

# 論文 補強工法の違いによる RC 造灯台の振動特性

日高 みなみ\*1・青木 孝義\*2

**要旨:** 航路標識として海の安全を守る重要施設である灯台は、台風や地震などの自然災害時においても機能し続けなければならないため、その耐震性が確保されていない場合には、耐震補強あるいは建て替えが必要となる。耐震診断時、あるいは耐震補強前には灯台の現状把握のための調査が行われているが、耐震補強後の検証が行われた例はない。そこで本稿では、鋼板による巻き立て工法が採用された灯台と補強されていない灯台の振動計測を実施することにより、振動性状の変化を推定した。その結果、補強工法の違いにより 2 次モードおよび 3 次モードの振動特性に変化が確認された。

**キーワード:** 灯台, 固有振動数, 振動モード, 補強工法, 鋼板巻き立て

## 1. はじめに

航路標識として海の安全を守る重要施設である灯台は、台風や地震などの自然災害時においても機能し続けなければならない。その耐震性が確保されていない場合には、耐震補強あるいは建て替えが必要となる。過去に採用された灯台の補強工法の例を表-1 に示す。表-1 に示した灯台のほとんどは明治・大正期に建設されており、歴史的な価値が高いことから、補修・補強にあたっては外観を変えないように、全周を他材料で巻き立てる工法が選定され、耐力や靱性の向上を図っている。このように、灯台の耐震補強工法としては、炭素繊維あるいは鉄筋コンクリート・鋼板などによる巻き立て工法が採用されることが多い。また、灯台が転倒する恐れがある場合には、基礎の拡幅を実施している<sup>1)</sup>。

これらの巻き立て工法を採用した場合、図-1 に示したように、巻き方の種類として①全高さを巻き立てる範囲とする方法、②下部のみ巻き立てる範囲とする方法、③等間隔に帯状に巻き立てる方法、の 3 通りが挙げられる。しかしながら、特に鉄筋コンクリートや鋼板による補強において②が採用された場合、灯台の管理を行う吏員の宿舎や設備機器室などの付属舎が併設された灯台と同様に、灯塔中腹部で剛性が急激に変化するため、地震時に応力が集中しやすくなることが懸念される。東日本大震災時においても、陸前江島灯台の灯塔の損傷は付属舎高さ付近に集中していた<sup>2)</sup>。耐震診断時、あるいは耐震補強前には灯台の現状把握のための調査が行われているが、耐震補強後の検証が行われた例はない。

以上を背景として、本稿では、RC 造灯台を対象とし、耐震補強工法の違いが振動特性（固有振動数や振動モードなど）に与える影響を把握することを目的とした。鋼板による巻き立て工法が採用された清水灯台（図-1②）と勝浦灯台（図-1③）の振動特性を耐震補強されてい

ない字品灯台<sup>3)</sup>と比較することにより、振動特性の変化を推定する。ただし、前者 2 基とも耐震診断時に固有周期の実測がなされていないため、耐震補強前の実際の固有周期は不明である。

表-1 灯台の耐震補強工法選定例<sup>1)</sup>

構造	採用された工法	灯台例
RC 造	鋼板巻き立て	清水灯台 (②) 勝浦灯台 (③)
	炭素繊維巻き立て	観音埼灯台 (③) 塩屋埼灯台 (②)
	鉄筋コンクリート巻き立て	舩倉島灯台 (②) 松前小島灯台 (①)
煉瓦造	PC 鋼棒巻き立て	御前埼灯台
	PC 巻き立て	犬吠埼灯台 (①)
	炭素繊維強化プラスチック成形板及び炭素繊維巻き立て	尻屋埼灯台 (①)
石造	アラミド繊維巻き立て	潮岬灯台 (①)
	炭素繊維巻き立て	神子元島灯台 (①)
	目地材取替	出雲日御碕灯台 美保関灯台 角島灯台
	目地樹脂注入	江崎灯台

※括弧内の数字は図-1 参照のこと

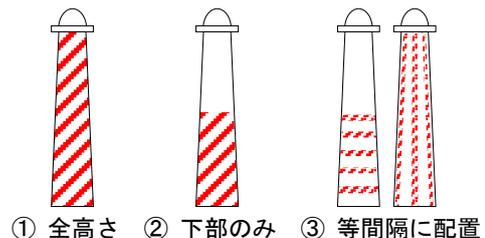


図-1 灯台の補強方法の種類

\*1 株式会社コンステック 技術研究所 (正会員)

\*2 名古屋市立大学大学院 芸術工学研究科教授 工博 (正会員)

## 2. 対象灯台の詳細

### 2.1 宇品灯台

宇品灯台は、1971年（昭和46年）に建設されたRC造の灯台である。2007年（平成19年）に耐震性確保のため灯台下部と付属舎がEXP.Jで分離された。躯体高さ17.00m、下端外径2.70m、下端壁厚は0.25mである。

塔内部は、鉄骨階段とRC造の踊り場・鋼製の塔芯により構成されている。概要を図-2(a)に示す。

### 2.2 清水灯台

清水灯台は、1912年（明治45年）に建設されたRC造の灯台である。1994年（平成6年）に灯塔保存のため、基礎拡幅と鋼板接着補強が実施された。また、転倒防止のため基礎の改良として杭が新設されている。躯体高さ14.10mのうちGL+5.64mまで厚さ6mmの鋼板が施工されている。下端外径は2.66m、下端壁厚は0.66mである。

塔内部は、鉄骨階段と木製の踊り場・鋼製の塔芯により構成されている。概要を図-2(b)に示す。

### 2.3 勝浦灯台

勝浦灯台は、1917年（大正6年）に建設されたRC造の灯台である。1986年（昭和61年）に地震によって生じたひび割れへの樹脂注入と灯塔への鋼板接着補強が実施された。躯体高さ15.85mのうちGL+1.80m、2.70m、3.90m、5.70m、7.80mの位置にそれぞれ幅400mm、厚さ4mmの鋼板が施工されている。下端外径は4.59m、下端壁厚は約1.10mである。

塔内部は、GL+9.68mまではRC造の螺旋階段・塔芯、それ以上は鉄骨階段とRC造の踊り場により構成されている。概要を図-2(c)に示す。

## 3. 実験概要

### 3.1 実験方法

地盤の常時微動計測には小型換振器（S社製：動電型速度計、水平2成分、上下1成分、測定周波数：1.4～30Hz）を用いた。灯台の躯体高さ以上離れ、周辺施設の影響を考慮した位置に設置した。サンプリング周波数は100Hzとした。

次に、灯台の基本的な振動特性である固有振動数と振動モードを把握するため、加速度センサを用いた常時微動計測を実施した。灯台の振動特性把握における常時微動計測の有用性については、すでに起振器による強制振動実験の結果から確認できている<sup>4)</sup>。

常時微動計測は、2種類の方式で実施した。三軸加速度センサ（K社製、計測範囲：±2,940gal、周波数応答：DC～1kHz、分解能：4 $\mu\text{m/s}^2$ ）7台（K1～K7）を使用した無線方式と、一軸加速度センサ（S社製、計測範囲：±2,942gal、周波数応答：DC～400Hz、分解能：0.000049m/s<sup>2</sup>rms以下）32台とアナログ入力モジュール（NI社製、分解能：24bit）による有線方式である。宇品灯台においては3軸に組み合わせた9台（S1～S7、S10、S11）と2軸に組み合わせた2台（S8、S9）を、他の2

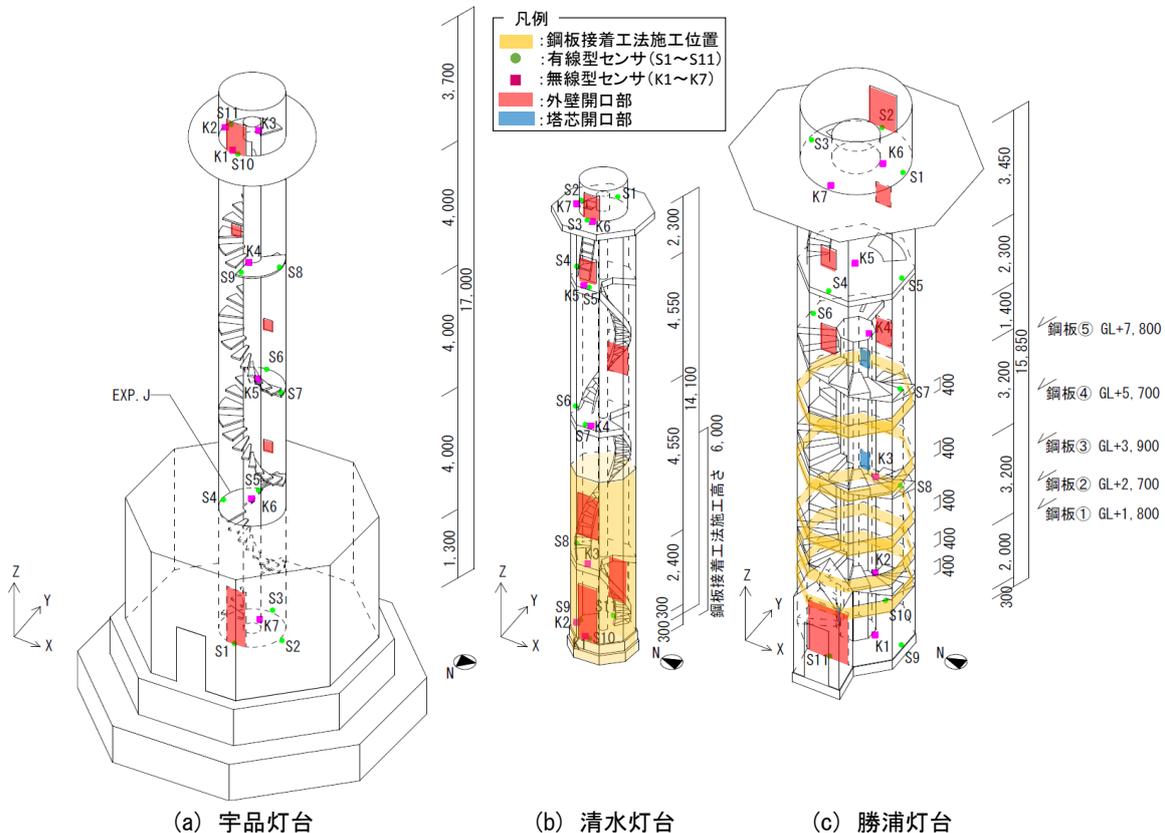


図-2 補強の概要とセンサ設置位置図

基においては3軸に組み合わせた10台(S1~S10)と2軸に組み合わせた1台(S11)を使用した。

全てのセンサは、開口部を有する軸に対して直交方向をX軸、平行方向をY軸、上下方向をZ軸として設置した。サンプリング周波数は200Hzとした。

### 3.2 計測位置

それぞれのセンサの設置位置を図-2に示す。また、4章の解析に使用するセンサ番号と高さレベル○FLの関係を表-2に示す。

## 4. 実験結果

### 4.1 地盤の振動特性

常時微動には様々な周期の波が含まれており、計測された波形を周期ごとの波の強さに分解し表したものをフーリエスペクトルという。常時微動の水平動と上下動のスペクトル比(H/Vスペクトル比)が表層地盤の増幅倍率や卓越振動数を示すことは広く知られており、簡易的に地震動の増幅特性の推定を行うことができる<sup>5)</sup>。

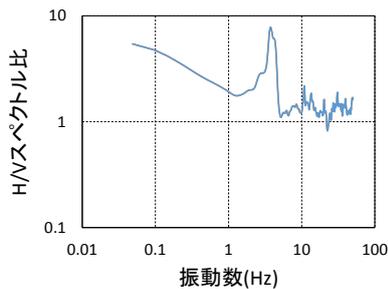
各灯台の地盤の振動特性であるH/Vスペクトル比を図-3に示す。ここでは、計測波形を2048点ずつに分割し、それぞれのデータを独立したデータと考えて平均(以下、アンサンブル平均という)してH/Vスペクトル比を求めた。なお、ハニング窓によるデータ補正を行い、スペクトルの平滑化にはバンド幅0.5HzのParzenウィンドウを用いた。解析対象としたデータは1時間分(360,000点)とし、50%ずつオーバーラップさせた。

これより、常時微動計測により推定される地盤種別<sup>6)</sup>は、それぞれ航路標識構造物設計基準<sup>7)</sup>において以下の通りであると考えられる。

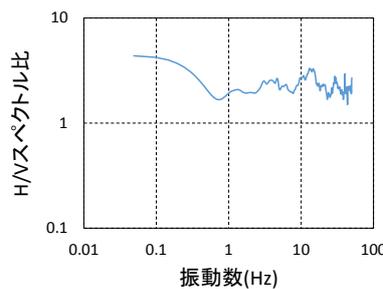
- a) 宇品灯台：第二種地盤(卓越振動数3.76Hz)
- b) 清水灯台：第二種地盤(卓越振動数4.64Hz)
- c) 勝浦灯台：第一種地盤(卓越振動数7.18Hz)

### 4.2 灯台の振動特性

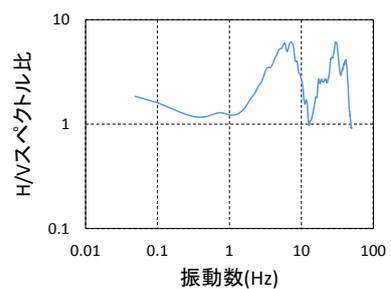
各点で計測されたデータを4096点ずつに分割し、アンサンブル平均したフーリエスペクトルを求める。なお、ハニング窓によるデータ補正を行い、スペクトルの平滑化にはバンド幅0.5HzのParzenウィンドウを用いた。解



(a) 宇品灯台の地盤



(b) 清水灯台の地盤



(c) 勝浦灯台の地盤

図-3 各地盤のH/Vスペクトル比

析対象としたデータはそれぞれ1時間分(720,000点)とし、50%ずつオーバーラップさせた。

### (1) フーリエスペクトル

各灯台のフーリエスペクトルを図-4に示す。図-4より推定される地盤-建物連成系の固有振動数を表-3にまとめる。

### (2) 伝達関数

1FLのフーリエスペクトルに対する灯室のフーリエスペクトルの比(以下、伝達関数という)を図-5に示し、推定されるスウェイ固定系の固有振動数を表-3に示す。各灯台のスウェイ固定系の1次固有振動数は、地盤-建物連成系の1次固有振動数と比較して高い値を示している。この差は、地盤のスウェイ変形の影響であると考えられ、これによる固有振動数の低下率は、宇品灯台：1.55~4.66%、清水灯台：12.00~17.76%、勝浦灯台：2.63~4.48%である。低下率の計算には式(1)を用いた。一方、2次、3次固有振動数においては、スウェイ固定系と地盤-建物連成系の差が小さく、スウェイ変形の影響は小さいと考えられる。

$$\text{低下率(\%)} = \frac{f_s - f_g}{f_s} \quad (1)$$

ここで、 $f_s$ ：スウェイ固定系の固有振動数(Hz)

$f_g$ ：地盤-建物連成系の固有振動数(Hz)

さらに、表-3及び図-4と図-5を比較すると、それぞれ以下に示すような特徴が見られた。

#### a) 宇品灯台

X, Y方向ともに1~3次固有振動数においてピークが

表-2 高さレベルに対応するセンサ番号

	宇品灯台	清水灯台	勝浦灯台
1FL	K7	K1	K1
2FL	K6	K3	K2
3FL	K5	K4	K3
4FL	K4	K5	K4
5FL	—	—	K5
灯室	K3	K6	K6

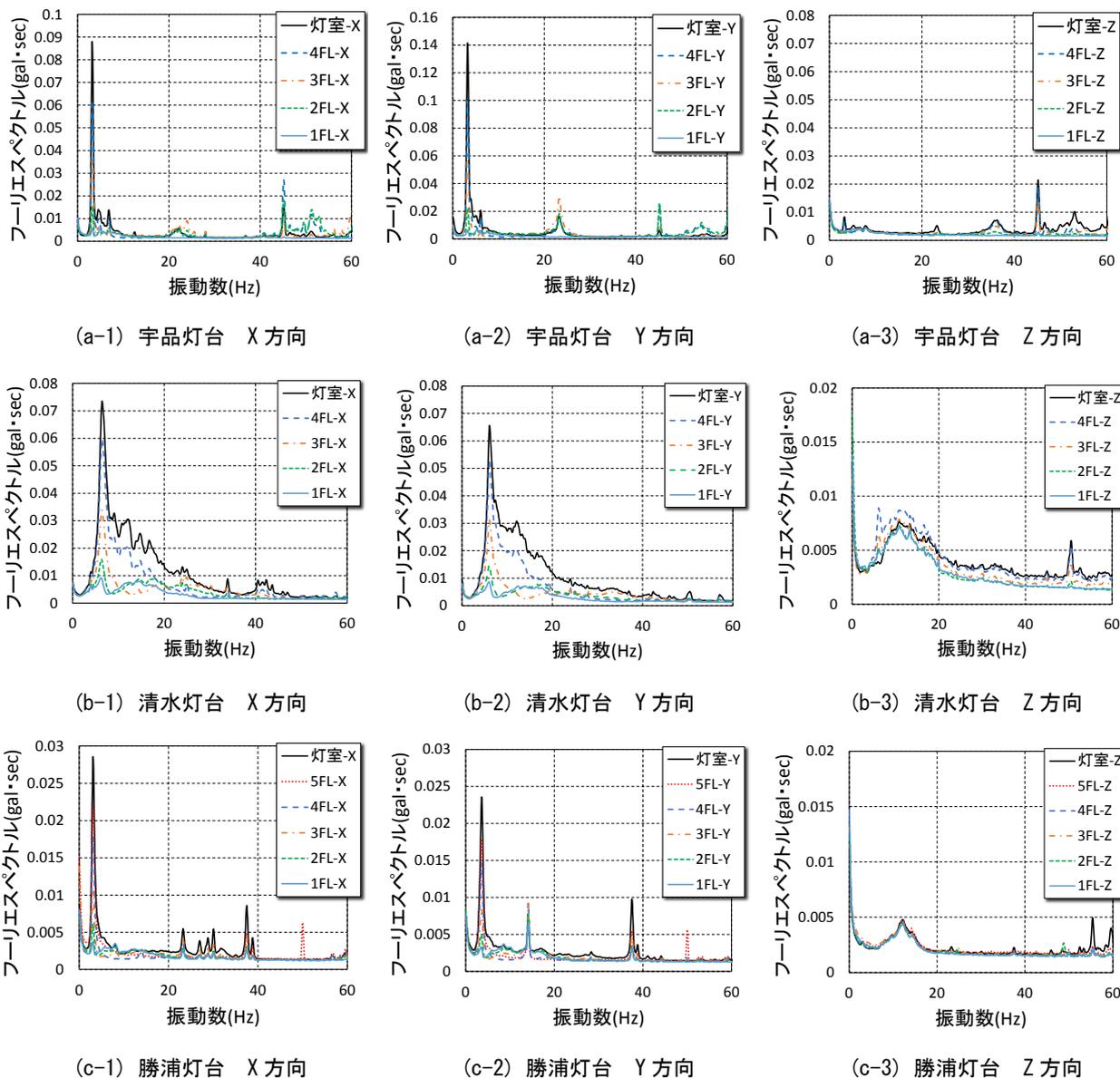


図-4 各灯台のフーリエスペクトル

明確に分かれており、非常に単純な振動をしていると考えられる。

Z方向の各ピークはX、Y方向の各次固有振動数と一致しており、その大きさは高次になるにしたがって大きくなっている。これは、高次モードになるにしたがって曲げ変形の影響が大きくなっていることを示していると考えられる<sup>8), 9)</sup>。ただし、曲げ変形がどの程度影響しているかについては明らかになっていないため、今後さらに検討すべき事項である。

#### b) 清水灯台

図-4中においてX、Y方向の1次固有振動数と考えられるピークは5~40Hzまで広い裾を持っており、その中でもピークが乱立している。Z方向のスペクトルも同様の傾向を示しており、また、スウェイ変形による1次固有振動数の低下率が12.00~17.76%と大きいことから、清水灯台においては地盤の影響を大きく受けているもの

と考えられる。このため、地盤の影響を考慮しない図-5では、2次、3次固有振動数を分離することができている。

また、図-4のスペクトルの形に注目し、特徴別に分類すると以下の3通りに分けることができる。

- ・1FL, 2FL (鋼板接着工法施工高さ以下)
- ・3FL (鋼板接着工法施工高さ付近)
- ・4FL, 灯室 (鋼板接着工法施工高さ以上)

このスペクトルの形の変化は、宇品灯台および勝浦灯台では確認されなかった。鋼板接着工法施工高さ付近で振動性状が変化しているものと考えられるため、地震時に施工高さ付近において灯塔外周にひび割れが発生する可能性がある。この点については、数値解析との比較により、今後詳細に検討する予定である。さらに、同様の補強がなされた灯台の被災履歴情報を収集し、数値解析結果と照合し、補強工法の妥当性について検証したい。

Z方向の各ピークはX、Y方向の各次固有振動数とは一致しておらず、曲げ変形による影響は小さいものと推測される。

Z方向の各ピークはX、Y方向の各次固有振動数とは一致しておらず、曲げ変形による影響は小さいものと推測される。

c) 勝浦灯台

X・Y方向ともに2次以上の固有振動数でピークが乱立しており、固有振動数を特定することができなかった。この点に関しては今後数値解析とあわせて検討を行う予定である。

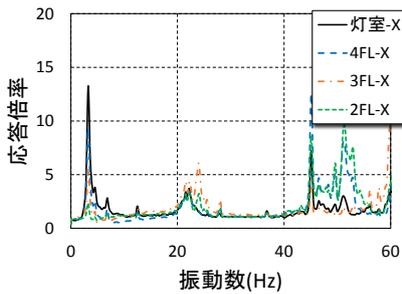
(3) 振動モード

(2)伝達関数により得られた1階(K7あるいはK1センサ)に対する各階(K3~K6あるいはK2~K6センサ)の加速度応答倍率と位相情報を利用して1~3次固有振

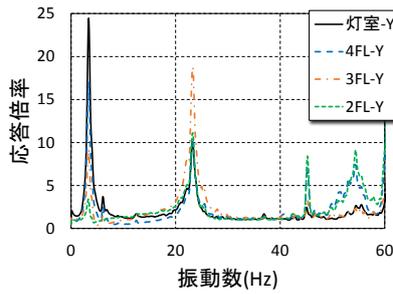
表-3 各灯台の固有振動数

		固有振動数(Hz)					
		X方向			Y方向		
		1次	2次	3次	1次	2次	3次
宇品灯台	地盤-建物連成系	3.22	22.17	51.27	3.22	23.29	54.44
	スウェイ固定系(K3/K7)	3.27	22.17	51.32	3.37	23.24	54.44
清水灯台	地盤-建物連成系	6.45	23.97	57.52	6.10	33.84	57.03
	スウェイ固定系(K6/K1)	7.32	28.17	57.47	7.42	33.84	57.03
勝浦灯台	地盤-建物連成系	3.13	23.39	37.50*	3.61	28.32	37.55*
	スウェイ固定系(K6/K1)	3.27	23.34	37.50*	3.71	28.32	37.55*

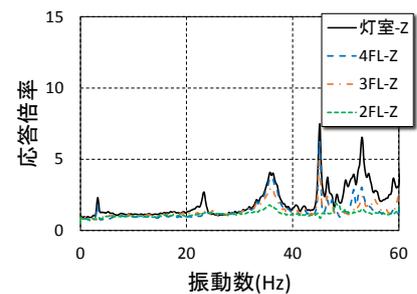
\*特定できないため、仮の固有振動数とする。



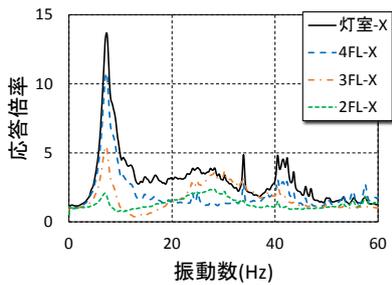
(a-1) 宇品灯台 X方向



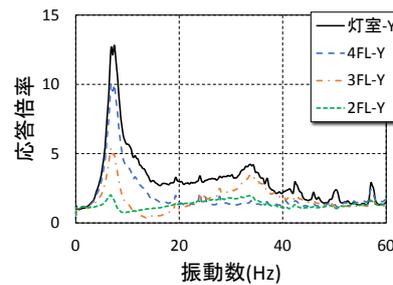
(a-2) 宇品灯台 Y方向



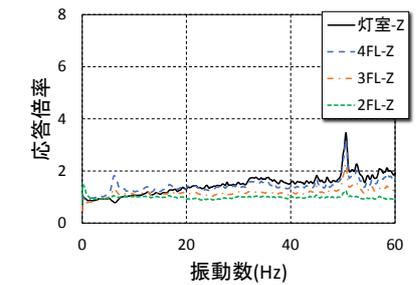
(a-3) 宇品灯台 Z方向



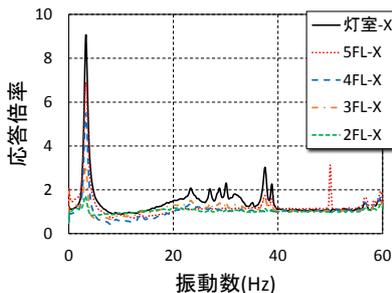
(b-1) 清水灯台 X方向



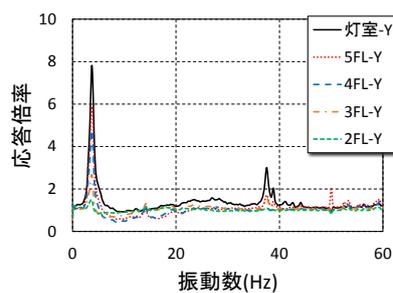
(b-2) 清水灯台 Y方向



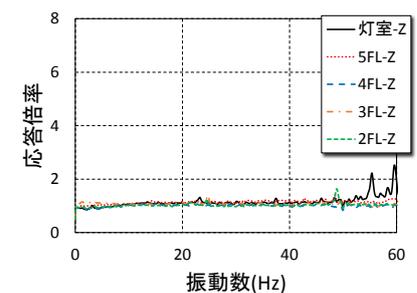
(b-3) 清水灯台 Z方向



(c-1) 勝浦灯台 X方向



(c-2) 勝浦灯台 Y方向



(c-3) 勝浦灯台 Z方向

図-5 各灯台の1FLに対する各階の伝達関数

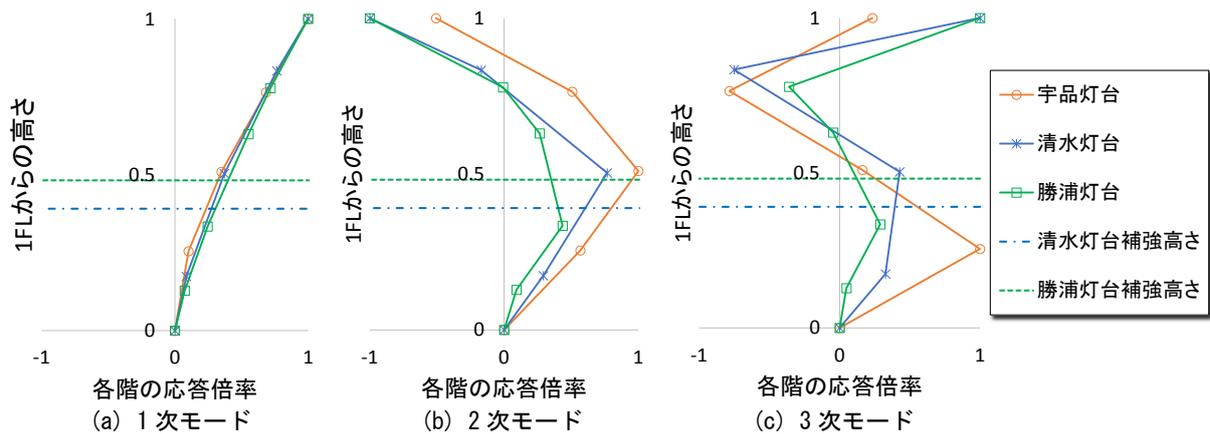


図-6 各灯台のY方向の振動モード図

動モードを描く。高さは灯室位置を1として無次元化し、加速度応答倍率は各モードにおいて最大値を1として無次元化した。得られたY方向の各次振動モード図を図-6に示す。X方向の振動モード図は、応答の大きさは異なるがモード形状の傾向はほぼ同様であったため、ここでは省略する。

図-6より、1次振動モードにおいては、各灯台共にほぼ同様の形となっており、鋼板補強による1次モードへの影響は少ないものと考えられる。一方、2次、3次モードでは未補強の宇品灯台と比べ、清水灯台と勝浦灯台では補強された灯台下部の応答倍率が低減し、かつ、2次より3次モードの低減率が大きくなっており、補強により振動が抑制されていることが分かる。

## 5. まとめ

補強工法の異なる3基の灯台の常時微動計測によって得られた知見は、灯塔への補強が実施されていない場合は、各次固有振動モードはそれぞれ分離しているが、鋼板による巻き立て工法が採用された場合は、2次・3次固有振動モードが複雑になり、固有振動数の特定が困難となった点である。

今後は、数値解析との比較・検証を行うことで、2次・3次固有振動数の特定が困難になった要因とそれが地震時の挙動にどう影響してくるかについて検討を行う予定である。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人大幸財団の平成26年度第24回自然科学系学術研究助成により進められた研究成果の一部である。また、灯台の調査にあたり、海上保安庁、第六管区海上保安本部、第三管区海上保安本部、広島海

上保安部、清水海上保安部、勝浦海上保安署の方々には便宜を図っていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 灯台施設調査委員会、灯台施設保全委員会編：明治期灯台の保全、財団法人日本航路標識協会、2001.3
- 2) 五十嵐耕：東日本大震災による航行援助施設の被害と復旧、電波航法研究会、平成24年度第1回研究会、2012.5
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 中村豊：H/Vスペクトル比の基本構造、物理探査学会地震防災シンポジウム、2008.1
- 6) 国土交通省住宅局建築指導課、日本建築主事会議、日本建築センター：5.5 地震力、2007年版建築物の構造関係技術基準解説書、日本建築センター、pp.260-271, 2007
- 7) 海上保安庁：航路標識構造物設計基準、保灯工第30号、1997.3
- 8) 佐武直紀、中島秀雄：水平・上下動同時測定による高層建物の振動特性評価、日本建築学会関東支部研究報告集、66巻、pp.61-64, 1996.3
- 9) 護雅史、神原浩：鉄骨高層建物の上下方向振動性状に関する検討、日本建築学会技術報告集、第5号、pp.52-56, 1997.12