corrections for scale effect are needed.



4. Even under the same condition, values of  $C_p$  at the bottom portion of pipe section differ from that at the top portion. This may be a reason why dispersion of fluctuation refers to the distance from the center of turbulence to the wall.

5. It seems that there is no indication of dominant frequency concerning pressure fluctuation. And the spectral profile of high frequency region is unlike to that of the velocity-fluctuation due to the wall shear flow.