

東洋大学工学部 正員 荻原 国宏
 京都大学工学部 正員 中川 博次
 石川島播磨重工 正員 上田 幸彦

振動を発生する時の水位状況 開度を設定し上流から一定流量を流し上流水位が徐々に上昇させる。測定は上流水位、中央点の変位、端部点の変位、中央点の振動を前3者は板パネの変位で、後者は加速度計で同時測定をしている。一例が図-1である。図の最上段が上流の水位の記録、その下が中央点の変位、さらにその下が梁の端部の点の変位であり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から水位の変化の変化率が減少傾向から上昇傾向に変じている点になっている事が判る。すなわち流量は上流から一定流量で供給され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くる。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が生じなければ、このような現象は生じない。

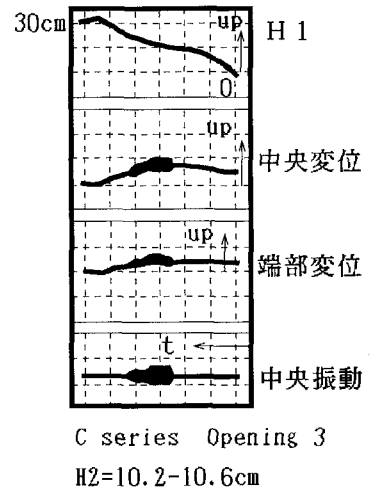
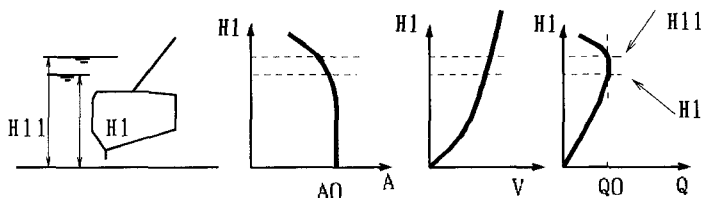


図-1 振動記録の一例

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ならないことになる。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分かりやすく説明すると図-2のようになる。この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を表している。3番目は流速を4番目は流速と面積の積として求められる流量を表している。流速は上流水位が上昇するに従って $(H1)^{1/2}$ で増加する。面積は水位がゲートの上面に達するとゲートが下向きに撓むので減少し出す。その結果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。

図-2 水位と流量の関係

この結果、図に示したように H11 の水位とH1の水位で同じ流量 Q_0 で流れる現象が生ずる。この事はこの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水位で二つの変位を示しても良い事になり、どちらの位置にゲートがあっても良いので振動を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、模型実験によっても確認され、潜り流出での振動となっており、上記のように解釈する自由流出、潜り流出のいずれの流出でも発生し得る事が良く判る。従って振動の解析モデルもこれに従って求める事が出来る。上記の関係を振動の発生限界条件としてもとめ。上流水位の上昇に伴う梁の撓みによる流出量の変化について、撓みによる流出面積の減少と水位の上昇による流速の増加を考慮して理論的に検討してみる。ここにまとめたのは主として鉛直撓みについてであるが、ねじれが支配的な場合には捻れ方程式で検討する事になる。流量は

$$Q = C_v \sqrt{2g} (H_1 - a) \left[aL - \frac{(q - p_v) L^5}{120EI} \right] \quad (1)$$

はゲートの単位長さ当たりの重量、 p_v は水圧による鉛直荷重で上流水位によって決まる。この式により流量

が最大になる条件を開度 a と上流水位 H_1 との関係で限界曲線を求め、模型実験で自励振動が発生したケースとの関係をグラフに示したのが図-3である。曲線が流量が最大になる点であり、それより上流水位が深い点で自励振動が発生している事が判る。(図中の黒い点) この事を考慮して振動の理論解析を以下に示す。振動の基礎方程式は鉛直と水平方向について次の様に示される。

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

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

(2)

ここに $f_y(z, t)$ 、 $f_x(z, t)$ は振動外力である。これはゲートの運動と流れの関係から求められ、集約すると次の様になる。

$$f_y = -\rho V C_{my} \frac{d^2 y}{dt^2} - \rho (L \sin \theta + b + b_1 \sin \alpha) \left| \frac{dy}{dt} \right| \frac{dy}{dt} - C_y \frac{\rho q}{a} |y| \frac{dy}{dt}$$

$$+ (\rho q v_i + P_i) \tan \theta \frac{y}{a} - \rho (L \sin \theta \tan \theta + \beta h) \left| \frac{dx}{dt} \right| \frac{dx}{dt} + w d v$$

$$f_x = -\rho V C_{mx} \frac{d^2 x}{dt^2} - \rho (L \sin \theta + h) \left| \frac{dx}{dt} \right| \frac{dx}{dt} - \rho L \cos \theta \left| \frac{dy}{dt} \right| \frac{dy}{dt}$$

$$+ C_x \frac{\rho q}{a} |y| \frac{dy}{dt} + \frac{\rho}{a} (q v_i + \frac{P_i}{\rho} + g a H) y \quad (3) \quad \text{この式を見ると判る如く水平と鉛}$$

直各方向の運動がカップリングした振動である事が判る。各項の内自励振動に寄与している項がどれであるかを振動の一周期でなす仕事がプラス、マイナスであるかによって考察する。プラスの場合は振動のエネルギーがその項を通じて振動系に供給され自励振動になる可能性を持っている。仕事の関係式は次の様になる。

$$\frac{\pi W}{2L} = a_y \omega \left[\frac{4a_y^2 (2A_{A1} \omega + A_{A2})}{3} + \frac{8\omega A_{A5} a_x^2 \cos \psi}{3} - 2\gamma_y a_y \pi \right] \quad (5)$$

$$\frac{\pi W}{2L} = a_x \left[\frac{4\omega^2}{3} \left\{ 2B_{B1} a_x^2 + \left(2B_{B2} + \frac{B_{B3}}{\omega} \right) a_y^2 \cos \psi \right\} \right] + a_x [B_{B4} a_y \pi \sin \psi - 2\gamma_x \pi \omega a_x] \quad (6)$$

これに模型の場合の値を使って振幅 $a_y = 0.05 \text{ cm}$ 、 $a_x = 0.05 \text{ cm}$ 周波数 $f = 10 \text{ Hz}$ $\omega = 2\pi f = 62.83 \frac{1}{s}$ 鉛

直運動と水平運動の位相 $\psi = \frac{\pi}{4}$ $\cos \phi = 0.707$ 、 $\sin \phi = 0.707$ 、下流側接水長 $L = 2 \text{ cm}$ 、下流側スキムプレート

の勾配 $\tan \theta = 0.354$ 、 $\sin \theta = 0.338$ 、 $\cos \theta = 0.943$ 、鉛直運動の影響幅 $b = 10 \text{ cm}$ 、 $b_1 = 10 \text{ cm}$ 、水位流量曲線の勾配 $\sin \alpha = \frac{-40 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = -10$ 、水平運動の影響幅 $h = 15 \text{ cm}$ 、影響係数 $\beta = 0.4$ 、ゲートよりの流速

$$v_i = \frac{q}{a} = \sqrt{2 \times 980 \times 25} = 221 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \text{、係数 } C_y = 0.2, C_x = 0.2 \text{、上流の水圧}$$

$$p a = g H a = 980 \times 25 \times 0.2 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}^2} \text{として各項の値を計算すると、鉛直方向では第1項、水平方向では第2}$$

項が自励振動の原因となっている事が判った。これは鉛直は図-2に示す不安定条件からの、水平は鉛直振動が原因となっている事が判った。

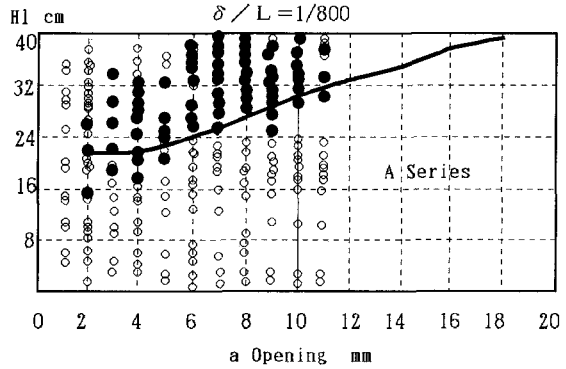


図-3 自励振動の発生限界