

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04035

研究課題名（和文）テンタゲート式水門の動的安全性確保の具体策とその実地検証

研究課題名（英文）Specific counter measures for ensuring dynamic safety of Tainter gates

研究代表者

阿南 景子（ANAMI, KEIKO）

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：30346077

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：テンタゲートの動的安定性を確保し、崩壊事故の再発を未然に防ぐための実現性のある方法について研究を行った。テンタゲート三次元大型モデルを用い、スキンプレート流水方向曲げ固有振動数とトラニオンピンまわり剛体固有振動数の比を変化させ、各振動数比において、動的安定性を確保するための特殊ばね装置の設計を行った。固有振動数比が0.9以下または1.1以上の範囲では、本研究で提案のさらばね装置を用いることで、巻上げワイヤー本来の機能を持たせたまま十分に動的安定を保つことが可能であることが確認できた。両者の固有振動数比が1に近いいわゆる共振に近い状態では、かなり大きなばね装置が必要となる結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ほとんどのダムで洪水調整用に利用されているテンタゲート式水門は本質的に動的不安定性を持つ可能性があるが、動的に不安定なゲートは構造的な二つの固有振動の振動数比を調節することによって動的に安定にできることがこれまでの学術的な研究で明らかにされている。その結果に基づいて具体的な安全対策法を確立しておくことが、今後起こる可能性のある水門崩壊事故を未然に防ぐために是非必要である。テンタゲートのような大型水門装置の動力学的な特性およびその安全対策に関する研究はきわめて少なく、本研究の成果がテンタゲートの長期的な動的安全性の確保に寄与するところはきわめて大きい。

研究成果の概要（英文）：To assure the complete long-term stability and safe operation of the large number of Tainter gates, the model experiment was conducted. Using a large-scaled three-dimensional model, the spring device was designed to ensure dynamic stability. The model test and device design for countermeasure were conducted to the different natural vibration frequency ratio of the skinplate streamwise bending vibration and the whole gate rotational vibration around the trunnion pin. It was confirmed that the proposed leaf spring devices are in useful except when the natural frequency ratio is in the resonance state. At this time, it is possible to sufficiently maintain dynamic stability while retaining the original function of the hoist wire.

研究分野：機械力学、流体関連振動

キーワード：機械力学 流体関連振動 自励振動 連成振動 安全対策

### 1. 研究開始当初の背景

米国で発生した大型テンタゲートの崩壊事故以来、研究代表者らによって事故原因解明のための機械力学的研究が数多く行われた。その結果、テンタゲートは、図1にその概略断面図と主要な固有振動モードを示しているように、スキンプレート（扇形せき）の「流水方向曲げ振動」とトラニオンピン周りの「ゲート全体の回転振動」の固有振動を持ち、それら二つの固有振動が動水圧と慣性力を介して連成し、ある条件下で強烈な自励振動を引き起こすこと、すなわち、テンタゲートが本質的に動的に不安定な特性を有していることを明らかにした。

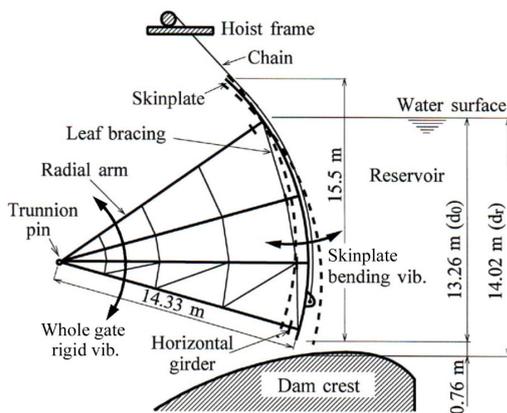


図1 崩壊した大型テンタゲートとその固有振動モード

実用されている大形テンタゲートの設計段階では、このようなテンタゲートの本質的な動的に不安定については考慮されていないため、動的に不安定な大型テンタゲートが具体的な安全対策も取られずに実用されている例がいくつか現実存在する。摩擦減衰効果が自励振動の発生を防いでいるが、地震や上流での急激な水位変化などによって摩擦の閾値を超えるような初期加振がゲートに加えられると、激しい自励振動が急激に成長し、ゲートは一瞬のうちに崩壊する可能性がある。長期的な安全運転を視野に入れたインフラの危機管理と言った観点からも、このような危険な状態を早急に解決できる具体案を確立しておくことが望まれる。

### 2. 研究の目的

テンタゲートの動的安定判別図の一例を図2に示す。スキンプレートの流水方向曲げ固有振動の減衰比の最小値が約0.003、ゲート全体のトラニオンピン周りの固有振動の減衰比の最小値が約0.011であることがこれまでの数多くの実地調査の結果から分かっているため、図2に示すように、振動数比が $\gamma_{nw} < 0.45$  あるいは $\gamma_{nw} > 1.15$ の要件を満たせば、ゲートを常に動的安定に保つことができる。

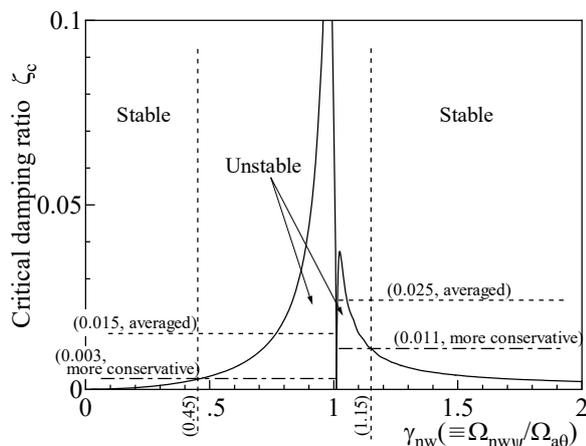


図2 動的安定判別図の理論解析結果

前者の条件を満たそうとする場合、ゲート巻上げ装置（ワイヤー）の剛性を高め、スキンプレートの剛性を低下させなければならない。その場合、スキンプレート自体を非常に柔らかい構造にする必要があり、巨大な静水圧を支えるというゲート本来の目的が果たせなくなる。したがって、この条件を実現することは不可能である。

それに対し、後者の条件を満たそうとする場合には、スキンプレートの剛性を高め、ゲート巻上げ装置の剛性を低下させればよい。スキンプレートの剛性を高めることには限界があるが、ゲート巻上げ装置の剛性を低下させることは比較的容易である。具体的には、巻上げ用ワイヤーの中間に特殊なばね装置を設置する方法が簡単で効果的であると考えられる。そこで、本研究では、巨大な重量のゲートを支えてかつばね定数が小さな特殊なばね装置を考案・設計・製作し、その効果を実験により検証する。

### 3. 研究の方法

テンタゲートを動的に安定にする要件を満足させる方法として、スキンプレートの流水方向曲げ固有振動数を高めるためにスキンプレート自体やラジアルアームの剛性を上げる方法も考えられるが、そのためには莫大な費用と時間をかけて補強をする必要がある上に、補強に伴いゲート全体の質量が増加することとなり、巻上げワイヤーの取り換えも必要となる。本研究では、

ゲート本体の補強は行わず、巻上げワイヤーの剛性を下げる方法を検討し、その有用性を確認する。

そのために、巨大な重量のゲートを支えてかつばね定数が小さな特殊なばね装置を設計する。図3に概略図を示しているように、大きなコイルばねを円筒状の容器内に収納して圧縮ばねとして利用し、それをワイヤーロープの中間に設置する非常に簡単な方法である。これによって大きな荷重のゲート本体を吊り上げ、かつ巻上げばね定数を自由に低く調整することが可能になる。コイルばねを用いる方法の他にも、耐力が大きく変形の小さいさらばねを組み合わせる方法についても検討する。

実用テナゲートの持つ二つの固有振動まで再現した、高さ1240mm、幅990mm、スキンプレート円弧半径1100mmの大型三次元モデルゲートを、幅1000mm、長さ7mの循環水槽に設置して実験を行い、特殊ばね装置の効果を確認する。

#### 4. 研究成果

モデルゲートの中での流水方向の曲げ固有振動数 $\Omega_{nw}$ は7.15Hz、減衰比は0.01であった。ゲートの空中での上下方向振動数 $\Omega_{a\theta}$ を7.5Hzに設定した。減衰比は0.015であった。上流側水位を1100mmに設定し、開度5mmで放水すると激しい自励振動が発生した。その時の振動波形を図4に示している。上がゲート全体のトラニオンピンまわり振動、下がスキンプレートの流水方向振動である。ゲートを巻き上げたショックで加振された後、一旦振幅が小さくなるが、その後、徐々に振幅が大きくなる自励振動が確認できた。この振動の周波数はいずれの方向も7.2Hzであった。このような動的に不安定な状態のゲートについて、巻上げワイヤーの中間にばねを取り付けることで動的安定化を図るための実験を行った。

圧縮ばねによる減衰装置を巻上げワイヤーの中間に取付けて実験を行った。ばね定数の異なる6種類の圧縮ばねを用い、それぞれのばね装置を取り付けて振動低減の効果を確認した。

特殊ばね装置を取り付けて上下方向の振動数 $\Omega_{a\theta}$ を7.0Hzに設定したとき、ワイヤーを巻き上げるとことで、ゲート下端の開度を5mmに設定し、放水すると振動が発生した。その流水方向振動の様子を図5(a)に示している。ばねを取り付けていない時と同様、ゲートを巻き上げた際の衝撃が収まったのちにゆっくりと成長する自励振動が発生している。定常振動に落ち着いた際の振幅は、ばねを取り付けていない場合よりも小さくなっている。次に、上下方向の振動数 $\Omega_{a\theta}$ が6.5Hzになるようにばねを取り付けた。その時の流水方向振動の様子を図5(b)に示している。ゲートを巻き上げた際の衝撃が徐々に収まっていく様子が分かる。図4に示したような振動の成長は発生せず、流水方向振動と連成する明らかな発散振動は生じなかった。さらに、上下方向の振動数 $\Omega_{a\theta}$ が5.5Hzになるようにばねを取り付けた。その時の流水方向振動の様子を図5(c)に示している。ゲートを巻き上げた際の衝撃が短時間で減衰し、自励振動は発生しないことが分かる。

実験を行った振動数比に対し、主振動の減衰比

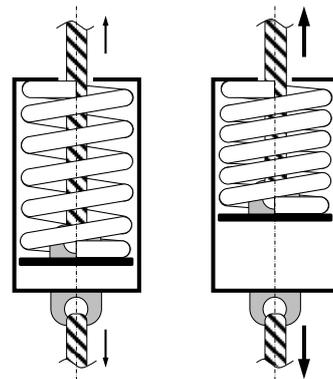


図3 安全対策用特殊ばね装置

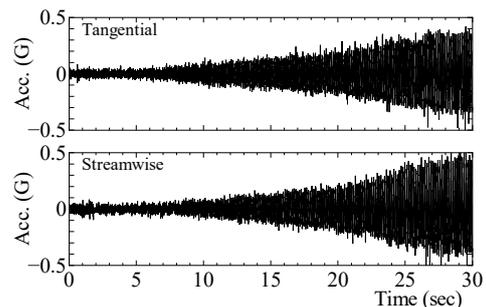


図4 上下方向振動数を7.5Hzに設定したときの自励振動波形

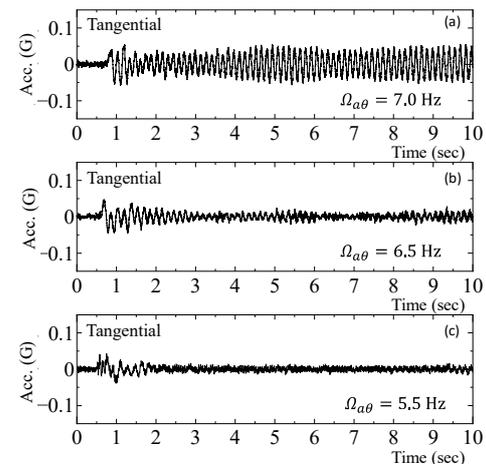


図5 特殊ばね装置を用いたときの流水方向振動波形；(a)  $\Omega_{a\theta}=7.0$  Hz, (b)  $\Omega_{a\theta}=6.5$  Hz, (c)  $\Omega_{a\theta}=5.5$  Hz

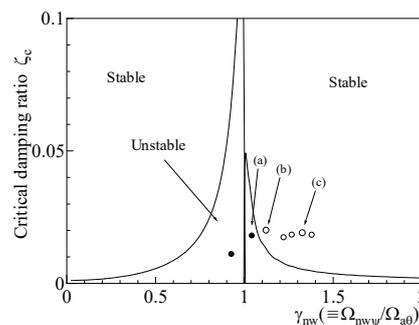


図6 モデルゲートの動的安定判別図と実験結果

をプロットしたものが図6である。横軸は2つの固有振動の振動数比である。縦軸は、モデルゲートが動的に安定であるために必要な減衰比を示している。したがって、実験時の振動数比の上に、計測した減衰比をプロットした際、データ点が実線より下の領域であれば、ゲートは動的に不安定な状態にあることになる。空中での上下方向振動数 $\Omega_{a0}$ を7.5Hzに設定した場合、図4に示したように激しい自励振動が発生した。このとき、振動数比 $\gamma_{nw}$ は0.95である。この範囲では流水方向振動が主体となる現象が発生することが明らかになっているので、その振動数比の上にスキムプレート流水方向振動の減衰比0.01をプロットすると、ゲートが大きな動的不安定化にあることが図6からも判断できる。特殊ばね装置を設置して行った実験の結果を同じ図にプロットしている。図中の(a), (b), (c)は図5に対応している。 $\Omega_{a0}$ が7.0Hzの(a)の場合は動的に不安定、それ以外は動的に安定であることが確認できる。ばねを用いた減衰装置を取り付けることにより、振動数比を大きくすることができ、動的に不安定なゲートを安定にすることができることを確認した。

次に、耐力が大きいさらばね装置をワイヤーロープの中間に設置する方法について検討した。図7は、特殊ばね装置を用いない場合とさらばね方式の特殊ばね装置を用いた場合のモデルゲートの水中振動数比である。特殊ばね装置を用いない場合は横軸の振動数比が0.8~1の範囲で自励振動が発生しているが、特殊ばね装置を用いることにより、0.9以下では自励振動が発生しないという結果が得られた。さらばねの変形量が小さいため、十分な効果を得るためには、ばね装置の全長が長くなったが、コイルばねを用いた場合よりも効果的にゲートを動的安定に導けることが確認できた。

以上のように、巻上げワイヤーの中間に特殊ばね装置を設置することにより、ゲートを巻き上げるというワイヤーの機能を保ちながら、連成振動の発生を抑制する効果を実験により確認した。今後は、特に共振に近い状態にあるゲートを動的安定に導く対策について、引き続き検討を行う必要がある。さらに、研究結果を総合し、実用テナゲートでの実証試験についての交渉を進める必要がある。

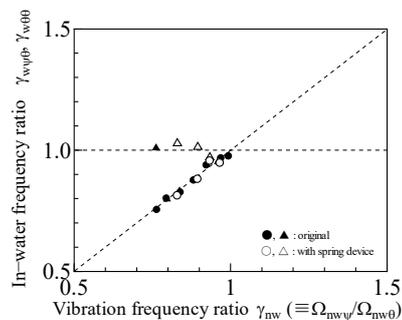


図7 特殊ばねによる振動低減効果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 阿南景子
2. 発表標題 テナゲートの動的安定化のためのモデル実験
3. 学会等名 日本機械学会関東支部・精密工学会 山梨講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿南 景子
2. 発表標題 実用されているダム取水設備で生じる高周波音および低周波振動
3. 学会等名 日本機械学会関東支部・精密工学会 山梨講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本機械学会 編（分担執筆）	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技報堂出版	5. 総ページ数 432
3. 書名 事例に学ぶ流体関連振動 第3版	

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪電気通信大学 教員情報データベース  
<https://research.osakac.ac.jp/index.php?%E9%98%BF%E5%8D%97%E3%80%80%E6%99%AF%E5%AD%90>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	中田 亮生  (Nakata Akinori)  (90309196)	大阪電気通信大学・工学部・教授    (34412)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Bucknell University		