

長径間シェルローラーゲートの自励振動に関する理論解析

荻原国宏*・中川博次**・上田幸彦***

長径間シェルローラーゲートの微小開度での放流時には、自励振動が発生することが報告されており、通常はこれらの開度を避けて操作をすることが行われている。しかし、調節放流を実施するためには微小開度での放流が、是非とも必要とされている。この自励振動の発生原因を明解すべく、3次元振動相似模型による実験を行うとともに、現地実験もあわせて行い、振動の発生条件を明確にする事が出来た。

Key Words: self-excited vibration, flutter, shell type roller gate, free flow, submerged flow

はじめに

長径間シェルローラーゲートの自励振動に関する実験解析を模型実験、現地実験の双方について行って、自励振動の発生条件を掘る事が出来た。このタイプのゲートに対する研究はほとんどされておらず、長径間シェルローラーゲートが日本で開発されたタイプのゲートであるために外国でも研究の対象になっていない¹⁸⁾。模型実験は一般的なローラーゲート（標準断面-I）、現地実験に合わせたゲート（標準断面-II）、上流スキンプレート（標準断面-III）と下流スキンプレート（標準断面-IV）の4断面形で、梁の撓み度（梁の中央点の撓み／スパン長）を3種類 [A(1/500), B(1/800), C(1/1200)] についての組み合わせで実験をした。撓み度の設定は水平、鉛直方向で同じとした。また梁に付加質量を加えたケースをA', B', C'のようにケース表示した^{1)~8)}。

この論文では実験で明らかになった事実をもとに理論解析モデルを作成し、振動方程式の不安定条件を求める事によりこの自励振動の発生条件を決定する事が出来た。振動は鉛直と水平振動のカップリングした振動であり、いわゆるフラッター型の振動である事が判った。自励振動の発生条件が明確になった事から、今後ゲートの操作方法、振動防止手法等が現実的に利用できることになった。

1. 長径間シェルローラーゲートに発生する自励振動の概況

振動相似模型での自励振動発生時の状況を代表的なケースBの梁（撓み度1/800）について図-2に示した。

* 正員 工博 東洋大学教授 工学部土木学科
(〒350 川越市鯨井中野台 2100)

** 正員 工博 京都大学教授 工学部土木学科

*** 正員 工博 石川島播磨重工（株）機械鉄構事業本部管理部品質保証担当部長

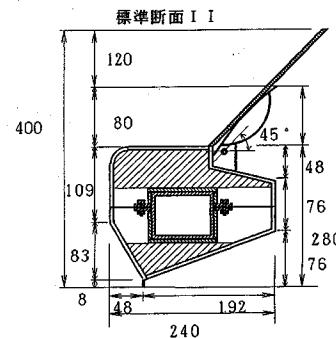


図-1 模型断面図（単位 mm）

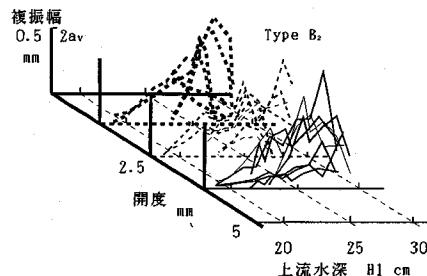


図-2 自励振動の複振幅

この図は複振幅、上流水位、開度との関係を3次元のグラフで示した。これは標準断面-II（図-1）で水平河床の場合である。

剛度 EI (E は弾性係数, I は断面2次モーメント) の異なる梁A(1/500)とC梁(1/1200)でも振動の性状は同じであり、振動の発生範囲は剛度の小さいA梁では広くなり剛度の大きなC梁では狭くなる。図-2のグラフは鉛直軸が振動の複振幅を示し水平軸が上流水深を示している。

グラフの奥から手前に開度が大きくなる様に配置してある。グラフ中の折れ線は上流水位を徐々に上昇させ、

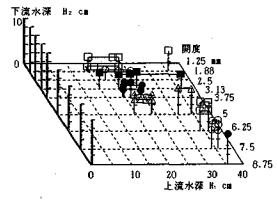


図-3 振動の発生範囲

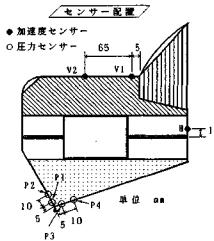


図-4 測点設置位置

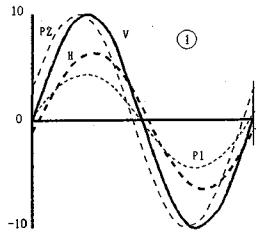


図-5 運動のリサージュ

また下降させた時に発生した自励振動の複振幅を示している。下流水深の組み合わせ3ケースの結果を一緒に示してある。また図-3には鉛直軸に下流水深を水平軸に上流水深を取り、グラフの奥から手前に開度が大きくなるように配置してある。グラフ中の点は自励振動の発生した範囲を示している。発生している自励振動の特性として次の様な事が判った。

- (1) 開度の小さいときには(開度5mmまで)上流水深15~25cmの範囲では梁が河床に接地しない為に振動が起こっている。しかし25~30cmでは梁が河床に接して振動が起らなくなっている。
- (2) さらに開度が大きくなり5~8.75mmまでは上流水深が35cm付近を中心にして振動が発生している。しかしこの場合には下流水深が6cm以上で発生してきている。このとき水深15~25cmでは開度が大きくなつて振動が発生し難くなっている。
- (3) 下流水深の深いところでの振動は現地実験でも観測された潜り流出時での自励振動である。
- (4) 下流水深の浅いところでの振動と、深いところでの振動は異なる様に見えるが、一連の現象であると考えられる。すなわち開度の小さいとき上流水深30cm以上では梁の中央部は撓みの為に水路床に接触して動かなくなつており、開度の大きいところでのみ運動の自由度が保たれている。
- (5) 梁の撓み度の影響は、振動の発生する範囲において顕著であり、撓み度が大きい梁ほど、端部開度の大きい所まで自励振動が発生している。
- (6) 発生振動の振動数は梁の撓み振動による固有振

動になっている。

- (7) 鉛直振動と水平振動の振幅の大きさはほぼ同じ程度である。

この傾向は現地対応の模型実験の結果でも同じ傾向を示している。また現地実験でも微小開度で自励振動の発生を確認している²⁾。

2. 自励振動時のゲートの運動

(1) 振動時のゲートの動きの測定

自励振動が発生しているときのゲートの運動と圧力の関係を捉えるべく加速度計と圧力計をゲートに取り付けて同時観測をした。運動の変位は加速度計を使用し、圧力の変動は小型の圧力変換器を使用している。設置ポイントは図-4の様になっている。加速度はゲート上面にv1, v2の鉛直方向の運動の測定点、水平方向の測定点としてHをゲート下流面に設定している。圧力の測定はスキンプレートの上流にp1, p2と下流にp3, p4の各2点を設定している。キャリブレーションは加速度については1G(980 cm/s²)の値により、圧力計はゲートを水没したときの水位の変化によって行っている。下流面の圧力は自励振動発生時の下流の流れが殆ど自由流出に近い状態であるので、圧力変動値が測定値として得られなかった。B梁のケースで開度が6.25mmの場合の結果をグラフに表したのが図-5である。この図は振動変位と圧力変動を同時測定した振動記録をデジタイザーで1周期当たり4~5点、総数80点を各波形毎に読みとり最少自乗法で振幅、位相を決定した。鉛直方向の運動を基準として水平運動との関係を表すことを行った。すなわち鉛直振動と水平振動、圧力変動との位相をとることと、鉛直方向の振幅を1として水平方向の振幅はそれとの比で表わすことによって図に示している。但しグラフでは各々10倍して表示している。圧力は2倍した値を示している(gf/cm²)。図中の上の図①が1周期にわたる各運動の状態を示したものである。鉛直軸のプラス方向は鉛直運動が上向き、水平方向は上流側への動きを、圧力はプラスの圧力を示している。水平軸は時間軸である。また下の図②では梁の中心点の運動のリサージュを示し、鉛直方向上向きの運動を鉛直軸のプラス方向に、水平方向上流側への動きを水平軸右向きに表わしている。この結果自励振動が発生している状態では次の特性がある事が判った。

- (a) 鉛直振動と水平振動が同時に発生しており、振幅の大きさは殆ど同じ程度である。
- (b) ゲートの振動時の動きは上向きに動くときには上流方向に変位し、下向きに動くときには下流側に動く傾向を示している。
- (c) 圧力変動は上流側リップ面のみ観測され、鉛直、水平運動に比べて進み位相になっている事がわか

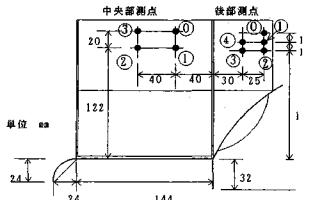


図-6 マーカー位置図

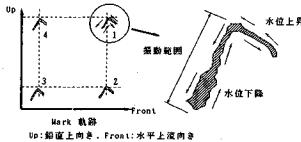


図-7 変位に伴う軌跡

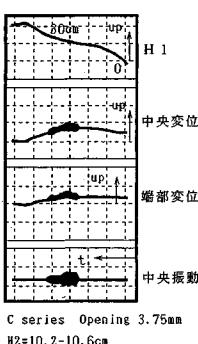


図-9 振動記録の一例

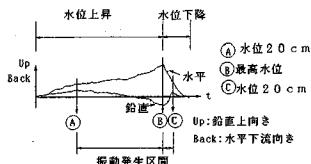


図-8 変位の時間変化

る。この例の場合には鉛直運動が水平運動より進み位相である。

(d) この振動は鉛直運動と水平運動がカップリングした、いわゆるフッターモードの振動であることが判った。

(2) 振動時の運動軌跡

振動時の梁の運動の軌跡をとらえる為に図-6の様な梁の中央点上部にマーカーを設置して、パソコンによる物体軌跡演算装置によってマーカーの動きを測定した。

マーカーは中央部に 0, 1, 2, 3 の 4 点、後部に 0, 1, 2, 3, 4 の 5 点を設定してあるので写りの良いものを選んで測定している。後部の測定点 1, 2, 3, 4 について観測したデータの一部を以下に示す。上流の水位を徐々に上昇して行った時の各点の移動している状態を、水平変位、鉛直変位を水深が零の状態を原点にし、ゲートが下流側に変位する場合を水平軸左側に、ゲートが上昇する場合を鉛直軸上向きにとり、それぞれの測点の移動を追ってプロットしたのが図-7である。上流水位をあげて行くと各点は上昇をはじめ、また下流側に移動していく事が判る。観測点はそれぞれ上昇した後、更に水位が上がるとゲートの下段ゲートの上面に水が入り出すので(上流水位 20 cm), 下向きの圧力が働きゲートは低下しだす、従って各測定点も下降し出し、下流側に向かう圧力が働くので、梁は下流側に撓んで行く。したがって測定点の軌跡は下流側に移動していく。上流水位が最高水位まで上昇した後に水位が低下したと、上昇時と全く逆の動きをして水位中間では自励振動が起こってお

り、先に述べた鉛直及び水平振動が発生している。しかし振動の変位が水圧による梁の撓み変位よりも小さいので、この図では振動変位が水圧による変位の軌跡の中に隠れてしまい、振動変位を明確に区別出来ない事が判る。上流水位が最高水位に達する付近で振動が発生しているが、各点の軌跡は直線に近い傾向を示し、全く同じ動きをしている。従って振動時の動きは各点の水圧による変位の平均的な移動方向とほぼ一致していると考えられる。更にこれを拡大した軌跡が図-7の中の右に示してある。

この関係を水平変位と鉛直変位の時間変化として表したのが図-8である。測定点の 4 点別々に表してみたが、いずれも同じ動きをしており、並進運動をしている事が判った。図-8 に示したのは No.1 の測点であり上流水位が上昇したのち下降するまでの水平変位と鉛直変位を示している。鉛直変位で上昇した後下降し出す点 A, C が下段扉の上端まで水位が上昇した点である。

3. 自励振動の発生条件

自励振動の発生条件は開度、流量及び下流水位を一定にして上流水位を徐々に上昇する時に、上流水位の変化に変曲点が現れるところで自励振動が発生する事から判った。その観測記録の一例を図-9 に示した。測定には上流水位、中央点の変位、端部点の変位を板バネの変位で、中央点の振動は加速度計で同時測定をしている。図の最上段が上流の水位の記録であり、2 段目が中央点の変位、3 段目が梁の端部の点の変位である。最下段は中央点の振動記録である。変位を表すグラフと振動を表すグラフの何れにもグラフの中央付近に振動(黒く軌跡が幅広く記録されている)が表れているのが判る。この部分に相当する水位記録を見ると水位の変化が減少傾向から上昇傾向に転じている事が読み取れる。流量は上流から一定流量で流しているので通常は水位が上昇すると、ゲート下からの流出流速が早くなるのでゲート下から流れ出る流量が増加して、上流の水位の上昇速度は減少していく。

上流の水位の上昇速度が増加する為にはゲート下からの流量が減少する事態が生じなければ、このような現象は生じない。すなわち流速は増加しているので流出面積が減少しなければいけないことになる。これは梁が撓んで流出する面積が減少している事を示している。

この辺の事情を模式的に説明すると図-10 の様になる。図の左端はゲートと水位関係を表している。

2 番目の図はゲート下の水の流れる面積 A を表している。3 番目は流速 V を 4 番目は流速と面積の積として求められる流量 Q を表している。流速は上流水位が上昇するに従って $(H1)^{1/2}$ で増加する。面積は上流水位が下段ゲートの上面に達するとゲートが下向きに撓むの

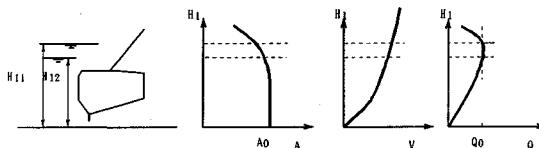


図-10 水位と流量の関係

で減少し出す。従って流量も水位の上昇に従って増加してきたのが面積の減少によって減少をするようになる。この結果、右端の図に示したように H_{11} の水位と H_{12} の水位で同じ流量 Q_0 で流れる現象が生ずる。この事は流量曲線のピーク付近で同じ流量で 2 つの水位を持つ事が出来ることを示している。

このことをゲートの方からみると同じ流量、同じ水位の条件で二つの開度に相当する変位を示しても良い事になり、どちらの開度を示す位置にゲートがあっても良いことになり、振動が発生し易い状態が生ずる。現地観測によって観測された振動は、模型実験によても確認され潜り流出での振動となっている。このように流量が最大になる条件で振動が発生すると解釈すると自由流出、潜り流出のいずれの流出でも振動が発生し得る事が良く判る。

4. 梁の振動方程式

(1) 自由振動の振動方程式

梁の断面 2 次モーメントを I_x, I_y とし、単位長さ当たりの質量を m 、弾性係数を E とした時の自由振動の方程式は

$$EI_y \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad EI_x \frac{\partial^4 x}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

である。スパン長 L の単純梁りでの固有振動は

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin \omega_{yn} t + b_n \cos \omega_{yn} t) \sin \frac{n\pi z}{L}$$

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} (c_n \sin \omega_{xn} t + d_n \cos \omega_{xn} t) \sin \frac{n\pi z}{L} \quad (2)$$

で与えられる。このとき固有角周波数は

$$\omega_{yn} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI_y}{m}}, \quad \omega_{xn} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI_x}{m}} \quad (3)$$

となる。但し、ゲートの運動方向を下向きを y 軸のプラスとし、下流向きを x 軸のプラスとする。

(2) 自励振動の振動方程式

自励振動の場合には式(1)の右辺に梁の運動にともなう振動外力が加わる。単位幅当たりに作用する外力を $f_y(z, t), f_x(z, t)$ とし速度に比例する減衰項が作用するすれば振動方程式は次ぎの様になる。減衰係数を R とする。

$$EI_y \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + R \frac{\partial y}{\partial t} = f_y(z, t)$$

$$EI_x \frac{\partial^4 x}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + R \frac{\partial x}{\partial t} = f_x(z, t) \quad (4)$$

振動外力項はゲートの運動に関係して生ずる項と、前述の振動時の水位特性に伴う項とで構成される。

5. 振動方程式の外力項

自励振動の振動外力は梁の運動にともなって生ずる力である。したがって式(4)の右辺項は z, t の関数としているが、変位、運動速度、加速度の関数ともなる。

(1) 外力項の表示

実験の結果、回転運動は無視できるので、この理論解析でも無視する。以下に梁の単位長さ当たりの外力としての分布荷重を考える。

a) 付加質量

ゲートの片面が水に接しているから付加質量の項として次のものが考えられる。

$$F_{y1} = -\rho V C_{my} \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad F_{x1} = -\rho V C_{mx} \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (5)$$

ここに C_{my}, C_{mx} は付加質量係数である。

b) 水面下にある部分の鉛直変位 y の変化にともなう力

ゲートが水深 H で水圧を受けている時の水平方向の圧力 P_h は単位幅当たり式(6)となり、そのときゲートが y 動いたときの圧力変動は式(7)となる。

$$P_h = w \frac{H^2}{2} \quad (6)$$

$$F_{x2} = \frac{\partial P_h}{\partial H} y = w H y \quad (7)$$

鉛直方向の力は y の変化によって生ずるゲートの水中体積の変化によって生ずる。体積変化を dV とすると

$$F_{y2} = w dV \quad (8)$$

となる。

c) 水の流れを遮ることによる力

ゲートが y の変化を (dy/dt) の速度でしたときに、水の流れに生ずる流量の変化が運動量としてゲートに外力となって戻って来ると考えると、開度 a での y の変化による単位時間当たりの質量変化は

$$\Delta M = \frac{\rho q}{a} y \quad (9)$$

である。但し q は開度 a での単位当たりの流量である。

この変化が速度 (dy/dt) で生ずるので外力は運動量の式に従って

$$\Delta F = \frac{\rho q}{a} y \frac{dy}{dt} \quad (10)$$

となる。この力の各方向成分を上流のリップ面の形状によって分力として求める。

$$F_{y3} = -C_y \frac{\rho q}{a} y \frac{dy}{dt}, \quad F_{x3} = C_x \frac{\rho q}{a} y \frac{dy}{dt} \quad (11)$$

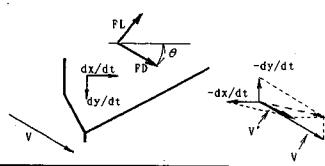


図-11 速度の関係図

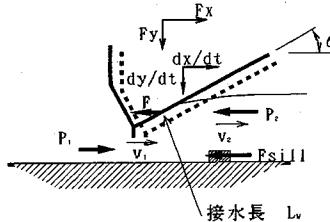


図-12 ゲート下面の流れの関係

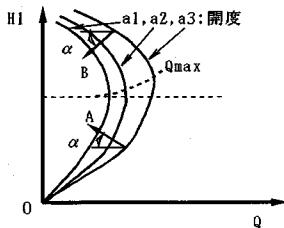


図-13 流量の関係

この式はゲートが微小開度で振動している時の運動の外力として考えられる。 C_x , C_y は運動量にともなう力の各方向への分力の分配係数である。

d) ゲートが運動する事によって生ずる外力

前記の水の流れを遮る事によって生ずる振動外力は開度の小さい場合に発生すると考えられる。しかし比較的開度が大きいときには、抗力、揚力の考えにもとづくのが良いであろう。

ゲートが水平と鉛直方向に運動した時に生ずる力について次に考えよう。流れの方向は図-11のようになっていると考えられる。このとき流れからゲートは抗力 F_D と揚力 F_L を受けてつりあっている。考え方を変えると一般に定義されているダウソブルの流れ方向の分力と考えられるが、この場合抗力、揚力は流れの方向の力とそれに直角方向の力に分けて考へるので上記のように考えた方が良いであろう。

均合状態からゲートが運動をした場合を相対的にゲートが停止している状態での速度変化を考えると図-11の V から V' に変化している。従ってゲートの受ける力も変化して来るはずである。そこで各方向の力を次のように考へよう。

均合状態では

$$F_y = F_L \cos \theta - F_D \sin \theta, \quad F_x = F_L \sin \theta + F_D \cos \theta \quad \dots \dots \dots (12)$$

である。そこでゲートの運動によって仮想的に速度が変化した為に生じる力は式(13)となる。

$$\begin{aligned} F_{y4} &= \frac{\partial F_y}{\partial v_y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial F_y}{\partial v_x} \frac{dx}{dt} \\ F_{x4} &= \frac{\partial F_x}{\partial v_y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial F_x}{\partial v_x} \frac{dx}{dt} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (13)$$

但し v_x , v_y は下流方向及び鉛直下向き方向の速度である。

e) ゲート下流面に作用する力

ゲート下からの流出が潜り流出になっていてゲート下流面が水に接する場合には、この部分の水の動きによる外力を考へる必要がある。ゲートからの流出速度を v_1 、下流の速度 v_2 とし、水圧による力を上流側を P_1 、下流側を P_2 としシルに作用する力を F_{sill} 、ゲートに作用する力の水平成分

$$P_1 - P_2 - F_{sill} - F = \rho q (v_2 - v_1) \quad \dots \dots \dots (14)$$

を F とすると、水平方向の均合状態での運動量の式は(14)となる。

次にゲートが図-12のように速度 (dy/dt) , (dx/dt) で運動をしたときゲートの受ける力がどのようになるか考える。変化した運動量は上流側の力の成分と、流量の変化、ゲートの動きに伴う運動量、シルに作用する力が考えられる。下流側の変化は微小であると考えると運動量の式は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_1 \left(1 - \frac{y}{a}\right) - P_2 - F_{sill}' - F' &= \rho \left[q v_2 - q \left(1 - \frac{y}{a}\right) v_1 \right] \\ - \rho L_w \sin \theta \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - \rho L_w \cos \theta \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (15)$$

(14), (15)の両式から次の式が得られる。

$$\begin{aligned} F' - F &= dF = -\rho q \left(\frac{y}{a}\right) v_1 - P_1 \frac{y}{a} + F_{sill} - F_{sill}' \\ + \rho L_w \sin \theta \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \rho L_w \cos \theta \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (16)$$

ここに L_w はゲート下面の水の接している長さである。シルの部分は小さいのでこの部分の力を無視すると次の式となる。

$$\begin{aligned} dF &= -(\rho q v_1 + P_1) \frac{y}{a} + \rho L_w \sin \theta \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \\ + \rho L_w \cos \theta \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (17)$$

シルの無い場合には接水部分の長さを変える事によってこのまま利用出来る。

f) 開度と流量の関係から決まる外力

梁の撓みと開度の関係として図-13のような流量、上流水位、開度の関係がある事が判っている²⁰⁾。この図のゾーンBの部分で自励振動が発生している事が判明している(図-10)。この事を考慮して外力をまとめて置く。 $H1$ の変化に応じて流量が最大になる点が、各開度毎に現れて来ている。この点を連ねた曲線が Q_{max} の曲線である。この曲線より下がAゾーンであり、上がBゾーンである。この二つのゾーンで開度が小さくなつた(図中の矢印)時、すなわちゲートが下向きに運動した時の傾向をまとめると次のようになる。表-1の中の矢印の↓は値が小さくなることを示し、↑は大きくなる事を示している。この表でA, Bのゾーンの傾向の違い

表-1 流量、開度、上流水位

	Aゾーン	Bゾーン
開度	↓	↓, ↓
流量	↓	↑
上流水位	↑	↓

は上流水位が上昇する傾向にあるのか、下降する傾向にあるかの違いである。一般には開度が小さくなると流れの流量が減り、上流水位は上昇する傾向を示す。従ってAゾーンのような傾向を示すのが一般的であり、Bゾーンのように上流水位が小さくなる傾向が異常である。

まず鉛直方向に運動した時についてまずまとめて置こう。図-14に示すようにゲートが動いたときにゲートが単位幅、単位時間に排除した質量は、ゲートの有効幅を b として

$$M = \rho b \frac{dy}{dt} \quad (18)$$

となる。さらに水位の上昇傾向は図-13のグラフの矢印(A, Bゾーン)の関係から式(19)となる。

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dy}{dt} \sin \alpha \quad (19)$$

H は上流水深であり、 α は矢印の水平となす角度である。 dH/dt によるゲート振動外力に及ぼす質量に影響する影響幅を b_1 とすると、ゲートが速度(dy/dt)で運動する事によって生ずる力としては式(20)となる。

つぎに同じ事を水平運動に付いても求めて置く。水平方向の運動では図-13のような傾向は現れないで、速度(dx/dt)によるものだけである。従って式(21)のような式になる。

$$\begin{aligned} F_{y6} &= -\left[\rho b \frac{dy}{dt} + \rho b_1 \frac{dH}{dt}\right] \frac{dy}{dt} \\ &= -\rho(b+b_1 \sin \alpha) \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 \end{aligned} \quad (20)$$

ゲートの形状によってはこの水平運動によって、揚力が生じて、水平力に比例する力として、 F_{y7} が生ずる。係数 β は鉛直方向への換算係数である。

$$F_{x6} = -\left[\rho H \frac{dx}{dt}\right] \frac{dx}{dt} \quad (21)$$

$$F_{y7} = -\beta F_{x6} \quad (22)$$

6. 振動外力のとりまとめ

振動外力をまとめると以下のようになる。流れとゲートの運動によって生ずる力には、抗力 F_D 、揚力 F_L で扱う方法と運動量によって表す方法のように同じ現象を違った形で扱っているものがあるので、それについて整理し、最終的な振動外力をまとめて置く。

(1) 自由流出の場合

自由流出では流れの抗力、揚力による力を整理して加

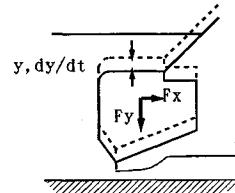


図-14 鉛直運動に伴う力

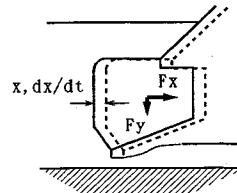


図-15 水平運動に伴う力

速度、速度、変位の項に分けてまとめると次の式が得られる。

$$f_y = -\rho V C_{my} \frac{d^2 y}{dt^2} + \left[\frac{\partial F_y}{\partial v_y} - C_y \frac{\rho q}{a} |y| \right] \frac{dy}{dt}$$

$$+ \frac{\partial F_y}{\partial v_x} \frac{dx}{dt} + w dV$$

$$f_x = -\rho V C_{mx} \frac{d^2 x}{dt^2} + \left[\frac{\partial F_x}{\partial v_y} + C_x \frac{\rho q}{a} |y| \right] \frac{dy}{dt}$$

$$+ \frac{\partial F_x}{\partial v_x} \frac{dx}{dt} + w H y \quad (23)$$

(2) 潜り流出の場合

潜り流出の場合には式(17)のX方向の分力を、ゲートの方からみると符号が変わり

$$F_{x5} = (\rho q v_i + P_i) \frac{y}{a} - \rho L_w \sin \theta \left(\frac{dx}{dt} \right)^2$$

$$- \rho L_w \cos \theta \left(\frac{dy}{dt} \right)^2$$

が得られ、 y 方向は下流の斜面の角度を θ とすると

$$F_{y5} = F_{x5} \tan \theta$$

となり、これを式(23)に加えることになる。

(3) 振動外力項の整理

振動の外力項が求められた。これらの式を振動変位の関係項すなわち、変位、速度、加速度によって項毎にまとめられる。

$$\begin{aligned} f_y &= -m_y \frac{d^2 y}{dt^2} + A_1 \left| \frac{dy}{dt} \right| \frac{dy}{dt} \\ &+ A_2 |y| \frac{dy}{dt} + A_3 |y| y + A_4 y + A_5 \left| \frac{dx}{dt} \right| \frac{dx}{dt} \end{aligned}$$

$$f_x = -m_x \frac{d^2 x}{dt^2} + B_1 \left| \frac{dx}{dt} \right| \frac{dx}{dt}$$

$$+ B_2 \left| \frac{dx}{dt} \right| \frac{dy}{dt} + B_3 |y| \frac{dy}{dt} + B_4 y \quad (24)$$

但し

$$m'_y = \rho C_{my} V,$$

$$A_1 = -\rho (L_w \sin \theta + b + b_1 \sin \alpha)$$

$$A_2 = -C_y \frac{\rho q}{a}, \quad A_3 = \frac{w}{2}$$

$$A_4 = \frac{(\rho q v_i + P_i) \tan \theta}{a}$$

$$A_5 = -\rho (L_w \sin \theta \tan \theta + \beta h) \quad (25)$$

でのBゾーンが不安定である事を示している。

- d) 流速: ゲート下からの流速が大きくなる。水平方向の運動に限れば流速が速いほど不安定である。鉛直方向ではc) の関係で流速が大きいほどBゾーンが広くなるので、不安定の条件に相当する。
- e) 位相角: $\sin \phi$ が大きくなる。水平、鉛直方向の位相が大きくなる。
- f) ゲートの高さ: 上流の水圧が大きくなる。ゲートの高さが高くなる。流速が大きくなる事と同じ傾向を示している。

9. 不安定条件のまとめと実験結果との関連

不安定条件は最も支配的な項のみを残した式(52)で与えられた。ここで減衰比 h を導入し、さらに上流の水圧と流出速度が次の式で書けるとすると

$$h = \frac{\gamma_u}{\omega} = \frac{\gamma_x}{\omega}, v_1 = \sqrt{2gH}, P_1 = \rho g H a$$

$$\sin \alpha < -h \frac{3\pi(m+m')}{4\rho a_y b_1} - \frac{b}{b_1} \dots \dots \dots (53)$$

$$\frac{2\rho g H}{(m+m')\omega^2 a_x} \frac{a_y}{a_x} \sin \phi > h \dots \dots \dots (54)$$

となる。 $\sin \alpha$ は水位と流量の曲線より決まる値であり

$$\sin \alpha = \frac{dH}{da} \dots \dots \dots (55)$$

のように開度が変化したときの上流水位の変化率である。鉛直運動の発生条件は式(53)であり、式(55)を満足する開度を、水位と梁の撓みを考慮した流量曲線から決定する事になる(図-10、図-13参照)。

- ① この式の中に鉛直振動の振幅 a_y が含まれており、しかも分母に含まれているので、この値が大きいほど不安定であることが判る。
- ② ゲートの運動に伴なって振動外力として作用する場合の影響幅 b_1 は大きいほど不安定になることを示している。水平振動の不安定条件は式(54)であるがこの式には鉛直振動の振幅と水平振動の振幅が含まれている。
- ③ 鉛直振動の振幅が大きくなる事が条件になる。
- ④ 位相角 ϕ が含まれており、この値がプラスすなわち鉛直振動が進み位相である事が条件になっている。
- ⑤ 上流水深 H が大きく、振動の角周波数が小さい事が条件になっている。

このことについて実験結果との関連について検討する、まず鉛直方向についての条件は式(53)、(55)から、

$$\sin \alpha = \frac{dH}{da} < -h \frac{3\pi(m+m')}{4\rho a_y b_1} - \frac{b}{b_1} \dots \dots \dots (56)$$

となる。この条件は右辺が通常マイナスであるので $\sin \alpha$ が最も大きな値を取る場合を考えると条件は $\sin \alpha$

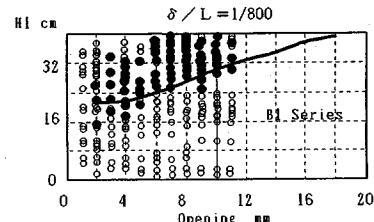


図-16 撓み度 1/800 の梁の場合

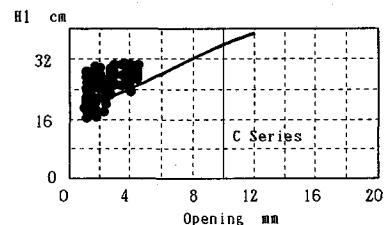


図-17 撓み度 1/1200 の梁の場合

< 0 である。これは図-10、13で示される流量最大の点より上流水位が大きいゾーン B(図-13の Q_{max} の曲線より上の部分)に相当している。

代表的な模型実験との相関を確認するために開度と上流水位を両軸に流量がピークになる点を連ねた限界曲線(図-16、17中の曲線)と、実験データーから自励振動が発生する場合を黒、発生しない点を白として図中にプロットした。

図-16はB梁の場合で撓み度 1/800 の場合、図-17はC梁で撓み度 1/1200 の場合の結果である。限界曲線より上流水位が高い B ゾーンで自励振動が発生しており、上記の理論解析の結果の式(56)に一致している。水平方向の場合は式(52b)であり、鉛直振動の発生が条件であり、上流水位が高いほど、固有振動数が低いほど振動が発生し易い事を示している。また位相角 $\sin \phi$ はプラスになることが条件であり、これを図-5に示した結果のリサージュと同じく右回りの回転運動をすることと一致している。

従って水平振動についても理論の解析と実験結果とは良く一致している。

おわりに

長径間シェルローラーゲートの3次元模型実験、現地実験を行い自励振動が小開度の自由流出、潜り流出の双方で発生する事が判明した解析の結果、振動の発生範囲を確定する手法が開発できた。

この論文はこの現象の理論的な解析を導いたものであり、ほぼ自励振動の解析モデルが確立できた。しかしこの論文で扱った理論では水平方向と鉛直方向の固有振動数にほとんど差がないとして解析している。これは実機の調査で自励振動が発生しているゲートが撓み度が大き

く水平、鉛直の撓み度がほぼ同じタイプのものであったことを考慮したためである。しかし現実のゲートでは鉛直撓み度が水平撓み度に比べて小さいゲート、すなわち鉛直方向の固有振動数が水平方向の固有振動数に比べて大きい場合には自励振動が発生していないし、2次元の模型実験ではこの傾向を確認出来ている。この事を考慮するとこの理論解析モデルの手法を鉛直と水平撓み度がかなり相違している場合に適用して確認する必要があると考えている。これは今後に残された問題である。

最後に水門鉄管協会の技術調査委員会及び研究小委員会の委員各位、同協会の事務局には、研究の遂行に協力いただいた事を記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 荻原国宏・中川博次・上田幸彦：長径間シェルローラーゲート振動発生条件、東洋大学工学部研究報告、Vol. 28, pp. 63~68, 1992.
- 2) 建設省土木研究所ダム水工研究室：長径間シェル構造ローラーゲート振動実態調査報告書、土木研究所資料、3177号、1993.3.
- 3) 荻原国宏・中川博次・上田幸彦：シェルローラーゲートの自励振動についての現地実験、土木学会年次学術講演会、47, pp. 8~9, 1992.10.
- 4) K. Ogihara, H. Nakagawa and S. Ueda : Self-excited vibration of long span shell roller gate by three dimensional experimental model, 24 th IAHR Congress pp.(D 433~D 422), 1992.9.
- 5) 荻原国宏・中川博次・上田幸彦：長径間シェルローラーゲートの3次元模型実験、土木学会構造工学論文集、Vol. 37 A, pp. 975~987, 1992.4.
- 6) 荻原国宏・中川博次・上田幸彦：シェルローラーゲートの小開度で発生する自励振動の形態、土木学会年次学術講演会、46, pp. 26~27, 1991.10.
- 7) 荻原国宏・中川博次・上田幸彦：シェル構造ローラーゲートの3次元模型振動実験報告、水門鉄管、No. 164, pp. 89~91, 1990.10.
- 8) 荻原国宏・中川博次・上田幸彦：長径間シェルローラーゲートの3次元模型振動実験、土木学会年次学術講演会,
- 9) 荻原国宏・江森担也：ラバーダムの固有振動、東洋大学工学部研究報告、Vol. 24, pp. 87~94, 1990.7.
- 10) 菅原一昌・白毛良男・一柳直樹・荻原国宏：ローラーゲートの振動実験、土木学会構造工学論文集、Vol. 36 A, pp. 837~847, 1990.3.
- 11) 荻原国宏・上田幸彦：ローラーゲートの小開度で発生する自励振動範囲、土木学会構造工学論文集、Vol. 36 A, pp. 827~835, 1990.3.
- 12) 荻原国宏・和田宏三：多くの開口部を持つ取水口の選択性能についての実験、土木学会年次学術講演会、44, pp. 530~531, 1989.10.
- 13) 荻原国宏・上田幸彦：長径間ゲートの振動に関する基礎的解析、水門鉄管、No. 160, pp. 24~29, 1989.10.
- 14) 荻原国宏・上田幸彦：シェル構造ローラーゲートの鉛直方向水理力に関する研究、土木学会年次学術講演会、43, pp. 454~455, 1989.9.
- 15) 荻原国宏・上田幸彦：ローラーゲートの小開度で発生する自励振動についての理論解析、土木学会論文集、Vol. 405//I-1, pp. 73~78, 1989.5.
- 16) 荻原国宏・上田幸彦：シェルローラーゲートの鉛直水理力に関する研究、水門鉄管、No. 158, pp. 50~56, 1989.3.
- 17) 今村建二・大久保精二・金子徹：強制加震実験法によるゲートの自励振動発生限界把握研究、土木学会論文集、No. 438//I-17, pp. 41~50, 1991.11.
- 18) 丸山富美夫・石井徳章・中田亮生：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、土木学会年次学術講演会、I-144, 1993.9.
- 19) K. Ogihara, H. Nakagawa and S. Ueda : Theoretical analysis on the conditions of self-excited vibration in shell roller gate, 9th APD-IAHR Congress, Vol.2 pp.125~131, August 24~26, 1994.
- 20) 荻原国宏・中川博次・上田幸彦：シェルローラーゲートの小開度で発生する自励振動の範囲、土木学会年次学術講演会、48, pp. 26~27, 1993, 10.
- 21) 荻原国宏・中川博次・上田幸彦：長径間シェルローラーゲートの自励振動発生限界の推定法、土木学会年次学術講演会、49, pp. 632~633, 1994.9, II-316.

(1992.2.20受付)

THEORETICAL MODEL FOR SELF-EXCITED VIBRATION OF SHELL TYPE ROLLER GATE

Kunihiro OGIHARA, Hiroji NAKAGAWA and Sachihiko UEDA

The conditions of the self-excited vibration observed in long span shell roller gate can be determined by both the model test and the field test. This self-excited vibrations have been observed under the small gate opening and both in the free flow conditions and slightly in the submerged flow at the model test. And this vibration have been observed also in the submerged flow in the field test. The condition for self-excited vibration occurs can be determined as the maximum discharge condition to take into account the deflection of the gate beam. By this condition, the zone of self-excited vibration can be determined at the designing stage by consultant engineers. After the theoretical analysis has been done by the unstable problem for the vibration of bending beam by taking account the maximum discharge condition, this vibration is defined as the coupled vibration of two directions such as vertical and horizontal direction. So this is so called Flatter type vibration. And the measures to avoid the self-excited vibration can be offered from this analysis.