

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007 ～ 2008

課題番号：19760155

研究課題名（和文） テンタゲート式水門の動的不安定に関する安全対策手法の確立

研究課題名（英文） Countermeasures for the Dynamic Stability of Tainter Gates

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：テンタゲート式水門の動的不安定に対する安全対策手法について検討を行うために、テンタゲートの実用テンタゲートにおける振動実地調査、縮小モデルを用いた実験および理論解析を行った。第一に、米国・カリフォルニア州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り、ゲートの水中での振動応答を計測し、その結果を用いて研究代表者らが導いたテンタゲートの動的不安定性に関する理論解析手法の検証を行った。さらに、ゲートの動的不安定を回避する手法を検討、提案した。第二に、テンタゲートの二次元モデルおよび三次元モデルを用いた実験を行い、ワイヤーロープの非線形性やスキンプレート両サイドの水密ゴムの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。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

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

## 1. 研究開始当初の背景

米国カリフォルニア州の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）が放水時に突然崩壊するという事故が1995年7月17日に発生した。この事故の28年前（1967年7月）には、京都府下の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る。今回米国で崩壊したテンタゲートは、総質量は87 tonに達す

る、日本で崩壊したゲートの約2.4倍の巨大なものである。

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無く、事故原因の解明は長年にわたって放置されていた。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明確なオペレータの証言があったため、近年、申請者

等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ている。その結果、フォルソンダム・テンタゲートはスキンプレート(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、ある条件下ではゲート下端からの放水流量変化からエネルギーを取り込んで強烈な自励振動を引き起こすことを、理論的に明らかにし、それを二次元モデル実験、および三次元モデル実験で実証している。さらに、その理論解析を崩壊したフォルソンダム・テンタゲートに適用し、フォルソンダム・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。現実には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。そのような現実の中であって、実用テンタゲートの振動実地調査を早急に行い、動的安定・不安定の判定を行い、動的に強不安定なものについては安全対策を提案することが急務である。これによって初めて、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が今後いかなる場合にも決して起こらないようにすることが可能となる。

## 2. 研究の目的

これまでの研究で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、第一に、崩壊したフォルソン・テンタゲートを管理する米国連邦政府内務省(USBR)や、米国陸軍工兵部隊(USACE)、カリフォルニア州水資源局ダム安全管理課(California DWR)の協力を得て、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・不安定の判定を行い、動的に強不安定なものについては安全対策の具体案を提案する。第二に、三次元の大形テンタゲートモデルを製作して、安全対策具体案の検証を行う。

現在のところ、テンタゲートの新設計に際して動的安全設計基準が全くない状態

である。そこで、第三に、本調査研究で得られた結果を総括する形で動的安全設計基準を作成する。

## 3. 研究の方法

### (1)実用テンタゲートの動的不安定性の計測と安全対策

実用されているテンタゲートでは、スキンプレート両サイドの水密ゴムやワイヤーの弾性範囲内で自励的定常振動が起こっているものと考えられる。水門メーカーおよびダム管理者らの協力を得て、振動発生時の状況について、詳しく情報収集を行い、実用テンタゲートの自励的定常振動の計測を行う。さらに、研究代表者らが以前から提案している鋼棒切断加振法により、流水中で巨大なゲートを加振し、そのときのゲートの振動応答を計測する。その結果にこれまでの理論解析を適用し、実用テンタゲートの動的安定性を判断する。動的に不安定であることが確認されたゲートについては、その自励的定常振動に対する安全対策手法を検討する。

### (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、フォルソンダム・テンタゲートの1/30スケールの二次元モデルと1/20スケールの三次元モデル、1/13スケールの三次元モデルを用いた実験を行い、複合発散振動を詳しく計測する。1/13スケールの三次元モデル実験には、大阪電気通信大学・工学部・石井徳章教授の協力を得て、大阪電気通信大学に設置されている大形循環水槽およびモデルゲートを使用させていただき予定である。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正確に計測し、非線形効果を理論解析する際の主要な非線形特性を明らかにする。非線形効果が支配的となる自励的定常振動を再現することができないような場合には、適宜、小形モデルを用いた強制振動実験を実施し、自励的定常振動を引き起す非線形効果のうち、影響が大きい要因を明らかにする。

### (3)理論解析

テンタ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場合の理論解析を行う。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。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、実用大形テンタゲートに適合した理論解析法について検討する。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予定である。

#### 4. 研究成果

(1) 米国・カリフォルニア州で実用されているテナタゲートについて振動の実地調査を行った。実験は、総質量約 77 トンのテナタゲートを対象に、大阪電気通信大学石井徳章教授、California Department of Water Resources、US Army Corps of Engineers の協力を得て実施した。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。鋼棒切断加振法により、流水中で巨大なゲートを加振し、そのときのゲートの振動応答を計測した。解析の結果、研究代表者らが導いた自励振動発生のための初期変位量(摩擦の閾値を超える初期変位量)に関する解析の検証を行うことができた。さらに、動的安定/不安定の判別に関する理論解析法の検証を行うこともできた。それらの結果より、図 1 に示すように、対象ゲートが不安定に陥る水位と開度の関係を示し、ゲート操作による不安定回避の方法を提案した。

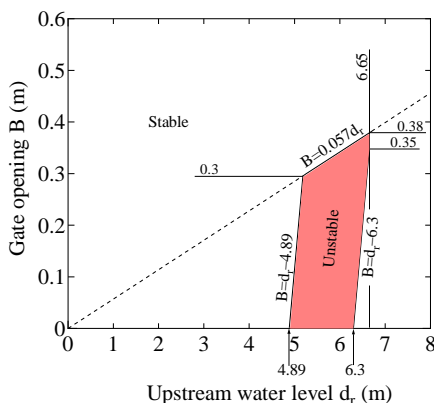


図 1 動的不安定発生域

(2) テンタ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。ゲートのトラニオンピンまわりの振動数を変化させ、微小開度での振動挙動を計測したところ、スキンプレートの流水方向振動が主体の自励振動と、ゲート全体のトラニオンピンまわり振動が主体の自励振動を確認することができた。実験データから求めた流体発振比が理論解析の結果とよく一致することも確認できた。さらに、ワイヤーロープ(ばね)の非線形性が自励振動特性におよぼす影響を検討した。さらに、せき板両サイドの水密ゴムの摩擦の影響につ

いて検討した。その結果、図 2 に示しているように、摩擦がある場合、初期加振力が摩擦の閾値を越えた場合には、非常に激しい自励振動が発生することが確認できた。

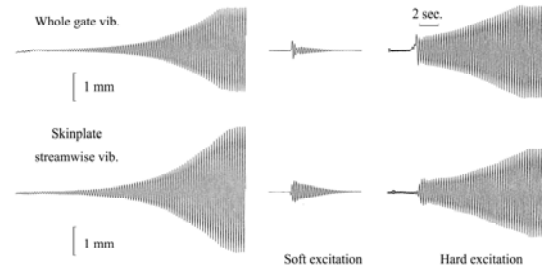


図 2 自励振動特性におよぼす摩擦の影響

(3) テンタ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、実用大形テナタ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はたっていないが、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、解析の途中である。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、実用テナタゲートの動的不安定に関する解析が可能となる。

研究代表者らの近年の研究においてテナタゲートの流体関連振動問題に対する理論解析法を確立し、そのモデルおよび実用テナタゲートを用いた実験による検証を終えており、それらの研究成果を実用大形テナタゲートの安全対策に応用する段階に直面しており、本研究が第一回の応用研究という重要な位置付けを占めている。テナタゲートのような土木装置の動力学特性に関する流体力学的かつ機械力学的見地からの研究は極めて少なく、国内外においてほとんど行われていない。それゆえ、本研究の成果が土木工学と機械工学の両分野において寄与するところは非常に大きいものと考えられる。

#### 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 1 件)

- ① 石井徳章、阿南景子、巻幡敏秋、奥達也、大原健史：我国におけるテナゲートの崩壊事故、構造工学論文集、Vol.53A、pp.589-596、2007、査読有

〔学会発表〕（計5件）

- ① Anami, K., Ishii, N., Knisely, C. W., Oku, T.: Field Measurement of Dynamic Instability of A 50-Ton Tainter-Gate, Proc. of 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2007- 26543 (CD-ROM), ISBN 0-7918-3804-8, San Antonio, Texas, USA, 2007, 査読有
- ② 阿南景子・石井徳章・巻幡敏秋・奥達也・谷野真吾・紺屋佳宏・前川知寛, ダム利水放流設備の副ゲート用空気弁の自励振動: 日本機械学会機械力学・計測制御講演会CD-ROM論文集, No.07-8, 論文No. 819, 2007, 査読無
- ③ 阿南景子・石井徳章・寺川直人・奥達也・巻幡敏秋・紺屋佳宏, 大形テナゲートの複合発散振動に関する3次元モデル実験(ゲート全体のトラニオンピン周りの振動に同期した場合): 日本機械学会機械力学・計測制御講演会CD-ROM論文集, No.07-8, 論文No. 820, 2007, 査読無
- ④ Ishii, N., Anami, K., Oku, T., Makihata, T., Knisely, C.W.: Analogous Tainter-Gate Failures in Japan and USA, Proc. of the 9th International Conference on Flow- Induced Vibration, 9th International Conference on Flow-Induced Vibration, pp.569-574, 2008, 査読有
- ⑤ Ishii, N., Anami, K., Knisely, C.W., Field Testing of the Dynamic Stability of the Poe Power Dam Tainter-Gates, Workshop on Dynamic Stability of Poe Power Dam, 2008, 査読無

## 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