

長径間ゲートの振動特性に関する研究

A STUDY ON VIBRATION PHENOMENA OF LONG-SPAN GATES

上田 幸彦*・荻原 国宏**

By Yukihiko UEDA and Kunihiko OGIHARA

1. はじめに

近年工業用水, 上水道用水および農業用水などの水資源を確保するために, 河川中流域や河口付近を河川全幅にわたって締切り, せきを兼ねるような長径間ゲートが数多く設置されるようになって以来, 流水に伴うこの種のゲート振動は非常に重要な問題となり, 注目されている。

一般に長径間ゲートといっても, その用途に応じていろいろなタイプのもが考えられ, ここで対象としているのは, ゲート下端から放流させるタイプの1段式長径間シェル構造ローラゲート(以下1段式ローラゲートと略称する)およびゲート上部から越流させるタイプの2段式長径間シェル構造ローラゲート(以下2段式ローラゲートと略称する)であり, これらは, いずれも通常よく用いられる長径間ゲートである。

1段式ローラゲートの振動現象は, Petrikat¹⁾をはじめとしていく人かの人によって基礎的な研究^{2), 3)}がなされてきたけれども, 流水と構造物の相互作用によって振動する水力弾性⁴⁾とよばれる現象に属するため, 実際に使われているようなシェル構造タイプの振動現象については, 要因分析が困難となり, いまだ未解明な点が多い。

一方, 2段式ローラゲートの振動現象については, まだ研究例⁵⁾が少なく, 特に上下段扉間の中間止水部からの漏水に伴う振動については, その現象がほとんど解明されていない現状である。

筆者らは, 上記の1段式ローラゲートの下端放流および2段式ローラゲートの中間止水部からの漏水に伴う振動現象を解明すべく, 主として大型弾性相似模型による実験により研究し, また, 理論解析モデルと実験結果との比較を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いられた水路は幅 2.5 m, 深さ 1.8 m, 長さ 43.5 m の鉄筋コンクリート製で, 側壁の1部に強化ガラスでつくられた観測窓が取り付けられている。水路上流端には送水管と連結した分散管が設けられており, 下流端には下流水位調節用の電動式鋼製ゲートが設置されている。

模型ゲートは, ゲート底板を水平面より 20° 傾斜させた径間 41.4 m, 高さ 5.0 m, 1段式ローラゲートおよび下段扉を上流側, 上段扉を下流側に配置した径間 41.4 m, 高さ 7.8 m (上段扉高 4.05 m, 下段扉高 4.35 m) の2段式ローラゲートをそれぞれ想定原型とし, 水路幅の関係から縮尺 1/20 の弾性相似模型とした。

この弾性相似模型は, 幾何学的に相似した部材と弾性的に相似した部材を組合せる方法で製作された。すなわち, 模型ゲートの弾性は, 重心位置に配置された高力アルミ合金 (A3P4-T3, 比重量 2.77 t/m³, ヤング率 728 t/cm²) 製の引抜中空角形弾性棒により相似させ, スキンプレート, 頂板, 底板および背板で構成された扉体シェル(ゲート本体)の幾何学的形状は, 透明で加工精度のよいアクリル樹脂によって相似させた。この場合, 扉体シェルはアルミ製弾性棒の剛性に関与しないようにゲート全長を 16 ブロックに分割し, 各ブロック間のすきま 2 mm は非常に薄いゴム(厚さ 0.010 mm)で接合することによって, 各ブロック間の漏水は完全に防止された。また, 模型ゲートの質量相似は, アルミ製弾性棒と扉体シェルを構成しているアクリル樹脂によって満足させた。

2段式ローラゲートの場合には, 上段扉に発生する振動に着目しているのので, 弾性相似模型は上段扉のみとし全閉状態となっている下段扉は, 外郭形状のみ幾何学的に相似したアクリル製模型とし水路底面に固定された。

* 正会員 石川島播磨重工業(株)鉄構基本設計部課長補佐

** 正会員 工博 東洋大学教授 工学部土木工学科

図-1, 2 は模型ゲートの外形形状を示したものである。

上下段扉間の中間止水部模型は、図-2 に示すように、水密ゴムの代りに厚さ 2mm のアクリル樹脂が用いられ、そのすきまは自由に変えられるようになっている。

ところで、模型により振動を計測する場合には、応答特性に大きな影響を与える減衰定数を模型と原型の間で一致させなければならないことは当然のことであるが、実物ゲートの減衰値は、種々の要因が複雑に組合わり定量的評価ができないのが現状である。そこで、ここでは構造減衰をできるだけ小さくして危険側の実験結果が得られるように、模型ゲートの両端は、図-3 と 図-4 に示すように、ワイヤロープに対応する板ばねと連結した懸垂吊棒とローラの取付位置に配置された水平支持棒により支承された。したがって、ゲート両端では、鉛直方向のみ自由に運動できるようになっている。

次に、実験状況であるが、1 段式ローラゲートの場合上流水深 h_u は常に一定にしてゲート開き高 a 、下流水深 h_d 、ゲートリップ形状、シル形状、スキンプレートの配置および板ばね定数などを変え、2 段式ローラゲートの場合には、やはり上流水深を一定に保ちながらゲート開き高（ここでは、上流水面から上段扉天端までの下り量をいう）、下流水深、水密板のすきまおよび水密板の取付位置などを種々変化させて実験が行われた。また、これによって発生してくる振動は、径間中央部と側部にセットされた変位計（日本測器製 DM-002 型、周

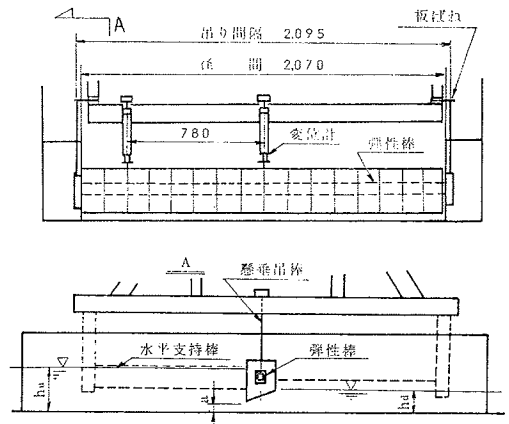


図-3 1 段式ローラゲート模型支持方式

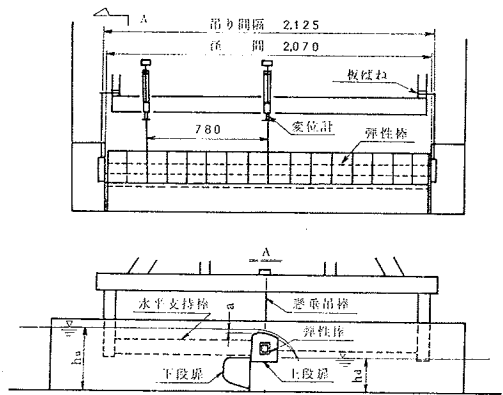


図-4 2 段式ローラゲート模型支持方式

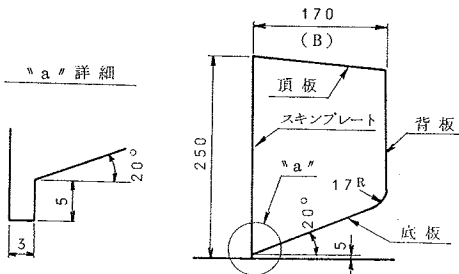


図-1 1 段式ローラゲート模型外形形状

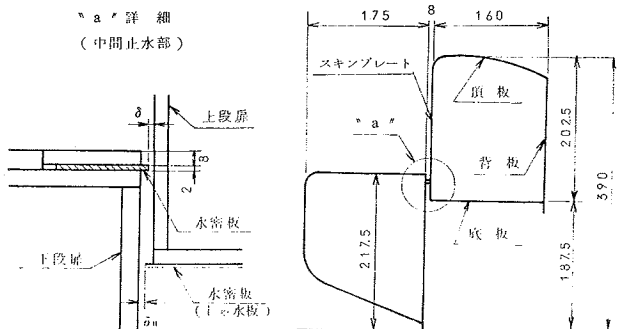


図-2 2 段式ローラゲート模型外形形状

波数側定範囲 0~10 kc/s) により検出し、電磁オシログラフに記録された。これらの測定結果については、すべて実物に換算し次の実験結果のところで述べよう。

3. 実験結果

流水に伴う振動を計測するに先だち、空中においてゲートの質量、曲げ剛性、板ばね定数、固有振動数（1次）および粘性減衰定数が計測された。その結果が表

1 に示されている。また、図-5 には、静水中においてゲートに自由振動を与え、その変位曲線から求められた粘性減衰定数と没水度の関係が示されている。

(1) 下端放流による 1 段式ローラゲートの振動特性

a) 流れの状況と振動の関係

まず下端放流に伴って発生してくるゲートの振動は、流れの状況によってどのように変わってくるかを調べてみる。上流水深を一定 ($h_u =$

5.0 m) にし、ゲート開度や下流水深を広範囲にわたって種々変化させ、これによって発生してくる径間中央の振幅および振動数を下流水深との関連において整理した結果が、それぞれ 図-6 および 図-7, 8 である。図-

7, 8 には、減衰自由振動の変位曲線から求められた流水中における固有振動数も示されている。また、図-9 は流況変化曲線であり、これによってゲート下流側の流れの状態が判別できるわけである。すなわち、放流条件が

図-9 の曲線よりも左側の領域にすれば、ゲートリップ直下から流出水脈が射流となる自由流出状態、右側にすれば、下流水深が跳水の対応水深よりも高い潜り流出状態、ちょうど曲線上にすれば、跳水の始端がゲートリップに接するような遷移流出状態となる。

これらの図より、次のことが判明する。

① 上流水深とゲート開度を一定にしておいて、下流水深を次第に増してくると、流れの状況が自由流出から遷移流出さらに潜り流出へと変化してくるが、自由流出状態および遷移流出状態であ

れば、流水により発生する振動はきわめて小さい。これは自由流出状態の場合には流れが常にリップの上流縁からはく離しリップ下面に干渉しないこと、遷移流出の場合には、跳水表面渦の不規則性によるものと考えられる。

② 遷移流出状態より下流水深が徐々に増してきて、ゲート底板が接水するような潜り流出状態になると、振幅は増大してくる。しかし、下流水深がさらに増えてきて背板が接水するような流況になってくると、振幅は再び減少してくる。したがって、上流水深を一定にしてゲート開度と下流水深を種々変化させると、各開度ごとに振幅のピーク値が存在することになる。

表-1

項目	1 段式ローラゲート	2 段式ローラゲート
質量 ($Kg-S^2-cm^{-1}$)	159.2	231.8
曲げ剛性 ($Kg-cm^2$)	$E I_x = 117.6 \times 10^{12}$ $E I_y = 9.17 \times 10^{12}$	$E I_x = 117.6 \times 10^{12}$ $E I_y = 9.17 \times 10^{12}$
板ばね定数 (Kg/cm)	$k_1 = 101,720$ $k_2 = 2.6560$	$k = 97,080$
固有振動数 (C/S) ()内は実物ゲート計算値	$k_1 : fa = 3.5 (3.8)$ $k_2 : fa = 2.6$	$fa = 3.0 (3.1)$
粘性減衰定数	$k_1 : ha = 0.0036$ $k_2 : ha = 0.0066$	$ha = 0.0042$

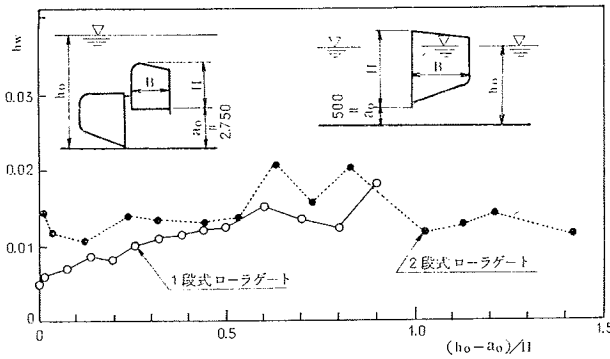


図-5 静水中における減衰定数 h_w

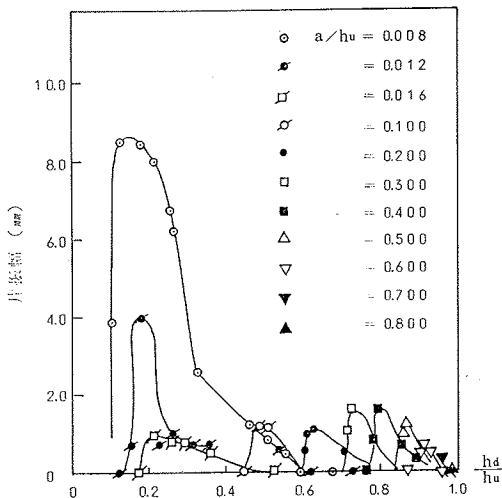


図-6 振幅と h_d/h_u の関係 (板ばね k_1)

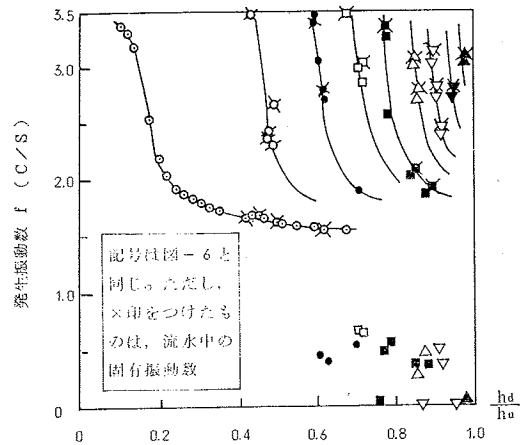


図-7 発生振動数 f と h_d/h_u の関係 (板ばね k_1)

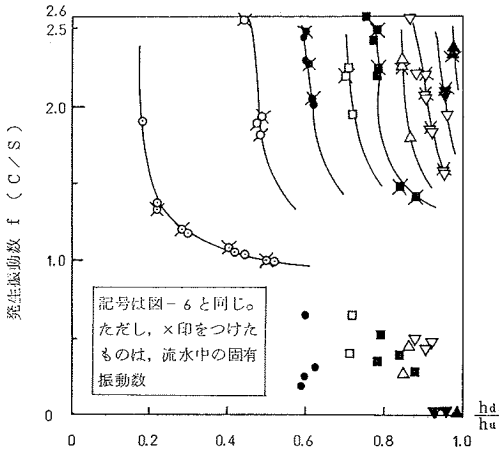


図-8 発生振動数 f と h_d/h_u の関係 (板ばね k_2)

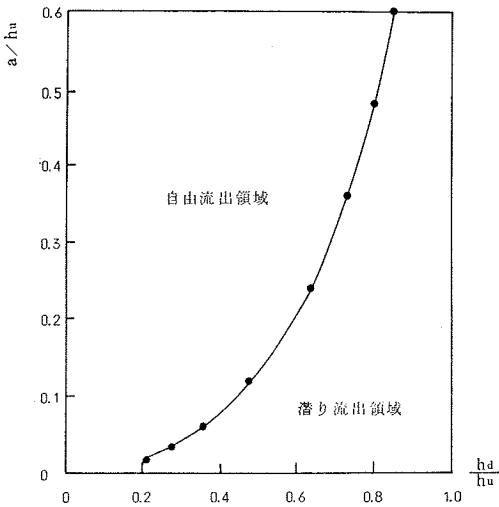


図-9 流況変化曲線

このピーク値が発生するときの振動は、開度 $a/h_u \geq 0.1$ の場合と $a/h_u \approx 0.01$ の微小開度の場合を比較するとその特性がまったく異なっている。すなわち、前者は 0.7 c/s 以下の低周波成分と固有振動数にほぼ一致した共振成分を含んだ振幅の小さい比較的規則的な1次振動である(図-10(a))。低周波成分の振動数は、系の固有振動数のほぼ $1/2$ 以下となり、その振幅(包絡線の中心線の振幅)は共振成分のもと同程度かこれより小さい。図-6 に示した振幅は共振成分の値である。また、この前者の振動が発生するときには、板ばね k_1 と k_2 の両方において低周波成分はほぼ同じ振動数をもっており、さらにゲート直下流側において、これとほぼ同じ周期をもつかなり激しい波動が観測されている。したがって、この種の低周波振動は、振動系に関係なく、主としてゲート直下流側に生ずる波動がゲート底板に作用することによって誘起される強制振動であると考えることが

できる。共振振動は、この波動とゲートの動きに位相のずれが生じたときに発生する過渡的な振動ではないかと考えられる。写真-1 はゲート直下流側に波動が発生しているときの状況を示したものである。

次に後者の振動であるが、これは $0.1 \leq h_d/h_u \leq 0.5$ の潜り流出状態において発生する1次の規則振動(図-10(b))で、その振動数は、放流条件が同じ場合にも、板ばね k_1 と k_2 で異なっており、系の固有振動数にほ

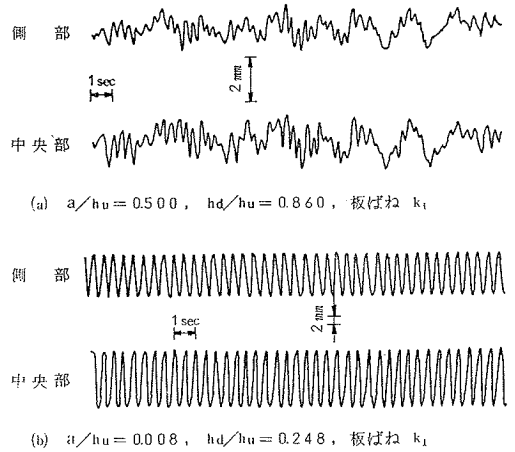


図-10 下端放流に伴う振動記録波形



写真-1 ゲート直下流の流況 ($a/h_u=0.60, h_d/h_u=0.91$)

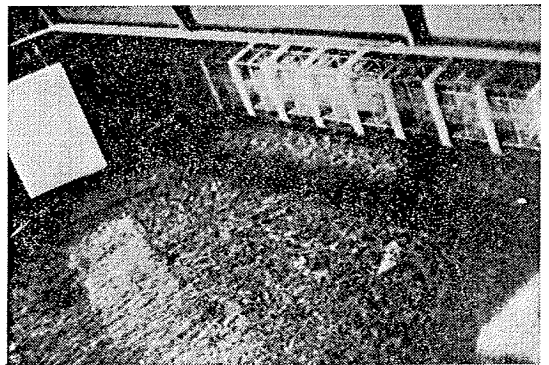


写真-2 ゲート直下流の流況 ($a/h_u=0.008, h_d/h_u=0.30$)

ば一致している。そして振幅は前者の場合すなわち波動によって起こる振動に比べて著しく大きい。しかしながら、ゲート下流側の水面は静穏で、ゲート底板付近にわずかに波面がみられる程度である（写真-2）。

したがって、微小開度におけるこの種の振動は、明らかに前者のような波動によって誘起される強制振動ではなく、振動系自体の影響を受ける自励振動であるといえる。

図-11 は縦軸に $(h_u - a)/h_u$ 、横軸に a/h_u をとって自励振動と強制振動の発生領域を示したものである。

b) 微小開度時に発生する規則振動の特性

前項 a) において、微小開度で放流すると振幅の大きい自励振動が発生することを述べた。ここでは、その特性についてさらに詳しく調べてみる。

まずゲートリップの形状と振動の関係を把握するために、リップの長さを種々変化させた場合、リップ下端を下流に向かって 45° 傾斜させたシャープエッジリップにした場合、さらにスキムプレートを下流側に配置した場合に上流水深 $h_u = 5.0\text{m}$ 、開度 $a/h_u = 0.008$ のもとで計測された径間中央の振幅および振動数を下流水深と関連づけて整理した結果が図-12 に示されている。この図から、リップ下面がフラットである場合には、下流水深が上流水深の 20% 付近に達したときに振幅が最大となり、その値はリップが長いほど大きくなる傾向がみられる。

また、リップを 45° 傾斜のシャープエッジにした場合にも同じような振動が発生することがわかる。すなわち、流れのはく離点をリップの下流縁にもってきても、フラットリップの場合と同様な振動が発生するわけである。

さらに、スキムプレートが下流側に配置された場合には、リップ下端がフラットであるにもかかわらず、振動はほとんど発生しないことが認められる。

これらの事実は、振動の発生源がリップ下面にあるのではないことを示すものである。換言すれば、この種の振動はリップ下面への流水の吸着によって起こるのではなく、リップより下流の不安定な圧力変動がゲート底板に作用することによって誘起されるものと

考えられる。

したがって、このような場合には、扉体そのものが 1 種の弾性リップであると解釈できるので、リップをできるだけ薄くし、かつシャープエッジにするという Petrikat⁶⁾ の振動低減策をシェル構造ゲートに適用することは、構造強度上不可能なことになる。

次に、シルが振動に与える影響について調べてみる。

前と同じ条件のもとで台形シルの形状やその設置位置を変えた場合に測定された径間中央の振幅、振動数と下流水深の関係を示したのが 図-13 である。

これより、ゲートリップの直下に台形シルを設けた場合には、水平水路床の場合とほとんど同じような振動が発生することがわかる。しかし、台形シルをリップより

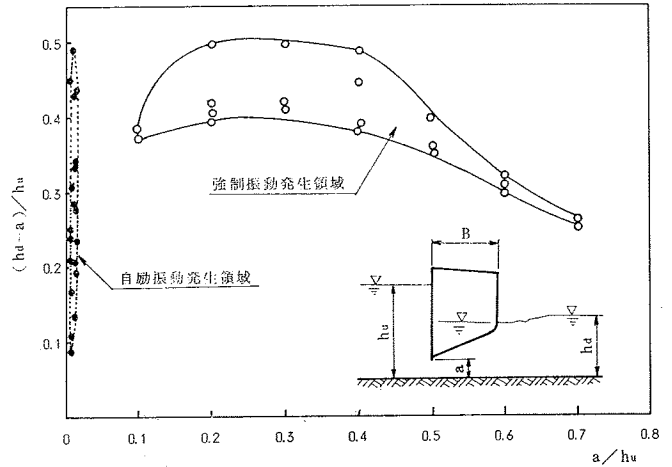


図-11 自励振動と強制振動の発生領域

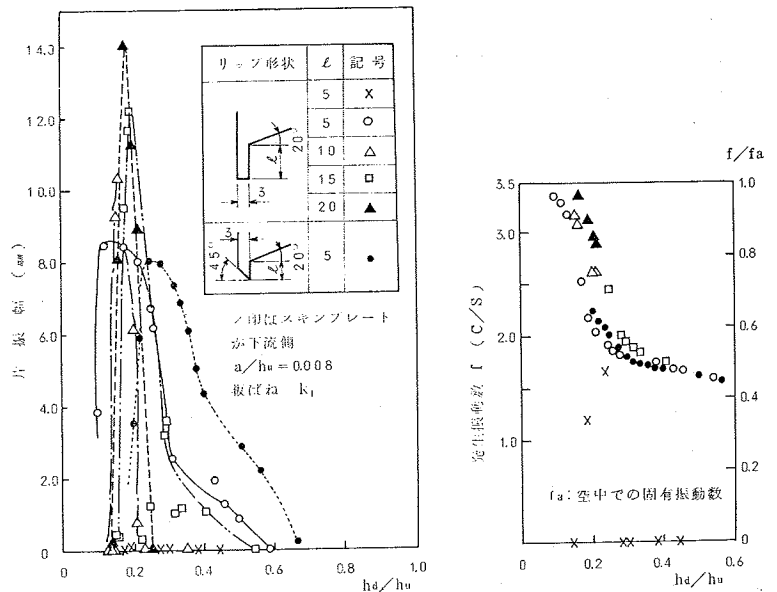


図-12 ゲートリップの形状と振動の関係

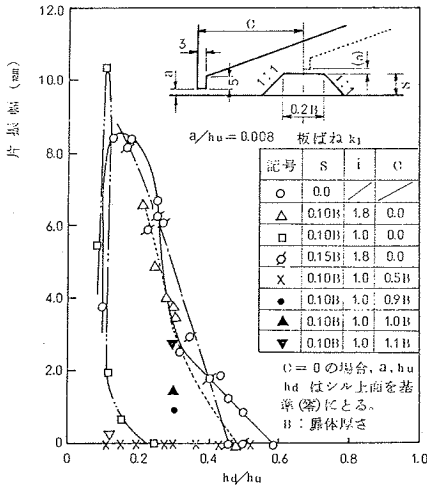


図-13 シルの形状や設置位置が振動に与える影響

下流のゲート底板直下に設けると、振動は著しく低減し、特にリップより $0.5B$ (B :ゲートの厚さ) 下流の位置にシルが配置されると、この種の振動は完全に防止される。

以上述べてきた微小開度における規則振動の特性よりこの種の振動の発生原因は、リップより流出する薄い水脈の不安定性にあると考えられる。すなわち、リップより流出する薄い水脈は、下流水位が低く自由流出状態であれば下向きに噴出し、水路底面に沿う安定した露出射流水脈となるが、下流水位が上昇してくると、この水脈は上方へ向うようになりある限られた下流水位の範囲内においてはゲートのわずかな動きによって水路底面に沿って流れたり、流水表面に向かって流れたりする不安定な状態になると考えられる。

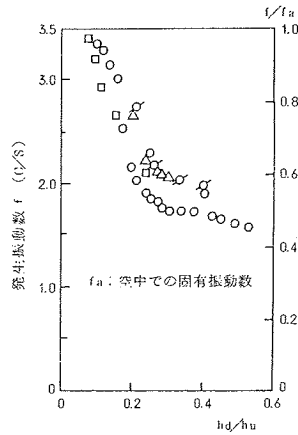
したがって、この種の振動を防止するには、ゲート底板下の流れの安定化をはかることが必要であり、それにはゲート底板直下に前面傾斜 $1:1$ 、高さ $0.1D$ 以上のシルを設ける方法およびスキムプレートを下流側に配置し、流れのはく離点をゲートの下流縁に固定する方法がある。

(2) 漏水に伴う 2 段式ローラゲートの振動特性

上下段扉間の中間止水部からの漏水に伴う振動特性を明らかにするために、ここでは、中間止水部のすきま、ゲート開度、下流水深および水密板の取付位置の影響について検討された。以下、これらについて順を追って説明する。

a) すきまと振動の関係

漏水に伴う振動が、中間止水部のすきまとどのような関係にあるかを調べるために、まず水密板を下段扉に取付け、上流水深を一定 (7.8 m) として、すきま δ と上



段扉スキムプレート下端から下流水面までの深さ h_T を種々変化させて計測した径間中央の振幅と h_T/H (H : 上段扉高さ) の関係を整理すると 図-14 のようになる。ここにすきま δ とは、下流水位が上段扉スキムプレート下端より低いときの径間中央における水密板先端と上段扉スキムプレート間の間隙である。これより次のことがわかる。

① 下流水位が上段扉スキムプレート下端より低い場合には、振動は発生しない。これは、水密板からの流出水脈が射流となり、上段扉スキムプレートに沿って流下する場合には振動が発生しないことを示すものであり、ちょうど (1) において述べた自由流出時の場合と類似の現象といえる。

② すきま δ が上下段扉のスキムプレート間隔 δ_0 ($=210$ mm) の約 $1/2$ 以上であれば、振動は発生しない。ここに δ_0 は、下流水位が上段扉底板より低いときの径間中央での値である。

③ 漏水により上段扉に振動が発生するのは、 $\delta \leq \delta_0/3$ で、しかも下流水位が上段扉スキムプレート下端より高くなってきたときである。したがって、漏水に伴う振動は、水密板より下側における上下段扉のスキムプレートで囲まれた流路内の空気が、上部から流下する漏水によって連行誘出され、その流路内が充水されてしまうときに発生するわけで、励振源はその流路内に存在する。したがって、この種の振動は従来報告⁷⁾ されているような水密ゴム自身の自励振動によって誘起される振動ではない。これがこの振動現象の特徴である。

④ 漏水によって生ずるこのゲート振動は、振幅のきわめて大きい 1 次の規則振動である (図-15)。また、振動発生時には、上流水面にゲートの発生周期に等しい周期をもった表面波が観測されている (写真-3)。

b) ゲート開度と下流水深が振動に与える影響

ここでは、水密板を下段扉に取付け、 $\delta/\delta_0=1/3$ の状態でゲート開度や下流水深を種々変化させたときの振動特性を調べてみる。径間中央の振幅と振動数を、それぞれ h_T/H および h_d/h_u と関連させて整理した結果が 図-16, 17 である。図-18 には、縦軸を $1-h_T/(H+a)$ 、横軸を l_0/δ (l_0 : 水密板から上段扉スキムプレート下端までの距離) としたときの振動発生領域が示されている。

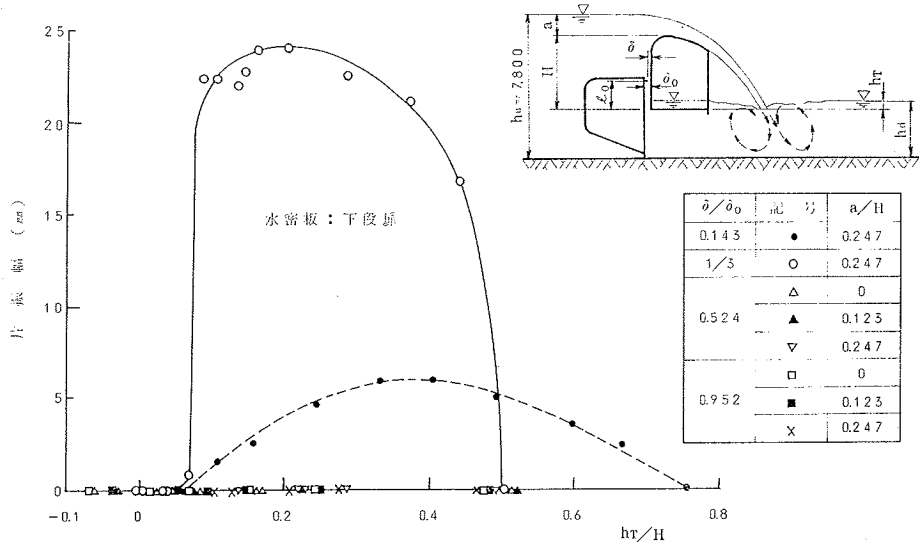


図-14 中間止水部のすきま δ と振動の関係

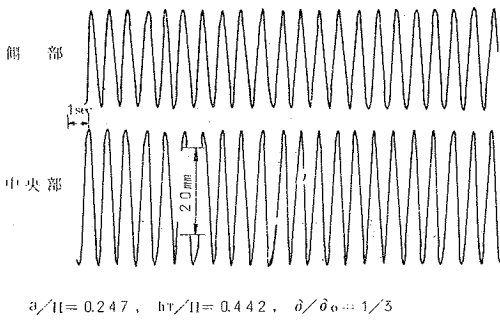


図-15 漏水に伴う振動記録波形

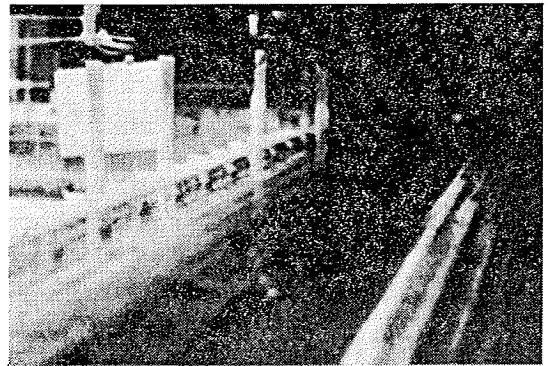


写真-3 ゲート直上流の水面状況 ($a/H=0$, $hr/H=0.16$, $\delta/\delta_0=1/3$)

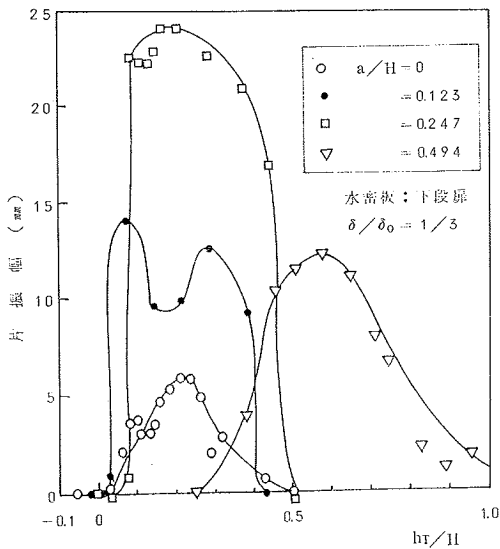


図-16 振幅と hr/H の関係

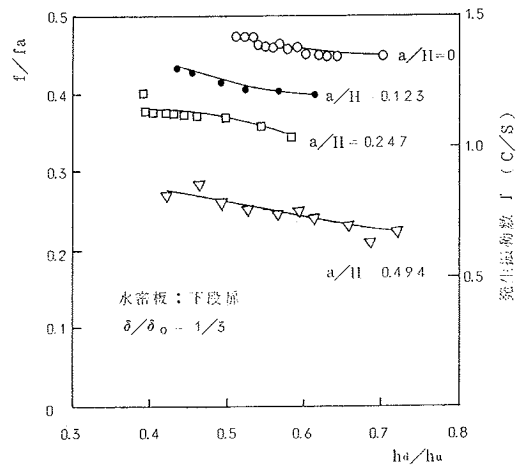


図-17 発生振動数 f と h_a/H の関係

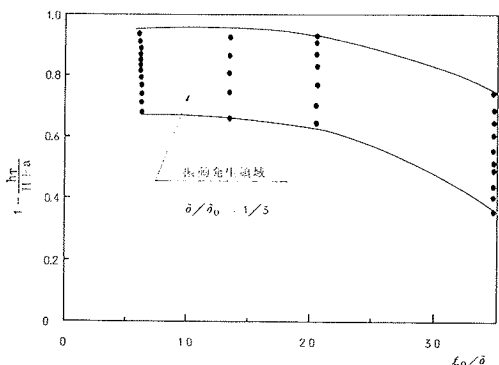


図-18 振動の発生領域

これらの図より、次のことが判明する。

① 下流水位が上段扉スキムプレート下端よりも上昇してくると、ゲート開度が大幅に変化しても振動は発生する。

② 振動の発生振動数は、上下流水位差が同じであるにもかかわらず、ゲート開度が大きくなるにつれて低下する。このことは、この種の振動が水密板先端から離脱する周期的な渦によって発生する強制振動ではなく、振動系自体の影響を受ける自励振動であることを示すものである。したがって、図-17 に示された発生振動数は、系の固有振動数にほぼ一致するとみることができ、ゲート開度や下流水深が増すにつれて発生振動数が低下するのは、水の付加質量の増大によるためであると考えられる。

③ 漏水に伴う振動の発生範囲は、上下段扉のラップする長さが増すほどすなわち開度が大きいほど広がる傾向がある。

c) 水密板の取付位置の効果

水密板の取付位置が、これまでに述べてきた振動にどのように影響してくるかを調べてみる。水密板上段扉スキムプレート下端にのみ取付けて、そのすきま δ_u を種々変化させた場合および水密板を下段扉上部と上段扉スキムプレート下端の両方に取付け、 $\delta = \delta_0/3 =$ 一定の状態では δ_u を変化させた場合の径間中央における振幅と h_T/H の関係を示すと図-19 のようになる。この図には水密板を下段扉にのみ取付けて、 $\delta = \delta_0/3$ のときの振幅と h_T/H の関係も示されている。これより、水密板上段扉スキムプレート下端にのみ取付けると、す

きま δ_u や下流水位が種々変化しても、この種の振動は発生しないことが認められる。さらに、水密板を上段扉の両方に取付けた場合にも、 δ_u をある限られた値 ($\delta_u \leq \delta_0/1.4$) にすれば、漏水しているにもかかわらず、この種の振動は発生しないことがわかる。

以上、a)~c) で述べてきた振動特性から、漏水に伴う振動は、薄い漏水水脈の不安定性に起因する自励振動であると考えられる。すなわち、下段扉上部に取付けられた水密板のすきまから流下する薄い漏水水脈により水密板下側の圧力が低下すると、その水脈が下段扉側に引き寄せられて上段扉がたわみ、水密板のすきまをせばめる。すると水密板下側の圧力は上昇し、上段扉の弾性力によって再びそのすきまが大きくなり、以後これを繰り返すという現象であると考えられる。

したがって、上下段扉のスキムプレートで囲まれた流路内の流れの安定化をはかることがこの種の振動を防止する有効な方法であり、上段扉スキムプレート下端にのみ水密ゴムを取付け、流れの支配断面を下流端にもってこくことも1つの方法である。しかし、このようにすると、上段扉に作用する水圧が増大し不経済な設計となるため、実際上は水密ゴムを下段扉に、 $\delta_u \leq \delta_0/1.4$ を満足するようなしゃ水板(水密板)を上段扉スキムプレート下端に取付ける方が合理的であるといえる。

4. 微小開度下端放流および漏水に伴う振動についての理論解析

下端放流を行う1段式ローラゲートにおいて、開度が非常に小さいときに振動が発生する場合には、ゲートの動きによって流水の止水効果がかかり強く効いてきて、水の流入量と流出量の差によって力が生じてくるものと

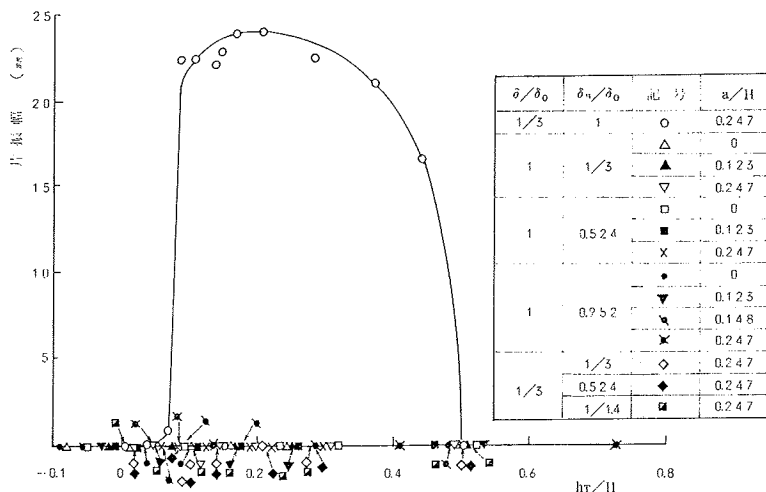


図-19 水密板の取付位置と振動の関係

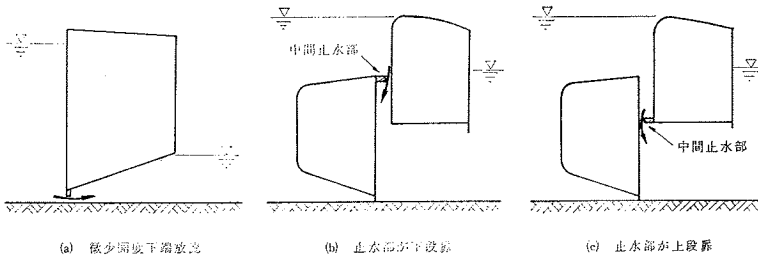


図-20 微小開度下端放流と中間止水部からの漏水

考えられる。このことは、2 段式ローラゲートの漏水に伴う振動についても、水密のが 図-20 (b) のように下段扉上部に取付けられた場合に発生し、図-20 (c) のように上段扉スキムプレート下端に取付けられた場合には発生してこないことを考えると、図-20 (a) と同じような考えで進めてもよいと考えられる。すなわち、図-20 (b) を 90° 回転させると 図-20 (a) とほぼ同じ流れの状況になってくることがわかる。以下、このような振動現象の理論解析モデルを発展させてみる。実験は弾性相似模型によって行っているの、たわみ振動と剛性振動が合成された形で発生している。しかし、自励振動の原因はゲートの固有振動と水の流れの関係で発生するので、解析上簡素化するため剛体運動としての解析をし、実験との比較は固有振動（たわみと剛性）について考えることにする。

(1) 体積変化を考えた理論解析モデル

ここで扱うような小開度での流れにおいては、ゲートに作用する力をどのように表現するかが大きなポイントになってくる。大開度および流水の中におかれたゲートの場合には、抗力、揚力を使った表現方法を適用することも比較的容易であるが（揚力係数、抗力係数などのデータも多い¹¹⁾）。このような小開度においての流体力は、水路底面または上段扉のスキムプレートの効果が大きなファクターになってきており、抗力、揚力の考え方をを使うのは、あまり適当であるとは考えられない。

そこで、ここでは次のような考え方を展開することにする。すなわち、ゲート下端から放流した場合、流れがゲートリップからはく離し、ゲート底板下に Wake が形成される。この Wake の大きさは、ゲート底部の形状と放流条件によって決まるものと考えられる。ゲート底板に作用する圧力は、この Wake 中の圧力に支配されることは自明であり、また、ゲートが振動している場合にも、この関係は不変であると考えてよいので、この Wake の消長が圧力変動を生じさせることになる。または逆に考えて流れの変動に伴ってこの Wake が消長し、それに合致する形で圧力の変動を生じさせると考えてもよい。前記の実験結果のところで指摘している薄い

水脈の不安定性は、この流れの変動に対応するわけである。このような考え方によって、ここではこの Wake の変動をゲートの運動と結びつけて理論的な表現をする。この場合、長径間シェル構造ローラゲートは、一般にねじれ剛性が非常に大きく回転運動が無視できると考えられるから⁸⁾、以下、

上下方向の運動のみ着目する。

a) 流量

ゲート下端から流出する単位幅あたりの流量 q は、流量係数を c 、流速を v_0 とすれば、

$$\begin{aligned}
 q &= cav_0 \dots\dots\dots (1) \\
 &= ca\sqrt{2gh_u} \dots\dots\dots (1)' \\
 &= ca\sqrt{2g(h_u - h_d)} \dots\dots\dots (1)''
 \end{aligned}$$

で与えられ、式 (1)' および式 (1)'' は、それぞれ自由流出および潜り流出についての表現である。

b) ゲートの運動に伴う流量の変化

流れの応答の速度は、ゲートの運動に比べて遅いと考えられるので、ゲート開度の増減中においても流速はほとんど一定に保たれているとみなされる。

したがって、本来式 (1) より、

$$dq = c \cdot a \cdot dv_0 + c \cdot v_0 \cdot da \dots\dots\dots (2)$$

となるはずであるが、 dv_0 は da に比べて微小であると考えられているから、式 (2) は、

$$dq = cv_0 da \dots\dots\dots (3)$$

と表わされる。

c) ゲートの運動に伴う Wake の体積の増減

ゲートの運動の始まった瞬間においては、流れの追隨が難しいことは先の仮定にいられてあるところであるが、この場合にも同様に考えることにする。

いまゲートが上方へ運動するときを正とし、図-21 に示すように開度 a から上方へ y だけ移動したための Wake の体積増減量を dV_1 、ゲートリップ付近において生ずるそれを dV_2 とすれば、ゲートの運動に伴う体積の増減は、

$$\left. \begin{aligned}
 dV &= dV_1 - dV_2 \\
 &= By - dV_2 \quad (B: \text{ゲートの厚さ}) \\
 &\approx By
 \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

として、 dV_2 は dV_1 に比べて微小であると考えられる。

d) 流量変化を考慮した Wake の体積変化

式 (4) の y は、実は時間の経過に伴って刻々変化しているの、運動している状態で考える必要がある。

したがって、 dt 時間で y が生じたとすれば、

$$y = y dt \dots\dots\dots (5)$$

と表わされる。したがって、式 (3)、(4) および式 (5)

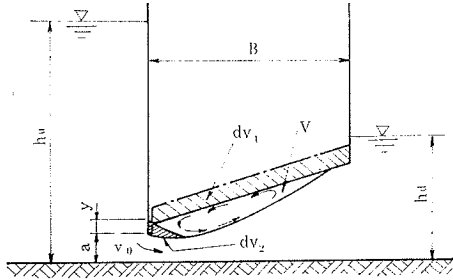


図-21 Wake の体積増減モデル

より、

$$dV = cv_0 da \cdot dt + B\dot{y}dt$$

また、 $da = y$ であることを考えると、

$$\frac{dV}{dt} = cv_0 y + B\dot{y} \dots\dots\dots(6)$$

を得る。

e) 振動外力

式(6)のような Wake の体積変化が運動の各瞬間に作用しているときに、変動圧力 P の大きさとしては、もともとあった Wake の体積 V との関係で、

$$P = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{V} \cdot \beta \dots\dots\dots(7)$$

と表現することにする。ここに、 β は体積弾性係数に相当するが、 $(\text{kg}/\text{cm}^2)(\text{sec})$ の単位をもつことになる。

したがって、振動外力は次のようになる。

$$F = PBL \quad (L: \text{径間})$$

f) 振動方程式

質量 M 、減衰係数 R およびばね定数 k とすれば、振動方程式は、

$$M\ddot{y} + R\dot{y} + ky = F$$

で表わされる。そこで、

$$2r = R/M, \omega_n^2 = k/M \dots\dots\dots(8)$$

とすれば、次のようになる。

$$\ddot{y} + 2r\dot{y} + \omega_n^2 y = (BL/M)(\beta/V)(cv_0 y + B\dot{y}) \dots\dots\dots(9)$$

さらに、

$$(BL/M)(\beta/V) \cdot cv_0 = \omega_1^2, (BL/M)(\beta/V) \cdot B = 2r_1$$

とおくと、

$$\ddot{y} + 2(r-r_1)\dot{y} + (\omega_n^2 - \omega_1^2)y = 0 \dots\dots\dots(10)$$

で表わされる。

したがって、式(10)は $r < r_1$ のときに不安定となるわけであるが、この条件では前述の実験結果と比較することができない。

(2) 運動量の変化を考えた理論解析モデル

(1) で述べた解析モデルでは、ゲート開度や流量等に関係した不安定条件がでてこないことがわかった。この原因は式(7)に示した外力の表示方法にある。すなわ

ち、この式は体積弾性係数によって示されるごとく、水の圧力波としての扱いになっており、ウォーターハンマーのように非常に速い速度で伝わる現象を示している。

そこで、ここでは運動量の変化すなわち流れのしゃ断による力に着目することにする。

いま、ゲートが開度 a から dy/dt の速度で y だけ降下したと考えるとき、流れをさえぎった流量 dV_0 は、

$$dV_0 = v_0 y L = Q_0 y / a \quad (Q_0: \text{流量}) \dots\dots\dots(11)$$

で表わされる。一方、運動量の方程式は、

$$F \cdot dt = d(M \cdot v)$$

であるから、振動外力は、この運動量によって生ずる力のスキンプレートに作用する成分と考えられるので、

$$F = \eta \cdot \rho Q_0 \cdot \left(\frac{y}{a}\right) \cdot \frac{dy}{dt}$$

で与えられる。ここに、 η はゲートに作用する実際の振動外力と流れのしゃ断による力の比を表わす無次元数で影響係数とよぶことにする。また、 ρ は水の密度である。

そこで、運動方程式は、

$$M\ddot{y} + R\dot{y} + ky = \eta \cdot \rho Q_0 \cdot \left(\frac{y}{a}\right) \cdot \frac{dy}{dt}$$

で表わされる。ここで、 $\eta \cdot (\rho Q_0 / Ma) = \alpha$ とおき、式(8)の関係より次式が得られる。

$$\ddot{y} + 2r\dot{y} + \omega_n^2 y - \alpha y \cdot \frac{dy}{dt} = 0 \dots\dots\dots(12)$$

この式は非線形であって、次のように書き直せる。

$$\ddot{y} + (2r - \alpha y)\dot{y} + \omega_n^2 y = 0 \dots\dots\dots(13)$$

式(13)において問題の項は第2項であり、単純に考えれば、 $y = \varepsilon \sin \omega_0 t$ のような微小振動があったとすると、

$$2r - \alpha \varepsilon \sin \omega_0 t < 0$$

によって不安定振動が発生することになる。すなわち、

$$2r - \alpha \varepsilon < 0$$

のときに不安定な振動となることが考えられる。

したがって、不安定条件として、

$$2r < \eta \cdot \frac{\rho Q_0}{M} \cdot \frac{\varepsilon}{a} \dots\dots\dots(14)$$

を得る。ただし、厳密には式(13)を解く必要がある。

このように、運動量の変化を考えた解析モデルの場合には、不安定条件の中に流量、質量、振幅、ゲート開度および減衰係数が含まれている。

そこで、前述の実験結果と不安定条件、式(14)との関係について調べてみると図-22のようになる。図中、
 ・印はゲート下端から放流したときの微小開度 ($a/h_u = 0.008$) において自励振動が発生した場合、
 ×印は $a/h_u \geq 0.1$ において強制振動が発生した場合を示している。
 また、○印は中間止水部からの漏水に伴う振動 ($\delta/\delta_0 =$

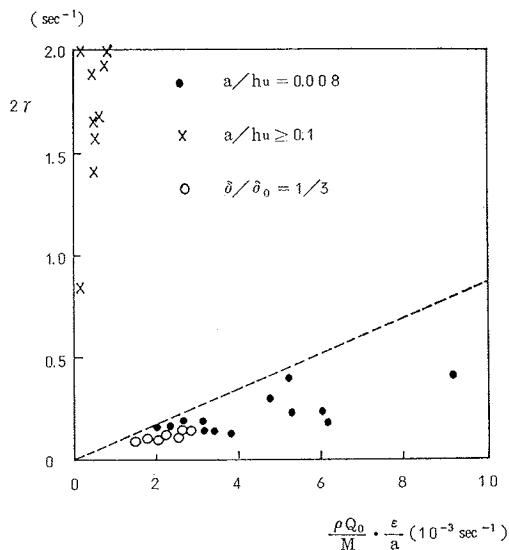


図-22 2γ と $(\rho Q_0/M)(\epsilon/a)$ の関係

1/3)が発生した場合を表わしている。

図-22 から、微少開度下端放流に伴う振動と漏水に伴う振動は、類似の現象としてみることができ、 $a/h_u \geq 0.1$ の下端放流に伴う振動とは明らかに異なっていることがわかる。また、不安定条件、式(14)を満足する影響係数 η は、図-22 の破線で示す直線の勾配であり、 $\eta = 85$ となる。これは、振動外力の大きさが流れのしゃ断による力の 85 倍程度であることを意味している。

5. 結 論

以上 1 段式ローラゲートの下端放流および 2 段式ローラゲートの中間止水部からの漏水に伴う振動特性について述べてきた。

この研究から得られた結果をまとめると、

(1) スキンプレートが上流側に配置され、底板が 20° 程度傾斜したゲートの下端放流に伴う振動は、 $a/h_u \geq 0.1$ の開度で発生する振幅の小さい比較的不規則な振動と $a/h_u \approx 0.01$ の微少開度で発生する振幅の大きい規則振動に分類される。

(2) 前者はゲート直下流に生ずる波動によって誘起される強制振動である。後者はゲート底板下へ流入する

薄い水脈の不安定性に起因する自励振動で、台形シルをゲート底板下に設けたり、あるいは流れのはく離点をゲート下流縁に固定すれば防止できる。

(3) 漏水に伴う振動は、下流水位が上段扉底板よりも高く、しかも下段扉上部にのみ取付けられた水密ゴムと上段扉スキンプレートの間にある限られたすきま ($\delta \leq \delta_0/3$) が生じたときにのみ発生する。

(4) この振動は、水密部のすきまから流下する薄い漏水水脈の不安定性に起因する自励振動である。漏水していてもこれを防止できる有効かつ合理的な方法は、水密ゴムを下段扉に、 $\delta_u \leq \delta_0/1.4$ としたしゃ水板を上段扉スキンプレート下端に設けることである。

(5) 運動量の変化を考えた解析モデルより、不安定条件 $2\gamma < \eta(\rho Q_0/M)(\epsilon/a)$ が誘導され、微少開度下端放流および漏水による自励振動が発生するときには、影響係数 $\eta \approx 85$ となる。

(6) 実験結果をもとに解析された 2γ と $(\rho Q_0/M)(\epsilon/a)$ の関係より、微少開度下端放流および漏水に伴う振動は類似の現象としてみることができ、 $a/h_u \geq 0.1$ の下端放流に伴う振動とは明らかに異なっていることが認められる。

最後に、本研究にあたり多大のご指導をいただいた林栄港博士(建設技術研究所)ならびに実験の遂行に終始協力していただいた山田稔君(石川島播磨重工業(株)鉄構基本設計部)に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Petrikat, K.: Vibration tests on weirs and bottom gates, Water Power, Part One, Feb. 1958.
- 2) 荻原国宏: 開水路中のスルースゲートの振動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 141 号, 1967.
- 3) 林 泰造・朝田真弘: ローラゲートの振動特性に関する研究, 第 23 回土木学会年次学術講演会, 昭 43.
- 4) Campbell, F.B.: Vibration Problems in Hydraulic Structures, Proc. A.S.C.E. (HY 2), Mar. 1961.
- 5) Naudascher, E.: Vibration of gates during overflow and underflow, Proc. A.S.C.E. (HY 5), Sep. 1961.
- 6) Petrikat, K.: Vibration tests on weirs and bottom gates, Water Power, Part Three, April, 1958.
- 7) Petrikat, K.: Vibration in bottom outlet structures of dam excited by elastic control gate seals, I.A.H.R. Eleventh International Congress, Leningrad, 1965.
- 8) 荒木正夫: 長径間ゲートの振動解析および水理実験と実測との比較, 第 25 回土木学会年次学術講演会, 昭 45. (1978.2.9・受付)