

平成 21 年 6 月 19 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18404007  
 研究課題名(和文) 米国で実用されている大形テンタゲートの動的不安定に関する実地調査と安全対策の提案  
 研究課題名(英文) Field Vibration Test for Dynamic Instability of Tainter gate in USA, and countermeasures for the Dynamic Stability  
 研究代表者  
 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

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、米国で実用されている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・連携研究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表現することを試みた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2007年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：機械力学 流体関連振動 自励振動 連成振動 複合振動 ゲート  
 テンタゲート ラジアルゲート

## 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

の研究も研究代表者らによって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ので、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・テンタゲートは、スキンプレーットの「流水方向曲げ振動」とトランニオンピン周りの「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明らかにした。この強烈な自励振動を理論的に解明し、ゲートの動的不安定特性を導き出した。このような強烈な自励振動が生じることを、「2次元モデル実験」および「大形3次元モデル実験」で実証している。

これらの結果を応用し、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ており、さらに、トランニオンピンとスキンプレーッ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フォルソン・テンタゲートの動的不安定を長年に渡って抑制していたこと、崩壊時にはその減衰効果を上回る初期変位 8.5 mm がスキンプレーッ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たこと、スキンプレーット上下動が 11.9 mm に達したときにボルトが破断し始めたことなどをすべて定量的に解明している。

この種の自励振動はスキンプレーットの幾何中心がトラン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

研究代表者らが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、および、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、3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。振動実地調査と検証実験は米国連邦政府内務省 USBR との共同研究として実施する計画である。

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)米国で実用されている大形テンタゲートの振動実地調査

米国カリフォルニア州で実用されている大形テンタゲートを対象に、振動実地調査を行う。

巨大な水圧を支えているトランニオンピン部分やスキンプレーット両端の水密ゴム部分での機械的摩擦減衰効果のために、巨大なテンタゲートは通常運転状態では振動しない。摩擦の閾値を越えるような初期加振が与えられると動的不安定なテンタゲートでは振動が一举に表面化してくることはもちろんである。そこで、今回の振動実地調査では単純に流水時の振動計測を行うだけではなく、巨大なゲートを鋼棒切断によって危険の伴わない程度で弱く加振をする。それによって比較的大きな減衰振動を観測できるので、固有振動数や振動モードなどの固有振動特性を正確に特定でき、動的安定・不安定を正確に判定できる。このような方法で正確な振動実地調査が可能であることはすでに国内での実地調査で確認済みであり、その結果については国際会議 FIV2004(Paris)でも発表している。

ゲート本体の構造的な振動モードを特定するために、ゲートの振動加速度応答を多点で同時計測する。得られた計測データ

については、周波数の分析、減衰・発振比の分析、振動モードの分析を詳細に行う。

### (2) 動的安定・不安定の判定

振動実地調査によって得られた上下固有振動数、流水方向固有振動数、減衰比、振動モードと流体関連振動の理論解析法とを用いて大形テナゲートの動的安定・不安定を判定する。

### (3) 自励振動が発生する初期変位の算定

動的に強不安定のテナゲートについては、どの程度の初期変位が与えられれば自励振動が引き起こされるかを算定する。これは実測された減衰比のデータと理論解析によって得られる不安定特性図から正確に算定することが可能である。

### (4) 崩壊する振動振幅の予測

理論解析法を適用すれば、振動振幅に対してどの程度の巨大な動水圧がスキンプレートに作用するかを算定できる。それに対してテナゲートが強度的に耐えられるか否かは FEM 解析法を利用することによってシミュレーションできる。このような方法で自励振動によってテナゲートが崩壊する振動振幅を予測する。

### (5) 動的安全対策の提案

理論解析法を用いて危険な自励振動発生を防ぐためにはどの程度の減衰器を取り付ければよいかを算定し、FEM 解析を併用することによってゲートのどの部分を補強すればよいかを特定する。安全対策の具体案については、3次元モデルゲートを製作して検証する。

## 4. 研究成果

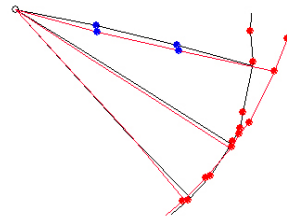
(1) 米国カリフォルニア州の Thermalito Diversion Dam および Poe Power Dam で実用されている大形テナゲートを対象に、振動実地調査を行った。前者は総質量が 24 トン、後者は総質量が 77 トンの大形テナゲートである。

鋼棒切断加振法により、流水中で巨大なゲートを危険の伴わない程度に加振し、そのときの減衰振動の加速度応答を計測した。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、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。

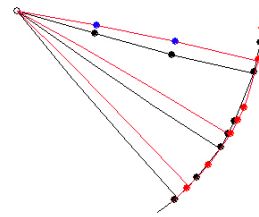
得られた計測データを分析し、テナゲートの水中での固有振動特性(固有振動数、減衰・発振比、振動モード)を明らかにした。

いずれのゲートの場合にも、図 1 に示す

ような、スキンプレートの流水方向の回転的な曲げ振動とゲート全体のトランソンプン周り剛体振動の 2 つの固有振動を持つことが確認できた。



(a)スキンプレートの曲げ振動



(b)トランソンプン周り剛体振動

図 1 Poe dam gate で確認された固有振動

(2) 振動実地調査によって得られたゲートの固有振動特性に、これまでに確立した流体関連振動の理論解析法を適用し、大形テナゲートの動的安定判別を行った。いずれのゲートも実験を行った水位では動的に安定であることが確認できた。さらに、上流側水位を変化させた場合についても同様の理論解析を行い、図 2 に示しているように、動的不安定となる水位と開度の関係を明らかにした。

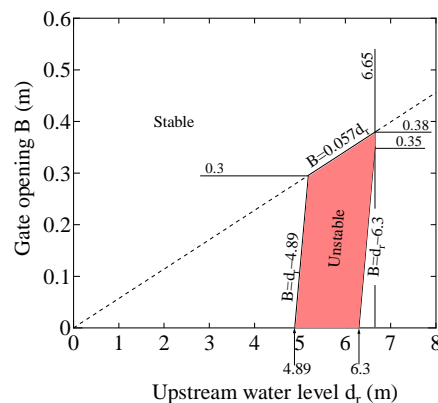


図 2 動的不安定発生域

(3) 振動実地調査で得られた結果と理論解析を用いて、どの程度の初期変位が与えられれば、本質的な動的不安定が表面化するのかを算定した。

(4) 理論解析と FEM 解析を併用し、テナゲートが構造的に破壊するにはどの程度の力が働く必要があるのかを解析した。ト

ラニオンピンやスキンプレート両サイドのクーロン摩擦の影響も考慮に入れた上で、テナゲートが崩壊に至る振動振幅を明らかにした。

(5) テナゲートを長期にわたり動的安定に使用するため、実地調査結果と理論解析を用いて、安全対策の具体案を提案した。図2に示したような動的不安定が発生する水位と開度の範囲でのゲートの開閉を行わないよう提案するだけでなく、ゲート巻上げワイヤーの剛性をどの様に変化させればよいか、どの程度の減衰器を取り付ければよいかを算定し提案した。これらの具体案については、3次元モデルゲートを製作して検証している。

#### 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, 石井徳章:「空調用圧縮機のリードバルブの流体関連振動」総合研究センター年報, 査読有, 第9号, pp.92-94, 2008-7.
- (2) 阿南景子, 石井徳章, 巻幡敏秋, 奥達也, 大原健史:「わが国におけるテナゲートの崩壊事故」, 構造工学論文集, 査読有, Vol.53A, pp.589-596, 2007-3.
- (3) 石井徳章, 巻幡敏秋, 阿南景子, 奥達也, 大原健史:「わが国におけるテナゲートの崩壊事故」, 大阪電気通信大学研究論集(自然科学編), 査読有, 第41号, pp.49-57, 2006-5.

[学会発表] (計 12 件)

- (1) 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 Int'l Conference on Flow- Induced Vibration, pp.569-574, Prague, Czech republic, 2008-7-1, 査読有.
- (2) Ishii, N., Anami, K., Knisely, C.W., Field Testing of the Dynamic Stability of the Poe Power Dam Tainter-Gates, submitted to Department of Water Resources, Sacramento, State of California, USA, , 2008-7-18.
- (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, 2007-9-27, 広島大学, 査読無.

- (4) 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, 2007-9-27, 広島大学, 査読無.
- (5) Ishii, N., Anami, K., Knisely, C.W., Todd, R.V.: "Field Testing of the Dynamic Stability of the Thermalito Diversion Dam Tainter-Gates", submitted to Department of Water Resources, Sacramento, State of California, USA, 2007-7-5.
- (6) 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, 2007-7-24, 査読有.
- (7) Anami, K., Ishii, N., Knisely, C. W., Oku, T.: "Full-Scale Verification of Coupled-Mode Excitation of A 50 Ton Tainter-Gate, Modernization and Optimization of Existing Dams and Reservoirs", Proc. of 27th Annual USSD Conference, pp.647- 658, Philadelphia, PA, USA, 2007-3-7, 査読有.
- (8) 阿南景子, 石井徳章, 奥達也, 佐々木智, 寺川直人:「大形テナゲートの複合発散振動に関する実験的研究(摩擦維持型動的安定の検討)」, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集, No.06-1, Vol.7, pp.57-58, 2006-9-19, 熊本大学, 査読無.
- (9) 阿南景子, 奥達也, 石井徳章, 谷野真吾, 紺屋佳宏:「テナゲートに作用する流量変化動水圧に関する実験的研究」, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集, No.06-1, Vol.7, pp.59-60, 2006-9 -19, 熊本大学, 査読無.
- (10) 阿南景子, 石井徳章, 奥達也, 佐々木智:「テナゲートにおける変動流量係数とその開度変化依存性」, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集, No.06-1, Vol.7, pp.61-62, 2006-9-17, 熊本大学, 査読無.
- (11) 阿南景子, 石井徳章, Knisely Charles W., 奥達也:「補強後のフォルソンダムテナゲートの動的不安定性と長期的安全運転指針」, 日本機械学会 2006 年

度年次大会講演論文集, No.06-1, Vol.7, pp.63-64, 2006-9-17, 熊本大学, 査読無.

- (12) 阿南景子, 石井徳章, 奥達也, 佐々木智.: 「テンタゲートにおける変動流量係数のLDV計測」, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会講演論文集, No.060-2, pp.139-140, 2006-9-17, 熊本大学, 査読無.
- (13) Anami, K., Ishii, N., Knisely, C. W., Todd, R.V., Oku, T.: “Vibration Tests with a 1/13-Scaled 3D Model of Folsom Dam Tainter-Gate and Its Prediction by Theory”, Proc. of ASME 6th International Symposium on FSI, AE & FIV+N, Vol. 4, pp.1127-1134, PVP2006-ICPVT- 11- 93917 (CD-ROM), Vancouver, Canada, 2006-7-27, 査読有.
- (14) Anami, K., Ishii, N., Knisely, C. W., Todd, R.V., Oku, T.: “Vibration Tests with A 1/13-Scaled 3D Model of Folsom Dam Tainter-gate”, Proc. of Hydro Vision 2006 (CD-ROM), No.179, Portland, Oregon, USA, 2006-7-31, 査読有.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

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

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

阿南 景子 (ANAMI KEIKO)  
足利工業大学・工学部・講師  
研究者番号：30346077