

橋梁損傷検出のための振動特性推定手法の 高精度化と実験的検証に関する研究

下妻 達也¹

課題番号：227402

研究期間：令和4年7月15日～令和5年3月31日

研究代表者：下妻 達也 (E-mail: shimozuma@fukuoka-u.ac.jp)

国内に73万橋ある道路橋の内、全体の約63%が建設後50年を経過すると見込まれている。膨大な数の橋梁の健全度診断を効率的に実現する手法の確立は急務の課題であるが、橋梁の損傷による振動特性の変化に着目した研究が多数報告されている。その内の一つに著者らが既往研究で実施した帯域分離推定法による振動数推定精度向上があるが、本研究は帯域分離推定法における低域と高域の振動数の閾値の決定方法について検討したものである。検討した手法について解析および実橋梁計測データによる検証を行った結果、推定値の欠損には検討の余地があるものの振動数の推定精度に一定の効果を確認することができた。

キーワード：構造同定、確率的部分空間法、常時微動、リサンプリング

1. はじめに

国土交通白書^{1), 2)}によると、建設後50年以上経過する道路橋の割合は全体の約63%と見込まれているが、国内にはおよそ73万橋もの道路橋が架設されており、膨大な数の橋梁の維持管理は重要な課題である。一方、国や地方自治体の危機的予算の中、全ての橋梁を満足に点検するのは費用や技術者の確保等の理由から容易ではない。橋梁の損傷診断は現状目視点検による方法が一般的であり、専門の知識・経験を有する技術者が橋梁まで赴き、高所作業車等を使った点検が行われている。故に、経費的に実現可能な維持管理手法の確立が求められている。

以上の背景に対し、橋梁の効率的な維持管理手法の確立に関する様々な研究が行われているが、その一つとして橋梁の振動特性の変化から損傷検出を行う研究が多数報告されている³⁾⁻¹⁰⁾。これは、橋梁が健全な状態と一部の部材に損傷を生じた状態での振動特性の違いに着目するものであり、固有振動数、振動モード、減衰定数の比較が行われる。具体的な手順としては、図1に示すように橋梁に設置したセンサ（加速度センサ等）から得られた動的応答データから後述する同定手法により振動特性の推定を継続的に行う。そして、推定結果の変化が生じた時に橋梁に変状が生じたとみなすものである。このような橋梁の健全度診断手法が確立すれば、橋梁の動的応答データ計測を行うことで損傷の検出が可能になる可能性がある。

振動特性の推定手法には様々な手法があるが、実現理論を元とするERA法（Eigensystem Realization Algorithm）^{11), 12)}や、確率的部分空間法（Stochastic Subspace Identification, 以下SSIと記す）¹³⁾⁻¹⁵⁾などが用いられている場合が多い。これらの既往研究では、低次の振動領域の固有振動数では比較的良好な推定結果を得られているケースが多いものの、入力する動的応答データによっては推定結果にばらつきが見られる場合がある¹⁶⁾。一方、高次の振動領域においては動的応答データに含まれるノイズの影響を受け、固有振動数の推定精度の低下が多く見られる^{17), 18)}。また、固有振動数の推定において推定値の欠損を生じる場合も多い。橋梁の部材に損傷が生じた時の振動特性の変化は概して小さいと予想されるため¹⁹⁾、従来の手法よりも振動特性の推定精度

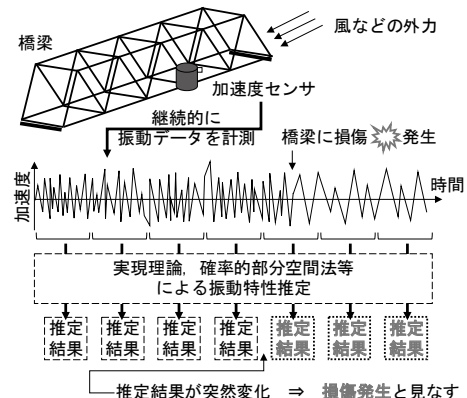


図1 振動特性に着目した橋梁の損傷検出

を向上させ、推定値の欠損を軽減する必要がある。

振動特性の推定精度向上に対し、SSI等振動特性推定手法そのものに関する研究^{3),13)}は数多く行われている。入力する動的応答データに着目した検討事例では、推定に使用するデータ長の調整¹³⁾、フィルタ処理²⁰⁾、内挿処理²¹⁾等を動的応答データに個別に施すことで動的応答データに含まれるノイズを軽減し、振動特性推定精度の向上を図っている。また、下妻ら²²⁾によってこれらの処理を統合した手法（以下、帯域分離推定法と記す）に関する研究も行われており、低域の振動数における変動係数の軽減、高域の振動数における推定値の欠損の大幅な改善が確認されている。一方、振動特性推定におけるSSIや帯域分離推定法の各種パラメータは試行錯誤の上に決定しているのが現状であり、一義的にパラメータを決定する手法の確立が課題となっている。

本研究では帯域分離推定法を用いた振動特性推定の高精度化のため、はじめに目指す推定値の精度を検討する。また、帯域分離推定法のパラメータの内、低域と高域の振動領域の閾値について、パラメータの設定手法について検討を行う。さらに、検討したパラメータ設定手法を実橋梁で計測された動的応答データに適用し、目指す推定値の精度を満足できるか検証する。

2. 帯域分離推定法と閾値の決定方法

本章では低域と高域の振動領域を分け、異なる推定方法を適用することで振動特性の推定精度向上を図る帯域分離推定法の概要を説明する。また、帯域分離推定法における低域と高域の閾値の決定方法について示す。

(1) 帯域分離推定法

帯域分離推定法の動的応答データの処理は図2に示す流れで行われる。振動数の低域側と高域側で処理方法が

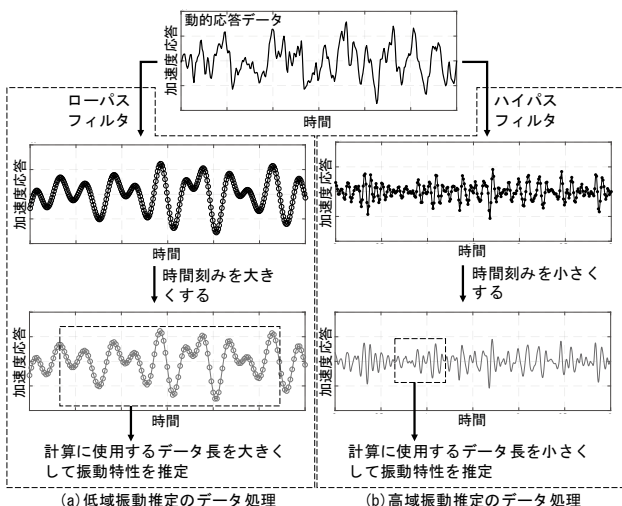


図2 振動特性に着目した橋梁の損傷検出

異なるため図では分けて示しているが、詳細な手順を以下に示す。

橋梁の動的応答データは様々な周波数の波が重畳されたものであるため、低域振動の推定においては高域振動が、高域振動の推定においては低域振動がノイズとなり、振動特性の推定精度を低下させる要因の一つになると想定される。そこで、はじめに動的応答データにフィルタ処理を施し、着目している領域外の振動成分を除去する。具体的には、低域振動の推定時はローパスフィルタ処理、高域振動の推定時はハイパスフィルタ処理を行う。フィルタの形状はいくつか種類があるが、本研究では既往研究²¹⁾と同じ矩形窓を用いている。

フィルタ処理の次は時間刻みの変更処理を行う。実橋梁での動的応答データ計測のサンプリング周波数は100Hz程度とする場合が多いが^{13),17)}、低域振動の推定時は時間刻みを大きくすることで高域成分の影響を軽減できると考えられる。具体的な処理は動的応答データの間引きを行い、意図的に時間刻みを大きくする。一方、高域振動の推定時は時間刻みを小さくするが、これだけでは低域振動の影響の軽減には効果が無い。しかし、後述する推定に使用するデータセグメント長を短くすることによるデータ数の不足を補うことができる。具体的な処理は応答データに内挿処理を行うことで時間刻みを小さくする。振動データの内挿方法には線形内挿や個々のデータを3次関数でなめらかに結ぶ3次スプライン等いくつか種類があるが、本研究では既往研究²¹⁾にて高次振動の推定精度向上への有効性が確認されている3次スプラインを用いる。

最後に、振動特性推定に使うデータセグメント長の調整を行う。低域振動は波形の周期が長いいため極力計算に使うデータセグメント長を大きくする方が有利である。一方、高域振動は計算に使うデータセグメント長を短くすることで周期の短い波形を捉えやすくし、低域振動の影響を小さくする。

以上のフィルタ処理、時間刻み変更、データセグメント長調整からなる処理を帯域分離推定法と呼ぶ。

(2) 低域振動と高域振動の閾値の決定方法

帯域分離推定法における低域と高域振動では推定に使用するパラメータが大きく異なる。故に、フィルタ処理における振動数の閾値の設定は固有振動数の推定精度に大きく影響すると考えられるが、本研究では図3に示すパワースペクトルの波形形状に着目した2つの手法を検討する。

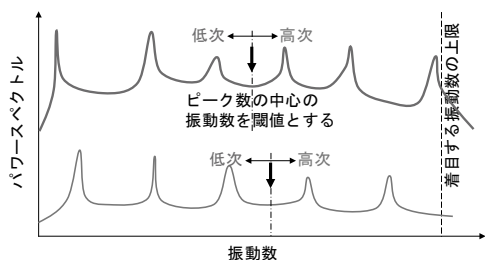
1つ目がパワースペクトルのピーク数に着目した手法である。橋梁の応答のパワースペクトルを計算し、着目する振動数の範囲内におけるスペクトルのピークを抽出する。そして、ピーク数の中心の振動数を閾値に設定する手法である。例えば、図3(a)の上側の青線のパワー

スペクトルのようにピークが偶数個確認できる場合、3次と4次の中間の振動数を閾値とする。一方、下側の赤線のパワースペクトルのようにピークが奇数個確認できる場合、中央の3次と4次の中間の振動数を閾値とする。パワースペクトルのピークと閾値が近接すると固有振動数の推定に影響を及ぼす可能性が高いが、本手法ではそれを回避できるメリットがある。一方、スペクトルのピークが十分に現れていない場合、閾値の設定が困難になる可能性がある。

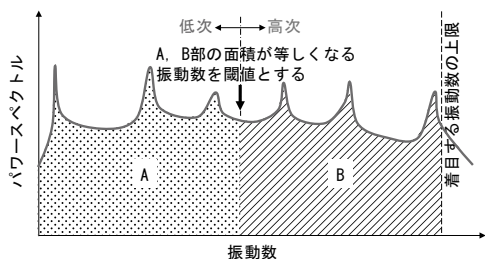
2つ目がパワースペクトル波形の面積に着目した手法である。図3(b)に示すように、パワースペクトルの波形と着目する振動数の上下限値の範囲に囲まれた面積が半分になる振動数を閾値とするものである。本手法は機械的に閾値を決定でき計測者によって閾値が変わらないメリットがあるが、パワースペクトルのピークと閾値が近接する可能性がある。

着目する振動数の上限値は、既往研究^{3), 6), 21)}における振動数推定の範囲を調べると20~30Hzを上限としているケースが多い。これを超えるとノイズによって固有振動数推定が困難になるためと考えられるが、上限値は橋梁規模や種類、作用する外力と励起される振動モードによって異なると考えられるため、今回はパワースペクトルのピークから判別できる最大の振動数または20Hzの内、大きい方とした。なお、閾値の計算に使うパワースペクトルのY軸は対数スケールとした。対数スケールとしない場合、低次の固有振動数のピークが高次と比較して大きくなりやすく、閾値が極端に低次振動数側に設定されてしまうためである。

3. 目指す推定精度の解析による検討



(a) パワースペクトルのピーク数に着目した手法



(b) パワースペクトル波形の面積に着目した手法

図3 振動数の閾値の決定方法1

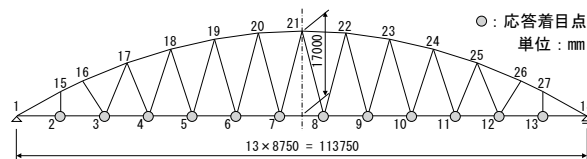
本章では実橋梁図面から作成した二次元解析モデルを用い、応答計算を行う。また、得られた加速度応答からSSIにより固有振動数の推定を行い、固有値解析の結果と比較する。そして、得られた結果から目指す推定精度について検討を行う。

(1) 対象橋梁と動的応答データの計算

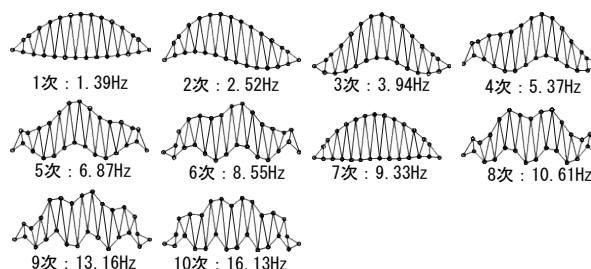
図4(a)に示すA橋を対象とする。A橋は1980年に架設された橋長115m、幅員10mの鋼アーチ橋である。全ての鋼部材を梁要素でモデル化した、図4(b)に示す2



(a) 橋梁写真



(b) 解析モデル



(c) 固有振動数と振動モード

図4 対象橋梁と解析モデル、固有振動数と振動モード

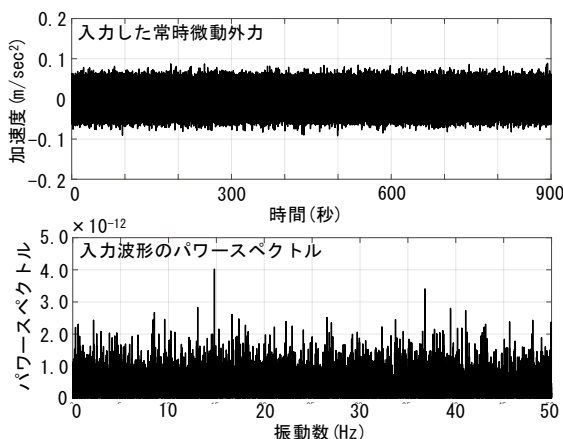


図5 常時微動外力とパワースペクトル

次元モデルを作成した。固有値解析で得られた固有振動数と振動モードを図4(c)に示す。外力は図5に示す白色雑音から作成した橋梁に作用する常時微動を模した外力とし、全節点に異なる外力を与えた。外力のパワースペクトルを併せて示している。時刻刻みは $dt=0.01$ 秒とし、下弦材の全節点の600秒の加速度応答をNewmark β 法 ($\beta=1/4$)により算出した。なお、本研究の計算は全て数値解析ソフトウェアMATLABにより行っている。

(2) 帯域分離推定法適用前の固有振動数の推定結果

得られた加速度応答から帯域分離推定法を適用せずに固有振動数の推定を行う。振動数推定には確率的部分空間法の一つである前進イノベーション SSI (以下、前進SSIと記す)を用いている^{13),17)}。前進SSIの設定パラメータは既往研究²²⁾を参考にデータセグメント長を30秒、初期モデル次数を100、特異ベクトル長を50とし、計30回の推定を行った。

図6に固有振動数推定結果、表1に推定した固有振動数の統計値を示す。図中の●が振動数の推定結果を示している。1~5次は固有値解析の結果に近い推定値が得られ変動係数も小さく、欠損も見られないが、6~8次は固有振動数が近接しているためか推定が上手く行えて

いない。9次は固有値解析の結果付近に推定値が多数プロットされているが、変動係数は約8%、欠損率は約30%といずれも大きな値となっている。なお、欠損率(%) = 推定結果が得られなかった回数 / 全計算回数 × 100で算出しており、値が小さいほど良好な結果が得られていることを意味する。

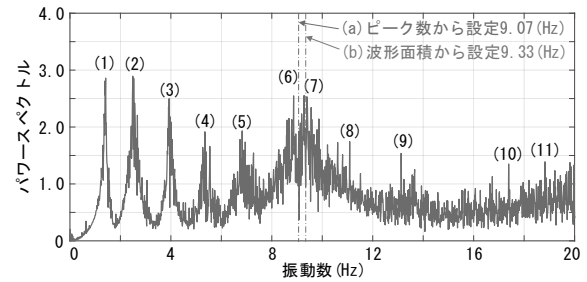


図7 加速度応答のパワースペクトルと閾値決定

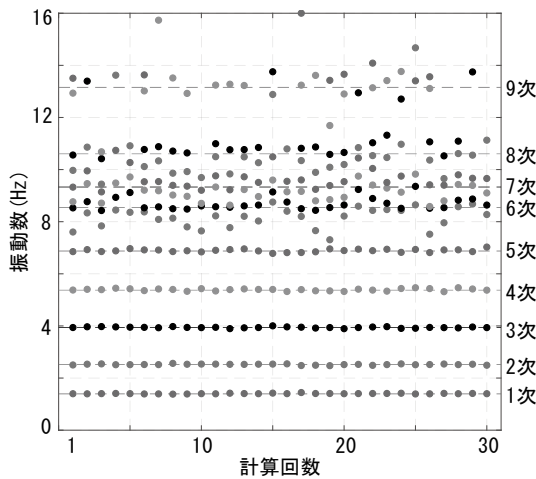


図6 帯域分離推定法適用前の固有振動数推定結果

表1 固有振動数の統計値

	固有値解析 (Hz)	帯域分離推定法適用前			
		平均値 (Hz)	標準偏差 (Hz)	変動係数 (%)	
低域	1	1.39	1.40	0.012	0.8
	2	2.52	2.52	0.020	0.8
	3	3.94	3.94	0.024	0.6
	4	5.37	5.39	0.043	0.8
	5	6.87	6.89	0.055	0.8
高域	6	8.55	8.16	0.372	4.6
	7	9.33	8.70	0.242	2.8
	8	10.61	9.15	0.337	3.7
	9	13.16	9.78	0.776	7.9

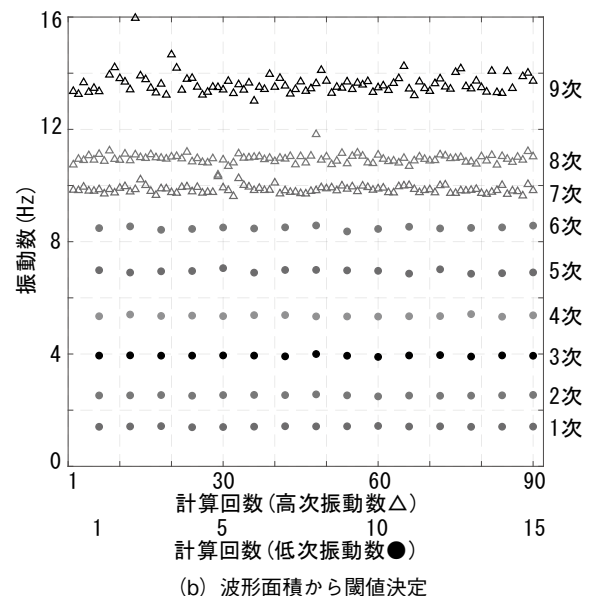
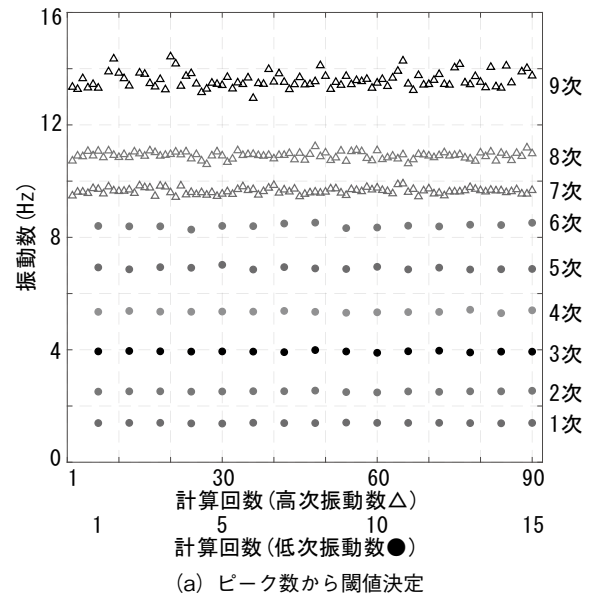


図8 帯域分離推定法適用後の固有振動数推定結果

表 2 固有振動数の統計値

	固有値 解析 (Hz)	(a) ピーク数から閾値設定			(b) 波形面積から閾値設定			
		平均値 (Hz)	標準偏差 (Hz)	変動係数 (%)	平均値 (Hz)	標準偏差 (Hz)	変動係数 (%)	
低次	1	1.39	1.40	0.009	0.6	1.42	0.012	0.8
	2	2.52	2.52	0.016	0.6	2.53	0.016	0.6
	3	3.94	3.94	0.023	0.6	3.94	0.023	0.6
	4	5.37	5.36	0.030	0.6	5.36	0.027	0.5
	5	6.87	6.91	0.046	0.7	6.95	0.058	0.8
	6	8.55	8.41	0.065	0.8	8.49	0.054	0.6
高次	7	9.33	9.65	0.104	1.1	9.86	0.126	1.3
	8	10.61	10.91	0.123	1.1	10.96	0.161	1.5
	9	13.16	13.73	0.770	5.6	13.73	0.768	5.6

(3) 帯域分離推定法適用後の固有振動数の推定結果

前章の図3に示した手法で低域と高域の振動領域の閾値を決定する。図7に加速度応答のパワースペクトルを示しているが、全節点分を足し合わせたものである。図中の(1)～(11)はスペクトルのピーク数を示している。(a)ピーク数から閾値を決定する場合、6次と7次の中間の振動数9.07(Hz)となる。一方、(b)波形面積から決定する場合、9.33(Hz)が閾値となっている。

決定した閾値を使い、帯域分離推定法により固有振動数の推定を行った。結果を図8、統計値を表2に示す。図中の●は低域、△は高域の振動数推定結果である。前進SSIのパラメータは既往研究²²⁾を参考に、低域の場合 dt=0.02秒、データセグメント長60秒、高域の場合 dt=0.005秒、データセグメント長10秒として計算を行う。

低域の振動数の1～5次はいずれも極めて明瞭な結果が得られ、欠損は確認できない。変動係数も極めて小さい値となっている。6次の固有振動数は固有値解析結果よりも若干過小評価となっているが、閾値と近接しているためと考えられる。高域振動の7、8次の振動数は固有値解析結果よりも過大評価となっているが、波形面積から決定した方が大きい値である。9次の振動数も7、8次同様にばらつきと推定値の欠損が見られるが、欠損率は波形面積から設定した方で3%程度、ピーク数から設定した方で1%程度であり、図6の結果と比較して大幅に改善している。また、振動数の平均値は固有値解析の結果に比較的近い値が得られた。

以上の結果から、本研究で検討したフィルタ処理における振動数の閾値の決定方法に一定の効果を確認することができた。本章での計算はシミュレーションでありノイズ成分の付加も行っていないため実橋梁計測データを用いる場合よりも良好な推定結果を得やすい条件であるが、得られた結果より推定結果の変動係数を5%以下、推定値の欠損率を全計算回数10%以下とすることを目指す推定精度に設定する。

4. 実橋梁データを用いた振動数の推定

A橋で実際に計測した動的応答データを使い、帯域分離推定法を用いた振動数の推定を行う。本章では動的応答データ計測の概要と、計測データより推定した振動数の推定結果について説明する。

(1) 動的応答データの計測

動的応答データの計測は、供用環境下での鉛直方向の加速度応答を対象として行った。大型車を含む複数回の車両走行があったが、そのまま計測を実施している。加速度センサの設置位置は図4(b)の節点2、4、6、8、10、12の計6箇所の下弦材と斜材の格点位置とし、歩道部の床版地覆部に設置した。加速度応答のサンプリング周波数は100Hzとし、600秒の連続計測を実施した。図9に計測した動的応答データの一例を示しているが、複数の車両走行と思われる波形が記録されている。

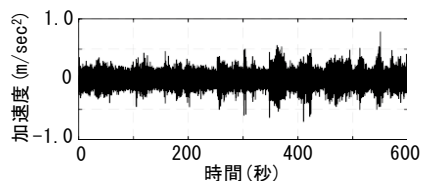


図9 計測した加速度応答(節点6)

(2) 帯域分離推定法適用前の振動数の推定

図10に帯域分離推定法適用前の振動数推定結果、表3に振動数の統計値を示す。図中の●印が振動数推定結果である。振動数推定には前章と同じ前進SSIを用い、設定パラメータは初期モデル次数を100、特異ベクトル長を50、データセグメント長を20秒とし、計30回の推定を行っている。7Hz未満の振動数は1.7、2.6、3.0、4.3、6.3Hz付近に卓越した結果が見られ、比較的良好な結果が得られている。7Hz以上の振動数は8.4、10.4、12.0、13.6、19.2Hz付近に卓越した結果が確認できるが、全体的にばらつきが大きく推定値の欠損率も大きな値となっている。

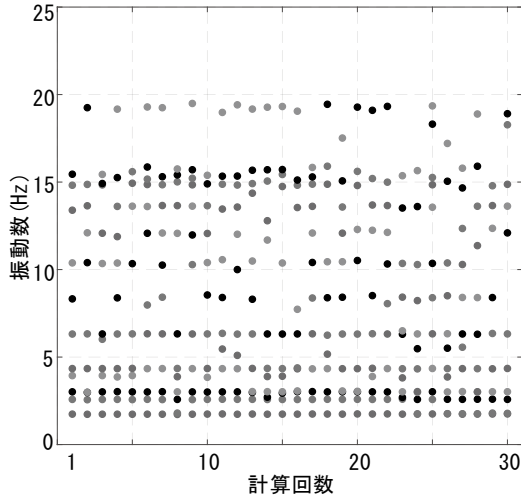


図10 帯域分離推定法適用前の振動数推定結果

表3 振動数の統計値

	平均値 (Hz)	標準偏差 (Hz)	変動係数 (%)	欠損率 (%)
1	1.74	0.008	0.4	0.0
2	2.58	0.007	0.3	0.0
3	3.01	0.008	0.3	0.0
4	4.34	0.007	0.2	0.0
5	6.31	0.057	0.9	0.0
6	8.36	0.138	1.7	33.3
7	10.36	0.110	1.1	26.7
8	12.17	0.194	1.6	40.0
9	13.61	0.054	0.4	26.7
10	15.36	0.297	1.9	0.0
11	19.11	0.479	2.5	40.0

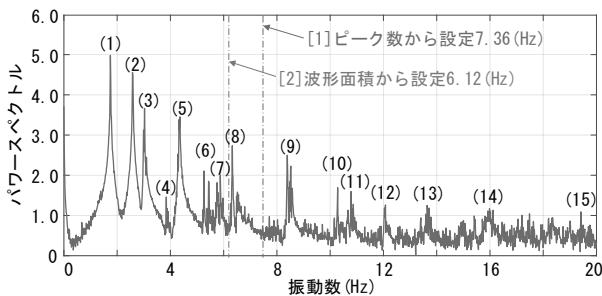


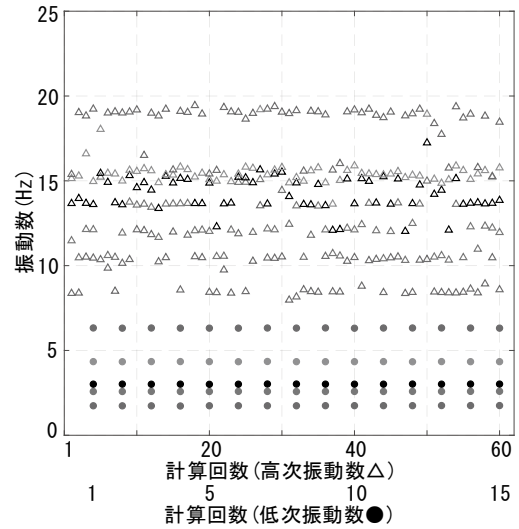
図11 加速度応答のパワースペクトルと閾値決定

(3) 低域・高域の閾値設定と振動数の推定

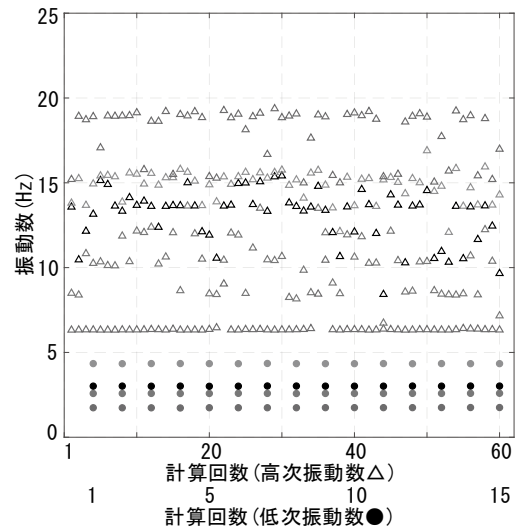
図11に加速度応答から算出したパワースペクトルを示す。2章(2)で示した(a)パワースペクトルのピーク数、(b)波形面積に着目して閾値を算出すると、7.36Hz、6.12Hzとなる。これらの閾値を使って算出した振動数を図12、統計値を表4に示す。図8同様に図中の●は低域、△は高域の振動数推定結果である。

図12(a)はピーク数から閾値を決定した結果である。

図10の5 Hz以下の領域では誤推定された振動数が複数確認できるが、1～5次の振動数は極めて明瞭な推定値が得られており、表4(a)の変動係数も非常に小さい



(a) ピーク数から閾値決定



(b) 波形面積から閾値決定

図12 帯域分離推定法適用後の振動数推定結果

値となっている。6次以上の振動数を見ると、欠損率は若干の改善が見られたが、変動係数に大きな改善は見られなかった。

図12(b)は波形面積から閾値を決定した結果である。閾値が小さいため5次の振動数が高次振動側で推定されており、一部推定値の欠損は見られるが、ばらつきは非常に小さくなっている。また、1～4次の振動数はピーク数から閾値を決定した場合と同様に明瞭な結果が得られている。6次以上の振動数は図12(a)と概ね近い位置に卓越した振動数を確認できるが、推定値の欠損率は大きな値となっている。

(4) 結果の評価と今後の課題

前章で示した通り目指す振動数の推定精度として変動係数を5%以下、欠損率を10%以下としていたが、低域の振動数推定に対しては変動係数、欠損率とも極めて

表4 振動数の統計値
(a) ピーク数から閾値決定

		平均値 (Hz)	標準偏差 (Hz)	変動係数 (%)	欠損率 (%)
低域	1	1.74	0.007	0.4	0.0
	2	2.58	0.004	0.2	0.0
	3	3.01	0.005	0.2	0.0
	4	4.34	0.004	0.1	0.0
	5	6.32	0.005	0.1	0.0
高域	6	8.54	0.373	4.4	50.0
	7	10.46	0.143	1.4	36.7
	8	12.07	0.204	1.7	40.0
	9	13.64	0.094	0.7	25.0
	10	15.11	0.396	2.6	0.0
	11	18.90	0.608	3.2	21.7

(b) 波形面積から閾値決定

		平均値 (Hz)	標準偏差 (Hz)	変動係数 (%)	欠損率 (%)
低域	1	1.74	0.007	0.4	0.0
	2	2.58	0.004	0.2	0.0
	3	3.01	0.004	0.1	0.0
	4	4.34	0.004	0.1	0.0
	5	6.34	0.026	0.4	5.0
高域	6	8.45	0.342	4.1	61.7
	7	10.41	0.252	2.4	46.7
	8	12.04	0.249	2.1	58.3
	9	13.61	0.144	1.1	33.3
	10	15.27	0.361	2.4	10.0
	11	18.94	0.219	1.2	33.3

良好な結果が得られ、帯域分離推定法および本研究で検討した低域と高域の閾値の決定手法の効果を確かめることができた。

一方、高域の振動数は変動係数は概ね満足できたものの欠損率は10%を超過しており、改善が必要である。振動数の閾値はピーク数から決定した方が欠損率は小さくなっており、本研究で使用した加速度応答のようにスペクトルのピークが明確に判別できる場合はピーク数から閾値を決定する、ピーク数の判別が容易ではない場合は波形面積から閾値を決定するような使い分けが有効である可能性がある。一方、ピーク数の判別は計測者によって変動する可能性もあるため、判別方法についても今後検討が必要である。また、高域の振動数の欠損率の改善には、帯域分離推定法や前進SSIのパラメータの調整、入力する動的応答データの見直し等を今後実施していく必要がある。

5. まとめと今後の課題

本研究では橋梁の効率的な損傷検出手法の確立を目指し、帯域分離推定法を用いた振動特性推定の高精度化のため、目指す振動数推定値の精度の検討および、帯域分離推定法における低域と高域の振動領域の閾値の決定方法についてシミュレーションおよび実橋梁計測データを

使用した検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 帯域分離推定法におけるフィルタ処理の振動数の閾値について、応答波形から算出したパワースペクトルに着目し、ピーク数と波形面積から決定する方法を検討した。シミュレーションでは両手法で決定した閾値は概ね近い振動数となったが、実橋梁計測データを使用した検討では波形面積から決定した方が1 Hz程度閾値が小さい値となった。
- 2) 鋼アーチ橋A橋を対象とした解析による検証では、ピーク数と波形面積で決定した閾値を基準として振動数を推定した。結果、両者の振動数は概ね一致し、固有値解析で得られた固有振動数とも近い値が得られた。帯域分離推定法を使用しない場合、高域の振動数を上手く分離できず、欠損率も大きい値であったが、帯域分離推定法を使用することで高域の振動数の欠損率は1～3%程度と大幅な改善が見られた。なお、本解析で得られた結果から、目指す振動数の推定精度を変動係数5%、欠損率10%と定めた。
- 3) A橋の実橋梁計測データによる検証でも、振動数の変動係数に関しては本研究で検討した手法による振動数の推定精度向上が確認できた。しかし、高域振動の推定値の欠損率は10%を満足できず、帯域分離推定法や前進SSIのパラメータ、入力する動的応答データの見直しが必要である。
- 4) 低域と高域の閾値の決定方法について、スペクトルのピーク数と波形面積に着目した方法について検討したが、スペクトルのピークが容易に判別できる場合と判別が難しい場合で閾値の決定方法を使い分けることが有効と考えられる。

今後の課題として、帯域分離推定法や前進SSIのパラメータ決定方法の検討がある。具体的には時間間隔、モデル次数、特異ベクトル長等であるが、一義的に決定する手法の検討を行いたい。また、近接固有値を有する構造物への帯域分離推定法の適用も挙げられる。玉田ら²³⁾の既往研究では橋梁損傷による0.1Hz程度の振動数の変化を検出している。帯域分離推定法により同程度の近接固有値の分離を高精度に行う手法を実現したい。また、本研究では入力する動的応答データを1計測分使用したが、欠損率に関して目標を満足することができなかった。複数の計測データを用いて統計的に振動数を推定する手法についても検討を行っていく予定である。

謝辞

本研究は福岡大学の研究助成(推奨研究プロジェクト、課題番号227402)を受けて実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和元年版 国土交通白書，p.110, 2019.
- 2) 国土交通省：令和3年版 国土交通白書，p.45, 2021.
- 3) 岡林隆敏，奥松俊博，中宮義貴：常時微動に基づくARモデルによる構造物振動数の高精度自動推定，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.271-282，2004.
- 4) 吉岡勉，原田政彦，山口宏樹，伊藤信：斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討，構造工学論文集，Vol.54A，pp.199-208，2008.
- 5) Wei-Hua Hun, Carlos Moutinho, Elsa Caetano, Filipe Magalhaes, Alvaro Cunha: Continuous dynamic monitoring of a lively footbridge for serviceability assessment and damage detection, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.33, pp.38-55, 2012.
- 6) 三増拓也，金哲佑，五良直，林巖：実鋼鈹桁橋の損傷前後における振動特性に関する考察，土木学会論文集A2，Vol.74，No.2，pp.I_513-I_522，2018.
- 7) 内藤英樹，小林珠祐，土屋祐貴，杉山涼亮，山口恭平，早坂洋平，安川義行，鈴木基行：局所振動試験に基づく道路橋RC床版の内部損傷評価，土木学会論文集E2，Vol.73，No.2，pp.133-149，2017.
- 8) 豊崎裕司，成行義文，源貴志：1次モード形の変化に基づく合成桁橋の損傷同定法に関する数値解析的研究，日本地震工学学会論文集，第16巻，第1号，pp.238-247，2016.
- 9) 渡邊学歩，友廣郁也，後藤悟史，江本久雄：橋梁振動実験に基づく斜橋の固有振動数の同定と部材の損傷が振動特性に及ぼす影響に関する基礎的研究，構造工学論文集，No.60A，pp.513-521，2014.
- 10) 金哲佑，北内壮太郎，杉浦邦征，川谷充郎，甲斐正義：多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法，土木学会論文集A1，Vol.69，No.3，pp.557-571，2013.
- 11) Juang, J.N. and Pappa, R.S.: An eigen system realization algorithm for modal parameter identification and modal reduction, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985.
- 12) Juang, J. N. and Pappa, R. S.: Effect of Noise on Modal Parameters Identified by the Eigensystem Realization Algorithm, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.9, No. 3, pp. 294-303, 1986.
- 13) 西川貴文，田代大樹，中村聖三，岡林隆敏：実稼働モード推定のための構造同定条件に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol.62A，pp.226-238，2016.
- 14) Akaike, H.: Stochastic theory of minimal realization, IEEE Trans, Autom. Control, vol.19, pp.667-674, 1974.
- 15) Overschee, P. V., and Moor, B. D.: Subspace identification for linear systems: Theory-Implementation-Applications, Kluwer, Dordrecht, Netherlands., 1996.
- 16) 奥松俊博，Jawaid Bashir Ahmad，岡林隆敏，下妻達也：遠隔モニタリングによる離島架橋の風速と振動数推定精度の検証，構造工学論文集，Vol.55A，pp.275-283，2009.
- 17) 田代大樹，西川貴文，中村聖三，奥松俊博：実応答データを用いた確率的部分空間法の同定条件に関する一検討，構造工学部論文集，Vol.64A，pp.343-353，2018.
- 18) 小松正貴，奥松俊博，岡林隆敏，下妻達也，深田宰史：実現理論による近接固有値を有する構造物の振動特性推定，構造工学論文集，Vol.59A，pp.340-352，2012.
- 19) Kangming Chen, Takafumi Nishikawa, Shozo Nakamura and Takatoshi Okabayashi: Change in dynamic characteristics of a steel arch bridge by a hanger rupture and possibility of its detection, 鋼構造年次論文報告集，第21巻，pp.899-906，2013.
- 20) 李亮，大久保孝昭，松本慎也，宮本文穂：無線加速度センサを用いた振動計測システムの老朽橋梁への適用と有効性：コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.1309-1314，2014.
- 21) Md. Rajab Ali, Takatoshi Okabayashi, Toshihiro Okumatsu: Ambient vibration data re-sampling by cubic spline interpolation for accuracy improvement of bridge dynamic characteristics estimation using realization theory, Journal of Structural Engineering, Vol.57A, pp.276-288, 2010.
- 22) 下妻達也，岡林隆敏，西川貴文，中村聖三，渡辺浩：確率的部分空間法による固有振動数推定精度向上のための応答データ処理手法の基礎的検討，構造工学論文集，Vol.68A，pp.289-297，2022.
- 23) 玉田和也，宮下剛，劉翠平，岩崎英徳，長井正嗣：段階的に損傷を与えた鋼鈹桁橋の振動計測と有限要素解析，橋梁振動コロキウム2011論文集，pp.68-75，2011.

STUDY ON HIGH ACCURACY OF DYNAMIC CHARACTERISTICS ESTIMATION METHOD AND EXPERIMENTAL VERIFICATION FOR BRIDGE DAMAGE DETECTION

Tatsuya SHIMOZUMA

In recent years, studies have been reported which aim to detect bridge damage from changes in vibration characteristics. In those studies, variable characteristics are estimated from bridge dynamic responses by utilizing structural identification methods such as ERA and stochastic subspace identification, where estimation accuracy generally decreases due to the influence of noises in the response data. This study aims to consider the threshold of lower-order and higher-order frequency in frequency bands separation method. Verification using analytical and actual response data showed improvement of identification in accuracy for lower-order modes and higher-order modes.

Keywords : *System identification, Stochastic subspace identification, Ambient vibration, Data re-sampling*