



## Nagoya City University Academic Repository

学位の種類	博士（芸術工学）
報告番号	甲第1665号
学位記番号	第17号
氏名	川瀬 みなみ
授与年月日	平成30年11月2日
学位論文の題名	保存を目的とした既存灯台の耐震性評価
論文審査担当者	主査： 青木 孝義 副査： 溝口 正人, 張 景耀

# 保存を目的とした既存灯台の耐震性評価

Seismic performance evaluation for preserving existing lighthouses

C155801 川瀬 みなみ

(主査 青木孝義 教授 副査 張景耀 准教授)  
(副査 溝口正人 教授 (審査委員長) )

## 第 1 章 序論

### 1.1 研究目的とその意義

人口減少および財政制約が顕在化している日本では、社会基盤施設（以下、施設という）の高齢化が進み、その維持管理・更新が大きな課題となっている。また、近代化の発展を支えてきた施設は、文化的・景観的な価値付けが進み、近代化（産業）遺産や景観資源として後世へ継承すべき財ともなっており、現地で使い続けていくための保存手法の確立が切望されている。

本研究で取り上げる既存灯台（図 1）も、そのような施設のひとつであり、既存灯台を使い続けるためには、耐震性確保が必要不可欠である。しかし、既存灯台の耐震性評価手法は、建築物および煙突の手法を準用したものであり、地震時に共振しやすい一次固有周期を精度良く推定することが重要であるにもかかわらず、現状は実証性のある推定式は確立されていない。また、地震時における建造物の揺れを予測するためには、固有周期や減衰定数の振幅依存性を考慮する必要があるが、既存灯台の地震時挙動を実測した事例はない。さらに、既存灯台の損傷の有無や補強効果の評価指標として固有周期を用いるためには、その日常的な変動の影響を把握しておく必要があるが、既存灯台の静的・動的特性を長期観測した事例はない。

以上を背景として、本論文では、既存灯台の耐震性評価に必要な既存灯台の I) 一次固有周期推定式の高精度化、II) 地震時挙動の解明、III) 静的・動的特性の変動の解明、の 3 つの課題の解決を目的としている。

### 1.2 論文構成

本論文は、7 章で構成されている。

第 1 章では、灯台の設計基準の変遷、既往研究を整理して本研究の学術的位置付けを明らかにし、灯台の耐震



(a) 塩屋埼灯台 (b) 友ヶ島灯台

図 1 既存灯台の活用状況

(友ヶ島灯台の出典: <http://www.sankei.com/photo/story/news/170527/sty1705270006-n1.html>(最終アクセス 2018.6.14))

性評価に関する前記 3 つの課題を抽出している。

第 2 章では、様々な構造形式をもつ灯台の地震被害を分析することで、検討対象とする灯台の竣工年代と構造種別を決定し、被害の特徴と要因を明らかにしている。第 3 章では、各種振動実験結果を比較することで、既存灯台の振動特性推定法として特別な加振源を必要としない常時微動測定が妥当であることを明らかにしている。

第 4 章では、既往の研究と常時微動測定結果に基づき、既存灯台の構造諸元が一次固有周期に与える影響を検討し、構造種別ごとの単純でより精度の高い既存灯台の一次固有周期推定式を提案している（課題 I）。第 5 章では、鹿嶋灯台の強震観測結果から一次固有振動数（一次固有周期の逆数）と一次減衰定数の地震時挙動を明らかにしている（課題 II）。第 6 章では、鹿嶋灯台の静的・動的特性の長期観測結果から日常的な変動の定性的・定量的傾向を明らかにすることで、一次固有周期推定式に含まれる測定時期や時間帯による影響を明らかにし、耐震補強工事が行われた既存灯台の補強工事前後における一次固有振動数の変化から、その補強効果を検証している（課題 III）。

第 7 章では、以上の成果を踏まえて既存灯台の耐震性評価としてまとめ、今後の課題に言及している。

## 第2章 既存灯台の地震被害

地震被害を受けた既存灯台 42 基の竣工年、構造種別と特徴を整理・分析した結果、すべて「航路標識構造物設計基準・同解説」<sup>1)~6)</sup>の制定・改正の変遷(表 1)に示す第 1 期以前に竣工したものであること、煉瓦造 8 基、石造 7 基、コンクリート造(以下、C 造という) 4 基、鉄筋コンクリート造(以下、RC 造という) 14 基、その他鉄骨造など 9 基であることが分かった。この結果に基づき、本研究で検討対象とする既存灯台は、第 1 期以前(1996 年以前)に竣工した煉瓦造、石造、C 造と RC 造とした。

灯塔に被害が生じた事例には、図 2 に示すように付属舎との接続部分や出入口上部で周状にひび割れ・亀裂が生じた場合が多く、これらの発生位置が一次の揺れにおいて曲げによる伸びが大きくなる位置に等しいことから、一次の揺れによる被害であると考えられる。このことから、既存灯台の耐震性評価において一次固有周期の把握は重要であると言える。

## 第3章 既存灯台の振動特性の推定方法に関する検討

宇品灯台(1971 年竣工、RC 造)を対象に常時微動測定と強制振動実験および自由振動実験を行った。宇品灯台の振動測定点を図 3 に、振動実験結果から推定された宇品灯台の固有振動数を表 2 に示す。これより、振幅が大きくなるほど固有振動数が低下するという振幅依存性はあるものの、常時微動測定により推定された一次から三次の固有振動数および振動モードが、強制振動実験および自由振動実験により推定された結果と概ね同じであることが示された。よって、常時微動測定は既存灯台の固有振動数および固有振動モードを推定するための振動実験方法として妥当であると判断し、以降の振動実験方法には常時微動測定を採用した。また、常時微動測定により得られた加速度波形の解析方法は、周波数領域によるものとした。

## 第4章 既存灯台の一次固有周期推定式に関する検討

既往の設計用一次固有周期推定式には、式(1)と式(2)がある。しかし、式(1)は、せん断系建築物の設計用一次固有周期略算式であり、構造的特徴が異なる既存灯台の一次固有周期を推定する式として適当ではないと考えら

れる。また、式(2)は、小原ら<sup>8)</sup>が提案した式を SI 単位系に換算した式であるが、パラメータが多い上に実験基数が少なく、実証性に乏しい。

$$T_{(2)} = (0.02 + 0.01 \cdot \alpha) \cdot H \quad (1)$$

$$T_{(3)} = 0.06 \cdot \sqrt{\gamma/E} \cdot (H^2/D) + 0.037 \quad (2)$$

ここで、 $T_{(2)}$ は第 2 期(1997~2016 年)の、 $T_{(3)}$ は第 3 期(2017 年以降)の基準における設計用一次固有周期(sec)、 $\alpha$ は構造物のうち大部分が鉄骨造などである階の高さの合計の  $H$  に対する比、 $H$  は躯体高さ(m)、 $\gamma$  は単位体積重量( $\text{kN/m}^3$ )、 $E$  はヤング係数( $\text{N/mm}^2$ )、 $D$  は灯塔下端の外径(m)である。

そこで、煉瓦造 4 基、石造 7 基、RC 造 14 基の振動実験結果から、既存灯台の構造諸元が一次固有周期に与える影響を検討し、回帰分析によって実証性のある既存灯台の一次固有周期推定式を検討した。

まず、図 4 に示すパラメータで構成される 8 個の構

表 1 航路標識設計基準・同解説の変遷<sup>1)~6)</sup>

年代	必要保有水平耐力の算出方法	
第 1 期	1996 年以前	建築基準法における震度法
第 2 期	1997 年から 2016 年	建築基準法における修正震度法
第 3 期	2017 年以降	煙突構造設計指針 <sup>7)</sup> におけるモーメント係数法



図 2 大津岬灯台(RC 造)の地震被害状況

(出典:<http://takasannoibaraki.blog58.fc2.com/blog-category-25.html> (最終アクセス 2018.6.14))

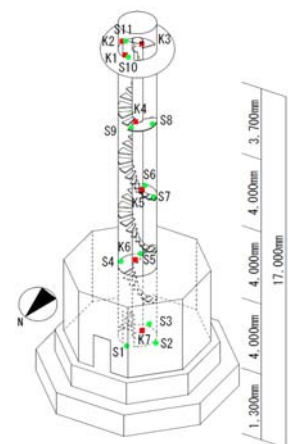


図 3 宇品灯台(RC 造)の振動測定点

(S1~11, K1~7 は加速度計の設置位置である。)

表 2 推定された宇品灯台の固有振動数(南北方向)

		固有振動数(Hz)		
		1 次	2 次	3 次
常時微動測定	地盤-建物連成系	3.22*	23.29	54.44
	スウェイ固定系	3.37	23.29	54.44
強制振動実験	地盤-建物連成系	3.17	23.14	54.15
自由振動実験	地盤-建物連成系	3.20	—	—

\* 北東-南西方向の振動

造諸元を既存灯台の一次固有周期に影響を与える構造諸元とし、これらと一次固有周期  $T$  との関係を相関係数から検討した。相関係数マトリクス (表 3) より、構造諸元は互いに相関関係にあることが明らかとなった。回帰分析において多重共線性による問題を避けるため、一次固有周期との相関係数が最も大きかった躯体高さ  $H$  のみを説明変数として採用して回帰分析を行った結果、回帰推定式(3)を得た。

$$T = \begin{cases} 0.019 \cdot H + 0.007 & (\text{煉瓦造灯台}) \\ 0.014 \cdot H + 0.015 & (\text{石造灯台}) \\ 0.013 \cdot H & (\text{RC造灯台}) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $T$  は既存灯台の一次固有周期 (sec)、 $H$  は躯体高さ (m) である。

入口直交方向の一次固有周期の実測値と既往の設計用一次固有周期推定式(1)、(2)および回帰推定式(3)による一次固有周期の推定値との関係を図 5 に示す。一次固有周期の実測値と各式による推定値との残差平方和は、回帰推定式(3)が最も小さく、最も高精度に既存灯台の一次固有周期を推定できることが示された。さらに、回帰推定式(3)に用いるパラメータは躯体高さ  $H$  のみであり、非常に簡単な式である。ここで、一次固有周期の実測値と回帰推定式(3)およびその 95% 予測区間を図 6 に示す。これより、今後常時微動測定によって実測される既存灯台の一次固有周期のうち、95% は回帰推定式(3)の 95% 予測区間内の値を採ることが推測される。

なお、宇品灯台 (RC 造) の一次固有周期の実測値は、回帰分析の標本から棄却している。これは、基礎部あるいは灯塔の損傷、軟弱地盤 (N 値が 5 程度) との相互作用などにより、他の既存灯台と比べて宇品灯台の一次固有周期が長くなっている可能性があるためである。

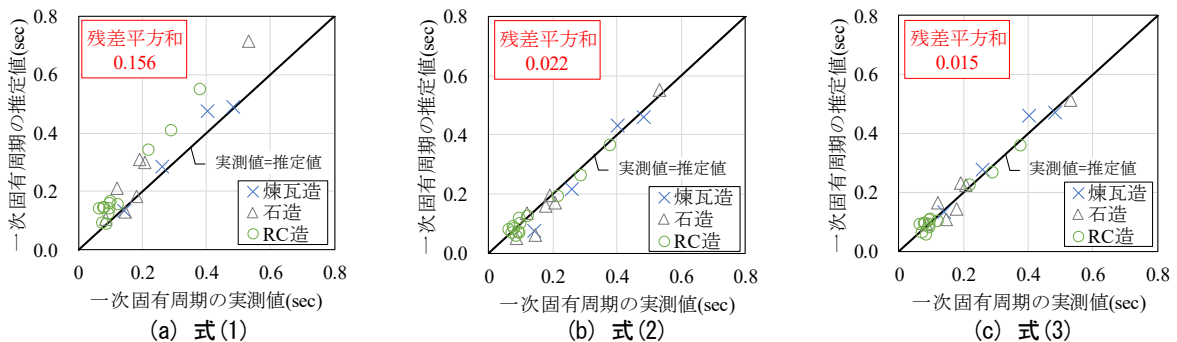


図 5 入口直交方向の一次固有周期の実測値と推定値との関係

る。このような状況にある宇品灯台の一次固有周期の実測値は、図 6(c) に示すように回帰推定式(3)の 95% 予測区間外にあることが分かった。このことは、回帰推定式(3)が簡単でより精度よく既存灯台の一次固有周期を推定できるのみならず、その健全性を振動特性の観点から評価できる可能性を示唆している。

### 第 5 章 強震観測に基づく既存灯台の地震時挙動に関する検討

鹿嶋灯台では、2015 年 3 月 18 日から 2018 年 5 月 17 日にわたり、図 7 に示す箇所での静的特性としてひび割

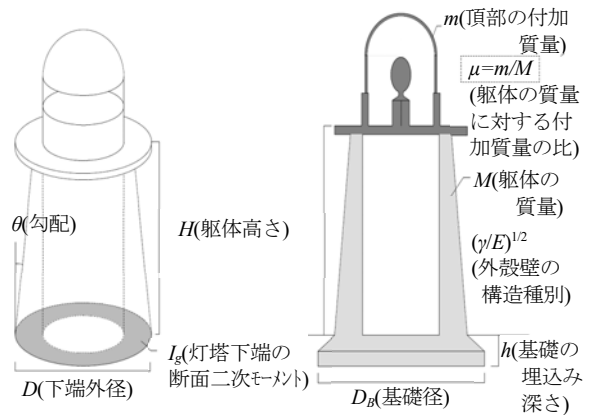


図 4 既存灯台のパラメータ

表 3 各要因間の相関係数マトリクス

	$T$	$H$	$(\gamma/E)^{1/2}$	$H/D$	$\theta$	$I_g$	$h/D_B$	$\mu$
$H$	0.96	—						
$(\gamma/E)^{1/2}$	0.45	0.31	—					
$H/D$	0.36	0.43	-0.45	—				
$\theta$	0.14	0.15	0.32	-0.19	—			
$I_g$	0.70	0.71	0.64	-0.15	0.49	—		
$h/D_B$	-0.39	-0.35	-0.40	0.19	0.12	-0.37	—	
$\mu$	-0.56	-0.54	-0.47	-0.16	-0.21	-0.37	0.15	—
$(\lambda/\lambda_0)^2$	0.59	0.56	0.49	0.18	0.18	0.39	-0.17	-0.99

ここで、 $T$  は既存灯台の一次固有周期 (sec)、 $(\lambda/\lambda_0)^2$  は付加質量の影響による固有周期の変化度合い、■は相関係数の絶対値が 0.7 以上、かつ、5%水準で有意である場合、■は相関係数の絶対値が 0.2 以上 0.7 未満、かつ、5%水準で有意である場合である。その他の変数は図 4 のとおりである。

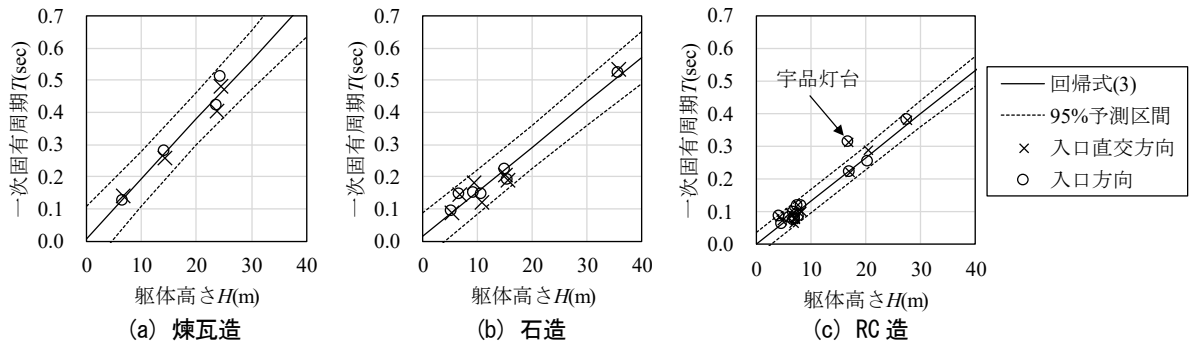


図6 一次固有周期の実測値と回帰推定式(3)による推定値との関係

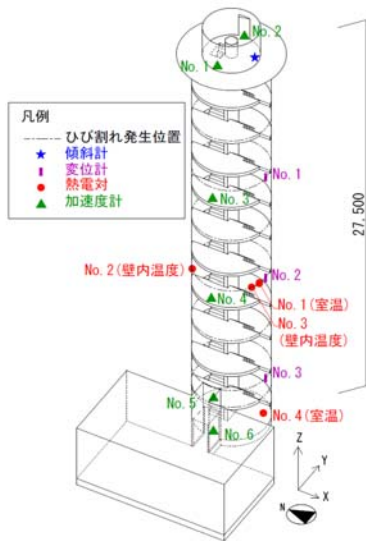
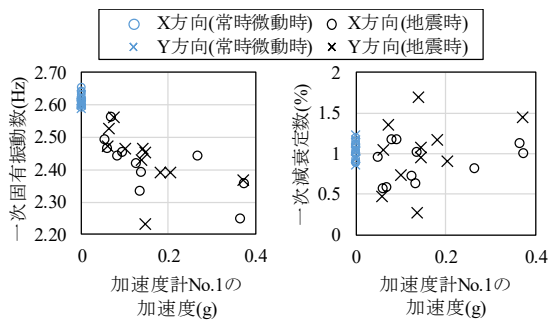


図7 鹿嶋灯台の観測点



(a) 一次固有振動数 (b) 一次減衰定数

図8 鹿嶋灯台の振動特性と

灯室(加速度計 No. 1)の加速度との関係

れ幅、傾斜角、温度を、動的特性として加速度を観測している。

強震観測網 K-NET (観測点: IBR018) で計測震度 3.0 (気象庁震度階 3) 以上が観測された地震 11 波を対象に、地震発生直前と地震時における一次固有振動数、一次減衰定数と灯室(加速度計 No.1)の加速度との関係をそれぞれ図 8(a)、図 8(b)に示す。なお、地震発生直前の加速度は 1 時間の RMS 値、地震時における加速度は絶対加速度の最大値とした。一次固有振動数は、地震の継続時

間に合わせたフレームサイズで求めたフーリエスペクトルから推定した。一次減衰定数は、常時微動時においては RD 法<sup>9)</sup>、地震時においては 1FL (加速度計 No.6) に対する灯室(加速度計 No.1)の伝達関数を 1 自由度系の伝達関数でカーブフィットしたもの<sup>9)</sup>から推定した。

一次固有振動数は、加速度が大きいほど低下するといった振幅依存性があり、地震時には地震発生直前に比べて 1~15%低下することが明らかとなった。一方、一次減衰定数は、明確な振幅依存性が見られず、0.2~2.0%でばらついている。小原ら<sup>8)</sup>は、常時微動測定と自由振動実験による既存灯台の一次減衰定数が 1~4%であったことから、大地震時には 2~5%の一次減衰定数が妥当であると言及しているが、図 8(b)によれば、振動振幅の増大に伴い一次減衰定数が増加するという傾向は見られなかった。

## 第 6 章 長期観測に基づく既存灯台の静的・動的特性に関する検討と補強効果

### 6.1 静的・動的特性の変動の傾向および大きさ

ここでは、鹿嶋灯台の傾斜角および一次固有振動数についてのみ詳しく述べる。地震時および強風時のデータを除外するため、1FL に設置した加速度計 No.6 で測定された加速度 RMS 値が、観測期間全体における平均値 + 標準偏差よりも大きい場合のデータを削除している。

傾斜角の観測データを XY 平面上にプロットした図を図 9 に、時系列データを図 10 に示す。傾斜角は、日変動を含みながら夏期に南・東側へ、冬期に北・西側へ傾くことが分かった。冬期は太陽高度が低いため南側壁面への日照時間が長く、北側壁面よりも南側壁面の方が高温となることで、南側が膨張して北側へ傾くと考えられる。また、観測期間全体を通して傾斜角は

徐々に西側へ推移していることが分かった。灯塔南面のひび割れ幅(変位計 No.1~3)の進展がないことから基礎地盤の沈下が要因のひとつとして考えられるが、今後の経過観察により明らかにする必要がある。

次に、X、Y 方向の一次固有振動数の観測データを図 11 に示す。一次固有振動数は、各方向ともに日変動を含みながら夏期に低く、冬期に高くなっていることが分かった。この変動の要因として、日射の影響や振幅依存性、温度応力の発生などが考えられるが、解明には至っておらず継続的な観測が必要である。また、計測震度 3.0 以上の地震(気象庁震度階 3~4)が観測されたタイミングを図 11 に▲印で示す。地震により一次固有振動数の一時的な低下は発生しているものの、数週間から 1 年間かけて徐々に回復していること、傾斜角およびひび割れ幅の急激な変化がないこと、一次固有振動数の値が第 4 章で提案した回帰推定式(3)の 95%予測区間(2.47Hz から 3.06Hz の間)から外れていないことから、地震による損傷は受けていないと考えられる。また、3 年

間にわたる一次固有振動数の変動が回帰推定式(3)の 95%予測区間内に収まっていることから、回帰推定式(3)に含まれる測定時期や時間帯による影響は小さいと考えられる。

## 6.2 測定時期や時間帯による影響を考慮した補強効果の検証

補強工事前後における一次固有振動数の変化から、その補強効果を検証するためには、一次固有振動数の日常的な変動の影響を定量的に把握する必要がある。そこで、鹿嶋灯台の一次固有振動数の測定時期および時間帯による変動の大きさを変動係数により検討した。

測定日ごとの一次固有振動数の変動係数  $\epsilon_f$  を式(4)により求めた結果、X、Y 方向の一次固有振動数の変動係数は 1.0%以下、標準偏差は 0.03Hz 以下でほとんどばらついていないことが明らかとなった。

$$\epsilon_f = \frac{f_\sigma}{f_\mu} \cdot 100 \quad (4)$$

$$f_\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (f_i - f_\mu)^2}$$

ここで、 $\epsilon_f$  は測定日ごとの一次固有振動数の変動係数(%)、 $f_\sigma$  は測定日ごとの一次固有振動数の標準偏差(Hz)、 $f_\mu$  は測定日ごとの一次固有振動数の平均値(Hz)、 $f_i$  は  $i$  時における一次固有振動数(Hz)である。

また、同様にして観測期間全体の一次固有振動数の変動係数および標準偏差を求めた。X、Y 方向の変動係数はそれぞれ 0.7%、0.6%、標準偏差はそれぞれ 0.019Hz、

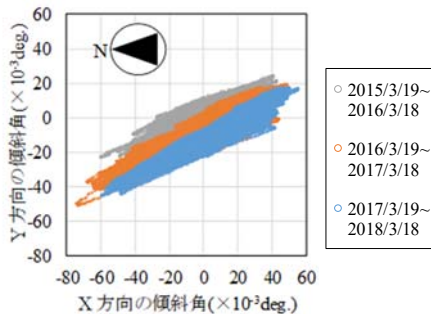


図 9 鹿嶋灯台の傾斜角の観測データ(XY 平面)

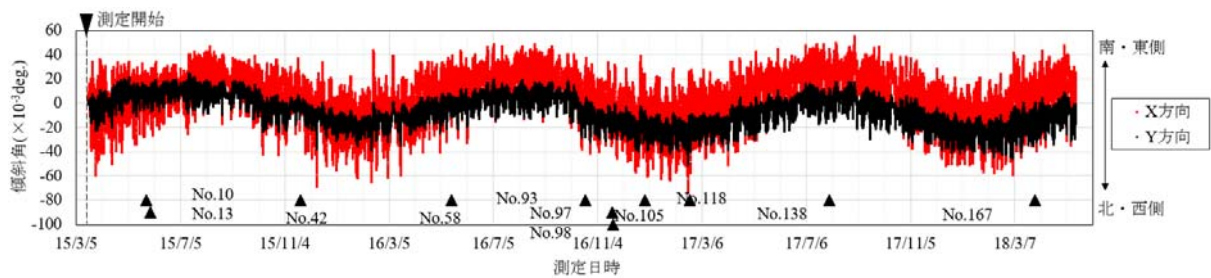


図 10 鹿嶋灯台の傾斜角の観測データ(▲印は、計測震度 3.0 以上の地震が観測されたタイミングである。)

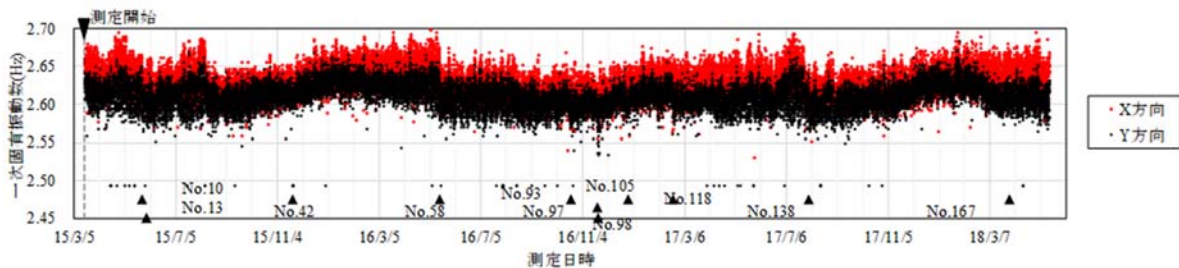


図 11 鹿嶋灯台の一次固有振動数の観測データ(▲印は、計測震度 3.0 以上の地震が観測されたタイミングである。)

0.017Hz であり、測定日ごとの一次固有振動数の変動係数および標準偏差と同程度であることが分かった。

以上のことから、鹿嶋灯台の一次固有振動数の変動係数は 1.0%以下で安定しており、変動係数 1%とすれば測定時期および時間帯による影響を無視できると考えられる。

次に、大王埼灯台（1927 年竣工、RC 造）を例にその補強効果を検討する。大王埼灯台の補強工事前後における一次固有振動数を表 4 に示す。補強工事前後に測定された一次固有振動数に変動係数 1%を考慮すれば、補強工事後における一次固有振動数の増加率は少なくとも 2.5%であると考えられ、補強工事前後で質量が変化していないと仮定すると、大王埼灯台の剛性の増加率は 105%と見積もることができる。以上のことから、測定時期および時間帯による影響を考慮しても、補強工事により大王埼灯台の剛性は増加したことが分かる。

## 第 7 章 結論

本論文では、航路標識として、国民的財産として重要な役割を担っている既存灯台の耐震性評価に必要となる 3 つの課題を実測データに基づいて検討した。得られた結論を以下に示す。

### I) 一次固有周期推定式の高精度化

煉瓦造灯台 4 基、石造灯台 7 基、RC 造灯台 14 基の既往の研究と振動実験結果に基づき、簡単でより高精度に既存灯台の一次固有周期を推定できる回帰推定式(3)を提案できた。さらに、回帰推定式(3)によって既存灯台の損傷の有無を評価できる可能性を示した。

### II) 地震時挙動の解明

約 3 年にわたる鹿嶋灯台の強震観測結果に基づき、常時微動時に対する地震時の一次固有振動数の低下率を定量的に示すことができた。一次減衰定数には振幅依存性が見られなかった。

### III) 静的・動的特性の変動の解明

約 3 年にわたる鹿嶋灯台の長期観測結果に基づき、静的・動的特性の日常的な変動の傾向を定性的・定量的に示すことができた。さらに、測定時期および時間帯による一次固有振動数の変動が、課題 I) で提案した回帰推定式(3)および一次固有振動数の変化に基づいた補強効果の検証に与える影響は小さいことを示した。

表 4 大王埼灯台の一次固有振動数<sup>8)</sup>

	補強工事前	補強工事後
振動実験実施年月	1982 年一月	2016 年 2 月
一次固有振動数 (入口方向)	4.58 Hz	4.79 Hz
測定時期および時間帯 による測定誤差 (変動係数 1%を考慮)	±0.05 Hz	±0.05 Hz

※ 大王埼灯台は、2004 年に炭素繊維シートによる巻き立て、基礎拡幅による補強工事が行われている。

以上の本研究の成果は、既存灯台を現地で使い続けるための保存手法を確立する上で明らかにすべき基本的な特徴である。なお、課題 II) と III) で明らかとなった知見は、本研究によって初めて示されたものであるが、1 基のみの結果であるため、観測対象を増やすことで精度を上げていきたい。今後は、本研究の成果を発展させて耐震性評価および補強を効率的に進めるための優先度を決定するツールとして耐震性が不足している可能性が高い既存灯台のスクリーニング（絞込み）手法を提案することで、既存灯台の保存に役立てたいと考えている。そのためには、地震時における既存灯台の揺れを簡単に予測できる算定式を検討すること、材料劣化が部材や建造物全体の揺れや耐力に及ぼす影響を検討することが今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 海上保安庁灯台部工務課：航路標識業務便覧、(制定年不明)
- 2) 海上保安庁灯台部工務課：航路標識構造物設計基準、1976.1
- 3) 海上保安庁灯台部工務課：航路標識構造物設計基準、1984.5
- 4) 海上保安庁灯台部工務課：航路標識構造物設計基準、1997.3
- 5) 海上保安庁交通部整備課：航路標識構造物設計基準、2004.3
- 6) 海上保安庁交通部整備課：航路標識構造物設計基準・同解説、2017.3
- 7) 日本建築学会：煙突構造設計指針、pp.60-61、2007.11
- 8) 小原ら：灯台の振動性状に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp.953-954、1983.9
- 9) 日本建築学会：建築物の減衰、278p.、2000.10

## 本論文に関する研究業績

- [1] 日高みなみ、佐藤大輔、青木孝義、高瀬剛：RC 造灯台の振動特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.2、pp.805-810、2014.7【第 3 章】
- [2] 日高みなみ、青木孝義：常時微動測定による灯台の振動特性推定、日本建築学会技術報告集、第 21 巻、第 47 号、pp.71-76、2015.2【第 3 章】
- [3] 日高みなみ、青木孝義：補強工法の違いによる RC 造灯台の振動特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No.2、pp.1315-1320、2015.7【第 6 章】
- [4] M. Hidaka and T. Aoki：Vibration characteristics of a brick lighthouse in Japan, Porto, REHAB2015, pp.725-736、2015(フルペーパー査読)【第 6 章】
- [5] 川瀬みなみ、青木孝義、佐藤大輔：航路標識構造物外壁の鉄筋腐食に関する実態調査、コンクリート工学年次論文集、Vol.39、No.2、pp.1213-1218、2017.7【附章】
- [6] 川瀬みなみ、青木孝義、佐藤大輔：灯台の静的・動的特性の長期観測—長期的変動 その 1—、日本建築学会技術報告集、第 24 巻、第 56 報、pp.69-74、2018.2【第 5 章、第 6 章】
- [7] 川瀬みなみ、青木孝義、張景耀、佐藤大輔：灯台の構造諸元と一次固有周期との関係に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 83 巻、第 745 号、pp.397-407、2018.3【第 4 章】

## 論文審査の結果の要旨

提出論文は、近代以降に出現し、航路標識として重要な役割を果たしている既存灯台の保存を目的に、その耐震性評価に関する一連の研究をまとめたもので、7章で構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的と方法について記述し、灯台の設計基準の変遷、既往研究の成果を整理し学術的位置付けをすることで、灯台の耐震性評価の意義を示すとともに、耐震性評価に関する三つの課題の抽出をしている。

第2章と第3章は考察の前提となる分析対象の特性と分析方法について整理したものである。第2章では、様々な構造形式をもつ既存灯台の構造的特徴を地震被害から明らかにし、第3章では、常時微動測定、強制振動実験および自由振動実験を比較することで、特別な加振源を必要としない常時微動測定が既存灯台の振動特性を推定する方法として妥当であることを明らかにしている。

第4章から第6章は第1章で抽出した三つの課題に対応した実証的な考察である。

第4章では、振動実験結果に基づき従来の設計用一次固有周期推定式の推定精度を明らかにするとともに、既存灯台の構造諸元が一次固有周期に与える影響を検討し、構造形式別の簡単でより精度の高い既存灯台の一次固有周期推定式を提案している。第5章では、既存灯台の強震観測結果から一次固有振動数と一次減衰定数の地震時挙動を明らかにしている。第6章では、既存灯台の静的・動的特性の長期観測結果から一次固有周期の変動を検討することで、一次固有周期推定式に含まれる測定時期や時間帯による影響を明らかにし、耐震補強工事が行われた既存灯台の補強工事前後における一次固有周期の変化から、その補強効果を検証している。

第7章では、以上の成果を踏まえて既存灯台の耐震性評価としてまとめ、今後の課題を指摘している。

以上のように、本研究は、近代以降の既存灯台の長寿命化、歴史的・文化的価値を継承するために必要となる耐震性評価の課題を抽出し、それらを実証的に解決することで既存灯台の保存を目指したもので、一次固有周期の簡単でより精度の高い推定式を提案するなど、芸術工学の実践的な成果を示すことで社会的な貢献に資するものとして高く評価できる。以上により、本申請論文は、博士（芸術工学）の学位授与論文に値するものと認められる。