

京都大学工学部 正員 中川 博次

大成建設

正員 ○畑 明仁

京都大学大学院 学生員 畠山 健

1. はじめに

河川に設置される長径間ゲートはその扉高、厚さに比べて、径間が非常に長く、従って径間方向に比較的柔な構造となる。そのようなゲートは水理条件によっては流れと連成して自励振動を起こすことが知られている。本研究室では、水門鉄管協会の技術研究の一環としてこのような自励振動に関して実験的研究を数年前より行い、その中で、断面形状と振動の関係が明かとなってきた。そうした実験事実を基に簡単な振動モデルを考案し、その妥当性を実験結果と比較、検討する。なお、長径間ゲートの振動には自由流出時の2自由度振動と潜り流出時の1自由度振動とがあるが、ここでは自由流出時の場合に焦点を絞る。

2. 実験事実の確認

これまでの実験により得られたいくつかの重要な事実をまとめておくと、①自由流出時にはゲートは鉛直振動と水平振動の連成した楕円軌道をとって振動する。また、通常鉛直振動が水平振動に対して幾分進み位相となる。②このタイプの振動はゲート前面の傾斜部が大きいほど発生しやすい。③微小開度時に振動が発生しやすい。以上三つの項目が挙げられる。こうした自励振動を決定するパラメータとしては幾つもの量が考えられるが、ここでは特に開度、ゲート断面形状といった幾何形状パラメータに注目して定式化を試みていくことにする。

3. 定式化の方針

今、ゲート中央部の振動のみに注目し、単位幅を持つゲート中央部が径間に鉛直な面内で2自由度振動を行うとする。そのときゲートの無次元化された運動方程式は次のようにかける。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \beta_x & 0 \\ 0 & \beta_y \gamma_{yx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \gamma_{yx}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (C_{Fx}/8\pi^2) U_R^2/m_R \\ (C_{Fy}/8\pi^2) U_R^2/m_R \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、 X, Y :無次元変位、 β_x, β_y :減衰定数、 γ_{yx} :水平鉛直固有周波数比、 U_R :無次元化速度、 m_R :質量比、 C_{Fx}, C_{Fy} :外力係数である。外力係数の把握が出来れば、この方程式の安定判別が出来る。しかし、このまま取り扱うのは複雑であるので、実験結果に基づいて簡略化を図ることにする。

実験ではゲートに働く圧力の測定も行ったが、その中で、ゲートに働く圧力変動は水平振動に対しては常に励振効果を、鉛直振動には水理条件によって励振効果を持つ場合と減衰効果を持つ場合が判明した。また、振動発生領域と照合すると、水平振動が常に励振される場合、鉛直振動が励振されるか、減衰されるかで、振動発生の有無が決定することが明らかとなった。とりわけ、許容撓み度:1/1200の場合にはこのような傾向が顕著にみられる(図-1、横軸は水深、縦軸は圧力変動と鉛直加速度の位相差、 D はゲートのフラップを除いた高さ)。従ってここでは、ゲートの水平変位にともなう鉛直励振効果を考える。

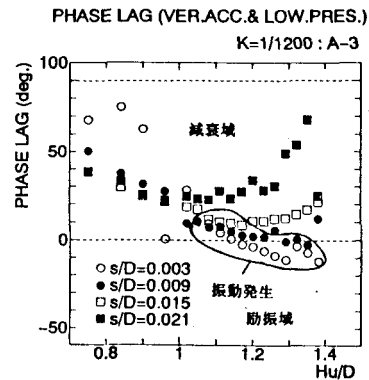


図-1 圧力変動と鉛直加速度の位相差

Hiroji NAKAGAWA, Akihito HATA, Takeshi HATAKEYAMA

4. 定式化

今、ゲートが水平方向に変位したとすると、それにともないゲート前面の傾斜部に鉛直方向外力が働く。また、その際、ゲートの変位にともないゲート前面の水の占有する体積が変化する。すなわち、ゲートが前方に変位したときには、それだけ水が排除されることになり、また逆に、ゲートが後方へ変位したときには逆にゲートが水により排除されることになる。こうした水の占有する体積の変化とそれにともないリップ下端より流出する流量の変動を連続式で、また、流量変動にともない流速変動とゲート傾斜部に働く力を運動方程式で結び、ゲート傾斜部に働く力をゲート水平変位で表すと、以下ようになる。

$$F = \rho \frac{LD_1 s_0}{D_1 - s_0} \log \left(\frac{D_1}{s_0} \right) \frac{D_2}{s_0} \ddot{x} \quad (2)$$

この変動外力のうちゲート鉛直方向速度に比例する成分のみ取り出し、鉛直振動について負減衰をもたらす条件を求めると、以下ようになる。

$$\beta_y - \left(\frac{\rho}{m} \frac{D_1 D_2}{2} \right) \frac{L}{D_1 - s_0} \log \left(\frac{D_1}{s_0} \right) \frac{\omega}{\omega_{ny}} \frac{x_0}{y_0} \sin \phi_{xy} < 0 \quad (3)$$

ただし、 D_1 : 傾斜部のせりだし長さ、 D_2 : 傾斜部高さ、 L : 傾斜部形状より求められる有効長さ、 s_0 : 開度、 ω : 振動周波数、 ω_y : 空中鉛直方向固有周波数、 x_0 : 水平振動振幅、 y_0 : 鉛直振動振幅、 ϕ_{xy} : 水平振動と鉛直振動の位相差である。図-2にこの条件式の持つ特性を示す。縦軸は ω/ω_y 、横軸はゲート前面の傾斜角の正接である。図より開度の増大と共に振動領域が狭くなる傾向、傾斜角度が大きくなると振動しやすくなる傾向が表れており、定性的には実験結果の傾向を示している。図-3に実験結果との比較を示す。これは、許容たわみ度: 1/1200、開度比: $s/D=0.009$ (s : 開度、 D : ゲートのフラップを除いた高さ) で、水平振動の鉛直振動に対する遅れ位相を 20° の場合である。白丸は振動発生点、黒丸は振動非発生点である。この図より振動発生領域は上限値と下限値を持っていることがわかるが、この振動条件式はその下限値を示していることになる。上述のように実験結果の傾向を概ね示していることが分かる。しかし、定量的にはまだ大きな食い違いがあり再検討を要するところである。

5. 結論

以上の結果より、ゲート水平変位にともなってゲート傾斜部に働く鉛直方向外力が振動発生の大きな要因の一つであることが明かとなった。しかし、ゲート振動は2自由度振動であり、鉛直方向振動の不安定性だけで議論するには無理がある。実験結果から、圧力変動が水平励振効果を持つことが分かっている。こうした特性は、ゲート鉛直振動にともなって生じる流量変動によるものであると考えられるが、今後はこのような特性も含めて2自由度系全体で振動限界を考えていく必要がある。また、その際ゲート振動を規定する条件として鉛直、水平方向のゲートの剛性を考慮していくことも必要と考えられる。

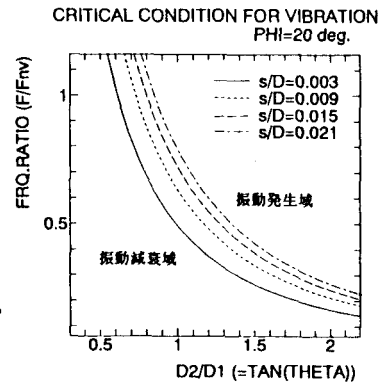


図-2 振動発生限界の特性

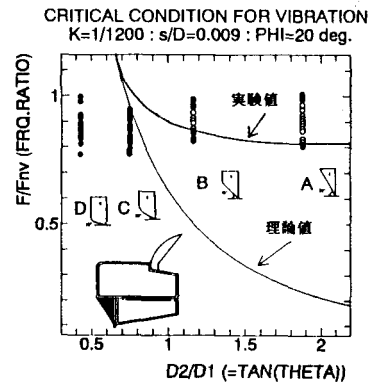


図-3 実験値との比較