

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05872

研究課題名(和文)テンタゲート式水門の動的安定性判別システムの研究開発

研究課題名(英文)Development of decision system of Dynamic Stability for Tainter Gates

研究代表者

阿南 景子 (ANAMI, KEIKO)

大阪電気通信大学・工学部・准教授

研究者番号：30346077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000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に、以下の研究を行った。第一に、2種類の三次元モデルゲートを用い、上流側水位が固有振動モードにおよぼす影響について検討した。FEMも併用して検討を行った。さらに、実用テンタゲートについても実験を行った。その結果、上流側の水位によって、ゲートの水中での固有振動数はもちろん低下するが、固有振動モードは影響を受けないことが確認できた。第二に、これまでの研究成果をもとに、ゲートの基本諸元のほかに、基本パラメータとして固有振動特性(固有振動数、振動モード)を設定すれば、動的安定/不安定の判別ができるようなシステムを試作した。

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 used worldwide, the following research was conducted. First, the effect of the upstream submergence (upstream water level) on the natural vibration mode of the gate were carefully examined using 3D model gates. The FEM analysis was also used. In addition, the field vibration test on practical Tainter gate was conducted for dry and wet condition. As a result, it was confirmed that the natural vibration mode of the skinplate is determined as an inherent vibration characteristic of the gate structure, and the water in contact with the skinplate has the effect of only lowering the natural frequency due to the added mass effect. Furthermore, the prototype of the decision system of the dynamic stability/ instability of Tainter gate was made for trial.

研究分野：機械力学

キーワード：機械力学 流体関連振動 自励振動 振動特性 動的安全性 振動モード

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、報告者らによって事故原因解明のための流体力学的・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を明らかにし、その理論的解析手法を確立した。

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、動的に不安定なゲートを早期に特定し、長期的な安全運転を視野に入れた安全対策を行うなどの維持管理体制を整えることが急務である。そのため、報告者らは、安全で比較的簡単な振動実地調査手法を考案し、実用テンタゲートの動的安定性を確認する作業を進めている。

ゲートの長期的な安全のためには、実地調査時の水位や開度の条件だけでなく、全運転条件について動的安定性を検討しておく必要がある。そのためには、上流側の水位とゲートの固有振動モードの関係を明らかにすることがぜひ必要である。さらに、水門メーカーや電力会社のエンジニアの方々が、簡単に動的安定性判別を行えるようなシステムの設計開発が望まれる。

2. 研究の目的

以上の背景より、本研究課題では、これまでの解析精度を向上させ、さらに、広く使用可能な動的安定性判別システムを開発することを目的としている。

具体的には、モデル実験、実機の振動実地調査、FEM解析を併用し、上流側の水位がゲートの振動モードにおよぼす影響を明らかにする。得られた結果をこれまでに確立した理論解析に反映させ、水位が変わった場合の解析の精度を向上させる。さらに、一般のエンジニアが簡単に安定判別を行えるようにするための動的安定判別システムの開発を進める。

これらの研究を遂行することによって、対策の必要なゲートの特定を容易にし、近い将来に起こる可能性のある重大な水門崩壊事故を未然に防ぐことが出来るようになることが本研究課題の大きな目的である。

3. 研究の方法

本研究課題では、上流側水位と振動モードの関係を明らかにし、動的安定判別の精度を向上させること、および、実用テンタゲートの動的安定性を判別するシステムを作成することを目的として、次の方法で研究を実施した。

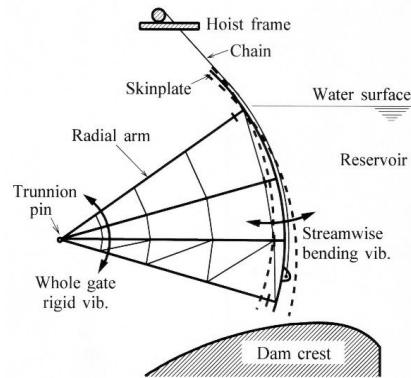


図1 テンタゲートの概略断面図と主要な固有振動モード

(1) 上流側水位が固有振動モードにおよぼす影響についての検討

固有振動モードが上流側の水位の影響を受けてどのように変化するかを明らかにするために、第一に、三次元モデルゲートを用いた実験を行った。モデルゲートは、実用テンタゲートの持つ二つの固有振動を正確に再現したものを使用した。特に流水方向振動に着目し、上流側の水位のみを変化させ、水中での固有振動モードを計測した。

さらに、大型三次元モデルゲートを対象に、実験と有限要素法(FEM)を用いた解析を実施した。上流側に水が作用しない状態でのゲートの固有振動モードをFEM解析により明らかにし、その結果とゲートに水が作用している場合の実験結果と比較し、上流側水位が振動モードに与える影響について検討した。

第二に、国内で実用されている大型テンタゲートについて、振動実地調査を実施した。まず初めに「上流側の水位が比較的高い状態」について水中固有振動特性を計測する実地調査を行った。その結果に基づいて動的安定判別を行った後、当該ダムおよび水門の維持管理に係わる関係者らの協力を得て、同じ水門を対象に、時期をずらして「上流側に水が作用していない状態」についての実験を行った。それらの結果より、上流側水位の影響について、実機で確認した。

得られた結果を、任意の運転条件における動的安定判別の解析に反映させた。

(2) 視覚的ユーザーインターフェースを備えた解析システムの開発

現在、テンタゲートの動的安定判別は、報告者の作成した複数のプログラムを用いて実施している。これを、動的安定判別に係る理論を理解していない状態で使用するのは非常に困難である。しかしながら、長期的な安全対策のためには、ダムゲートに関わる多くの現場のエンジニアが、比較的簡単に利用できるようなしておく必要があるため、比較的簡単に使用できる動的安定判別システムの開発に取り組んだ。特別な解析環境を必要とせず、解析者の能力差による影響等をなくすため、Excel VBAを用いて安定判別システ

ムの開発を進めた。画面上に指示されるゲート諸元を入力すれば、ゲートの動的安定判別が行えるシステムの基本構成を作成した。

4. 研究成果

第一に、ゲート高さが720mmの3Dモデルを用いた実験を行った。上流側の水位を655mm、491mm、328mm及び164mmに設定し、放水口開度を4mmに設定した。それぞれの水位でのスキムプレートの流水方向と上下方向の振動を、スキムプレートスパン中央に沿った5点で計測した。下端の測定点を基準とし、3台の3軸静電容量式加速度計を用いて計測を行った。

水位を低くしていき、自励振動が発生しない場合には、スキムプレート下端に背面から打撃加振を与え、減衰自由振動を計測し、固有振動モードを分析した。

計測したすべての流水方向振動の自励振動波形および減衰振動波形に対し、振幅と位相を解析した。位相を考慮して整理した振幅比を図2に示している。下端の測定点の振幅を1として整理している。横軸の正負は同位相か逆位相かを示している。スキムプレートの上端が上流側に動いたものとして表示している。すべての水位における実験結果を同じ図に示している。いずれの水位においても、スキムプレートが流水方向に回転的な振動をしていることが確認できる。今回実施した4通りの水位での実験において、すべての水位における結果がほぼ一本の曲線で表すことができた。

この結果より、上流側の水位が変化しても、スキムプレートの流水方向の固有振動モードはほとんど変化しないと考えられる。

3Dモデル実験では、上流側水位が低くなると、固有振動数が高くなりすぎるため、正確な振動モードを計測することが非常に難しくなる。そこで、第二に、ゲート高さが1199mmの3Dモデルゲートを用い、空中固有振動モードについてはFEM解析を行い、上流側水位が高い場合の振動計測による振動モードとの比較・検討を行った。FEMによる固有値解析で得られた固有振動モードを図3(a)に示している。スキムプレートの流水方向振動だけを表示したものである。振幅の最大と最小を赤と青で示している。振幅は拡大表示している。スキムプレートが流水方向に回転的な振動をしている様子がよく分かる。固有振動数は61.2Hz、回転中心の高さは、ゲート下端から654mmであった。多数の線が見えるのは、スパン方向に振幅が変化するためである。もちろん、スパン中央で振幅がもっとも大きくなっている。

このモデルゲートについて、上流側の水位を常時満水位に設定し、放水口開度を5mmに設定すると、非常に激しい自励振動が発生した。この時の振動モードを3軸の圧電型加速度計で計測した。得られた振動モードを図3(b)に示している。図中の印はスキムプレートの

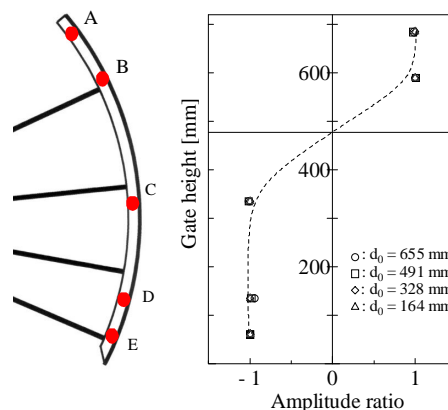
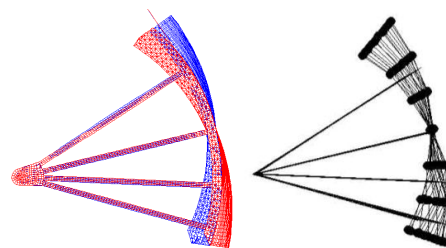


図2 上流側水位と流水方向振動モード



(a)空中固有振動モード (b)水中振動モード
図3 大型三次元モデルの空中と水中での流水方向振動モード

の振動計測位置を示している。スキムプレートの下端が最も下流側に押された状態から、最も上流側に動いた状態までを、途中の変化も含めて表示している。スキムプレートが流水方向に回転的な曲げ振動をしている様子がよく分かる。固有振動数は5.27Hz、回転中心高さはゲートの下端から634mmであった。空中固有振動モードの回転中心高さが654mmに対して相対誤差3%の結果である。したがって、実測した常時満水位での固有振動モードはFEMで解析した空中固有振動モードとよく一致していると結論付けられる。

モデル実験では、流水方向振動の上流側水位による影響はほとんどないことが確認できた。続いて、実用テンタゲートでも確認を行った。

国内で使用されている重力式コンクリートダムのカレストに常用洪水吐き設備として設置されているテンタゲートについて、水位条件を変えて実験を行った。ゲートの高さが約15m、総重量が73トンの大型の実用テンタゲートである。時期をずらし、設計水位の76%の水位の状態と、無水の状態での振動特性の計測を行った。実験はいずれも報告者らの考案した鋼棒切断加振法にて実施した。計測データから、応答振幅と位相を求め、ゲート全体が意味のある動きをするものを固有振動モードとして抽出した。

スキムプレートの流水方向の回転的な曲げ振動の固有振動数は、流水中で8.63Hzであるのに対し、空中では非常に高い39.25Hz

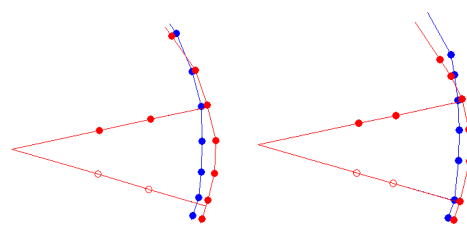
であった。このようにスキンプレートの空中での固有振動数が空中で大幅に高くなったのは、水の付加質量効果が無くなったためである。スキンプレートの流水方向の振動は、ゲートに接する水を押し引きしたり引きこんだりするため、巨大な押し引き動水圧を生じさせる。この押し引き動水圧が、付加質量として作用するため、流水中での固有振動数は空中での値に比べて大幅に低下することになる。この効果については、理論的な解析および実験による検証が報告者らによって既に行われており、今回の結果は理論解析の結果ともよく一致することが確認できている。

スキンプレートの回転中心高さは、それぞれ流水中で 11.95m、空中で 9.97m であった。固有振動の減衰比は流水中で 0.014、空中で 0.003 であった。流水中の方が空中の場合に比べて大きな値になっているが、これは流水中の実験で計測した減衰比には流体の波動放射減衰や流体摩擦による減衰などが含まれるためである。

スキンプレートの流水方向の固有振動モードを詳しく比較するために、それぞれのスキンプレートの流水方向振動のモードを図 4 に示している。図 4(a)が流水中、図 4(b)が空中での振動モードである。振幅の最大と最小を重ねて、赤と青で表示している。流水中と空中での振動モードを比較すると、ゲートに作用する水の有無に関わらず、基本的に同じ振動モードであることが分かる。したがって、実地調査結果からも、上流側水位がスキンプレートの流水方向固有振動モードに及ぼす影響はないと判断できる。ただ、回転中心高さに 1.98m の違いが見られる。これは大きな構造物を対象にした振動実地調査であるため、実験誤差などの影響が現われたものと考えられる。今後、計測事例を増やしていくなどの慎重な検討が必要であると考えられる。

もちろん、回転中心高さが異なると動的安定判別の基準となる理論値が変化する。空中および流水中での振動モードを用いて、流水実験時の水位 11.19m に対して動的安定判別曲線を描いたものが図 5 である。実線が流水時、破線が無水時のモードで計算した結果である。両者ともに動的安定判別線の基本的な特性に変わりはない。無水時のモードを利用した場合、不安定域が若干狭くなっている。しかしながら、ゲートが動的安定と不安定の境界にあるような場合には、絶対の安全を確保するという観点から、補強を行う等の対策が望まれるため、常に安全側の判定を行えば、大きな問題は生じないといえる。

以上より、ある水位における固有振動モードをもとに、他の水位条件における動的安定判別を行っても大きな影響はないことが確認できた。これまで、最も不安定に陥りやすい条件で動的安定判別を行ってきた。そのため、できるだけ水位の高い状態で振動実地調査を行う必要があったため、実験実施



(a) 空中固有振動モード (b) 水中振動モード
図 4 実用テナゲートの空中と水中での流水方向固有振動モードの比較

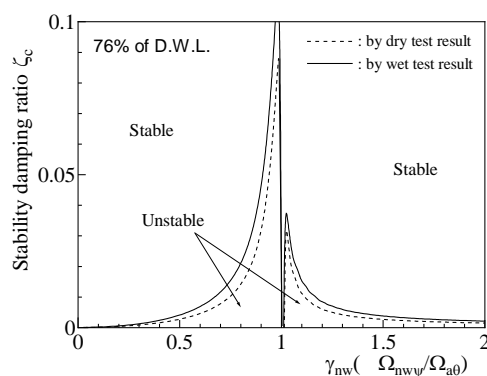


図 5 実用テナゲートの空中と水中での流水方向固有振動モードの比較

時期がかなり制限されていたが、上流側の水位に関わらず、任意の水位における固有振動特性の計測結果を用いれば、全ての運転条件でのゲートの動的安定性を判定することができるようになった。

この一連の解析を、ゲートを管理するエンジニア等が利用できるようにするための解析システムの開発に取り組んだ。基本的なゲートの諸元のほか、水位と振動モード(回転中心高さ)、振動数を入力すれば、動水圧の解析および動的安定判別が自動で計算でき、図 5 に示した安定判別図が表示できるようなシステムを試作した。動的安定判別を行う上で重要な減衰比については、これまでに蓄積した実機の実地調査結果をもとに、安全側の判定を行えるように設定した。

現在は概略設計が完成したところであり、さらに詳細設計を行い、専門知識を持たない人にも使いやすいシステムの作成を進めている。

以上の研究を実施し、得られた知見については、3 件の学術論文および 10 件の国内外の学会での口頭発表論文として公表した。さらに、これまでの研究成果を 1 冊の英文の図書にまとめて出版した。このうち、学術論文 1 件(雑誌論文)が日本設計工学会論文賞を受賞し、国内学会発表 1 件(学会発表)が日本機械学会 v_BASE フォーラムベストオーディエンス賞を受賞した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

阿南景子・石井徳章・Knisely, C.W., テンタゲートの流水方向固有振動モードの上流側水位に対する非依存性, 日本設計工学会誌「設計工学」, 第52巻, 第10号, pp.609-620, (Oct. 2017), 査読有。(日本設計工学会論文賞受賞)

DOI: 10.14953/jjsde.2017.2731.

Anami, Keiko, Ishii, Noriaki, Knisely, Charles W., Tsuji, Takuma, Oku, Tatusya, Method for Identifying Dynamic Instability of Tainter Gates, Hydro Review (The Magazine of for North American Hydroelectric Industry), Vol. 35, No.6, 2016, pp.72-80, 査読有.

Anami, Keiko, Ishii, Noriaki, Analogy between gate failure and bridge failure, Bhutan Journal of Research & Development, Vol.4, No. 1, 2015, pp.61-70, 査読有。(基調講演)

〔学会発表〕(計10件)

阿南景子, テンタゲートの水中固有振動モードに関するモデル実験, 日本機械学会関東支部・精密工学会 山梨講演会講演論文集, No.170-3, pp.139-140, (Oct. 2017).

Anami, Keiko, Design Guidelines for Dynamic Stability of Tainter Gates, Proc. of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference (CD-ROM), PVP2017-65325, (Jul. 2017).

Anami, Keiko, Effect of Upstream Submergence on In-Water Natural Vibration Mode of a Tainter Gate, Proc. of the 11th conference on Flow-Induced Vibration and Noise, pp.665-669, (Jul. 2016), ISBN: 978-90-9029803-0.

阿南景子, テンタゲートの水中固有振動モードにおよぼす上流側水位の影響, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, No.15-1, J1050302, (Sep. 2015).

阿南景子, 実用ラジアルゲートの流体関連振動, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015, v_BASE フォーラム・関連講習会資料集, No. 15-7, pp.7-8, (Aug. 2015). (v_BASE フォーラムベストオーディエンス賞受賞)

Anami, Keiko, Dynamic Stability Identification of a Full-Scale Tainter-Gate and Extension of Gate-Opening Range for Operation, Proc. of ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2015-45418, (Jul. 2015).

〔図書〕(計1件)

Noriaki ISHII, Keiko ANAMI, Charles W. KNISELY, IGI Global, Dynamic Stability of Hydraulic Gates and Engineering for Flood Prevention 2017 総ページ数 660.

〔その他〕

ホームページ等

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

(1) 研究代表者

阿南 景子 (ANAMI, Keiko)

大阪電気通信大学・工学部・准教授

研究者番号: 30346077

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

石井 徳章 (ISHII, Noriaki)

KNISELY, Charles W.