

振動する水門からの放水流の特性と流体圧力に関する理論解析結果の検証

Characteristics of discharge flow from vibrating gates and examinations of theoretical calculation on hydrodynamic pressure

中田亮生*、石井徳章**、徳島耕次***、阿南景子****、草野一石*****

Akinori Nakata, Noriaki Ishii, Kohji Tokushima, Keiko Anami and Ichishi Kusano

*工博、大阪電気通信大学講師、工学部第2部知能機械工学科(〒572-8530 大阪府寝屋川市初町18-8)

**工博、大阪電気通信大学教授、工学部第1部知能機械工学科

***工博、大阪電気通信大学教授、工学部第2部知能機械工学科

****工修、大阪電気通信大学大学院、工学研究科博士課程(後期)

*****大阪電気通信大学大学院、工学研究科博士課程(前期)

This paper presents results of tests of the variations in discharge flow from a model gate vibrating in the vertical direction, and the hydrodynamic pressure acting on the vertical weir plate, to verify the validity of the calculations of hydrodynamic pressure performed by Ishii. The discharge flow velocity induced by the gate vibration was measured along the whole gate opening just under the gate lower end, using an LDV, in order to measure the flow rate variations. Variations in flow rate amplitude were divided by the ideal flow rate change, to obtain the instantaneous flow rate coefficient. The vibration-induced hydrodynamic pressure was measured, and was compared with values predicted from the measured instantaneous flow rate coefficient.

Key Words : Fluid dynamics, Oscillatory flow, Flow measurement, Flow rate variation

キーワード : 流体力学、振動流れ、流体計測、流量変化

1. はじめに

幅の広い川の流れをせき止める長径間ゲートや、ダムの非常放水用に利用されるテンタゲートなどに代表される大型の水門が、放水時に自励振動を引き起こす事例がいくつか報告され、その危険性が指摘されている^{1)~5)}。

一般に水門の自励振動については、その下端からの放水状態がもろり流出の場合にしばしば発生するせん断渦に起因するもの⁶⁾がよく知られている。しかし、そのような渦に依存せずとも非常に激しい自励振動が引き起こされる場合が、特に微小開度での放水時に多く見られる。これは、構造物の流水中での固有振動が放水口開度を直接変化させ、それが放水流量を変化させてしまうことに起因している。放水流量の変化は、貯水池内の水圧を変化させるので、それが水門の振動をさらに増大させるような適当な条件下では、非常に激しい自励振動が発生することになる。

この種の自励振動問題を解決するために、著者らの研究グループでは、現場での調査^{2),3),5)}とモデルを用いた実験^{4),7)~11)}を行い、振動発生の基本メカニズムを明

らかにしている。さらに、理論的な解析も進行中である^{12)~18)}。理論解析を行う際に重要なことの1つは、貯水池内の水圧が放水口開度の変化に伴ってどのように変化するのかを正確に把握しておくことである。これについて石井らは、ポテンシャル理論を用いた解析を行っており^{12),13)}、著者らは、その解析結果をシェル構造の長径間ゲートに適用して流体力を求め、自励振動に関する運動方程式を導いている^{14),15)}。しかしながら、運動方程式に含まれる流体力の項には、放水口での流量が開度の変化に対してどの程度変化するのかを表す変動流量係数(動的な流量係数)の値が未知数のままで含まれているため、自励振動の解を具体的な形で算出することが難しい。そこで、小型のモデルゲートをいろいろな周波数で強制的に振動させて、放水流の流速をLDVで計測し、変動流量係数を実験的に求めるという手法をとった^{19),20)}。ただし、このような方法で求めた変動流量係数と流体圧力に関する石井らの理論解析の妥当性を是非確かめておく必要がある。そのためは、実験で求めた変動流量係数の値を用いて、流体圧力に関する理論解析値と実測値とを直接比較す

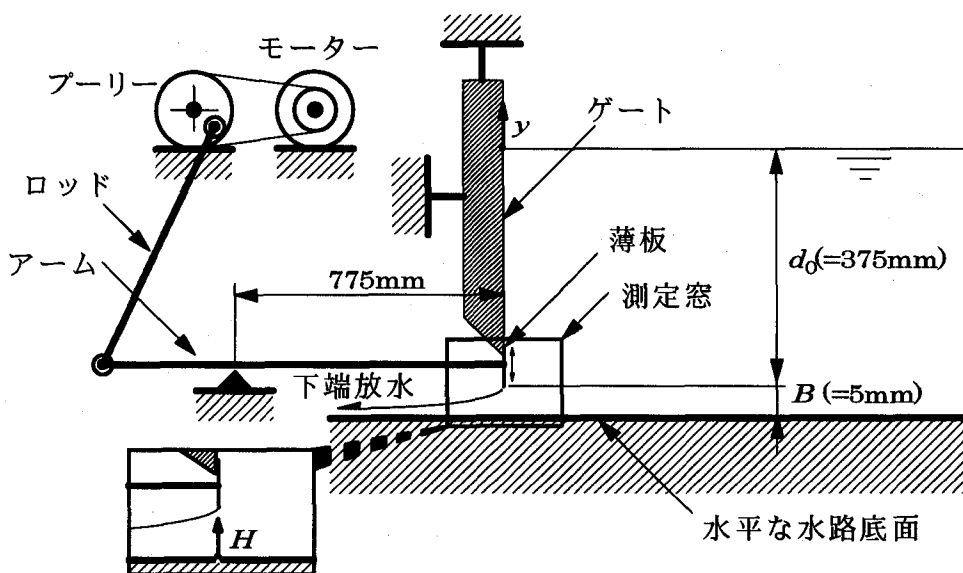


図-1 実験モデルの概略図

ればよい。

以上のような背景から、本論文では第1に、垂直なせき板をもつ最も単純なモデルゲートについて、その放水口開度を微小振幅で周期変動させ、放水口部分での流速を計測した結果を示す。第2に、その結果から、変動放水流の流量係数と位相の特性を明らかにする。第3に、ゲートに作用する変動圧力について、ポテンシャル理論を用いた石井らの解析結果の一例を示す。最後に、求められた変動流量係数の値を用いて流体圧力に関する石井らの理論解析値と実測値とを比較し、実験で得られた変動流量係数と圧力に関する理論解析の妥当性を検証する。

2. 実験モデル

実験に用いた2次元のモデルゲートを図-1に示す。ゲートは径間方向の長さ100mm、高さ約1.2mの平板である。下端部分には厚さ0.5mmのステンレス製の薄板を取り付け、それを垂直なゲート前面に沿って上下方向に振動させることによって、放水口の開度を周期的に変化させることを可能にしている。ステンレス板は水平な回転アームの先端に取り付けられている。それゆえ、厳密に言えばステンレス板はアームの支点を中心にして円弧を描くように動く。ただし、今回の場合は円弧の角度が十分に小さく、かつアームの支点までの距離が比較的大きいため、その動きは近似的に直線運動とみなせる。

モデルゲートは、幅105mm、高さ1.1m、流水方向の長さ約5mの水路に垂直に設置されている。ゲート下端付近の水路側壁には、LDVでの計測を可能にするため、光学ガラスをはめ込んだ測定窓を設けている。

ゲート下端（ステンレス板の下端）の平均水深 d_0 が375mmになるように、水路の上流からは常に一定流量の水を供給した。放水口開度 B はゲート下端の平均水深よりも十分に小さい5mm、ゲート下端の振動振幅 Y_0 は0.45mmである。ゲートの下流側は水没させず、完全な自由流出の状態で行った。

3. 放水流速に関する実験結果

ゲート下端の振動数 f を0.5Hzから8Hzまで段階的に変化させ、ゲートの径間中央の放水口に設定した位置座標の H 軸（図-1の拡大図を参照）上での流速を、LDV（TSI、出力300mW）を用いて計測した。計測する方向は、水平な水路底面に対して平行である。

計測データの一例として、水槽底面からの測定高さ H が3.0mm、ゲート下端の振動数 f が3.0Hzの場合の流速波形を図-2の上段に示す。横軸は時間 T (sec) である。下段はゲート下端の振動変位を示す。上段の流速波形には比較的大きなノイズ成分が含まれるが、これは流水中に含まれる散乱粒子の不均一性によるものである。一方、下段の振動波形には、ステンレス板とゲート表面との摩擦による若干の乱れが含まれるが、比較的滑らかな周期振動である。

上下の図を比較すると、流速の波形には、ゲート下端の振動に同期した変動分が明らかに存在することがわかる。そこで、得られた放水流の流速 V ：

$$V = V_{avg} + V_0 \cos(2\pi fT - \phi_v) \quad (1)$$

をフーリエ変換し、平均流速 V_{avg} と変動流速の振幅 V_0 および位相遅れ角 ϕ_v を正確に分析した。位相の基準は、上方向を正とするゲート下端の振動変位 Y_G ：

$$Y_G = Y_0 \cos(2\pi f T) \quad (2)$$

である。すべての流速データに関する分析結果を図-3に示している。縦軸は、水槽底面からの測定高さ H を放水口開度 B で無次元化したものである。せき板下端 ($H/B=1.0$) 近傍のデータが無いのは、LDVのプロープから発せられる2本のレーザ光線が、上下に動くステンレス板そのものに遮られることと、一部放水流の外側に出てしまうことの原因から計測できなかったためである。パラメータの F は流れ場の相似性を支配するフルード数 F :

$$F = \sqrt{d_0 / g} 2\pi f \quad (3)$$

ただし、 g : 重力加速度

である。

平均流速 V_{avg} を、せき板下端の水深 d_0 での理論流速 $\sqrt{2gd_0}$ で無次元化したものを図(a)に示している。

今回の場合、理論流速は 2.7m/s になる。無次元化した平均流速は、フルード数と測定位置にあまり依存せず、約 0.7 の値をとる。平均流速がこのように理論流速よりも小さくなるのは、放水口の後方で生じる縮流²¹⁾の影響であり、放水口開度の周期的な変動に起因するものではない。

変動流速の振幅を図(b)に示す。平均流速の場合と同じ基準量で無次元化している。その振幅値は、フルード数が大きくなるにしたがって徐々に増大する傾向を示す。ただし、最大でも 0.014 程度であり、平均流速よりはるかに小さい。位相遅れ角 ϕ_v を図(c)に示す。フルード数が比較的小さいときは全体的に 180° 近傍の値をとるが、フルード数が大きくなるに従って全体的に小さくなる傾向を示す。

4. 変動放水流の流量係数と位相遅れ角

ゲートの振動による放水口開度の変化分は、式 (2) で示した振動変位 Y_G で表される。これまでの理論的な取り扱い^{12),13)}では、基本的に、この開度の変化分に理論流速 $\sqrt{2gd_0}$ を掛けることによって、放水流の増加分が算定できるものとした。

$$\Delta Q = c_f \sqrt{2gd_0} Y_0 \cos(2\pi f T) \quad (4)$$

ただし、 c_f が変動流量係数であり、具体的な数値に関する理論的な検討は未だ行われていない。

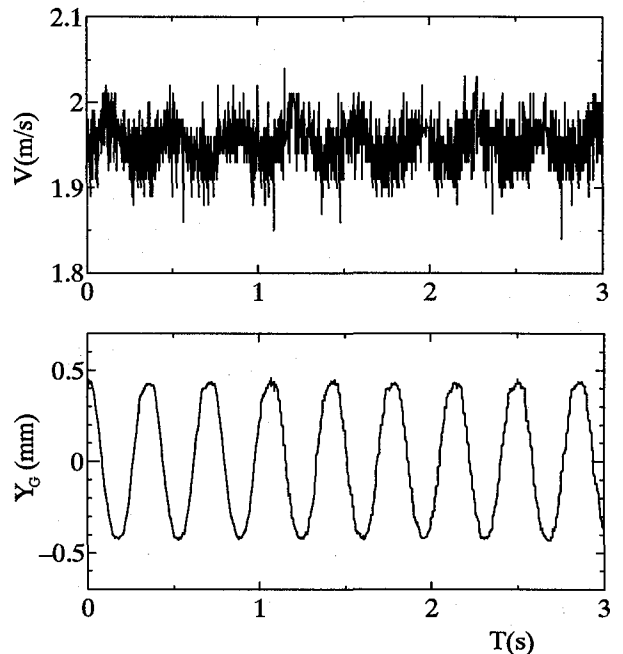


図-2 放水口における流速 V とゲート下端の振動変位 Y_G に関する実時間波形の一例 ($H=3.0\text{mm}$, $f=3.0\text{Hz}$)

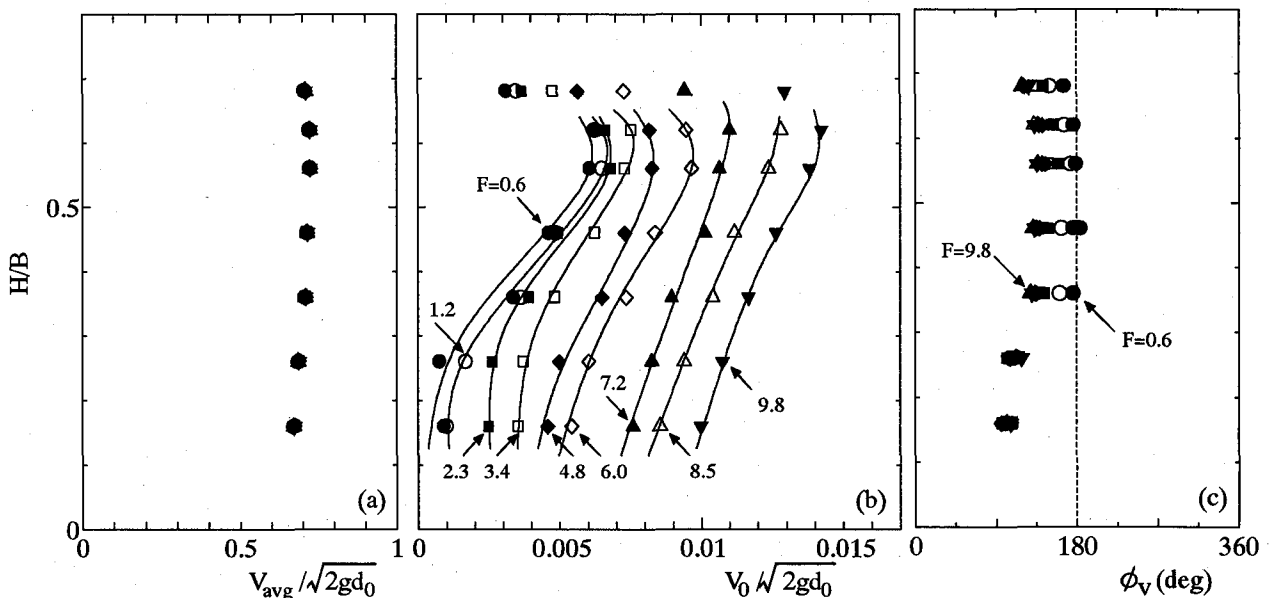


図-3 平均流速と変動流速の振幅および位相遅れ角

すでに図-3に示したように、開度の変化に伴って放水口全域の流速が変化する。それゆえ、実際の流量変化分 ΔQ_{ex} は、流速の変化による流量変化分 ΔQ_v と放水口開度が変化するに直接起因する流量変化分 ΔQ_b との和：

$$\Delta Q_{ex} = \Delta Q_v + \Delta Q_b \quad (5)$$

で求められる。ここで、 ΔQ_v は流速の変化を H 軸に沿って足し合わせたもの：

$$\Delta Q_v = Q_{v0} \cos(2\pi fT - \bar{\phi}_v) \quad (6)$$

$$\text{ただし、} Q_{v0} = \int_{H_L}^{H_U} V_0 dH$$

である。 H 軸に沿った積分範囲は測定域の下限 H_L から上限 H_U であり、今回の場合は0.8mmから3.4mmである。 $\bar{\phi}_v$ は位相遅れ角 ϕ_v の平均値であり、図3(c)のデータを平均化することによって求められる。さらに、 ΔQ_b は平均流速 V_{avg} の実測値に開度の変化 Y_G を掛けることによって求められる。

$$\Delta Q_b = Q_{b0} \cos(2\pi fT) \quad (7)$$

$$\text{ただし、} Q_{b0} = V_{avg} Y_0$$

式(6)と式(7)を式(5)に代入して整理すると、

$$\Delta Q_{ex} = Q_0 \cos(2\pi fT - \phi_Q) \quad (8)$$

となる。 Q_0 が実際の変動放水流量の振幅、 ϕ_Q がゲートの上方への動きを正とする流量変化の位相遅れであり、以下の式より求められる。

$$Q_0 = \sqrt{(Q_{v0} \sin \bar{\phi}_v)^2 + (Q_{v0} \cos \bar{\phi}_v + Q_{b0})^2},$$

$$\phi_Q = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{v0} \sin \bar{\phi}_v}{Q_{v0} \cos \bar{\phi}_v + Q_{b0}} \right) \quad (8')$$

理論的な評価式(4)と実測値に対する評価式(8)との相違は位相遅れ角 ϕ_Q である。式(8')の第2式から算出した ϕ_Q を図-4(a)に示している。フルード数が大きくなると位相遅れ角 ϕ_Q は0から徐々に大きくなる傾向を示す。それでも、今回実験を行ったフルード数の最大値(9.8)の場合でさえ、 5.0° のかなり小さな値である。したがって、式(4)で表される理論評価式において、位相に関する大きな誤りは無いといえる。

位相遅れ角を省略すると、式(4)と実測値に対する評価式(8)との振幅がそれぞれ等しいとおけるので、その関係から変動流量係数は次の形で算出できる。

$$c_f = \frac{Q_0}{\sqrt{2gd_0 Y_0}} \quad (9)$$

変動流量係数の特性を図-4(b)に示す。ただし、こ

れらの値は、ゲート下端を準静的に同じ振幅(0.45mm)だけ動かしたときに得られる流量係数を基準にして若干補正している。すでに説明したように、ゲートの下端部分と水路底面の近傍では、測定不可能な領域が存在する。したがって、このために生じる放水流量の算定誤差を補正する必要があった。

補正係数を求めるために、放水口開度が最も大きくなる場合($B=5.45\text{mm}$)と小さくなる場合($B=4.55\text{mm}$)にゲート下端を固定し、それぞれの場合の定常な放水流量を実測した。得られた流量の差から、0.45mmの開度変化が生じたときの準静的な流量変化分が、 $7.7 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ (ゲート単位幅当たり)であることがわかった。これを式(9)の Q_0 に代入して計算すると、準静的な流量係数は0.63になる。今回の実験で得られた変動流量係数は、周波数 f が0に近づくと、この準静的な実測値(0.63)に収束するはずである。このような考え方に基づいて、すべての変動流量係数のデータに同じ補正係数をかけて0.63に収束するように修正した。今回の実験における修正前の収束値は0.68であったため、補正係数は0.93になった。

フルード数が約7より小さい場合には、変動流量係数は準静的な値(0.63)にほぼ等しい。フルード数がそれよりも大きくなると、わずかに減少する傾向が見られる。これらは、放水口開度の変化に直接起因する流量変化分の割合が、流量変化全体に対して極めて大きいこと、フルード数が比較的大きくなると流速の変化に起因する流量変化分が僅かに増大することによる。

既報^{19),20)}で示したように、ゲートの振動と放水流の方向が直交しないような場合には、流速の変化による流量変化分の割合が比較的大きくなるために、変動流量係数がフルード数によって比較的大きな変化を見せる傾向があった。しかしながら、ゲートの振動と放水流の方向がほとんど直交するような今回の場合には、

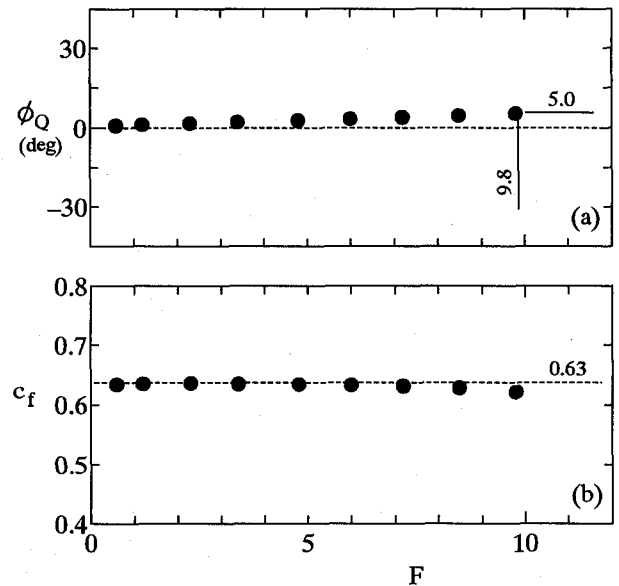


図-4 変動放水流の流量係数と位相遅れ角

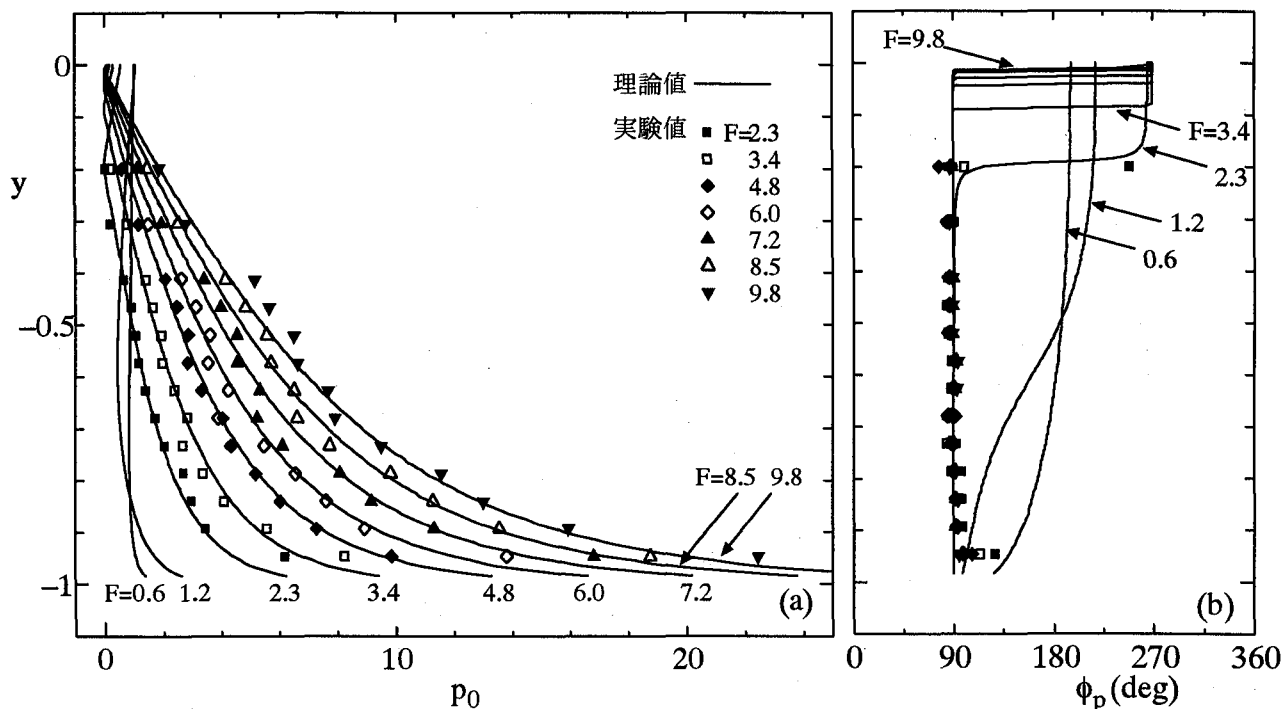


図-5 ゲート面に作用する流体圧力の無次元振幅と位相遅れ角

変動流量係数はフルード数にそれほど影響されないようである。

5. 流体圧力の解析結果とその検証

放水流量が変化する場合のゲート面に作用する流体圧力に関しては、ポテンシャル理論を用いた解析が石井らによって行われている^{12),13)}。その解析結果の一例を図-5に実線で示す。縦軸の y は、せき板に沿った上向きの位置座標をゲート下端の水深 d_0 で無次元化したものを示す。 $y=0$ が水面、 $y=-1$ がゲート下端である。

図(a)は、ゲートに作用する変動圧力の振幅 P_0 を、開度変化の振幅 Y_0 に相当する水頭の $\sqrt{2}c_f$ 倍で無次元化した無次元圧力振幅 p_0 :

$$p_0 = \frac{P_0}{\sqrt{2}c_f \rho g Y_0} \quad (10)$$

を表す。図(b)は変動圧力の位相遅れ角 ϕ_p を示す。位相の基準は、すでに式(2)で示したゲート下端の上下振動変位 Y_G である。パラメータはいずれもフルード数であり、今回の実験で設定した値と同じになるように選んでいる。

図中の記号で示すデータは、流速を計測した場合と同じ条件で、ゲート径間中央部での流体圧力の変化 P :

$$P = P_0 \cos(2\pi f T - \phi_p) \quad (11)$$

を、小型の圧力トランスデューサ（豊田工機、PD104W）を用いて計測し、その計測結果をフーリエ

変換することによって分析したものである。ただし、フルード数が 1.2 以下のデータでは、計測される圧力の振幅値が極めて小さくなるため、計測精度の問題から正確なデータが得られなかった。したがって、これらの実験データは比較の対象外として省略した。

変動圧力の振幅 P_0 は式(10)を用いて無次元化した。ただし、その際に必要な変動流量係数の値については、すでに図-4(b)に示した結果を用いた。無次元化された圧力の実測値は、図(a)に示すように、理論曲線によく一致している。一方、図(b)に示す位相遅れ角 ϕ_p についても、90° 近傍の理論値によく一致している。

6. 結論

本研究では、垂直なせき板をもつモデルゲートの放水口開度を、微小振幅で周期変動させた場合について、放水口部分での流速を計測し、その結果から変動放水流の流量係数と位相の特性を明らかにした。さらに、求められた流量係数の値を用いて流体圧力に関する理論解析値と実測値を比較し、実験で得られた変動流量係数および理論解析の妥当性を検証した。結果は以下のように要約できる。

- (1) 放水流の変動流量係数は、フルード数が約 7 より小さい場合には約 0.63 の一定値をとり、フルード数がそれよりも大きくなると、わずかに減少する傾向を示した。一方、放水流量の変化とゲートの動きとの位相差は、今回実験を行ったフルード数の範囲 (0.6~9.8) であれば、5.0° 以下のかなり小さな値をとることが分かった。
- (2) 求められた流量係数の値を用いて流体圧力に関

する理論解析値と実測値を比較した結果、フルード数が2.3から9.8の範囲で双方は非常によく一致することが確かめられた。これによって、限られたフルード数の範囲内ではあるが、ここで求めた流量係数の妥当性と、著者らが用いている流体圧力の評価法の有効性を証明できたと言える。

謝辞

㈱丸島アクアシステム、成実哲郎氏、松本征男氏から研究に着手する重要な手掛かりを得た。実験を行うにあたって、大阪電気通信大学大学院、畠中栄吉君、同大学工学部、木村健太郎君、加藤表正君に多大なご協力を得た。ここに謹んで謝意を示す。

参考文献

- 1) 石井徳章、Edward Naudascher、今市憲作：長径間ゲートの流体関連振動（第1報、運動方程式の導出）、日本機械学会論文集 B 編、53-495、pp.3267-3273、1987.
- 2) 石井徳章、中田亮生：水理構造物の諸問題（シェル形長径間ゲートの流体関連振動）、日本風工学会誌、59、pp.75-79、1994.
- 3) Ishii, N., Knisely, C. W. and Nakata, A. : Field Study of A Long-Span Shell-Type Gate Undergoing Flow-Induced Vibrations, J. Fluid and Structures, 9-1, pp.19-41, 1995.
- 4) Nakata, A., Ishii, N., Knisely, C.W., Irie, K. and Moriya, Y. : Effects of Weir Plate Inclination Angle on Flow-Induced Vibrations of Long-Span, Shell-Type Gates, JSME Int. J., Ser.C, 39-2, pp.203-211, 1996.
- 5) Anami, K. and Ishii, N. : In-air and in-water natural vibrations of Folsom Dam Radial Gate in California, 11th Int. Conf. on Exp. Mech., Exp. Mech. 1, Allison(ed.), 1998 Balkema, Rotterdam, pp.29-34, 1998.
- 6) Ishii, N. and Knisely, C.W. : Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates due to Shed Vortices (Vibration Criteria, Level of Fluid Excitation and Added Mass), JSME Int. J., Ser. III, 35-1, pp.1-8, 1992.
- 7) 石井徳章、岩尾憲孝、鈴木宏明：シェル形長径間ゲートの流体関連振動（第1報、アンダーフロータイプの基本的な自励振動特性）、日本機械学会論文集 C 編、56-531、pp.2880-2886、1990.
- 8) 石井徳章：シェル形長径間ゲートの流体関連振動（第2報、アンダーフロータイプの基本的な自励振動特性に関する検討）、日本機械学会論文集 C 編、57-533、pp.35-41、1991.
- 9) Ishii, N and Knisely, C.W. : Flow-Induced Vibration of Shell-Type Long-Span Gates, Journal of Fluids and Structures, 6-6, pp.681-703, 1992.
- 10) 石井徳章、中田亮生、野島貴彦：シェル形長径間ゲートの流体関連振動、構造工学論文集、38A、pp.837-850、1992.
- 11) Ishii, N., Knisely, C.W. and Nakata, A. : Coupled-Mode Vibration of Gates with Simultaneous Over-and Underflow, J. Fluids and Structures, 8-5, pp.455-469, 1994.
- 12) Ishii, N. and Naudascher, E. : A Design Criterion for Dynamic Stability of Tainter Gates, J. Fluids and Structures, 6-1, pp.67-84, 1992.
- 13) Ishii, N. : Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates (Part I : Model Development), J. Fluids and Structures, 6-5, pp.539-562, 1992.
- 14) 中田亮生、石井徳章：下端放水を行うシェル形長径間ゲートの流体関連振動に関する理論解析（第1報、運動方程式の導出）、日本機械学会論文集 B 編、63-606、pp.560-568、1997.
- 15) 中田亮生、石井徳章：下端放水を行うシェル形長径間ゲートの流体関連振動に関する理論解析（第2報、付加質量と流体減衰、発振係数）、日本機械学会論文集 B 編、66-646、pp.98-105、2000.
- 16) Anami, K. and Ishii, N. : In-Water Streamwise Vibration of Folsom Dam Radial Gates in California, Proc. PVP-Vol.363, pp.87-93, 1998.
- 17) Keiko ANAMI, Noriaki ISHII : Flow-Induced Coupled-Mode-Vibration of Folsom Dam Tainter-Gates in California, Proc. of PVP-Vol. 396, pp.343-350, 1999.
- 18) Anami, K., Ishii, N. : Flow-Induced Dynamic Instability Flow Induced Vibration Closely Related to Folsom Dam Tainter-Gate Failure in California, Proc. of 7th Int. Conf. on F. I. V. 2000, pp.205-212, 2000.
- 19) 中田亮生、石井徳章、西原一嘉、木村一郎、徳島耕次、西澤隆、小川弘道、朝田孝子：シェル形長径間ゲートにおける変動放水流の特性、構造工学論文集、Vol.43A、pp.995-960、1997.
- 20) Nakata, A., Ishii, N., Nishihara, K., Kimura, I., Tokushima, K., Ogawa, H. and Asada, T. : Instantaneous Flow Rate Coefficient for Shell-Type Long-Span Gates Vibrating under a Small Gate Opening, Proc. of 1997 ASME FED Summer Meeting, FEDSM97-3080, 1997.
- 21) 岩佐義朗：水理学、朝倉書店、pp.220-223、1967.
(2000年9月14日受付)