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)

Vibration Problems in Hydraulic Structures

(Flow-Induced Vibration of Shell-Type Long-Span Gates)

石井徳章*¹

Noriaki ISHII

中田亮生*²

Akinori NAKATA

Results from a field study of the flow-induced vibrations of a full-scale, long-span, shell-type gate undergoing simultaneous over- and underflow are presented. Data include experimentally determined mode shapes and frequencies for both horizontal and vertical bending modes, the maximum center-span vibration amplitudes in the horizontal and vertical direction as functions of underflow gate openings and overflow depths, and the trajectories of gate motion. Predictions of gate vibration, based on theories previously developed from model-scale data, were in good agreement with the experimentally observed behavior. Several subjects for future study are also presented in this study.

1. はじめに 水理構造物としては、水をせき止めるための水門が代表的なものとして上げられる。テンタゲート(ラジアルゲート、扇形ゲートとも呼ばれる)、長径間ゲート、シェル形長径間ゲートなど、小形のものから大形のものまで様々である¹⁾。大形のものでは総重量が40tonに達するものもある。そのような大形のゲートも、水の力によっていとも簡単に自励振動を引き起こす場合がある。もちろんのこと、大形の構造物が振動した場合にはぜい性破壊、座屈破壊などの深刻な問題につながる可能性があるので、設計者は振動問題には非常に神経質になる。しかしながら、水に関連した振動であるために、それらの理論的な解析が極めて難しい場合が多く、それだけに十分な資料も明らかにされていないため、設計段階で自励振動の可能性を十分に検討するのが困難な場合が多い。もちろん、いろいろな場合についてモデルを用いた実験を行って詳しいデータをとれば、その個々の場合についての特性は確かに正確に把握することができる。しかしながら、それだけでは現象を支配する力学的相似則や本質的な振動発生メカニズムを明らかにすることがどうしてもできない。したがって、少し設計が変わった場合の対応、振動を防止するための最善の方法の検討などが進められないことになる。このような意味からも、理論的な解析の必要性が非常に高い、と言える。

水に限らず空気に関連した場合にも、構造物の振動には渦の発生が関与してくる場合(渦励起型振動)が多く、したがっていずれの水理構造物の流体関連振動も完全に理論的に解くことは非常に難しいとされてき

た(事実、実験的な研究報告例が大半である)。理論的に解こうとする努力すら、長年にわたって放棄されてきたようにも思われる。そのような中において、筆者らは、渦に全く無関係なタイプの振動問題がまだまだ多く残されていることに注目し、理論的な解析を試み、モデル実験による検証を繰り返してきた。

図1に示すテンタゲートの場合、ゲートを少し引き上げて微小な下端放水を開始すると、ゲートはトラニオンピンの周りに激しい自励振動を引き起こす^{2)~4)}。下流側が水没していない場合には、渦は全く発生しないので、ポテンシャル理論を用いて流れ場を理論的に解くことができ、ゲートの振動特性を理論的に明らかにすることができた。結果はモデル実験を用いた結果とも良く一致している^{2)~4)}。ただ、テンタゲートは非常用洪水吐ゲートとして用いられるので、建設省の厳重な管理下にあり、そのため振動に関する実地調査を

Fig.1 Cross-sectional view of a tainter-gate

*1大阪電気通信大学・工学部・教授

Professor, Osaka Electro-Communication Univ.

*2大阪電気通信大学・大学院・博士課程

Graduate Student, Osaka Electro-Communication Univ.

Fig.2 Cross-sectional view of the full-scale gate (All linear dimensions in mm)

行うことが非常にむづかしいのが現状である。したがって、実機の実測値との対応は、未だ確認されていない。

一方、図2に示すシェル形長径間ゲートに関しては、径間が24.6m、総重量が26.49tonの実機について振動に関する実地調査を1988年に行うことができた⁹⁾。この場合の流れ場にも渦が全く発生しないので、理論的な解析が可能なはずである。こういった観点から理論的な解析も試みている。したがって、水理構造物の中でも特にシェル形長径間ゲートは、実測との対応および今後の課題について議論できる数少ない題材の一つであるといえる。ここでは、実用されているシェル形長径間ゲートの自励振動問題に関して、実測の結果、理論解析の一例および実測との対応について説明し、今後の課題についても触れたい。

2. シェル形長径間ゲート 幅の広い川の流れをせき止める農業用灌漑設備として、背丈の低い長径間ゲートが利用されている。断面は図2に示すようにシェル形である。径間の長さは24.64m、質量は26,492kgである。クレスト（上部）は水を越流させるためになめらかな曲線で作られ、ゲートの前面は鉛直なせき板と傾斜したせき板から構成される。この種のゲートの最も注目すべき特徴は、ゲートの縦横比が大体1対1であるために、水平と上下の2方向に曲げ振動の自由度を持つ点である。

3. 実地調査結果 この種のゲートは河床上まで下ろして使用するのが普通である。しかし、上流側の水位を調節するコントロールゲートとしても使える可能性を検討するために、ゲートを少し吊り上げて微小な下端放水と大きな越流を同時に行った。そのとき、ゲートの下流側に閉じた空間が形成されないようにし

Fig.3 Waveforms of transient vibrations in both the horizontal and vertical directions, measured at a point just under the gate crest tail in the spanwise middle of the gate

Fig.4 Gate motion trajectories calculated from the waveforms growing exponentially

ているにもかかわらず、ゲートが激しい自励振動を引き起こした（この種の振動問題に関しては、モデル実験でその特性を詳しく調べている^{10), 11)}）。ゲート開度Bを5～7cmの範囲に設定したときに、自励振動が観測され、B=5cmのとき、もっとも激しい自励振動が発生した。そのときの振動波形を図3に示す。ゲートは静止した状態から自然に振動しはじめ、指数関数的に成長して約24秒後には最大振幅に達し、その後、同じ振幅で安定に振動を続けている。水平と上下の振動数 Ω_{wx} と Ω_{wy} は共に3.32Hz、発振比（負性減衰比） ξ_{wx} と ξ_{wy} はそれぞれ0.015と0.019、最大振幅 X_{max} と Y_{max} はそれぞれ13.8mmと5.1mmであった。越流高さ H_0 （図2を参照）は25.0cmであった。これらの振動波形を合成し、ゲートの運動軌跡を求めたものを図4に示す。運動軌跡は、ゲートが下流側に押されたときに放水口を閉める、いわゆる「プレス・シャット型」になっている。運動軌跡の長手軸に対する法線は、水平な軸から約61°傾いている。

ゲートの上流側の中央を上・下流方向にハンマーで衝撃的に加振し、曲げによる構造振動モードを調べた。

Table.1 Comparison of theoretical values with experimental data for the full-scale gate

	EXPERIMENT	THEORY using equivalent gate height, H_e	THEORY using physical gate height
Ω_{ax}	4.69 Hz (29.5 rad/s)	—	—
Ω_{ax}	3.32 Hz (20.9 rad/s)	3.30 Hz (19.9 rad/s)	3.16 Hz (19.85 rad/s)
ΔM_x	26,389 kg	25,980 kg	30,783 kg
ΔC_x	70,867 N/(m/s)	65,537 N/(m/s)	74,463 N/(m/s)

Fig.5 Cross-sectional view of a longitudinally slender long-span gate

伝達関数のピークの分布から、主要な振動モードを特定した結果、基本となる振動モードはゲート両端を節とする1/2波長の曲げ振動モードであり、固有振動数は4.69Hzであり、減衰比は0.027であることが分かった。

ゲートの振動に伴って水が動くために、ゲートの加速度に比例した流体力（慣性力）が生じる。さらに、放水流量が変化する場合には、速度に比例した流体力（加振力）も生じる。それぞれの比例係数が付加質量 ΔM_x と流体発振係数 ΔC_x である。実測した振動波形（図3）および空中での固有振動数と減衰比からこれらの ΔM_x と ΔC_x を算出することができる。計算結果をそれぞれ表1に示す。付加質量 ΔM_x はゲートの質量に近い大きな値を示すことが分かる。

4. 理論解析結果の応用および実測との対応 断面が縦に細長い長径間ゲートが、図5に示すように、かけ上がった河床の上に設置されていると、ゲートは流水方向に激しい自励振動を引き起こす。著者らはこの種の振動問題に関して理論的な解析^{12)~18)}を行い、特に放水口開度が微小な場合の現象を支配する基本的なパラメータが基礎フルード数 F_0 および水とゲートとの質量比 α_m であることを明らかにしている：

$$F_0 = \sqrt{d_0/g} \Omega_{ax}, \quad \alpha_m = \rho d_0^2 / (M/L). \quad (1)$$

ここで、 d_0 は放水口の水深、 Ω_{ax} は空中での固有円振動数、 M/L はゲートの単位長さ当りの質量である。

Fig.6 In-water to in-air vibration frequency ratio calculated from a theoretical study of a longitudinally slender long-span gate undergoing streamwise vibration

まず基礎フルード数 F_0 と質量比 α_m が分かると、図6から流水中での振動数 Ω_{ax} が分かり、フルード数 F ：

$$F = \sqrt{d_0/g} \Omega_{ax} \quad (2)$$

が算出できる。 F の値が分かると、図7から付加質量 ΔM_x と流体発振係数 ΔC_x が算出できる：

$$\Delta m_b = (\Delta M_x / L) / (\rho d_0^2), \quad (3)$$

$$\Delta c_r = (\Delta C_x / L) / (\rho d_0 \sqrt{g d_0})$$

図7bに見られる k はゲートの傾き率：

$$k = \sqrt{2} c_f \cos \theta \quad (c_f: \text{動的な流量係数}) \quad (4)$$

を表す。 θ は、図7bのさし絵に示すように、ゲートの動く方向に対する法線と傾いた河床とのなす角度を表し、ゲートの水平動に対して放水流量がどの程度変動するかを決定する。したがって、さし絵のようにゲート真下の河床がかけ上がっている場合には k は正、逆の場合には k は負となる。河床がかけ上がっている場合、図7bから明らかなように、フルード数が小さいときを除くほとんどの範囲で Δc_r は正となる。したがって、式(3)から ΔC_x も正となり、流体による正の励振力が存在することになる。このことは、もし機械的な減衰の効果が小さいならば、ゲートは必ず自励振動を引き起こすといった非常に大切なことを示唆している。

上で説明した縦に細長い長径間ゲートの理論解析結果は、シェル形長径間ゲートにも応用することが可能である。縦に細長い長径間ゲートが水平方向に振動すると、それによって水が押されたり引き込まれたりするので流体圧力が変動する。その変動圧力の振幅を図8に示す。縦軸 y は放水口の水深 d_0 で無次元化している（ $y=0$ が水面、 $y=-1$ がゲート下端に相当）。シェル形長径間ゲートのクレストの位置を $y=-0.14$ の破線で示すように、それよりも上の流体圧力は下方の流体圧力に比べてはるかに小さい。それゆえ、非常に粗い取扱いではあるが、オーバーフローを有するシェル

Fig.7 Reduced added mass, reduced fluid damping coefficient, and reduced fluid excitation coefficient calculated from a theoretical study of a longitudinally slender long-span gate undergoing streamwise vibration

形長径間ゲートが水平方向に振動することによって生じる流体圧力を図8に示す $-0.14 > y > -1.0$ の範囲の計算値で近似しても、大きな誤りは生じないものと考えられる。このような観点に立つと、質量比 α 、付加質量 Δm_b 、流体発振係数 Δc_r の定義式にそれぞれ含まれる d_0 をシェル形長径間ゲートの高さ H に置き換えるだけで、図6、7に示した理論解析結果がそのまま利用できる。そこで、 $H = 1.55\text{m}$ を用いて流水中の振動数 Ω_{vx} 、付加質量 ΔM_x 、流体発振係数 ΔC_x を算出した。その結果を表1の右側の列に示す。左側の列に示した実測の結果と良く一致していることが分かる。さらに、滑らかな曲線で作られたゲートクレストは付加質量を減少させる効果があると考えられるので、ゲートの高さ(1.55m)からゲートクレストの高さ(0.252m)の半分を差し引いた1.424mがゲートの有効高さであるとして取り扱くと、表1の真中の列に計算結果を示すように、実測値と非常に良く一致する結果が得られる。

5. 今後の課題 実地調査を行った図2に示すゲートではゲート下部の傾斜したせき板がかなり切り立っているために、ゲートの前面はほとんど直線上とみ

Fig.8 Resultant pressures exerted on the gate from its bottom to the water surface

Fig.9 Cross-sectional view of the full-scale gate (All linear dimensions in mm)

なすことができる。それゆえ、縦に細長い長径間ゲートの理論解析結果を応用して、水中での振動数、付加質量、流体発振係数などをかなり正確に算出することができた。しかし、実用されている大形のゲートには、図9に示すように、せき板の傾斜角が 60° 前後のものも多い。このような場合には、縦に細長い長径間ゲートの理論解析結果を単純に応用するわけにはいかない。このような場合の評価法を早急に検討する必要がある。さらに、理論解析の結果は放水口開度が微小な場合にのみ有効なものである。放水流量が比較的大きな場合の解析法についても検討し、力学的な相似則をさらに明確なものにする必要がある。

6. おわりに ここでは、水中に沈めて利用するシェル形長径間ゲートの流体関連振動問題について理論的に評価する一つの近似的な方法を示した。シェル形長径間ゲートの断面は図2に示したように、ゲート前面には傾斜面があり、ゲート上部は曲線状であるといったように非常に複雑な形状である。このような境界を全て厳密に取扱って理論的な解析を進めることはまず不可能である。ここでは、問題を解けるようにするためには境界の形状を可能な限り単純化するべきであるとの基本的な考え方に立って、一枚の直立した平板が水平方向に振動する場合（縦に細長い長径間ゲート）の理論解析結果が応用できるものと考えた。その結果、計算値は実測値と良く一致することを示すことができた。いずれの場合にも境界の形状を厳密に守るべきだとの意見も確かにあるが、境界を単純化して問題が解けるならばそれに越したことはなく、その結果が実測との対応で正しいことが検証されるならば、さらにそれに優るものはない、と考えている。

ここでは紙面の都合上、水門の振動問題だけに限定して説明したが、水門以外にも水理構造物で重要な振動問題を抱えている例がある。1994年4月に高速増殖炉「もんじゅ」が臨界に達し、運転を開始しているが、それと同じタイプの高速増殖炉「スーパーフェニックス」

（仏国）」において重大な振動問題が発生したことがある。図10に示すように、原子炉壁を冷却するために低温液体ナトリウムを薄肉円筒せきからいつ流させている。そのときに、薄肉円筒せきが上、下流の水面に発生する定在波と連成して激しい自励振動を引き起こした。この種の流体関連振動問題に関していくつかの研究報告例¹⁷⁾があるが、まだまだその全容が解明されたとは言いがたい現状である。今後の早急な理論的解明が望まれるテーマである。

謝辞 実地調査を行うにあたっては、丸島アクアシステム、成実哲郎氏から多大なご協力を得た。ここに、謹んで謝意を表す。

Fig.10 Schematic view of an atomic reactor vessel

参考文献

- (1) Davis, C.V. and Sorensen, K.E., Handbook of Applied Hydraulics, 21-1, McGraw-Hill, 1969.
- (2) 石井・今市：表面波の発生と連成したテンタゲート系の自励振動、日本機械学会論文集、第42巻364号、pp. 3853-3861、1975-12.
- (3) 今市・石井：放水量の変化によるダムの上流水面に生じる波、日本機械学会論文集、第42巻364号、pp. 3929-3941、1975-12.
- (4) Ishii, N. and Imaichi, K. : Instability of Elastically Suspended Tainter-Gate System Caused by Surface Waves on the Reservoir of a Dam, Trans. ASME, J. Fluid Engineering, Ser.I, Vol.99, No.4, pp.699-709, 1977-12.
- (5) Ishii, N. and Imaichi, K. : Dynamic Instability of Tainter Gates, In : Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations (ed. Naudascher, E. & Rockwell, D.), pp.452-460, 1980, Berlin, Springer-Verlag.
- (6) 石井・今市：表面波の発生と連成したテンタゲートの自励振動（近似解）、日本機械学会論文集B編、第48巻428号、pp. 640-647、1982-4.
- (7) 石井・今市：貯水池が比較的浅い場合のテンタゲートの自励振動（第1報、運動方程式の導出）、日本機械学会論文集B編、第54巻508号、pp. 3444-3448、1988-12.
- (8) Ishii, N. and Naudascher, E. : A Design Criterion for Dynamic Stability of Tainter Gates, J. Fluids & Structures, Vol.6, No.1, pp.67-84, 1992.
- (9) Ishii, N., Knisely, C.W. and Nakata, A. : Field Study of a Long-Span Shell-Type Gate Undergoing Flow, J. Fluids & Structures, to appear in 1994.
- (10) Ishii, N. and Knisely, C.W. : Flow-Induced Vibration of Shell-Type Long-Span Gates, J. Fluids & Structures, Vol.6, pp.681-703, 1992.
- (11) Ishii, N., Knisely, C.W. and Nakata, A. : Coupled-Mode Vibration of Gates with Simultaneous Over- and Underflow, J. Fluids & Structures, to appear in May, 1994.
- (12) 石井・ほか2名：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、第53巻495号、pp. 3267-3273、1987-11.
- (13) 石井・ほか3名：長径間ゲートの流体関連振動（第2報、付加質量と流体減衰係数）、日本機械学会論文集B編、第54巻504号、pp. 1977-1984、1988-8.
- (14) 石井・ほか4名：長径間ゲートの流体関連振動（第3報、付加質量と流体減衰係数の検証）、日本機械学会論文集B編、第54巻507号、pp. 3151-3156、1988-11.
- (15) 石井：長径間ゲートの流体関連振動（第4報、振動数比と流体減衰比）、日本機械学会論文集B編、第56巻531号、pp. 2887-2892、1990-11.
- (16) Ishii, N. : Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates, (Part I : Model Development), J. Fluids & Structures, Vol.6 No.5, pp.539-562, 1992.
- (17) 千葉・木内：薄肉円筒せきの流力弾性不安定振動に関する実験（不安定振動特性）、日本機械学会論文集C編、第59巻565号、pp. 2600-2605、1993-9.