

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：32201

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760173

研究課題名（和文） 日本の実用大形テンタゲートの実地調査と自励的定常振動を支配する非線形効果

研究課題名（英文） Field-vibration tests for large-scaled practical use Tainter-gates in Japan and the nonlinear effect for the self-excited steady vibration

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

研究成果の概要（和文）：実用テンタゲート式水門の動的安定性を明らかにするとともに、自励的定常振動を支配する非線形効果について検討した。第一に、日本で実用されているテンタゲートについて、鋼棒切断加振法による振動実地調査を行い、その動的安定性を確認した。第二に、2次元と3次元の縮小モデルを用いた実験により、水密ゴムの弾性および壁面とのクーロン摩擦が、自励振動特性におよぼす影響を検討した。第三に、振動実地調査で得られた結果およびモデル実験の結果を元に、自励的定常振動を理論的に解析することを試みた。

研究成果の概要（英文）：Dynamic stability of the practical use Tainter gates were clarified, and the nonlinear effect which determines the self-excited steady vibration were examined. First, in order to identify the dynamic stability/ instability, the field vibration test with steel-rod breaking excitation method were conducted to the practical use Tainter gates in Japan. Second, the laboratory studies of a model gate show that a gate with “friction-maintained steady vibration” can fail readily when exposed to an initial displacement exceeding a threshold value. Moreover, the theoretical analysis of self-excited steady vibration was tried based on the model test results and field vibration test results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,400,000	1,020,000	3,020,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 機械力学・制御

キーワード：動的設計、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

1995年に米国カリフォルニア州のフォルソンダムで発生した、世界的にも大形のテンタゲート（ラジアルゲート）の崩壊事故に関連し、近年、申請者らによって事故原因解明および再発防止のための流体力学的・機械力学的研究が数多く行われてきた。その結果、フォルソンダム・テンタゲートは、ゲートの持つ二つの固有振動が動水圧と慣性力を介して連成し、非常に激しい発散振動を引き起

こし、崩壊に至ったことを明らかにしている。さらに、崩壊時のフォルソンダム・テンタゲートが強烈な動的不安定条件下にあったことも明らかにしている。

この種の自励振動はスキン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・据付されていても生じるので、現在実用されている大形テンタゲートのうち、かなりの数がこの種の危険な動的不安定性を具備している可能性がある。現実に数千の大形

テンタゲートが世界中で実用されているが、その中には振動問題を抱え、微小開度で運転できないゲートが多数あることもよく知られている。現実には発生する不安定振動は、微小振動から徐々にその振幅を増大させ、それに応じて弾性支持系および流体波動の非線形効果が支配的となるために振幅一定の自励的定常振動振幅に落ち着く。そのときの振幅が構造強度を上回るものであれば、崩壊に至る危険性があると判定できる。それゆえ、自励的定常振動振幅を評価できるようにしておくことがきわめて重要である。これらを考慮した上で、動的に強不安定なものについては安全対策を提案するなどの維持管理体制を整えることが急務である。

申請者らがこれまでに確立してきた理論解析手法を用いれば、比較的簡単な流水時の振動実地調査を行うことによってゲートの動的安定・不安定を判定することが可能である。そこで、平成 20 年度までに、米国で実用されている大形テンタゲートを対象に鋼棒切断加振法による振動実地調査を行い、その動的安定・不安定の判定を行った。実験により動的に強不安定であることが明らかになったゲートについては安全対策の具体案を提案した。

## 2. 研究の目的

平成 20 年度までに米国で実施した動的安全性の確認および安全対策を、日本で実用されているテンタゲートについても行う必要がある。本研究課題では、国内で実用されているテンタゲートについて、同様な振動実地調査を実施し、動的不安定なゲートについては安全対策を提示する。振動実地調査は電力関連企業および水門メーカーの協力を得て進める。得られた実地調査結果を総括し、新設計に際して必ず必要とされる動的安全設計基準に必要な諸データを収集する。

## 3. 研究の方法

### (1) 実用大形テンタゲートの振動実地調査

国内のダムで実用されている大形テンタゲートについて振動実地調査を行う。ゲート本体の構造的な振動モードを特定するために、申請者らの提案する鋼棒切断加振法による振動実地調査を実施する。14 点 21 方向の振動加速度を同時計測する。特に扇形せきの曲げ振動モードを正確に計測する必要があるため、扇形せき上で 10 点 15 方向の計測を行う。振動計測には特に低周波数域で感度の高いサーボ型加速度ピックアップを用いる。ピックアップは大形のマグネットゲート本体に取り付ける。計測機材は、研究協力者の大阪電気通信大学・石井徳章教授より一部借用する。計測機器のゲート本体への取り付けは危険が伴うが、研究代表者は既に Rescue

3 の Technical Rope Access (Technician) の認証を受けている。

### (2) モデル実験

系の非線形効果が支配的となる自励的定常振動について、大形と中形のテンタゲートの 3 次元モデルゲートを用いた実験を行う。線形理論に支配された微小振動から非線形性が卓越してくる自励的定常振動までの挙動がいろいろな条件下で実験を行い、非線形効果を理論解析する際の主要な特性を明らかにする。

### (3) 理論解析

実地調査結果およびモデル実験結果に基づいて、実用大形テンタゲートに適合した理論解析法を確立する。解析はファン・デル・ポール型の非線形問題に帰着できることがこれまでの基礎研究で明らかにされている。理論解析の結果はすべて無次元形に帰着させ、小形模型と実物とのスケールファクターも明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) 日本で実用されている大型テンタゲートについて、振動実地調査を行った。総重量が約 80 トンの大型のテンタゲートについて、鋼棒切断加振法による振動実地調査を実施した。上流側の水位が常時満水位の約 86% (設計水深の約 76%) の状態で、ゲート下端とダムクレストの間に取り付けた鋼棒を、ゲートを巻上げることによって切断し、そのときの衝撃でゲートを加振した。鋼棒くびれ部の直径が 3mm、4mm、5mm の場合について実験を行った。ゲート本体の構造的な振動モードを特定するために、14 点 21 方向の振動加速度を同時計測した。振動計測には特に低周波数域で感度の高いサーボ型加速度ピックアップを用いた。鋼棒切断時の振動加速度応答だけでなく、ゲート巻上げ時のアームにかかる荷重も同時に計測した。

解析の結果、表 1 に示しているように、ゲート全体がトラニオンピンまわりに剛体的に回転する固有振動と、スキンプレートが流水方向に回転的な低次の曲げ振動をする固有振動が確認された。スキンプレートの流水方向の回転的な曲げ振動については、回転中心高さの異なる 2 つの固有振動を確認した。

これら 2 つの振動が慣性力と流体力を介して連成し、複合発散振動を引き起こす可能性について解析した。実験を行った水位において、実験で明らかになった固有振動の振動数比は、ゲートが危険な複合発散振動を引き起こす条件から大きく外れており、このゲートは動的に安定であることが確認できた。

さらに、研究代表者らがこれまでに確立した理論解析を適用し、実験時よりも水位が高

い、設計水深の状態におけるゲートの動的安定性について検討を行った。その結果を図 1 に示している。モード  $M_{X1}$  と  $M_Z$  が連成する場合についての結果である。実線および破線が実験時および設計水深時における不安定領域を表わしており、曲線の上側が動的に安定な領域である。実験時に計測した固有振動数と設計水深時の固有振動数（理論計算値）を●と○でプロットしている。実験時よりも水位が上昇し、設計水深に達した場合であっても、今回確認された固有振動の振動数比は、ゲートが危険な複合発散振動を引き起こす条件から外れていることが確認できた。したがって、今回実験を行ったテナゲートは、すべての水位において動的に安定であることが確認できたと言える。

表 1 振動実地調査で得られた固有振動特性

モード名	周波数	振動モード	回転中心高さ
$M_Z$	6.63 Hz		—
$M_{X1}$	8.63 Hz		11.95 m
$M_{X2}$	13.63 Hz		4.64 m

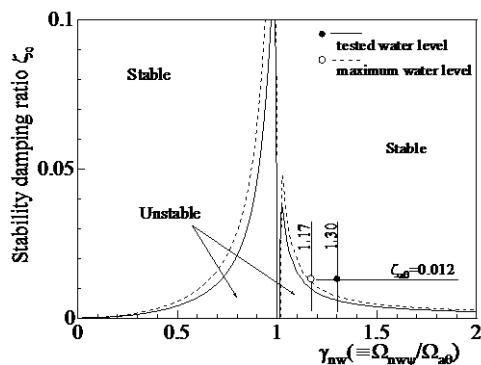


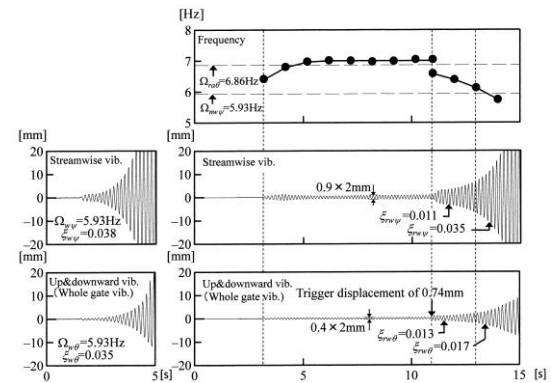
図 1 実験時および設計水深における動的安定判別(モード  $M_{X1}$  と  $M_Z$  が連成する場合)

(2) テナゲートの二次元モデルおよび大形と中型の三次元モデルを用いた実験を行い、自励的定常振動の特性を詳細に検討した。特に、スキンプレート両サイドの水密ゴムの摩擦の影響について詳しく検討した。第一に、モデルゲートを、スキンプレート両サイドに摩擦がない状態では非常に動的に不安定な状態に設定した。そのときの自励振動波形が図 2(a)である。大型三次元モデルを用いた実験の結果である。次に、そのスキンプレート両サイドにゴムシートを取り付け、クーロン摩擦を付加し、発生する振動挙動を計測した。その結果を図 2(b)に示している。計測開始から約 3 秒後にゲートを 5mm 巻上げ、放水す

ると自励的定常振動が発生した。流水方向の片振幅は約 9mm であった。この自励的定常振動状態のゲートに上下方向に 0.74mm のごくわずかな加振変位を与えたところ、図 2(b) の 11 秒付近以降に見られるように、自励定期定常振動が発散振動に移行し、非常に激しい振動が発生した。非常に激しい発散振動が発生したときの流水方向の減衰比は 0.035 であり、クーロン摩擦を与えていないときの減衰比(0.038)とほぼ同じ値であった。

また、自励振動の周波数の変化を図 2(b) の上の図に示しているように、自励的定常振動状態のときには取り付けたゴムの弾性的影響を受けた上下方向の固有振動数に同期した振動が発生し、発散系に移行した後はスキンプレートの流水方向振動に同期した振動が発生することも確認できた。

以上のように、自励的定常振動そのものが極めて不安定であり、ごくわずかな初期変位で危険な発散系に移行することが確認できた。



(a) without friction (b) with Coulomb friction  
図 2 摩擦維持型動的安定が動的不安定に移行する実験の結果

(3) テナゲートの自励的定常振動について、非線形効果が支配的となる現象を理論的に表現することを試みた。非線形効果をもたらす代表的なものとしては、支持系のばね定数と貯水池内の流体波動が挙げられる。振動の増大に応じて、前者は非線形的に大きくなり、後者は波動放射減衰を非線形的に大きくする。これらの主要な非線形特性をモデル実験の結果に基づいて実証的に明らかにした上で、実用大形テナゲートに適合した理論解析を行うことを試みた。最終的な理論解析手法の確立にはさらなる検討が必要であるが、基本的には、ファン・デル・ポール型の非線形問題に帰着できるものと考え、現在、解析を進めている。今後、理論解析手法が確立できれば、理論解析の結果はすべて無次元形に帰着させ、小形模型と実物とのスケールファクターも明らかにすることで、実用テナゲートの動的不安定に関する解析が可能となるものと考えている。

## 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)

- ① 阿南景子・辻琢磨・石井徳章・奥達也・Knisely, Charles W., テンタゲートの動的安定判別のための鋼棒切断加振実験, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.552-558, (Mar. 2012), 査読有.
- ② Anami, K., Ishii, N., Knisely, C.W., Pressure Induced by Vertical Planar and Inclined Curved Weir Plates Undergoing Streamwise Rotational Vibration, Journal of Fluids and Structures, Vol. 29, pp.25-49, (Feb. 2012), 査読有.
- ③ 石井徳章・西原一嘉・阿南景子・奥達也, 大形テンタゲートの動的不安定に関する 2D 及び 3D モデル実験, 大阪電気通信大学メカトロニクス基礎研究所 MERI Activity Report 2009, Vol. 10, pp.53-59, (Mar. 2010), 査読無.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 阿南景子・石井徳章・茂木達也, スキンプレートが並進振動するテンタゲート式水門の流体関連振動, 日本機械学会関東支部第18期総会講演会講演論文集, No.120-1, pp.149-150, (10, Mar. 2012), 発表者: 茂木達也, 場所: 日本大学生産工学部, 査読無.
- ② 阿南景子・石井徳章・辻琢磨・阿久津将矢, テンタゲート式水門の摩擦維持型動的安定に関するモデル実験, 日本機械学会東北支部第 47 期秋季講演会講演論文集, No.2011-2, pp.372-373, (22, Sep. 2011), 発表者: 阿南景子, 場所: 山形大学, 査読無.
- ③ Anami, K., Ishii, N., Knisely, C.W., Tsuji, T., Oku, T., Sato, S.: Friction-Maintained Dynamic Stability, Proc. of 10th biennial International Conference on Vibration Problems, Vibration Problems ICOVP 2011 (Eds. Naprstek, J. et.al.), Springer Proceedings in Physics 139, pp.779-785, (7, Sep. 2011), Prague, Czech Republic, 発表者: Anami, K., 査読有.
- ④ Ishii, N., Anami, K., Knisely, C.W., Tsuji, T., Oku, T.: Tainter Gates - Why Some Fail but Many Do Not, Proceedings of Hydro Vision 2011, Paper No. 1J-5 (Online), (20, Jul. 2011), Sacramento, CA, USA, 発表者: Anami, K., 査読有.
- ⑤ 石井徳章・阿南景子・Knisely, C. W. ・辻琢磨・奥達也, テンタゲート式大形水門におけるフラッター現象とその防振対策, 「フラッターの制御と利用」に関する第 1 回シンポジウム(特別講演), (15, Sep. 2010),

場所: 東京大学, 発表者: 石井徳章, 査読無.

- ⑥ 阿南景子・石井徳章・辻琢磨・後藤大・八木一聡, 大形テンタゲートの並進型自励振動に関する 2次元モデル再現実験, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, No. 10-1, Vol.7, pp.81-82, (Sep. 2010), 発表者: 阿南景子, 査読無.
- ⑦ Anami, K., Ishii, N., Tsuji, T., Oku, T., Goto, M., Yagi, K., C.W. Knisely: Coupled-Mode Dynamic Instability of Tainter Gates with Parallel Bending Vibration of the Skinplate, International Symposium on Fluid-Structure Interactions, Flow-Sound Interactions, and Flow-Induced Vibration & Noise (FSI2 & FIV+N), FEDSM/ICNMM2010-30400, (Aug. 2010), Montreal, Canada, 発表者: Anami, K., 査読有.
- ⑧ Ishii, N., Anami, K., Knisely, C.W., Tsuji, T., Oku, T.: Analogy between the Coupled-Mode Vibration Failure of the Folsom Dam Tainter-Gate and the Tacoma Narrows Bridge Failure, Proc. of 1st Int'l Conf. on Advances in Interaction & Multiscale Mechanics (AIMM'10), pp.629-641, (June 2010), Jeju, Korea, 発表者: Ishii, N., 査読有.
- ⑨ Ishii, N., Anami, K., Knisely, C.W., Oku, T., Aslam, M.: Field Vibration Tests Concerning the Dynamic Stability of Tainter Gates at the Poe Power Dam, Proc. of Hydro 2009 Conference (CD-ROM), No.8-10, (Oct.2009), Lyon, France, 発表者: Anami, K., 査読有.
- ⑩ 阿南景子・石井徳章・奥達也・松本征男・Charles W. Knisely・佐々木智, 米国で実用されているテンタゲートの動的安定に関する振動実地調査, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集, N0.09-1, Vol.7, pp.221-222, (Sep. 2009), 発表者: 阿南景子, 査読無.
- ⑪ Ishii, N., Anami, K., Knisely, C.W., Oku, T.: Field Tests Concerning the Dynamic Stability of Tainter Gates at the Thermalito Diversion Dam, Proc. of WaterPower XVI (CD-ROM), No.188, (Jul.2009), Spokane, Washington, USA, 発表者: Anami, K., 査読有.

[その他]

ホームページ

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

報告書 (2 件)

対象ダムゲートおよび管理者名称等の特定を避けるため表題等は報告しないものとする。

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