

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560270

研究課題名(和文)大形テンタゲートの長期的安全運転のための動的不安定対策

研究課題名(英文)Countermeasures for dynamic instability of large-scaled Tainter gate for long-term safety operation

研究代表者

阿南 景子 (ANAMI, KEIKO)

足利工業大学・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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本質的な動的不安定特性を有するテンタゲートの長期的な安全運転のために、第一に、これまでの振動実地調査結果に基づいた理論解析により、ゲートの動的安全性を確保した。第二に、発生し得る動的不安定に対し、減衰器の設置やスキンプレート構造の補強等による長期的な安全対策手法について検討を行った。また、ゲートを巻き上げるワイヤーのばね定数を変更することで安全性を確保する方法については、大形および中形の三次元モデルゲートを用いた実験でその妥当性の検討を行った。第三に、実用テンタゲートの振動実地調査を実施し、ゲートの長期的な動的安全性の確認と安全運転範囲の拡大を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to maintain the long-term safety operation of the practical use Tainter gates, theoretical and experimental studies were conducted. First, the operational dynamic stability were secured by using the previous field test results and our theoretical analysis. Second, the countermeasure and reinforcement, such as installation of damper and additional mass for the skinplate structure were examined by theoretical and FEM analysis. In addition, the flexible wire cables of the gate to ensure the safety, were examined its validity in model experiments. Moreover, the safety operating range with small gate opening were expanded after confirmation of the long-term dynamic stability from the field vibration test for practical use Tainter gate.

研究分野：機械力学・計測制御

キーワード：流体関連振動 自励振動 連成振動 動的不安定 安全対策 理論解析 モデル実験 実機試験

1. 研究開始当初の背景

米国カリフォルニア州フォルソンダムに設置された世界的にも大形のテンタゲート（ラジアルゲート）が、1995年7月17日早朝、放水時に突然崩壊した。この事故の28年前（1967年7月）には、京都府和知ダムに設置された37トンのテンタゲートが、同様の崩壊事故を引き起こしていた。米国で崩壊したテンタゲートは、図1に断面外略図を示しているとおり、扇形せきの半径が14.3 m、高さが15.5 mであり、総質量が87 tonに達する巨大なものである。

日本での崩壊事故当時、振動に起因した動水圧の問題も指摘され、原因解明のための研究もいくつか行われていたが、当時は振動関与の明確な証言なども全く無かったため、事故原因の完全な解明には至っていなかった。ところが、米国での崩壊事故では事故当初より振動が関与したとのオペレータの明確な証言があったため、研究代表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。

それにより、テンタゲートはスキムプレート（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」の固有振動モードを持ち、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、ある条件下では放水流量の変化からエネルギーを取り込み、強烈な自励振動を引き起こすことを明らかにした。このような危険な自励振動について、理論的解析手法を確立し、「流水方向曲げ振動」の水中固有振動数が「ゲート全体の回転振動」の固有振動数よりも僅かに小さいときに、強烈な自励振動が発生することを明らかにした。理論解析の結果は、すべて、大型と中型の3次元モデルを用いた実験により検証している。さらに、崩壊したフォルソン・テンタゲートが崩壊時にはまさにその強烈な動的不安定条件下にあったことを明らかにし、証言の全てに一致する崩壊のシナリオを明らかにした。

この種の自励振動はスキムプレートの幾何中心がトラニオンピンに一致するように設計・据付された通常のゲートでも生じるので、現在実用されている大形テンタゲートのうちのかなりのものがこの種の危険な動的不安定を具備している可能性がある。しかしながら、強烈な動的不安定を具備していながら、現実には、大形水門の崩壊はそう度々起こらない。その理由を明らかにするための研究が最近になって行われている。

その中で、研究代表者らは、トラニオンピンとスキムプレート両サイド水密ゴム部分でのクーロン摩擦による減衰効果がテンタゲートの動的不安定を表面上抑制し、見かけ上の動的安定を保っていること、その摩擦によって維持された動的安定は、摩擦の閾値を超えるような初期変位が与えられると簡単に動的不安定に移行する極めて危険な状態であることを明らかにしている。フォルソ

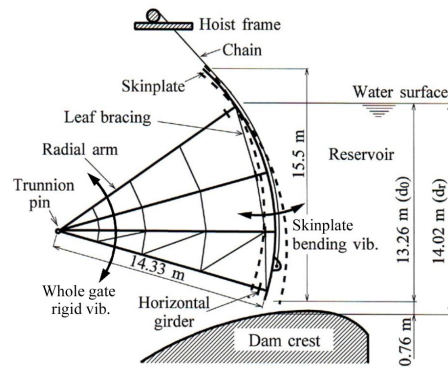


図1 フォルソンダムテンタゲートの断面外略図

ン・テンタゲートの場合、摩擦の減衰効果を上回る初期変位 8.5 mm がスキムプレート上下動に与えられたために強烈な動的不安定が一気に表面化して激しい自励振動が生じ、スキムプレート上下動が 11.9 mm に達したときにボルトが破断し始めたことを定量的に解明している。

したがって、今現在、振動が表面化していないゲートについても、本質的に動的に不安定なゲートについては、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。それによって、和知ダムやフォルソンダムでのテンタゲート崩壊と同様な重大事故の再発を防ぐことが可能となる。

2. 研究の目的

大形テンタゲート式水門の崩壊事故を二度と繰り返さないために、振動問題が表面化しているか否かに関わらず、本質的に動的不安定特性を有するテンタゲートに対して、長期的な安全運転のための具体策を提示する。その目的のために、次の事項に取り組む。

- (1) 動的不安定に陥る運転条件の明確化
- (2) テンタゲート式水門の動的安全化のための具体策の検討
- (3) テンタゲート式水門の長期的な動的安全性の確保

上記の研究を進めることにより、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。

3. 研究の方法

(1) 動的不安定に陥る運転条件の明確化

第一に、これまでの実地調査によって動的に不安定であることが分かっているテンタゲート、および、摩擦によって見かけ上の動的安定が保たれているゲートについて、自励振動が発生し得る水位と開度の条件、および、摩擦の閾値を超えて動的不安定が表面化し得る初期振動変位を理論的に推定する。対象ゲートが運転中にその危険運転条件に陥ることがないように、厳重な注意を促し、テンタゲートの動的安定性を確保する。

(2) テンタゲート式水門の動的安全化のための具体策の検討

理論解析と FEM 解析を併用し、実現可能、かつ効果の期待できる補強・改修策を検討する。もちろん、安価で最も効果的な、実現可能な対策を提案する必要がある。特に、補強によりゲートの固有振動特性を変化させる方法と、ゲートを巻き上げるワイヤーの剛性を変化させることでゲートの動的安全性を確保する方法について検討する。その有用性は、大形と中形の 3 次元テンタゲートモデルを用いて検証する。実現の可能性については、水門メーカー、ゲート管理者等の意見を聞きながら慎重に検討する。

(3) テンタゲート式水門の長期的な動的安全性の確保と安全運転範囲の拡大

モデル実験で有用性が確認された動的不安定に対する具体策を実用テンタゲートに適用し、その効果を実証する。水門メーカー、ゲート管理者等の理解と協力を得て、慎重に実施する。

さらに、実用テンタゲートの振動実地調査を実施し、動的安全性の確認、および、必要な不安定対策を進める。また、動的安定であることが確認された場合には、長期的な安全運転のために安全運転範囲の確認を行う。

4. 研究成果

(1) 動的不安定に陥る運転条件の明確化

過去に行った実用テンタゲート T の振動実地調査では、ある上流側水位におけるゲートの流水中での固有振動特性を明らかにしている。上流側の水位が変化すると、ゲートに作用する水の付加質量効果が変化し、流水中での固有振動特性が変化する。そこで、第一に、研究代表者らの動水圧および複合発散振動に関する理論解析を適用し、運転範囲内のすべての水位条件について、ゲートの動的安定性を代表する流体発振比を算出した。第二に、ゲート両サイドの水密ゴムの形状を考慮し、発生する摩擦力を計算し、どれだけの初期変位が加えられたとき、摩擦の閾値を越えて動的不安定が表面化するのかを算出した。その結果、メンテナンス等により 5mm 以上の初期変位は加わらないと仮定しても、テンタゲート T の場合、図 2 に示しているように、ゲートに作用する水深が 5.7m ~ 6.2m の範囲では、危険な動的不安定が発生する可能性を明らかにした。この水深は、ゲート操作でよく用いられる水深であるので、解析の結果をゲート管理者に報告し、安全対策を講じるまではこの水位での運転を避けるよう注意を促した。

(2) テンタゲート式水門の動的安全化のための具体策の検討

安価で効果的、かつ、実現可能な安全対策として、第一に、補強によりゲートの固有振動特性を変化させる方法に関する検討を行

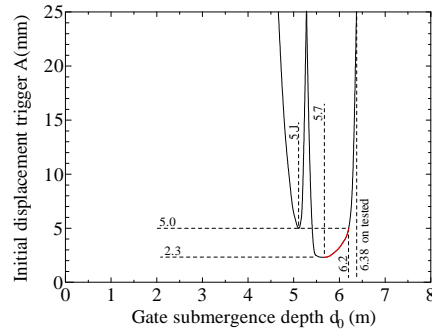



図 2 動的不安定が表面化する初期変位量

表 1 フォルソンゲートの動的安定を確保するワイヤーの諸元

	name	6×37		
	construction	6×(1+6+12+18)		
	Type	G, galvanized, pre-tensioned		
diameter of wire cable d_w (mm)	diameter of strand δ (mm)	area A (mm ²)	breaking load T (kN)	modulus of elasticity E (MPa)
60	2.86	1140	1780	92,200

った。FEM 解析とモデル実験を併用し、ゲートのどこを補強するのが効果的であるのかを検討した。その結果、スキンプレート下端の流水方向の曲げ変形が生じないように補強が効果的であることを確認した。しかしながら、実際には、この補強には大掛かりな作業をとらなければならないため、もっと簡単に動的安全性を確保できないか考えた。そこで、第二に、ゲートの巻き上げワイヤーを変更することでゲートの動的安全性を確保する方法について検討した。動的安定性に関する理論解析を用いてゲートが安定になるために必要な減衰比を明らかにし、その条件を満たすようなワイヤーの設計を行った。本研究の動機となったフォルソンダムテンタゲートの場合、ゲートは非常に合成の高いチェーンで巻き上げられているが、表 1 に示すワイヤーに取り替えることでゲートの動的安定を確保することが可能であることが分かった。このように、ワイヤーの弾性を変化させてゲートを動的安定に導く方法の有用性については、大形と中形の 3 次元テンタゲートモデルを用いて検証した。

(3) テンタゲート式水門の長期的な動的安全性の確保と安全運転範囲の拡大

検討した動的安全対策を具体的に実用テンタゲートに取り付けることは、本年度までの研究では実現できなかった。今後、水門メーカー、ゲート管理者等の意見を聞きながら慎重に検討を続ける必要がある。

実用テンタゲートの長期的な動的安全性を確保するために、振動実地調査を実施した。研究代表者らの考案した鋼棒切断加振方による振動実地調査を行い、ゲートの流水中での固有振動特性を明らかにした。さらに、理論解析を用い、すべての運転状態での動的安定性を確認した。その結果、今回振動実地調査を実施したテンタゲートは、いかなる水位、

開度での運転であっても、動的に安定であることが確認できた。

その結果を受け、これまで、慣例により設定されていた操作最小開度の見直しを行った。今回実験を実施したテナゲートの場合、操作可能な最小開度は 150 mm に設定されていた。しかしながら、上流側の水位に関わらず開度 150 mm 以下で操作しないという数値には根拠がなく、もし、動的不安定を考慮した値であれば、上流側の水位に対して何 % 以下を避けるというように、水位と開度に対する操作禁止範囲を設けるべきである。

振動実地調査と理論解析の結果、このゲートは微小開度であってもすべての水深において動的に安定であることが理論的に説明できた。その結果を受け、当該ゲートの常用放水として初めて、開度 20 mm での放水を実施した。48 時間連続での放水を実施したが、振動等は全く確認されず、慣例により定められた操作最小開度以下の開度での放水であっても、何ら支障がないことが確認できた。これにより、微小開度放水時のゲート操作を減らすことができ、ゲートの安全運転範囲を拡大することができた。

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 7 件)

- (1) Anami, K., Ishii, N., Knisely, C.W., Theory of Coupled-Mode Self-Excited Vibration of Tainter Gates, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 査読有, ISSN 2278-0149, Vol.3, No.4, pp.678-707, (Oct. 2014).
<http://www.ijmerr.com/uploadfile/2015/0409/20150409053754275.pdf>
- (2) Ishii, N., Anami, K., Knisely, C.W., Retrospective Consideration of A Plausible Vibration Mechanism for The Failure of The Folsom Dam Tainter Gate, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 査読有, ISSN 2278-0149, Vol.3, No.4, pp.314-345, (Oct. 2014).
<http://www.ijmerr.com/uploadfile/2015/0409/20150409111452965.pdf>
- (3) Anami, K., Ishii, N., Knisely, C.W., Matsumoto, Y., Field Test Validation of Analytical Model for Vibration Characteristics of a Flap Gate undergoing Self-Excited Vibration, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 査読有, ISSN 2278-0149, Vol.3, No.4, pp.1-15, (Oct. 2014).
<http://www.ijmerr.com/uploadfile/2015/0409/20150409115105108.pdf>
- (4) Anami, K., Ishii, N., Knisely, C.W., Tsuji, T., Oku, T., Method for Identifying Dynamic Instability of Tainter Gates, *Hydro Review*

Worldwide, 査読有, Vol.21, No.6, November-December 2013, pp.34-39, PennWell Global Energy Group, Essex, UK, (Nov. 2013).

- (5) 阿南景子, 石井徳章, 辻琢磨, 奥達也, 中村誠志, Charles W. Knisely, 鋼棒切断加振法を用いた実用テナゲート E の動的安全性確認, 構造工学論文集, 査読有, Vol.59A, pp.637-646, (Mar. 2013).
- (6) 石井徳章, 西原一嘉, 阿南景子, 奥達也, 大形テナゲートの振動実地調査結果に基づいた動的不安定に関する検証, 大阪電気通信大学メカトロニクス基礎研究所 MERI Activity Report 2012, 査読無, Vol. 13, pp.53-57, (Mar. 2013).
- (7) Anami, K., Ishii, N., Knisely, C.W., Added mass and wave radiation damping for flow-induced rotational vibrations of skinplates of hydraulic gates, *Journal of Fluids and Structures*, 査読有, Vol. 35, pp.213-228, (Nov. 2012),
D.O.I: 10.1016/j.jfluidstructs.2012.07.008

〔学会発表〕(計 10 件)

- (1) 高実子裕輝, 実用テナゲート F の動的安全性, 山梨講演会, 山梨大学(山梨県・甲府市), 2014 年 10 月 18 日.
- (2) 阿南景子, 水中にある水門の流水方向振動によって生じる動水圧, 山梨講演会, 山梨大学(山梨県・甲府市), 2014 年 10 月 18 日.
- (3) Anami, K., Analogy between gate failure and bridge failure, 1st International Conference on Engineering, Science, Technology, Education and History, Thimphu (Kingdom of Bhutan), 2014 年 8 月 20 日 ~ 21 日 (招待講演).
- (4) Anami, K., Measurement of Instantaneous Flow-Rate Coefficients and FIV Characteristics of Tainter Gates at Large Openings, 2014 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Anaheim (CA, USA), 2014 年 7 月 20 日 ~ 24 日.
- (5) 中村誠志, 鋼棒切断加振法によるテナゲートの動的安定判別法とその実用, 山梨講演会, 山梨大学(山梨県・甲府市), 2013 年 10 月 26 日.
- (6) Anami, K., Dynamic Stabilization of Folsom Dam Tainter-Gates by Replacing Hoist Chains with Cables, 11th International Conference on Flow-Induced Vibration, Lisbon (Portugal), 2013 年 9 月 9 日 ~ 12 日.
- (7) Anami, K., Steel-Rod Breaking Excitation Method to Identify Dynamic Instability of Full-Scale Tainter-Gates, Hydro Vision 2013, Denver (CO, USA), 2013 年 7 月 23 日 ~ 26 日.
- (8) 更西貴充, テナゲートの摩擦維持型定常振動とその危険性に関するモデル実験, 山梨講演会, 山梨大学(山梨県・甲府市),

2012年10月27日.

- (9) 茂木達也, 2種類のモデルを用いたテンタゲートの並進型自励振動に関する実験, 山梨講演会, 山梨大学(山梨県・甲府市), 2012年10月27日.
- (10) Anami, K., Steel Rod Breaking Excitation to Identify Full-Scale Tainter Gate Dynamics, 10th International Conference on Flow-Induced Vibration, Dublin (Ireland), 2012年7月2日~6日.

〔その他〕

ホームページ

足利工業大学 阿南研究室

<http://www2.ashitech.ac.jp/mech/anami/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿南 景子 (ANAMI, Keiko)
足利工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 30346077

(2) 研究分担者

石井 徳章 (ISHII, Noriaki)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号: 40098083