

大阪電気通信大学 正員 石井徳章
 学生員 〇中田亮生
 守屋好文
 学生員 丸山富美夫

1. 緒言

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1に示すようにシェル形であるので、この種のゲートはシェル形長径間ゲート^{(1)~(12)}と呼ばれる。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。河床は水平である。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とき、ゲートは激しい自励振動を引き起こした。著者らはこの種の自励振動に関して詳しい実地調査を行った^{(5), (8), (12)}。ここでは、著者らがこれまでに行ってきた理論的な解析手法^{(13)~(22)}を問題のあったシェル形長径間ゲートに応用することによって実地調査した自励振動の周波数、付加質量および流体励振力の強さがかなり正確に算出できることを示し、さらに自励振動発生メカニズムを明確に示した。

2. 実地調査結果の概要

水を越流させた状態で放水口開度Bを5~7cmの範囲に設定すると、ゲートは静止した状態から自然に振動し始め、指数関数的に振幅を増大させた。B=5cmのときの径間の中央部の振動軌跡(測定結果)を図2に示す。水平と上下の振動数 Ω_{wx} 、 Ω_{wy} は共に3.32Hz、発振比 ξ_{wx} 、 ξ_{wy} はそれぞれ0.015と0.019であった。振動軌跡は、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⁽¹⁾」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61°傾いている。

流水中でのゲートの振動は、基本的には空中での固有振動特性に依存する。そこで、ゲートを空中に引き上げて、その中央部をハンマで加振し、構造振動モードを調べた。その結果、径間の長さを半波長とする基本の振動モードは周波数 Ω_{ax} が4.69Hz、減衰比 ξ_{ax} が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

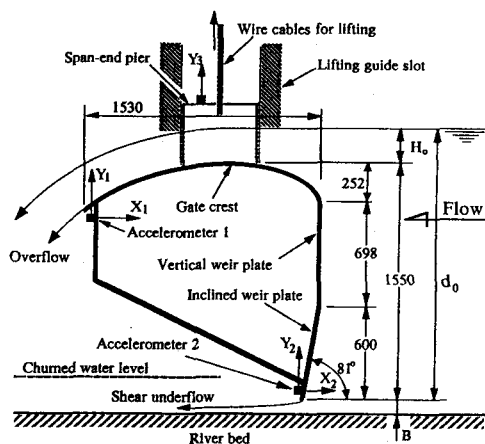


Fig.1 Cross-sectional view of the full-scale gate
(All linear dimensions in mm)

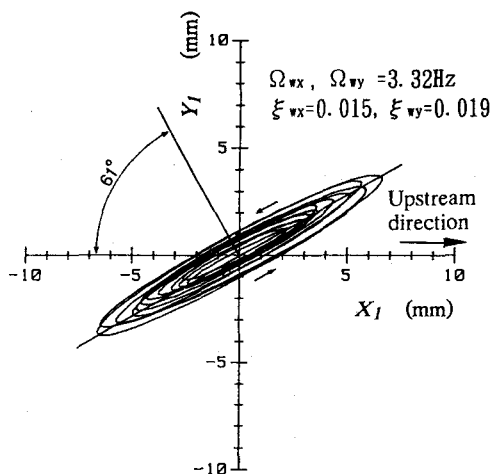


Fig.2 Gate motion trajectories calculated from the waveforms growing exponentially

Table.1 Comparison of results extracted from experimental data with those deduced from theoretical results

	Experiment	Theory
In-air vib. freq. Ω_{ax}	4.69Hz (29.5rad/s)	————
In-water vib. freq. Ω_{wx}	3.32Hz (20.9rad/s)	3.30Hz (20.7rad/s)
Added mass ΔM_x	26,389kg	25,980kg
Fluid excitation coef. ΔC_x	70,867N/m ²	65,537N/m ²

水流量が変化する場合には振動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。ゲートの空中での振動数 Ω_{ax} と減衰比 ξ_{ax} 、および流水中での振動数 Ω_{wx} と発振比 ξ_{wx} が実測できると、それらから ΔM_x と ΔC_x を算出できる⁽¹⁾。それらの算出結果を表1に示す。

3. 振動数、付加質量および流体発振係数の理論的な算出法

3. 1 振動数 断面が縦に細長い長径間ゲート^{(13)~(22)}は水平方向にだけ曲げ振動を行う。もしゲートが水平な河床の上で下流側に傾けられて設置されていると、ゲートの流水方向の振動に伴ってアンダーフローの流量が変化する。ゲートが下流側に動いたときには放水流量が減少するので、この場合もいわゆるプレス・シャット型である。ゲートが鉛直に設置され、ゲート真下の河床が傾斜してかけ上がっている場合も、同様にプレス・シャット型になる。このような場合には非常に激しい自励振動が発生する。著者らはこの種の流体関連振動に関し、貯水池内の流れ場の変化を Rayleigh や Lamb らのポテンシャル理論を応用して解析し、ゲートの動きに伴って流体圧力がどのように変化するかを明らかにしている。さらに、ゲートの運動方程式を導き、まず初めに放水流量が変化しない場合について運動方程式を近似的に解くことによって、特に水の付加質量効果によって流水中での振動数が空中での振動数より小さくなる特性を明らかにしている。流水中と空中との振動数比の理論解析結果⁽¹⁹⁾を図3に示す。図中の記号 F と F_0 はそれぞれ次式で定義されるフルード数と基礎フルード数(慣性力と重力との比の平方根)である。

$$F \equiv \sqrt{d_0/g} \Omega_{wx}, F_0 \equiv \sqrt{d_0/g} \Omega_{ax} \quad \dots\dots\dots(1)$$

d_0 はゲート下端の水深、 g は重力加速度を表す。上式から F/F_0 が、流水中と空中の振動数比 Ω_{wx}/Ω_{ax} を表すことが分かる。パラメータ α_n は水とゲートの質量比を表し、次式で定義される。

$$\alpha_n \equiv \rho H_e^2 / (M/L) \quad \dots\dots\dots(2)$$

M はゲート質量、 L はゲートの径間長さ、 ρH_e^2 が付加質量の代表量を表す。なめらかなゲート・クレスト前縁は、流体作用による付加質量を減少させる効果があると考えられる。そこで、粗い仮定ではあるが、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量が付加質量を作り出すのに有効であるとして、ゲートの有効高さ H_e を

$$H_e = 1.55 - 0.252/2 = 1.424 \quad \dots\dots\dots(3)$$

と算定した。このとき、 α_n は1.886になる。さらに、放水口水深 d_0 は1.80m、 Ω_{ax} は29.5rad/s (4.69Hz)である。したがって、基礎フルード数 F_0 は12.6になり、図3の理論曲線から振動数比

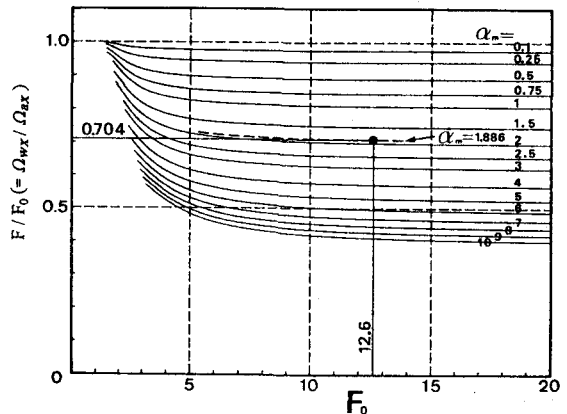


Fig.3 In-water to in-air vibration frequency ratio calculated from a theoretical study of a longitudinally slender long-span gate undergoing streamwise vibration

Ω_{vx}/Ω_{ax} が0.704と求まる。 Ω_{ax} が29.5rad/s(4.69 Hz)であるので、流水中での振動数 Ω_{vx} は20.7 rad/s(3.30Hz)となる。この結果は、表1に示すように、実測値とよく一致する。相対誤差は約0.6%である。

3. 2 付加質量と流体発振係数 付加質量と流体発振係数の理論解析結果⁽¹⁸⁾、⁽²⁰⁾、⁽²²⁾を図4に無次元形で示す。a図の Δm_b がゲートの流水方向の動きに対する付加質量であり、b図の Δc_r が放水流量の変化に起因した流体発振係数である。パラメータの $1/\beta^*$ はゲート下端の水深 d_0 と河川の水深 d_r との比を示す。ゲートが水平な河床の上に設置されているような場合には当然 $1/\beta^* = 1$ となる。さらに、図3から F/F_0 が0.704であることが分かっているので、フルード数 F は8.89である。したがって、図4から

$$\Delta m_b = 0.52, \Delta c_r/k = 0.733 \quad \dots\dots(4)$$

となる。ここで、 k はゲートの傾き率；

$$k \equiv \sqrt{2} c_r \cos \theta \quad \dots\dots(5)$$

を表す。 θ は、図4b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。 c_r は動的な流量係数を表す。実地調査したゲートの θ は図2の振動軌跡から 61° であることが分かる。さらに、 c_r を1.0とすると、 k は0.686となり、それゆえ Δc_r は0.50になる。

付加質量 Δm_b と流体発振係数 Δc_r の定義は、次式：

$$\begin{aligned} \Delta m_b &\equiv (\Delta M_x/L)/(\rho H_e^2), \\ \Delta c_r &\equiv (\Delta C_x/L)/(\rho H_e \sqrt{g H_e}) \end{aligned} \quad \dots\dots(6)$$

で与えられている。水の比質量 ρ は1000kg/m³、径間の長さ L は24.64m、ゲートの有効高さ H_e は1.424mである。したがって、上式から ΔM_x と ΔC_x を算出でき、その結果はそれぞれ25,980kg、65,537Ns/mとなる。これらの値は、表1に示すように、実験結果によく一致している。

4. 自励振動の発生メカニズム

著者が行ってきた理論的および実験的研究を総合すると、今回実地調査を行ったシェル形長径間ゲートの自励振動の発生メカニズムは次のように要約できる。まず、図5aに示すように、ゲートが水平方向にだけ振動数 Ω_{vx} で振動したとしよう。ゲートが上流側から下流側に向かう中間点を通過するとき、ゲートに対するオーバーフローの相対速度は最小になるので、ゲート・クレスト上の流体圧力は最大になる。その力がゲートを上下に加振することになる。そのときのゲートの応答は、図5bに示すように、水平振動数 Ω_{vx} と水中での上下方向の固有振動数 Ω_{vy} との比(Ω_{vx}/Ω_{vy})によって決まる。b図の応答曲線に●で示した $c \sim f$ の各振動数比(Ω_{vx}/Ω_{vy})の場合について、ゲートのリサージュ波形を描いたものを図5c～fに示した。

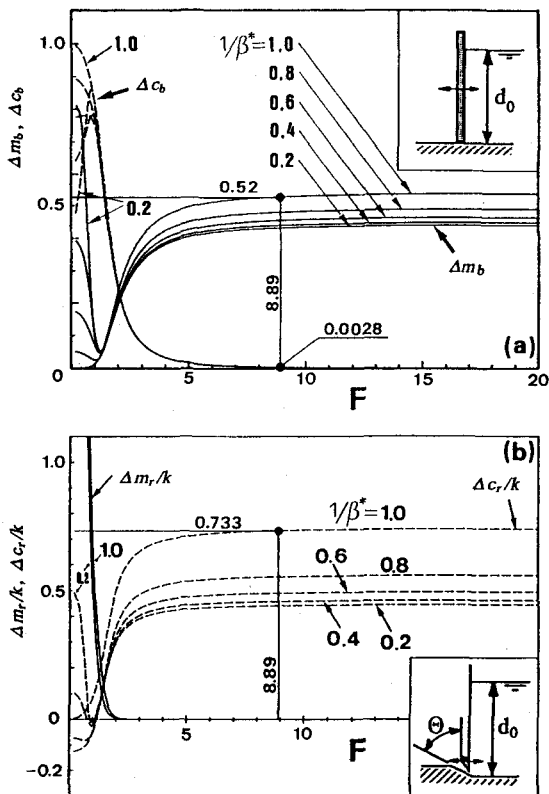


Fig.4 Reduced added mass, reduced fluid damping coefficient, and reduced fluid excitation coefficient calculated from a theoretical study of a longitudinally slender long-span gate undergoing streamwise vibration

調査したゲートの振動軌跡(図2)はe図の場合に近い。このように振動軌跡がプレス・シャット型の場合には、次のような経過をたどって自励振動を引き起こす：ゲートは下流側に動くと同時に下方向に動くため、アンダーフローの流量が減少し、上流側の流れが減速される；そのために流体圧力が上昇する；その流体圧力はゲートの運動方向(下流側)に働くので、ゲートの下流側への運動が増幅される；ゲートが上流側に向かって動くときには逆の経過をたどって同様にゲートの運動が増幅される。

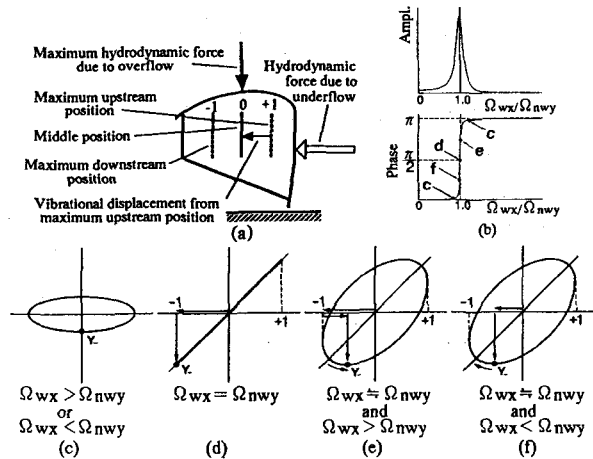


Fig.5 Formation of a coupled-mode press-shut device: (a)cross sectional view of shell-type gate; (b)amplitude and phase response of a classical oscillator; (c)gate motion trajectory for $\Omega_{wx} > \Omega_{nwy}$ or $\Omega_{wx} < \Omega_{nwy}$; (d)gate motion trajectory $\Omega_{wx} = \Omega_{nwy}$; (e)gate motion trajectory for Ω_{wx} slightly greater than Ω_{nwy} ; (f)gate motion trajectory for Ω_{wx} slightly less than Ω_{nwy}

参考文献

- (1) 石井、ほか2名：シェル型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、第56巻531号、pp. 2880-2886、1990-11.
- (2) 石井：シェル型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、第57巻533号、pp. 35-41、1991-1.
- (3) 石井、中田：シェル形長径間ゲートの流体関連振動（第3報、アンダーフロータイプの運動方程式の導出と仮定の検証）、日本機械学会・第69期全国大会講演会講演論文集、No. 910-62、Vol. B、pp. 126-128、1991-10.
- (4) 石井、中田、野島：シェル形長径間ゲートの流体関連振動、構造工学論文集、第38A巻、pp. 837-850、1992-3.
- (5) 石井：シェル形長径間ゲートの流体関連振動、日本機械学会・振動・騒音問題の改善と事例「v-BASE」フォーラム特別企画資料集、No. 920-65、1992.
- (6) Ishii, N. and Knisely, C.W.: Flow-Induced Vibration of Shell-Type Long-Span Gates, Journal of Fluids and Structures, Vol. 6, pp. 681-703, 1992.
- (7) Ishii, N., Knisely, C.W. and Nakata, A.: Coupled-Mode Vibration of Gates with Simultaneous Over- and Underflow, Proceedings of the ASME Winter Annual Symposium on Flow-Induced Vibration and Noise, Vol. 6, pp. 193-205, 1992-11.
- (8) Ishii, N., Knisely, C.W. and Nakata, A.: Field Studies of A Full-Scale Long-Span Shell-Type Gate Undergoing Flow-Induced Vibrations, Proceedings of Flow-Induced Vibration and Fluid-Structure Interaction, ASME PVP-Vol. 258, pp. 163-177, 1993-7.
- (9) 石井、中田、丸山：シェル形長径間ゲートの流体関連振動（越流水の上下振動に対する付加質量効果と自励振動の発生条件）、日本機械学会・流体工学部門講演会講演論文集、No. 930-49、pp. 373-375、1993-8.
- (10) 石井、中田、丸山：シェル形長径間ゲートの流体関連振動（下端放水だけを行う場合の理論的な解析とその検証）、日本機械学会・流体工学部門講演会講演論文集、No. 930-49、pp. 376-378、1993-8.
- (11) 石井、中田、丸山：シェル形長径間ゲートの流体関連振動（傾斜面角を変化させた場合の自励振動特性）、土木学会第48回年次学術講演会講演論文集、第1部、pp. 142-143、1993-9.
- (12) 石井、中田、丸山：実用されているシェル形長径間ゲートの流体関連振動に関する実地調査結果、土木学会第48回年次学術講演会講演論文集、第1部、pp. 144-145、1993-9.
- (13) 石井、今市：長径間ゲートの流体関連振動、土木学会第36回年次学術講演会講演概要集（第2部）、pp. 337-338、1981-10.
- (14) Ishii, N., Naudascher, E. and Thang, N.: A Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates, Proc. of Int. Conf. on Flow-Induced Vib., Bowness-on-Windermere, pp. 293-304, 1987-5.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) Ishii, N.: Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates (Verification of Added Mass and Fluid Damping), JSME Int. J., Ser. II, vol. 33, No. 4, pp. 642-648, 1990. Proc. IAHF & AIHR Symp. (Belgrade, Yugoslavia), p. N-1-1-9, 1990-9.
- (19) 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.
- (20) 石井、中田：長径間ゲートの流体関連振動（第5報、運動方程式の解と安定基準）、日本機械学会・流体工学部門講演会講演論文集、No. 910-50、pp. 51-53、1991-8.
- (21) 石井、中田、川邊：長径間ゲートの流体関連振動（第7報、自励振動特性のモデル実験による検証）、日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集、No. 920-55、Vol. B、1992-7.
- (22) Ishii, N.: Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates (Part I: Model Development), Journal of Fluids and Structures, Vol. 6, No. 5, pp. 539-562, 1992.