

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03940

研究課題名（和文）実用テナゲートの動的安定対策用特殊ばね装置の開発

研究課題名（英文）Development of Spring Device for Dynamic Stability of Tainter Gate

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：テナゲートの巻上げワイヤー本来の機能を持たせたまま、ゲートの動的安定性を確保する方法について研究を行った。テナ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がトラニオンピンまわり剛体固有振動数よりも低い状態に設定した。さらばねを用いた特殊ばね装置を用いることで、トラニオンピンまわり剛体固有振動数が低下し、振動数比は1に近づくことになる。それによって、さらに大きな動的不安定領域下に陥ることになるが、さらばねの圧縮によりゲートの初期開度が大きくなるため、十分な開度を確保できれば動的不安定の発生を防ぐことが可能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

本質的に動的に不安定な特性を持つテナゲートに対し、ゲート本体の大幅な補強を伴わずに動的安定性を確保する手法について検討した。巻き上げワイヤーを柔らかくするという逆転の発想により、動的安定を保つ手法について検討した。

テナゲートのような大型水門装置の動力学特性およびその安全対策に関する研究はほとんど行われておらず、研究成果をさらに検証し信頼性を高めることで、大型水門装置の長期的な安全性確保に大きく役立つものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to ensure the dynamic stability of Tainter gate. The initial condition on the model experiments was that the natural vibration frequency of skinplate streamwise vibration was set lower than that the natural vibration frequency of whole gate rotational vibration around the trunnion pin. In the model test, the whole gate vibration frequency decrease by attaching the proposed spring device, and the frequency ratio approaches 1.0. Then, the model gate is in excessive dynamically unstable region. However, since the initial gate opening increase due to the compression of the spring, it is possible to prevent the occurrence of the dynamic instability.

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 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てきた。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ている。さらに、図2に示すように、ゲートを動的に安定に保つために必要な減衰比を明らかにしている。これを用いれば、大型ゲートを動的に安定に保つ基本的な指針を示すことが可能になると考えられる。

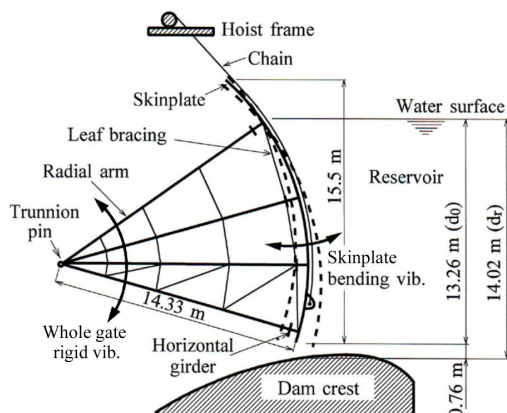


図1 崩壊した大型テンタゲートとその固有振動モード

しかしながら、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。ゲート両サイドの止水ゴムによる摩擦減衰効果が自励振動の発生を防いでいるが、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安全対策を確立しておくことが望まれる。

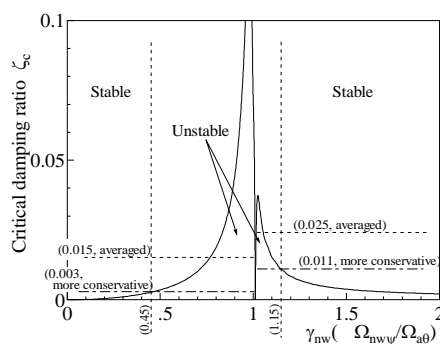


図2 テンタゲートの動的安定に必要な減衰比

2. 研究の目的

図2に示したテンタゲートの動的安定に必要な減衰比を用いれば、ゲートの動的安定判別を行うことができる。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ので、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、ゲートを常に動的に安定に保つことができる。

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。

そこで、これまでに、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を提案している。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、その効果の実験による検証を進めている。本研究では、特殊なばね装置の効果のさらなる検証のため、周波数の低減効果だけでなく、微小開度を避けるために必要なばねについても検討を行う。

3. 研究の方法

テンタゲートを動的に安定にするためには、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ばね装置を設計し、使用する。図3に概略図を示しているように、耐力の大きなさらばねを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。

以前の研究では、さらばねの代わりにコイルばねを用いた方法についても検討を進めていたが、振動数低減効果は得られるものの、微小開度を避けることが困難であったため、今回はさらばねを用いた装置について検討した。

実用テナゲートの持つ二つの固有振動まで再現した大型三次元モデルゲートを用いた実験を行い、特殊ばね装置の効果を確認する。

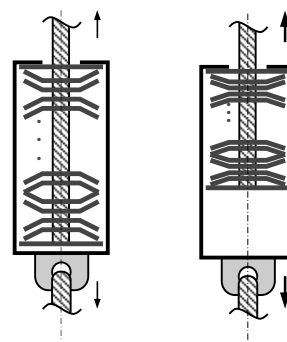


図3 さらばねを使用した安全対策用ばね装置

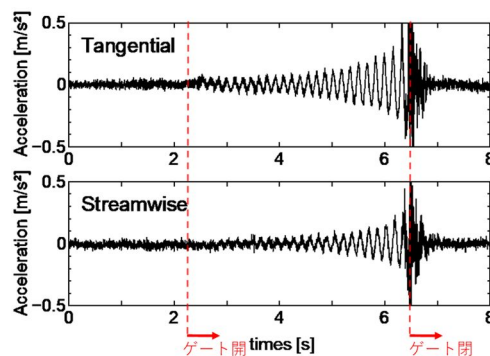
4. 研究成果

質量が約40kgのモデルゲートの水中での流水方向の曲げ固有振動数 Ω_{nw} は5.35Hz、減衰比は0.01であった。さらばねを取り付ける前のゲートの空中での接線方向振動数 Ω_{a0} を7.5Hzに設定した。減衰比は0.009である。したがって、図2に示した動的安定判別図の横軸である振動数 γ_{nw} は0.71である。したがって、動的に不安定になる設定である。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。

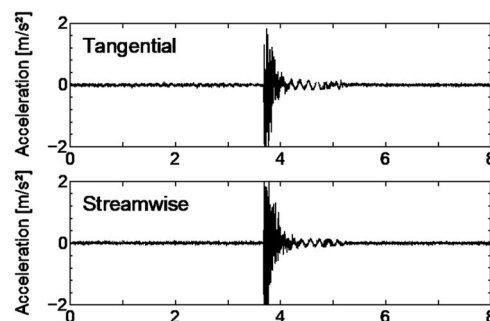
この動的に不安定な状態のゲートについて、巻上げワイヤーの中間にさらばねを用いた装置を取り付けることで動的安定化を図ることが可能であるか、どのようなさらばね装置を使用すればよいか、について実験を行った。さらばねの枚数を変更することでばね定数を変化させた。ばね装置を取り付けた状態で、上流側に1100mmまで水をため、ワイヤーを巻上げてゲートが開いた瞬間に巻上げを停止した。その時のスキンプレーットの接線方向と流水方向の振動加速度を計測した。さらに、その時のゲート開度を計測した。

さらばねの枚数を調整し、取り付けるばね装置のばね定数が45N/mmの場合に計測した振動加速度波形を図4(a)に示している。上が接線方向、下が流水方向の加速度波形である。記録と同時にワイヤーを巻き上げはじめ、約2.2秒後にゲートが開いたため巻き上げを停止した。ゲートが激しい振動を引き起こしたため、記録開始から約6.4秒後にゲートを急閉した。ゲートの流水中での振動数は、接線方向 Ω_{w0} 、流水方向 Ω_{wy} ともに6.45Hzであった。したがって、このばね装置を用いることで、ワイヤーの弾性による接線方向の振動数が7.5Hzから6.45Hzまで14%低下した。そのため、動的安定判別の基準となる振動数比 γ_{nw} はさらばね装置を使用しない場合の0.71から0.83に増大し、さらに大きな動的に不安定の領域に入った。そのため、図4(a)に示したような激しい振動が発生した。発振比(負の減衰比)は0.0437であった。このとき、ばねの圧縮によるゲートの開度は5.4mmであった。

ばね装置のばね定数が26N/mmの場合に計測した加速度波形を図4(b)に示している。ワイヤーを巻き上げ、ゲートが開いても振動は発生しなかった。そこで、スキンプレーット上端を接線方向に加振したところ、振動は成長せず減衰した。ばねの圧縮によるゲート開度は6.83mm、減衰振動の振動数は6.16Hzであった。振動数比 γ_{nw} は0.86であり、図4(a)に示した状態よりもさらに大きな動的に不安定の領域にあるが、さらばね圧縮によるゲート開度が大きいため、動的に不安定は表面化しなかった。



(a) 複合発散振動波形(k=45N/mm)



(b) 加振時の減衰振動波形(k=26N/mm)

図4 計測した振動波形の例

実験結果を整理したものを図5に示している。横軸は振動数比 γ_{nw} 、破線は左の縦軸に対応した動的安定に必要な減衰比 ζ_c である。は実験の初期設定の状態($\gamma_{nw}=0.71$ 、減衰比=0.009)である。破線の下領域にあることから、ゲートが動的に不安定であることがわかる。

同じ図に、さらばねの圧縮によるゲート開度をとで示している。右軸が開度を表している。

は動的不安定が表面化し、複合発散振動が発生した場合を示し、は振動が発生しなかった場合を示している。横軸の振動数比が1に近い条件でも、開度が大きくなる場合には動的安定が保たれることが分かった。

今回の実験では、ゲートの巻き上げワイヤーを柔らかくしていくことで、振動数比だけを見ると初期設定状態よりも不安定になる条件で実験を行った。その結果、振動数比が1に近い、極めて強い動的不安定状態にあっても、動的不安定が発生する微小開度を避けて巻き上げることができれば、振動は発生せずゲートを安定に保つことが可能であることを確認した。以上のように、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。実用テナゲートでの実証試験についての交渉を推進するためにはさらなる検討と検証が必要である。

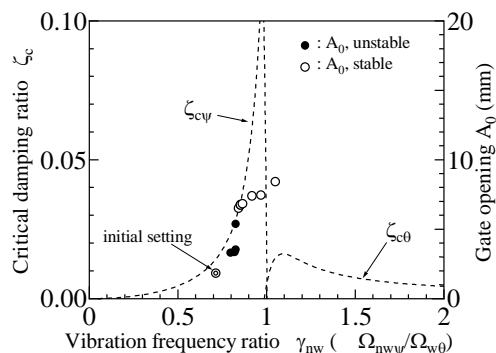


図5 特殊ばね装置を使用した動的不安定の回避

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------