

ゲートに作用する流体減衰力の研究

Experimental Study on Hydraulic Damping Force on Sluice Gates

三菱重工業㈱ 高砂研究所流体研究室	今村 建二	K. Imamura
三菱重工業㈱ 横浜研究所構造強度研究室	大久保 精二	S. Ohkubo
三菱重工業㈱ 横浜製作所水門鉄管設計課	金子 徹	T. Kaneko

1. 緒 言

ゲートの自励振動に関しては、従来から幾つかのすぐれた研究が示されている¹⁾。それらの研究では、実験装置を当論文の図-2(b)様にセットし、バネで吊った模型ゲートの振動の有無を判定している。

本研究では非定常流体力の理論、すなわち流れのなかで振動している物体に作用する流体力に関する理論をバックランドにおいて実験研究した。模型ゲートに圧力変換器をとりつけ、その模型を水流中で、モータとクランクで強制的に振動させる。そのときの模型ゲートに作用する変動圧力を解析することにより、流れが振動系に及ぼす減衰作用を知ることができる。この方法によれば、負の減衰力及び正の減衰力の定量的検討をすることができる。

実験結果は、ゲートの振動に関する近年の他の研究で示された負の減衰力の出現状況をよく説明するものであることを示すほかに、ゲート形状が変わった場合の減衰力の研究についても有用な結果を示した。

2. 非定常流体力の理論の概要²⁾

非定常流体力の理論は空中構造物に関しては比較的旧くから適用されてきているが³⁾、ゲートの水理特性などを対象とした分野には適用された例が少ないので、以下に既往の文献から理論の概要を解説的に示す。

非定常流体力は、振動している物体の変位・振動速度及び振動加速度等の関数であると想像される。そこで非定常流体力を下式で近似表現する。

$$F(t) = -m' \ddot{x} - c' \dot{x} - k' x \quad (1)$$

ここに右辺の物理的意味は、第1項が付加質量発生効果、第2項が正あるいは負の減衰力発生効果、第3項は流体のバネ効果である。

式(1)を振動系の運動方程式に代入すると下記となる。

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = F(t) = -m' \ddot{x} - c' \dot{x} - k' x \quad (2)$$

$$\text{あるいは} \quad (m+m') \ddot{x} + (c+c') \dot{x} + (k+k') x = 0 \quad (3)$$

したがって、非定常流体力を式(1)で表現する場合、減衰力の正・負は次のごとく表現される。

$$\left. \begin{array}{ll} c' > 0 & ; \text{ 正の減衰作用} \\ c' < 0 & ; \text{ 負の減衰作用} \end{array} \right\} \quad (4)$$

計測された非定常流体力の減衰作用の正・負の判定は、以下の検討から得ることができる。

$$\text{いま、振動系が} \quad x = a \cos \omega t \quad (5)$$

で振動しているとすれば下記様となる。

$$\dot{x} = -a \omega \sin \omega t, \quad \ddot{x} = -a \omega^2 \cos \omega t \quad (6)$$

式(5)及び(6)を式(1)に代入して変形すると下式を得る。

$$\frac{F(t)}{a} = c' \omega \sin \omega t + (m' \omega^2 - k') \cos \omega t \quad (7a)$$

$$= L' \cos(\omega t - \beta) \quad (7b)$$

ここに,
$$L' = \sqrt{(c' \omega)^2 + (m' \omega^2 - k')^2} \quad \text{---(7c)}$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{c' \omega}{m' \omega^2 - k'} \quad \text{---(7d)}$$

式(4), (5), (7b)及び(7d)の比較から次のごとくいえる。

- (1) $\dot{c} > 0$, すなわち正減衰作用の場合, $\beta > 0$ すなわち非定常流体力は変位に対して遅れ位相を有する。
- (2) $\dot{c} < 0$, すなわち負減衰作用の場合, 非定常流体力は変位に対して進み位相を有する。

上記が非定常流体力の減衰作用の概念である。そのなかの, $\dot{c} > 0$ の場合に関する説明を図1に示した。つぎに減衰作用の強さについては次のごとく言える。

式(7c)及び(7d)から, 次の関係を得る。

$$\frac{c' \omega}{L'} = \sin \beta \quad \text{---(8)}$$

式(7a)及び(7b)の関係を用いて変形すると下式を得る。

$$c' = \frac{L'}{\omega} \cdot \sin \beta = \frac{|F(t)|}{a \omega} \sin \beta \quad \text{---(9)}$$

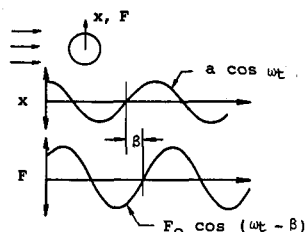


図-1 非定常流体力の概念

3. 実験装置

図2に実験装置の説明を示す。同図(a)に示した状態が最も基本的構成である。模型ゲートはローラベアリングを有しており, それによって流れ方向荷重を支持するとともに, 上下方向の運動を可能としている。また, ゲートは, モータとクランクとにより外部から強制加振される。ゲートの底面には圧力センサがとりつけてある。図2(b)は自由振動実験をする際の実験装置の状態である。ゲートがスプリングで吊られている以外は同図(a)とは変化はない。なお, 図2(c)に, 本文で用いる記号の説明を示した。

図3は供試ゲートの説明図である。当初は同図(a)の小モデルを用いたが, 最終的には, 図3(b), (c)及び(d)の大型ゲートを用いた。図3には, 圧力センサとりつけ位置もあわせて示してある。

4. 非定常流体力の減衰作用把握実験結果

4.1 負減衰作用の実験結果例

図4は, 実験装置を図2(b)の状態にセットして図3(a)の小モデルを用いて自由振動実験を行い, 振動が発散した例である。同図(a)は発散の全過程の記録であり(b)は(a)の一部分の拡大記録である。同図(b)において, 底面の圧力変化が, 変位に対して進み位相を有していることをみることができる。

その位相差の解析値は, $\beta = -23.0\text{deg.}$ であった。このように非定常流体力が変位に対して進み位相を有していたために負減衰作用が発生し, それが実験装置の構造減衰を相殺して振動が発散したといえる。

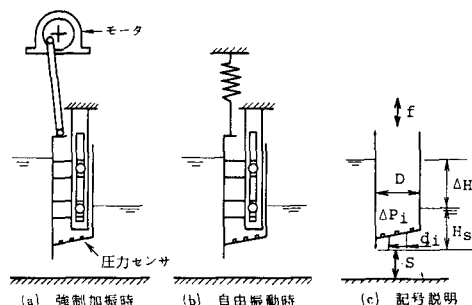


図-2 実験装置と記号の説明

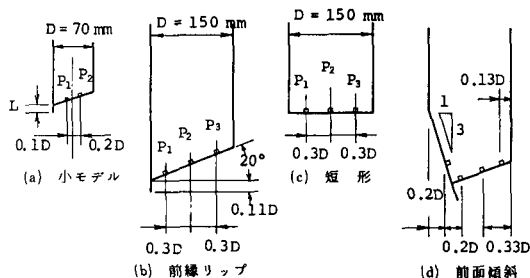


図-3 供試ゲート

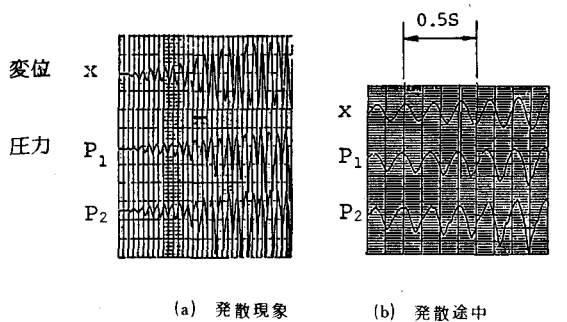


図-4 負減衰作用例

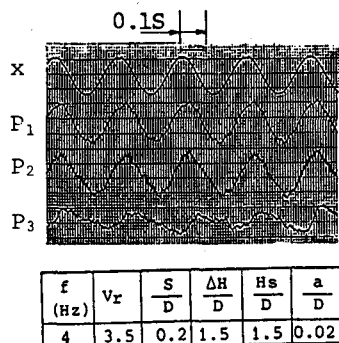


図-5 正減衰作用例

4.2 正減衰作用の実験結果例

図2(b)の実験装置において、バネ定数を高めて固有振動数を高めるとか、あるいはゲート上・下流の水位差を小さくする等の条件変更をほどこすと、ゲートは振動しなくなる。そのように、図2(b)の実験装置では振動が発生しない条件に対して、実験装置を図2(a)の状態に変更して、強制加振法により非定常流体力の特性を把握した。その実験結果の例を図5に示す。供試体は図-3(b)の大モデルである。図5の変位波形とゲート底面圧力変動波形とを見比べると、圧力変化波形が変位波形に対して遅れ位相を有しており、正減衰力特性を示していることを見ることができる。

4.3 減衰係数の把握

実験においては、圧力変動振巾を計測する。その計測量と式(9)の減衰係数との対応づけを以下に記す。

(1) 局所減衰係数

各圧力計測点での減衰係数を下式で求めた。

$$C'_i = \frac{1}{(a/D) \omega \cdot \Delta H} \left\{ \frac{\Delta P_i}{\gamma} \cdot \sin \beta_i \right\} \quad (10)$$

ここに ΔP_i 及び β_i は、各計測点での圧力振巾値及び位相差解析値である。その他の記号は図2及び式(5)を参照されたい。上式では無次元化のために、振巾 a を D で、また $\Delta P_i / \gamma$ を ΔH で割っている。

(2) 積分減衰係数

式(10)の C'_i を、区分求積し、全体特性を求めた。図2(c)を参照すると、下記様の計算式となる。

$$\overline{C'} = \sum C'_i \cdot d_i / D \quad (11)$$

今までの議論であきらかなように、次のごとく言える。

$$C'_i, \overline{C'} > 0 \quad ; \quad \text{正の減衰作用}$$

$$C'_i, \overline{C'} < 0 \quad ; \quad \text{負の減衰作用}$$

4.4 換算流速 V_r の導入

ゲートの水理特性表現においては水位が最も多用されかつ実用性が高い。そこで、ゲートの非定常流体力を表現するパラメータとして、下記の換算流速を用いる。

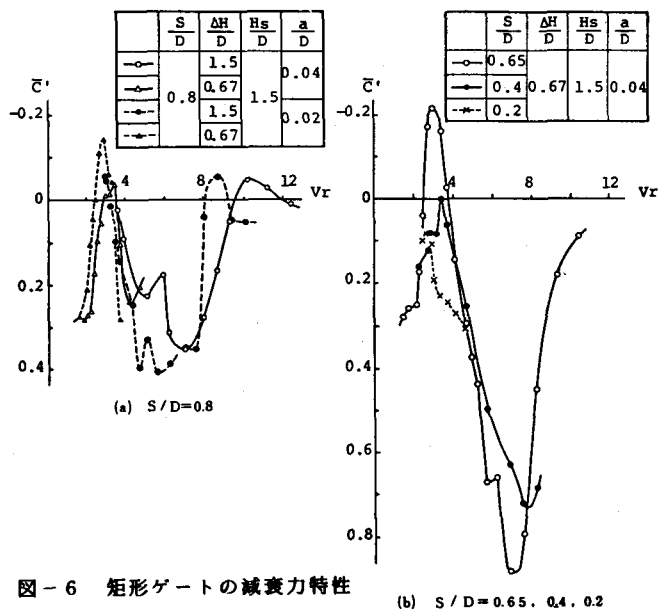
$$V_r = \sqrt{2g\Delta H} / f D \quad (12)$$

ここに、 $\Delta H, D$; 式(10)と同じ
 f ; 振動数 (Hz)

4.5 矩形ゲートに関する実験結果

図3(c)の矩形ゲートを用いた減衰力計測結果を図6に示す。その特徴的事項をあげると次のごとくいえる。

i) 図6(a)に示すごとく、ゲート開度 S/D が比較的大きい場合には、 $V_r \approx 2$ 及び8近辺の双方に負減衰力が生じる。
 ii) 図6(b)に示すごとく、 S/D が小さくなると $V_r = 8$ 近辺の負減衰力が消滅する。そして $S/D=0.65$, $V_r = 3$ で負減衰力が最大値をとる。
 iii) 上記実験結果はNaudascher⁴⁾等の先行研究で観察された自励振動発生域における負の減衰力出現状況を十分に説明し得るものであり、当実験法の実用性が検証されたと考える。



5. 各種形状ゲートの負荷減衰特性

ゲート形状が異なる場合の負減衰特性の差異に関し、減衰力の分布及びその積分値の双方にふれつつ実験結果を示す。

5.1 矩形断面ゲート

矩形断面ゲートの負減衰特性で最も特徴的事項は、前掲図6(a)のごとく、2ヶ所で負減衰が出現することである。この現象は、空中の四角柱が2ヶ所で負減衰を出現させる現象(図7参照)に一見するとよく似ている。しかし、それらの負減衰力の性質を負減衰力分布計測結果から検討すると、そこに興味深い差あるいは類似点があることが判明した。

図8は、空中の渦励振域で振動中の長方形物体表面の減衰力分布の例である。この場合、後縁近辺に負減衰力が発生し、前縁近辺には正の減衰力が発生している。この資料は、辺長比1:2の長方形物体の、 $V_r \approx 6$ の現象を示したものであるが、図7の辺長比1:1の場合の $V_r \approx 10$ においても同現象であることは想像に難くない。

ところで、図9は矩形ゲートの減衰力分布の例を示したものである。前述図6と見較べつつ特徴的事項を記すと次のとおりである。

- (1) 図6(a)の $V_r \approx 8 \sim 12$ での負減衰力は、図9(a)の前縁付近に発生した負減衰力にもとづいている。この現象は、図8の空中長方形物体に関する特性とは逆になっている。
- (2) 図6(a)の $V_r \approx 3$ での負減衰力は図9(b)の後縁付近に発生した負減衰力にもとづいている。すなわち、図8の空中長方形物体の特性と同じである。

すなわち、図6(a)と図7との類似現象のなかにも、その性質には、上述のような差及び類似点がある。空中構造物の場合は交番渦が生じ、双方の剥離域の流れに影響を及ぼし合うが、ゲートの場合、剥離域は1ヶ所であることが上述の差となるのであろう。

5.2 前縁リップゲート

図3(a)及び(b)に示す形状のゲートは、止水機構が簡単であることから多用される。また、自励振動特性を有していることも知られており、その一例を前述の図4に示した。

図10(a)は減衰力の積分特性の例であり、同図(b)及び(c)は代表的 V_r での減衰力の分布を示したものである。これらの図から、次のことが言える。

- (1) 図10(a)において減衰力が2ヶ所でピークを有する現象は、前述の矩形断面ゲートと同じである。しか

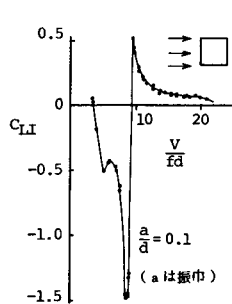


図-7 四角柱の減衰力特性

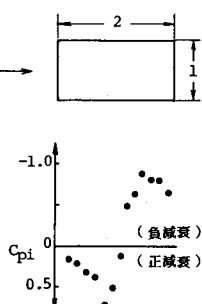


図-8 長方形柱面の減衰力分布例(e)

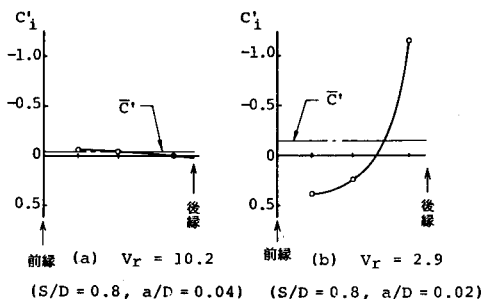


図-9 矩形ゲート底面の減衰力分布

しながら、 V_r の大きい領域のピークのみが負減衰域に突入している。

(2) 図10(b)及び(c)において、負減衰力の分布をみると、前述の図8の矩形断面ゲートのそれと同性質であるといえる。すなわち、 V_r の大きい領域の負減衰力発生域では前縁近辺の負減衰力が現象を支配している。他方、 $V_r \approx 3$ 近辺では後縁近辺に負減衰力が生じている。但しこの場合、前縁近辺の正減衰値が卓越し、積分値としては正減衰力となっている。

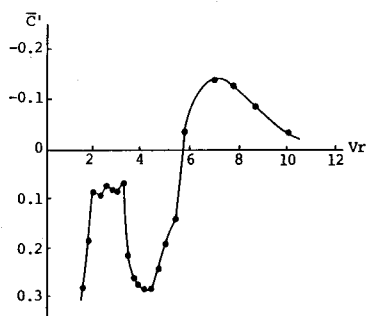
(3) 上記(2)の現象についてさらに述べると、前縁リップゲートは、リップ長さ(図3(a)における寸法L)を小さくしたりして矩形ゲートに近づけると、 V_r の小さい領域に別の負減衰力が出現するといえる。

(4) 前述の図6の矩形断面ゲートでは、 $V_r \approx 3$ で積分値として負減衰力が発生したのに対し、前縁リップゲートでは正減衰にとどまったことについては、現状では流れ観察結果にもとづき、定性的に次のように考えている。すなわち、 V_r が小さい領域は、振動数に比し流速が小さい領域であり、前縁リップゲート下部の大きな剥離域内では、渦の旋回速度が矩形断面ゲート下部に比し小さかったため、その影響度が小さくなったためと考えている。

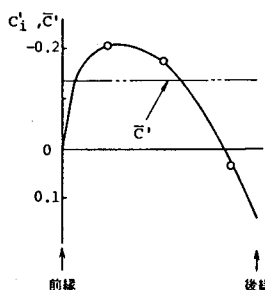
5.3 前面傾斜ゲート

図3(d)に示す形状のゲートは、浮力の利用を必要とする場合に適用される。このタイプにおいて前面の傾斜部を、ゲート最後縁まで広げると、後縁リップゲート、すなわち、振動特性のないゲートとなる。すると、この前面傾斜ゲートは、前述の図3(a)及び(b)の前縁リップ型に比し、振動しにくい方向にあると考えられるのであるが、筆者等はその逆の現象を多く経験してきた。それらの現象は、減衰力の分布を検討することにより説明し得たので以下に記す。

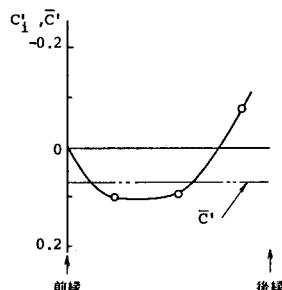
(1) 図11(a)は図3(d)に示した形状のゲートに関する減衰力の積分値特性を示したものである。負減衰力発生 $V_r \approx 4.6$ であり、前述の図10(a)の場合の $V_r \approx 5.8$ に比し、低い流速で負減衰力が発生する。



(a) 積分値の特性



(b) $V_r = 7$ の減衰力分布

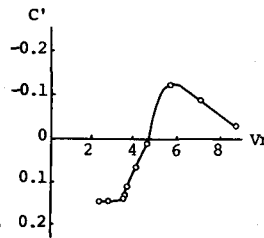


(c) $V_r = 3$ の減衰力分布

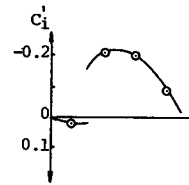
図-10 前縁リップゲートの減衰力特性例 ($S/D = 0.5$, $a/D = 0.02$, $H_g/D = 1.5$)

(2) 図11(b)は減衰力の分布を示したものである。特徴的事項として、次のことが言える。

(i) リップより下流では全域負減衰力発生域になっている。前掲図10(b)と見較べると、リップに近い領域の負減衰力のみが残り、リップから遠い領域の正減衰力が無くなっている。これは、リップより下流のゲート底面のリップ近辺流れだけが残る、後縁部のそれが無くなったことと同状態であり、現象的にうなづける。



(a) 積分値



(b) 分布側
($V_r=5.6$)

図-11 前面傾斜型の減衰力特性例

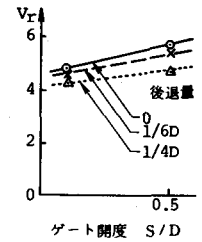


図-12 前縁後退量と自励振動発生 V_r 値の例 (前縁勾配1:3, $a/D=0.02$, $H_s/D=1.5$)

(ii) リップより上流の前面傾斜部で

は当然のことながら正減衰力が発生している。但し、この形状の場合、そこに発生する正減衰力は小さい。

(ii) 上記 (i) 及び (ii) の分布値を積分すると、この形状の場合、前述の前縁リップゲートより低い流速で負減衰力が発生する現象が説明づけられる。

もとより、前面傾斜ゲートは、その傾斜勾配あるいは傾斜領域の大きさを変えれば、上記とは異なった現象を示す。図12は、前面の勾配を3:1に保って、傾斜領域を変化させた場合の負減衰力発生 V_r を示したものである。この場合は、傾斜領域を前縁から $D/4$ まで拡大しても、まだ負減衰力発生 V_r は低下しつづけた。

6. 結び

ゲートの自励振動発生域の研究に強制加振法による非定常流体力計測法を適用することにより、流体減衰力の特性を種々検討することができる。ここでは、ゲート形状が変わった場合の減衰力特性の差異について、現在までに得られた知見を示した。要約すると次のとおりである。

- (1) 矩形断面形状の負減衰特性は、 $V_r \approx 3$ 近辺の現象が、空中構造物の渦励振現象と類似である。反面、 $V_r = 8 \sim 10$ の特性は少し異なる現象であった。
- (2) 前縁リップゲートは、 $V_r = 6 \sim 10$ で負減衰力を発生させるが、減衰力の基本的性質は矩形断面ゲートと同じである。したがって、リップ長を小さくする等の変形で、矩形断面に近づけると、 $V_r \approx 3$ 近辺に別の負減衰力が発生するであろう。
- (3) 前面を傾斜させたゲートは、その傾斜域に正減衰力が発生するが、リップ下流のゲート底面での負減衰力が強く残る可能性があり、必ずしも制振作用を増加させるものではない。

参 考 文 献

- (1) たとえば、上田・萩原；長径間ゲートの振動特性に関する研究；土木学会論文報告集，第279号，1979年11月
- (2) たとえば、岡他；耐風構造；丸善株式会社，1977
- (3) 釜口・坂田；吊り橋の耐風安定性に関する基礎研究；航空学会誌，第13巻，第133号，1964.
- (4) N.D.Thang・E.Naudascher；Vortex-excited vibrations of underflow gates；Jour. of Hydraulic Research, Vol. 24, 1986, No.2.
- (5) 伊藤他；振動する正方形断面に作用する空気力の特性；土木学会第30回年次学術講演会概要集，I-208, 1975
- (6) 橋本他；渦励振動に及ぼす気流の乱れ効果に関する一考察；同第41回，I-344, 1986