

論文 RC造灯台の振動特性

日高 みなみ^{*1}・佐藤 大輔^{*2}・青木 孝義^{*3}・高瀬 剛^{*4}

要旨: 構造物の耐震性能を評価する上で、その振動特性を精度よく推定することはきわめて重要であるが、灯台の振動実験例は少ない。そこで本稿では、常時微動計測や起振器を用いた強制振動実験により、宇品灯台(RC造)の振動性状の推定を行った。常時微動と強制振動による推定値は、減衰定数についてはばらつきが見られたが、固有振動数については各方向3次モードまで概ね同じ値を示し、今後灯台の振動特性に関するデータベースを蓄積していく上で、比較的簡便な計測手法といえる常時微動計測の有用性が確認できた。

キーワード: 灯台, 常時微動計測, 強制振動実験, 固有振動数, 減衰定数

1. はじめに

わが国の灯台の多くは明治・大正期に建設され、現在も航路標識として海の安全を守る重要施設であるとともに、歴史的建造物(文化遺産)としての価値も非常に高い。経済産業省も重要文化財の中に「近代化産業遺産」というカテゴリーを設けて、灯台の指定・保全を図っている¹⁾。

そのような重要性に鑑み、海上保安庁は、その歴史的・文化的価値に配慮しつつ、構造安全性を高めながら、灯台を従来どおり航路標識として活用していく方針を採っている。1985年に有識者を交えた「灯台施設調査委員会」を結成、1991年に「灯台施設保全委員会」を設置し、明治期に建設された約120基にもおよぶ灯台の内、当時(2001年3月)現存した66基に対して悉皆調査を行い、保全を図ってきた^{2),3),4)}。

また、2011年3月11日の東日本大震災では、東北地方を中心に多くの灯台が被災し⁵⁾、復旧工事が行われている。中には、倒壊の恐れがあるため解体され、建て替えが行われるものもある⁶⁾。今後、起こりうる想定される地震に対して、航路標識として運用を持続させるためにもその耐震性は重要であり、耐震診断の結果、耐震性能を満足しない場合には耐震補強あるいは建て替えが必要となる。

灯台は、「航路標識構造物設計基準⁷⁾」に沿って設計されており、耐震診断時には建物の固有周期を正確に把握すること、適切な減衰定数を設定することが重要である。しかしながら、一般に完成した構造物は、計算による固有周期と異なることが多く、耐震診断時に実測値を採用した例もある⁴⁾。一端固定、他端自由な中空円形の連続棒の基本周期の推定式を元に、石造4灯、煉瓦造2灯、RC造2灯の振動試験により、地盤との相互作用(スウェ

イ・ロッキングの影響)を含む灯台の固有周期の推定式を提案した論文⁸⁾もあるが、収集された資料の信頼性を確保し、種々の解析評価に耐えうる良質なデータベースとするためにはデータ量が少ないのが現状である。

そこで本稿は、鉄筋コンクリート造である宇品灯台(所在:広島市南区元宇品)において常時微動計測と起振器による加振実験を行い、現況の振動性状を把握し、資料のひとつとすることを目的とした。また、今後データベースを蓄積する上で、計測手法の簡便化は重要であるため、本実験結果に基づき、常時微動計測の有用性についても検討した。

2. 実験方法

2.1 計測灯台の概要

宇品灯台は、1971年に竣工され、40年以上経過した現在も航路標識としての役割を果たしており、元宇品公園の象徴的な存在となっている⁹⁾。外観を写真-1に示す。

全高20.95mの上部円形下部八角形コンクリート造で、壁主筋は全高にわたってダブル配筋、灯塔と付属舎はEXP.Jで分離されている。また、南西側の地盤沈下により、南西側基礎部に水平方向の大きいひび割れが発生していた。

1次固有振動数は、航路標識構造物設計基準の略算式(式(1))⁷⁾によると2.94Hz、推定式(式(2))⁸⁾によると3.85Hzであった。

$$T = 0.02h \tag{1}$$

$$T = 1.90 \sqrt{\frac{\gamma}{E} \cdot \frac{h^2}{D}} + 0.037 \tag{2}$$

ここで、T:1次固有周期(sec)とし、躯体高さh:17.00m、下端外径D:2.70m、単位体積重量 γ :2.4t/m³(23.53kN/m³)、ヤング係数E:2.0×10⁶t/m²(19.61GPa)である。

*1 (株)コンステック 技術研究所 (正会員)

*2 (株)コンステック 技術研究所 工博 (正会員)

*3 名古屋市立大学大学院 芸術工学研究科 工博 (正会員)

*4 第六管区海上保安本部 交通部整備課

2.2 観測点の概要

観測点の位置を図-1に示す。計測パターンは、以下の通りである。

(1) 地盤

地盤の特性を把握するため、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）を灯台から約20m離れた地盤に設置した。

(2) パターン1

無線型3軸加速度センサ（K社製、計測範囲：±2940gal、周波数応答：DC～1kHz、分解能：24bit）を用いた。センサは計7台を使用し、灯台の主要な振動特性把握のため、塔芯を中心としたK1～K7に設置した。加振実験の際は、K1は起振器上に設置した。

(3) パターン2

加速度センサ（S社製、計測範囲：±2942gal、周波数応答：DC～400Hz、分解能：0.000049m/s²rms以下）とアナログ入力モジュール（NI社製、分解能：24bit）を用いた。センサは計32台を使用し、ねじれ振動把握のため、S1～S12（S12は起振器上）に設置した。このとき、S8、S9は水平2成分、S12は起振器の加振方向、残りは水平2成分と上下1成分を計測した。

以上、全てのセンサは東西方向をX軸（西を正）、南北方向をY軸（南を正）、上下方向をZ軸（上を正）として設置した。サンプリング周波数は、地盤の振動計測のみ100Hz、その他の場合は200Hzとして計測を行った。

2.3 計測方法

(1) 常時微動計測

基本的な振動特性である固有振動数を推定するため、常時微動計測を実施した。計測時の風速は0～2m/s（宇品灯台気象データ、提供元：海上保安庁）であった。



写真-1 宇品灯台の外観

表-1 常時微動計測時間

	計測時間
地盤	約160分間
パターン1	約25分間
パターン2	約16時間

全ての計測パターンで計測を行い、それぞれの計測時間は、表-1に示す通りである。

(2) スウィープ加振実験

加振源として永久磁石起振器（S社製、重量：約50kg、起振慣性質量：49kg、最大変位：150mmp-p、周波数範囲：0.1～50Hz）、電力増幅器（S社製、周波数レンジ：0.1～8000Hz）、ファンクションジェネレータ（L社製、周波数設定範囲：0.002～2MHz、周波数設定分解能：0.01Hz）を灯室に設置した。南北方向に0～60Hzのスウィープ加振し、計測パターン1による計測を行った。

(3) 自由振動実験

(2)で用いた起振器を使用し、1次固有振動数付近で東西方向・南北方向にそれぞれ一定時間定常加振を行った後、起振器を急停止させることで自由振動波形を得た。計測パターン1を用いて行った。

3. 実験結果

3.1 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、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フーリエスペクトル比（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えるため利用されている¹⁰⁾。

宇品灯台における地盤特性を把握するため、得られたH/Vスペクトル比を図-2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

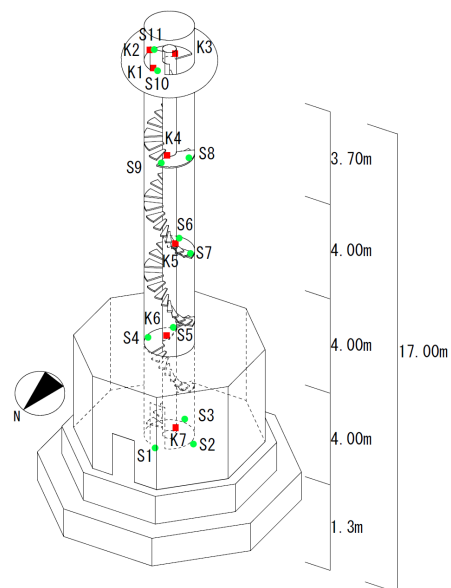


図-1 各センサ設置位置

0.5HzのParzenウィンドウを用いた。(以下、フーリエスペクトルの算出には、特記しない限り同様の処理を行うこととする。)

これより、地盤の卓越振動数は3.76Hzであり、航路標識構造物設計基準における第一種地盤⁷⁾であると考えられる。

3.2 常時微動計測結果

(1) フーリエスペクトル

各点(K1~K7, 図-1)での計測波形を4096点ずつ分割し、フーリエスペクトルをアンサンブル平均したものを求める。得られたフーリエスペクトルを図-3に、推定される地盤-建物連成系の固有振動数を表-2に示す。

1次固有振動数は、東西・南北方向ともに3.22Hzと推定され、北東-南西方向に振動している。これは、南西側の地盤沈下により南西側基礎部に生じた水平ひび割れの影響を受けているものと考えられる。

(2) 伝達関数

1階(K7, 図-1)のフーリエスペクトルに対する各点のフーリエスペクトルの比(以下、伝達関数という。)を求める。得られた伝達関数を図-4に、伝達関数より推定されるスウェイ固定系の固有振動数を表-2に示す。推定される固有振動数は各方向2,3次における地盤-建物連成系の固有振動数とほぼ等しいが、1次固有振動数は高い値を示している。この差は、地盤のスウェイ変形

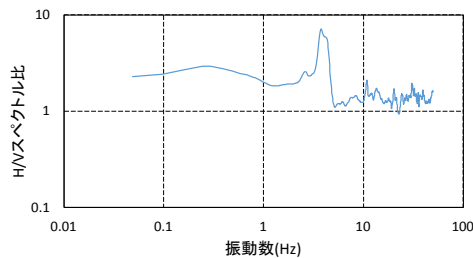


図-2 H/V スペクトル比

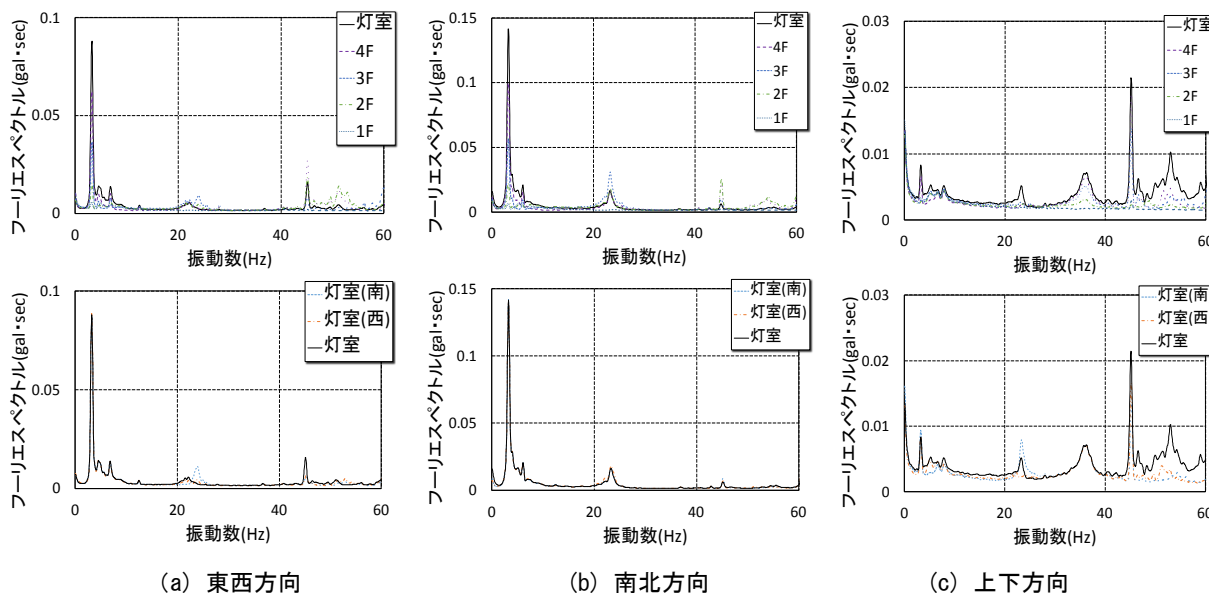


図-3 フーリエスペクトル

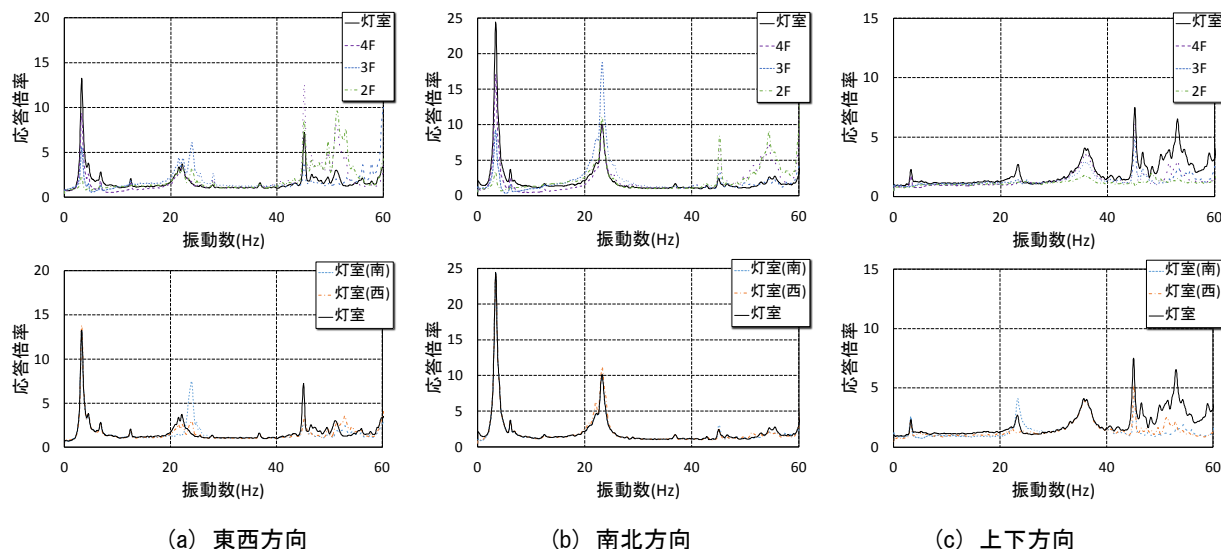


図-4 伝達関数

表-2 実験結果から得られた固有振動数

		固有振動数(Hz)							
		東西方向			南北方向			ねじれ	上下方向
		1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	1次
常時微動	地盤・建物連成系	3.22*	22.17	51.27	3.22*	23.29	54.44	24.27	36.28
	スウェイ固定系	3.27	22.17	51.32	3.37	23.29	54.44	24.22	35.69
スウィープ加振					3.17	23.14	54.15		
自由振動(全区間)		3.18				3.17			

* 北東-南西方向の振動

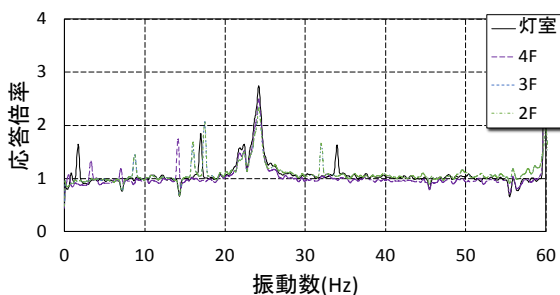


図-5 ねじれ振動の共振曲線

表-3 1次減衰定数(%)

		東西方向	南北方向
常時微動	RD法	0.86	1.30
	ハーフパワー法	1.74	2.10
スウィープ加振		2.55	
自由振動(全区間)		1.73	2.21

によるものであると考えられ、これによる振動数の低下率は、東西方向 1.55%、南北方向 4.66%である。

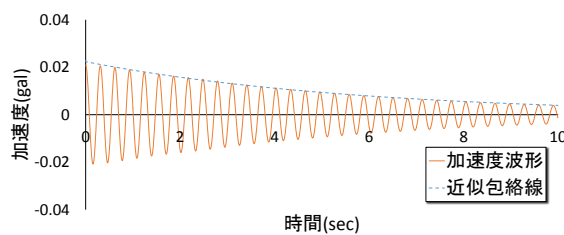
得られた1次固有振動数は、略算式(1)による値よりも高い値を、推定式(2)による値よりも低い値を示している。略算式(1)は、床面に質量が集中するRC造せん断系建物の設計用1次固有周期の計算式(建築基準法)と同じため、層を成さない灯台の実測値と差が生じたと考えられる。一方、推定式(2)は、構造の異なる8灯(石造4灯、煉瓦造2灯、RC造2灯)の振動試験による推定式のため、推定式の精度も高くなく差が出たものと考えられる。

(3) ねじれ振動

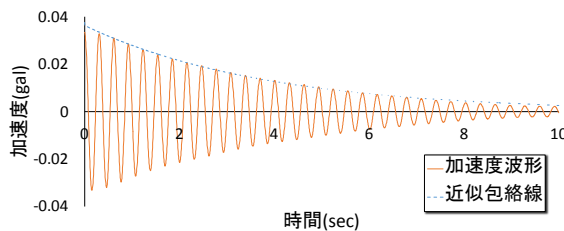
ねじれ振動把握のため、各階壁側に2点ずつ(1階のみ3点)設置したセンサ(S1~S11, 図-1)の東西方向の相対加速度をとって得られた1階に対する各階の伝達関数を図-5に示す。これより、ねじれ振動数は24Hz付近であると考えられる。

(4) 減衰定数

RD法¹¹⁾とハーフパワー法¹²⁾を用いて灯室(K3, 図-1)における減衰定数を評価する。RD法では、得られたランダムな応答波形の極大値が初期値となるように波形を10秒間の小サンプルに分割し、これを1ピークずつずらしながら重ね合わせる。そうすることによって、ランダム成分が消え自由振動成分のみが残り、その自由振動波



(a) 東西方向



(b) 南北方向

図-6 RD波形

形(RD波形)の2周期目から約10秒間の極大値を結ぶ包絡線を指数関数 $\exp(-hw_0t)$ で最小二乗近似して減衰定数 h を推定する。1次減衰定数推定のため、東西・南北方向ともに3.22Hzを中心振動数とし、バンド幅1.0Hzのフィルター処理を行ったのち、4000個以上重ね合わせたものを図-6に示す。これより、減衰定数は、東西方向0.86%、南北方向1.30%であった。

ハーフパワー法では、共振点 f_0 の両側に共振点の振幅のハーフパワーに等しい点を取り、その2点の振動数幅(f_2-f_1)を用いて、式(3)によって減衰定数 h を推定する。なお、本法によって推定される減衰定数は、窓関数の使用やスペクトルの平滑化の程度に依存するため、窓関数の使用・平滑化は行わないものとした。

$$h = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (3)$$

これより、減衰定数は、東西方向1.74%、南北方向2.10%と推定された。RD波形抽出の際に用いたバンドパスフィルターの影響により、RD法により求めた減衰定数はハーフパワー法で求めた値より低めの評価になったと考えられる。

3.3 スウィープ加振実験結果

図-7に南北方向加振時の共振曲線を示す。ここで共振曲線とは、灯台の応答波(K3~K7, 図-1)と起振器

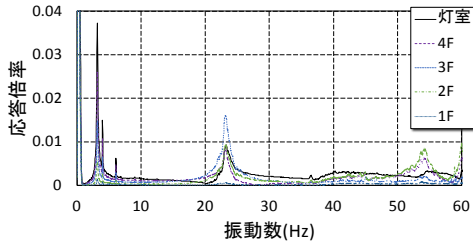


図-7 スウィープ加振時の共振曲線（南北方向）

による入力波（K1，図-1）のフーリエスペクトル比とする。この曲線により求めた固有振動数を表-2に示す。なお、このとき窓関数によるデータ補正は行わなかった。

常時微動計測結果と各方向3次振動数までほぼ一致しており、常時微動レベルの振動でも各方向3次モードまで抽出可能であるということが分かった。全体的に常時微動計測結果から求められた値よりも低くなる傾向が見られるが、これは振幅依存性によるものであると考えられる。

ハーフパワー法により推定された1次減衰定数を表-3に示す。スウィープ加振実験により得られた減衰定数は、常時微動計測結果から求められた値よりも大きい値を示している。これは、振幅依存性によるものであると考えられる。

3.4 自由振動実験結果

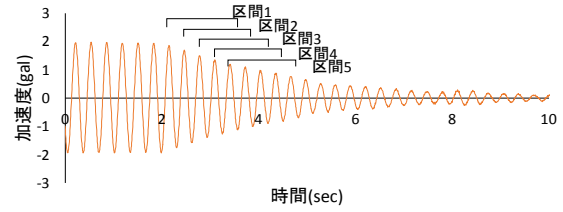
図-8に示す灯室K3（図-1）の自由振動波形からゼロクロス法により固有振動数を求め、波形の極大値を結んだ包絡線指数関数 $\exp(-hw_0t)$ で最小二乗近似して減衰定数 h を推定する。各方向1次モードに対して、評価範囲を任意の小区間に分けて推定した振動特性を表-4に示す。固有振動数と減衰定数は、平均すると、東西方向3.18Hz、1.73%、南北方向3.17Hz、2.21%であった。

以上の実験結果から推定された1次固有振動数、減衰定数と灯室(K3)の加速度振幅値の関係を図-9に示す。振幅値は、常時微動では1次固有振動数を含む狭帯域のバンドパスフィルターをかけた波形のrms値を、スウィープ加振では最大値を用いた。また、自由振動では評価した区間内での平均振幅値を用いた。常時微動時の減衰定数にはハーフパワー法による推定値を採用した。結果は、自由振動時にばらつきが見られるが、振幅が大きくなるに従い、概ね固有振動数は低下し、減衰定数は大きくなる傾向が見られた。

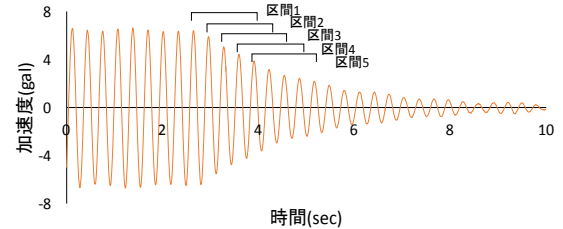
表-3より、RD法による減衰定数の推定値が小さく評価されていることが分かる。これは、RD法はフィルターの重ね合わせの処理が入るため、それによって値が変化するためである。これより、簡便なハーフパワー法で減衰定数が推定できることが明らかになった。

3.5 振動モード

計測パターン1における常時微動計測とスウィープ加



(a) 東西方向

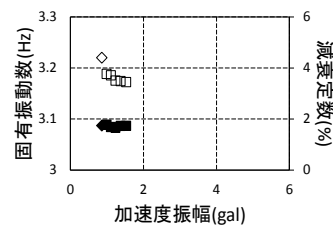


(b) 南北方向

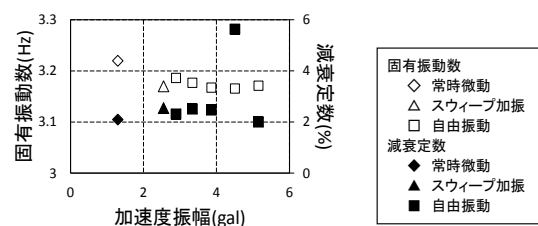
図-8 自由振動波形

表-4 自由振動実験結果

	東西方向		南北方向	
	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
区間1	3.17	1.73	3.17	2.01
区間2	3.17	1.73	3.17	5.64
区間3	3.18	1.66	3.17	2.47
区間4	3.19	1.68	3.18	2.51
区間5	3.20	1.78	3.19	2.32
全区間	3.18	1.73	3.17	2.21



(a) 東西方向



(b) 南北方向

図-9 固有振動数、減衰定数と加速度振幅値の関係

振実験結果について、各階の応答倍率から、1階に対する相対加速度応答を算出して得られた南北方向の各次固有振動モードを図-10に示す。1次モード、3次モードにおいては、常時微動計測とスウィープ加振実験で非常に応答が近似した振動モードが得られた。2次モードにおいても、スウィープ加振時の応答が常時微動時の応答の1.5倍となるが、同じモード形状が得られた。

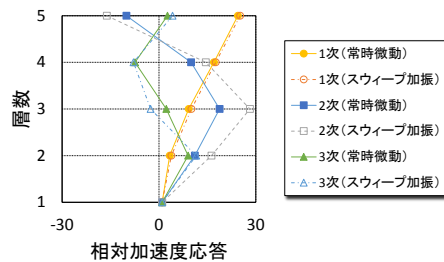


図-10 振動モード（南北方向）

4. まとめ

宇字灯台の常時微動計測と起振器による加振実験で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 常時微動計測と起振器を用いた強制振動実験による各次固有振動数の推定値は、振幅が大きくなるにしたがって若干低下するという振幅依存性が見られたが、概ね同じ値を示した。また、各次振動モードも非常に近似しており、常時微動計測でも各方向 3 次振動数までの推定が可能である。したがって、アクセスの悪いところに建設されていることが多い灯台に、人手と費用をかけて起振器を設置して加振実験を行わなくても、簡便な常時微動計測で振動数の推定が可能であることが分かった。
- 2) 実測による 1 次固有振動数は、略算式(1)による値よりも高い値を、推定式(2)による値よりも低い値を示した。略算式(1)は、床面に質量が集中する RC 造せん断系建築物の設計用 1 次固有周期の計算式のため、層を成さない灯台の実測値との差が生じたと考えられる。一方、推定式(2)は、構造の異なる 8 灯（石造 4 灯、煉瓦造 2 灯、RC 造 2 灯）の振動試験による推定式のため、推定式の精度も高くなく差が出たものと考えられる。したがって、精度の高い灯台の 1 次固有周期の推定式はなく、系統的に実測を行いその確立の必要性が明らかとなった。
- 3) 1 次固有振動モードの振動方向が、北東-南西方向に卓越していた。これは、南西側基礎部分に大きな水平ひび割れが生じていることが原因であると考えられる。常時微動計測により、地盤・基礎の状況も把握できることが分かった。今後は上部構造と地盤・基礎との振動特性の分離方法について検討する必要がある。
- 4) 減衰定数についてはばらつきが見られたが、ハーフパワー法による推定値はおおむね同じ値を示し、1.7%~2.5%程度であった。これは、RD 法はフィルターの重ね合わせの処理が入るため、それによって減衰定数の値が変化するためである。これより、簡便なハーフパワー法で減衰定数を推定できることが明らかになった。

5) 本実験では、2 種類（パターン 1, 2）の計測システムを用いた。両者ではほぼ同じ解析結果が得られており、加速度計を塔芯に設置しても壁際に設置しても固有振動数および振動モードが把握できることが分かった。この点については、稿を改める予定である。

本実験では、高さ 20m 程度の灯台を対象にしたため、比較的容易に振動特性を把握することができた。今後は、本実験結果と数値解析結果の比較・検討を行い、最終的には、振動計測を灯台の劣化予測、耐震診断に活用することを目標に、データの収集を行う予定である。

謝辞

本実験を実施するにあたり、第六管区海上保安本部交通部整備課をはじめとする多くの方々へ便宜をはかっていただき、実験に協力していただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省：近代化産業遺産認定遺産リスト（都道府県別），2009.2
- 2) 日本港湾協会：特集「海の安全を守る航路標識」，港湾，Vol.75，pp.6-15，1998.10
- 3) 藤岡洋保：灯台に見る日本の近代，海上保安庁交通部整備課，2004.3
- 4) 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
- 5) 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，海上保安庁，2012.5
- 6) 茨城新聞：とまった復興の光，9ヶ月ぶり大津岬灯台，2012.3
- 7) 海上保安庁：航路標識構造物設計基準，保灯工第 30 号，1997 年 3 月
- 8) 小原昭一郎，藤野義男，横田治彦，磯畑脩：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，58 卷（構造系），pp.953-954，1983.9
- 9) 大槻達夫，桜井慎一，大友洋卓，笠井孝：灯台の保存活用に関する研究—わが国における灯台の現状—，日本建築学会大会学術梗概集（関東），A-2（防火，海洋，情報システム技術），pp.395-396，2006.9
- 10) 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
- 11) 日本建築学会編：建築物の減衰，日本建築学会，pp.83-84，2000.9
- 12) 小林慎祐，鍵山佳秀，神野達夫，三浦賢治：RD 法による減衰評価に解析パラメーターが及ぼす影響，日本建築学会中国支部研究報告書，第 30 卷，pp.185-188，2007.3