

弾性相似を合れた長径間ゲート模型の振動実験 について

水資源開発公団 正会員 ○ 荒木 正夫

水資源開発公団 森 正秋

1. 序 説 ゲートの振動現象については扉体の軽量化およびスパンの長大化に伴い、近年とみに注目されるようになってきた。我国においても従来多くの理論的および実験的研究がなされているが、実験手法としてはたいてい扉体の弾性を考慮せず、剛体の振動として取扱っているようである。高圧ゲート、ラジアルゲートの振動などではこのような実験方法でも十分実用に役立つデータが得られると思われる。しかしながらゲートスパンや扉体の断面形に比して著しく長大な場合には、扉体は剛体としての振動より弾性体としての撓み振動が卓越するようになり、このようなゲートの振動問題では扉体の弾性的性質を考慮することなく実験的研究を行うことは全く無意味となるであろう。

このような弾性相似律を考慮したゲートの振動実験については、polyvinylchlorid を用いた模型実験がオランダで行われており、ゲート構造の関係上模型材料の比重を大きくする工夫がなされておらず、我々の模型実験に当っては新しい材料を開発しなければならなかった。

水資源開発公団試験所において著者等が実験的研究を実施した利根川河口北の調節門扉は、各々独立に上下する上段扉、扉高 3.60 m、幅 3.25 m、下段扉、扉高 4.00 m、幅 4.00 m、径間長 4.57 m という巨大な細長いセルタイプのゲートであって、このような扉高の割に長大なゲートは世界に例を見ないものである。しかもこのゲートは上段扉、下段扉ともに扉体の上下から水が同時に overflow および underflow する型式であるから、その場合ゲート下流に渦を発生し振動を誘発しやすいことは明白で、かかるゲート操作は勿論絶対に避けるべきであるが、そのような場合の振動特性をあらかじめ調べておくことは重要である。

以下述べる模型実験においては模型材料の弾性的性質を考慮するとともに、両端のワイヤーの代りにスプリングを用いたが、このスプリングは数種のバネ常数のものをとりかえ使用することにより、上記のような弾性体としての撓み振動と剛体としての上下振動の両者の割合を究明することにした。

2. 弾性相似律 ゲートの弾性振動には撓み、縦およびねじれなどの種の振動が現れるが、この種のゲートで最も影響が大きいのは撓み振動であるから、以下撓み振動の弾性相似律を検討する。水理学的には Froude の相似律によるのは勿論である。模型に添字 m 、実物に添字 p をつけて表わすと、撓み振動に対する模型と実物弾性相似律は次式を満足しなければならない。

$$(\gamma_m A_m l_m^3) / (E_m I_m) = (\gamma_p A_p l_p^3) / (E_p I_p) \text{-----}(1)$$

ここに、 γA は単位径間長当りの重量、 l はゲートの径間長、 $E I$ は曲中剛さである。実物と模型の寸法比を L であらわし、実物と模型を同一断面形状・同一比重の材料で作るとき、弾性相似律を満足する模型と実物の E の比は(1)式より、 $E_m/E_p = 1/L$ にすればよい。本実験では縮尺 $1/10$ の模型(径間長 4.57 m)を作ることにしたから、模型材料の E は鋼鉄の $1/10$ にする必要があるが、金属にはこれを満足する適当な材料がないので合成樹脂を用いることにした。

両端を吊るスプリングについては実物のワイヤーと模型のスプリングを次の条件式によって合わせればよい。 δ_0 を重り W がかかっているときのバネの静撓みとすると、 $\delta_0 = W/k$ であるから

$$\frac{(\delta_{sc})_m}{(\delta_{sc})_p} = \frac{1}{L} = \frac{W_m}{W_p} \frac{k_p}{k_m} = \frac{1}{L^3} \left(\frac{k_p}{k_m} \right) \quad \therefore \frac{k_m}{k_p} = \frac{1}{L^3} \quad \text{----- (2)}$$

ただし実験にあつては剛体としての振動と弾性体としての振動の卓越度を調べるために、バネ常数の異なる、種のバネを用いて実験を行ない固有振動数の変化を調べた。

3. 模型材料の選定 使用する合成樹脂材は次の諸性質を満足しなければならぬ。

(1) 弾性係数は 200,000 ~ 220,000 kg/cm²

(2) 比重は 7.8 にすることは理想であるが、合成樹脂固有の比重は 1.5 以下程度であるから、そのような材料を作ることは極めて困難である。この目的のためにポリエステル材に重い金属を融解配合することにした。フィラーとして鉄粉、鉛粉、タングステン粉を試験したが、試験結果による配合比と材料比重の関係を図-3 に示す。図中の積層可能粘度限界がそのフィラーによる可能な最大比重を示し、鉄で 3.6、鉛で 4.7、タングステンで 7.1 である。この結果からタングステンを最も優秀なフィラーであることが判明したが、あまりにも高価であり採用することはできなかった。

(3) 比例限度が高くかつ内部摩擦係数かなるべく小さいこと。フィラーに鉛を使用した材料は比例限度が低すぎて役に立たないことが判明したので、比重に難点があるがフィラーとして鉄粉を用いることにした。かつ比例限度を高めるために種々研究の結果次のような工夫を試みた。

(鉄粉) / (ポリエステル) 重量比 3.5 の合成樹脂材の中心に金網を 1 層置き、かつその外側に夫々 2 層づつ合計 4 層のファイバーグラス層を合成樹脂材と互層に積層し全厚 2.6 mm の板とする。合計 11 層の積層の状態は図-4 に図解的に示すとおりであつて、この特殊樹脂材は池野造型研究所と協力して開発したものである。本材料の比重は 3.16、弾性係数は 221,000 kg/cm² である。

使用した材料は次のとおり。

ポリエステル積層用樹脂	東洋高压製 R-21
ファイバーグラス	日東紡製 ECL 230 (平織 180 g/m ²)
金網	ワイヤーゲージ 23 (10 メッシュ)

この材料の比重は鋼よりも小さくゲート重量が軽くなるのでこれを補うために、できるだけ I に変化を与えないようにゲート断面の重心に位置に鉛棒を設置して全重量を一致させた。

4. 空中における固有振動数 模型が弾性相似律を満足しているかどうかを判定するには、撓み量と比較するほか、計算値が求められている実物の空中における固有振動数と模型実験による模型の固有振動数を比較してみるのが最も簡単である。

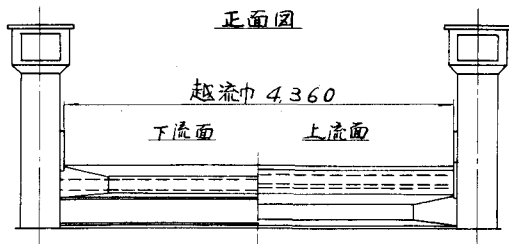
両端単純支持の梁の固有振動数 固着粘性を持つ梁の撓み振動方程式は

$$\frac{\gamma A}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \xi I \frac{\partial^2 y}{\partial t \partial x^2} = 0 \quad \text{----- (3)}$$

ここに ξ は内部摩擦係数である。 $\xi = 0$ の場合の固有振動数 f_n と ξ を考慮する場合の固有振動数 f_{dn} はそれぞれ次式で与えられる。

$$f_n = \frac{\pi^2 \pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI \rho}{\gamma A}} \quad \text{----- (4)} \quad f_{dn} = f_n \sqrt{1 - \left(\frac{\pi \xi f_n}{E} \right)^2} \quad \text{----- (5)}$$

(4) 式より模型と実物の固有振動数の比は



断面図

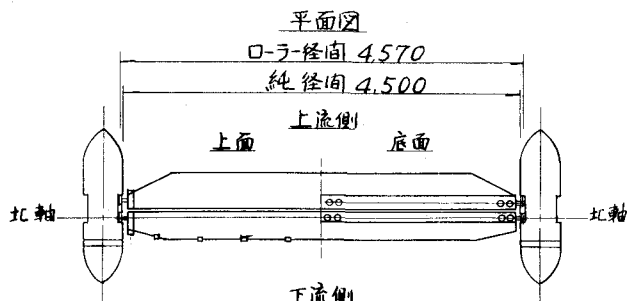
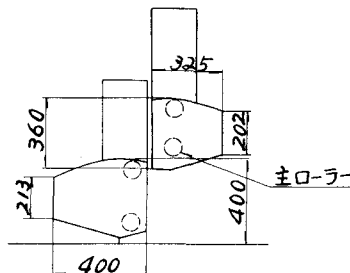


図-1 模型ゲート一般図 単位 mm

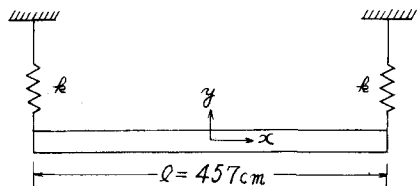


図-2 座標

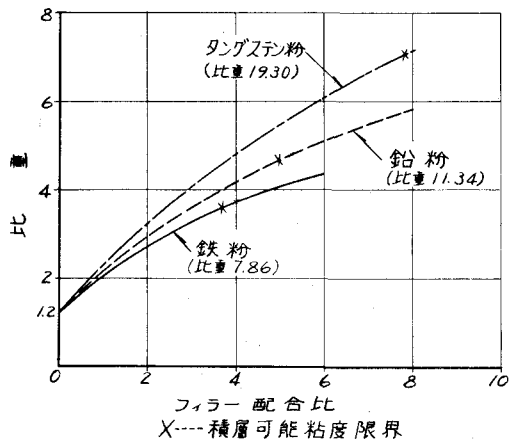


図-3 フィラー 配合比と比重の関係

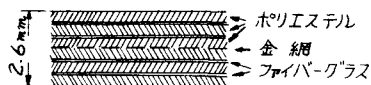


図-4 模型材料積層図

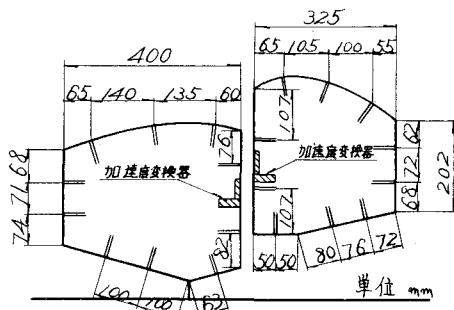


図-5 加速度変換器とピエゾメーター配置図

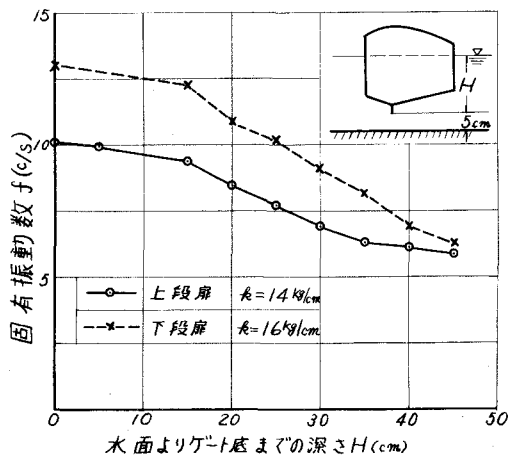


図-6 H と f の関係

$$\frac{f_m}{f_p} = \left(\frac{l_p}{l_m}\right)^2 \sqrt{\frac{E_m}{E_p} \frac{I_m}{I_p} \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{A_p}{A_m}} = \left(\frac{L}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{1}{L} \times \frac{1}{L^2} \times \frac{1}{1} \times \frac{L^2}{1}} = \sqrt{L} = 3.16 \quad (6)$$

実物についての1次振動の固有振動数 f_p の計算値と(6)式によるその模型換算値 f_m を次に示す。

上段扉	実物	水平	4.309%	模型	13.63%
	計算値	鉛直	3.737	換算値	11.81
下段扉	実物	水平	4.860	模型	15.37
	計算値	鉛直	4.223	換算値	13.35

ゲート下流の渦流による強制振動は実験の結果によれば、上段扉、下段扉ともに水平方向の振動に比べて鉛直方向の振動振幅の方がはるかに大きいことが判明したので、以下すべて鉛直方向の振動のみを論ずる。なお、(3)式より減衰定数 h は次式で与えられる。

$$h = \pi k f_m / E \quad \text{----- (7)}$$

5. 空中および静水中における固有振動数の測定 模型ゲート経間中央部に設置した加速度変換器(共和電業製 120A-5G)を用いて測定した空中における1次固有振動数を次に示す。

上段扉	バネ常数 k (kg/cm)	62.5	32.0	14.0	平均値	換算値
	固有振動数 f (%)	10.8	10.2	10.1	10.4	11.81
下段扉	バネ常数 k (kg/cm)	62.5	28.0	16.0	平均値	換算値
	固有振動数 f (%)	15.6	13.9	13.0	14.3	13.35

上表によれば k が大きく変化しても f の変化は僅かであり、かつ実物よりの模型換算値と測定値とは比較的良好に一致していることが分る。これよりこの特殊樹脂模型はほぼ弾性相似律を満足しており、かつ剛体としての上下振動に比して弾性体としての揺み振動の方が卓越していると言える。

次に、模型ゲート底から水路床面までの深さを5cmとすると、水面からゲート底までの深さ H と1次固有振動数との関係を図-6に示す。 H が深くなるに従い固有振動数も急速に減少することと認められる。水中における固有振動数は計算では求められないからこの実験結果は有益である。

6. 減衰定数の測定 空中および静水中における減衰定数 h の測定値を次に示す。模型ゲート底から水路床面までの深さは5cm、水面からゲート底までの深さを H とする。

上段扉	H (cm)	44.2	39.7	34.8	24.8	20.1	15.5	11.1	4.6	空中
	h	0.0743	0.0698	0.0681	0.0502	0.0754	0.0681	0.0932	0.0969	0.0920
下段扉	H (cm)	44.7	40.2	30.6	25.2	20.0	14.5	10.5	5.0	空中
	h	0.0913	0.1061	0.1259	0.0913	0.0865	0.0731	0.1108	0.0731	0.0717

減衰定数はかなりばらつきがひどく、かつ予想に反して水深に関してははっきりした変化傾向を見出すことができなかった。

7. 流水による強制振動と圧力変動の測定 各ゲート中央部の断面9~10ヶ所の位置にピエゾメーターを開口させ、これに圧力変換器(共和電業製 P-W 100gA)をとりつけて流水によりゲート面が受ける圧力変動を測定したが、この測定結果および流水によるゲートの強制振動測定値については別の機会に述べる。