

振動特性に着目した橋梁損傷検出のための振動特性推定手法の高精度化

下妻達也¹

福岡大学 工学部 社会デザイン工学科

近年、橋梁の動的応答データから SSI 等の手法により振動特性を推定し、その変化から橋梁の損傷検出を試みる研究が報告されている。損傷による振動特性の変化は小さいと考えられるため、本研究は SSI 等に入力する応答データに 3 つの処理を施し、振動数の推定精度の向上を図った。結果、低次の振動数推定精度は大きな向上が見られ、高次の振動数も推定精度の改善が確認できた。

1. はじめに

国・県の危機的予算の中、橋梁の維持管理は重要な課題である。国土交通白書¹⁾によると道路橋で建設後 50 年以上経過するものの割合は全体の約 63%と見込まれているが、膨大な数の橋梁を満足に点検するのは費用や技術者の減少等の理由から容易ではなく、経費的に実現可能な維持管理手法の確立は喫緊の課題である。

これに対し、近年橋梁の振動特性(固有振動数、減衰定数、振動モード)の変化から損傷検出を試みる研究が多数報告されている^{2),3)}。これは、橋梁が健全な時と部材が損傷した時の振動特性の変化に着目するもので、図 1 に示すように橋梁に設置した加速度センサ等から得られた動的応答データから振動特性の推定が行われる。本手法が確立すれば、橋梁の振動データ計測を行うことで損傷の検出ができるようになる可能性があり、近接目視点検よりも大幅な労力の軽減が期待できる。

振動特性の推定手法には実現理論を元とする ERA 法^{4),5)}や、確率的部分空間法(以下、SSI)⁶⁾⁻⁸⁾などが用いられている場合が多いが、既往研究では特に高次振動領域において、ノイズの影響により固有振動数の推定精度の低下が見られるケースが多い^{9),10)}。一方、低次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¹¹⁾。橋梁部材に損傷が生じた時の振動特性の変化は小さいと考えられるため¹²⁾、従来の手法よりも振動特性の推定精度を向上させる必要がある。

これまでに SSI 等振動特性推定手法に関する研究^{2),6)}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⁶⁾、フィルタ処理¹³⁾、内挿処理¹⁴⁾等を動的応答データに個別に施すことで振動特性推定精度の向上を図っているものがあ

る。いずれもノイズ成分の軽減を目的としたものであるが、これらの処理を複合的に組み合わせる方法は検証されていない。そこで本研究では SSI 等に入力する動的応答データにデータ長の調整、フィルタ処理、内挿処理を組み合わせ、各処理のパラメータ設定を適切に行った上で適用することで、振動特性推定精度の向上を図る。本手法の妥当性が確認できれば、従来よりも高精度な振動特性の推定が可能になると考えられる。

本稿では、動的応答データに施す 3 つの処理方法の詳細を説明する。また、実在する鋼アーチ橋、鋼ランガ-桁橋を対象に、解析、実橋梁計測による動的応答データから固有振動数の推定を行う。さらに、データ長の調整、フィルタ処理、内挿処理を施した動的応答データから固有振動数の推定を行い、得られた結果について考察する。

2. 動的応答データの処理方法

動的応答データに施すデータ処理は図 2 に示す手順で行われる。低次振動の推定と高次振動の推定で処理方法が異なるため分けて示しているが、詳細を以下に示す。

橋梁の動的応答データは様々な周波数の波が

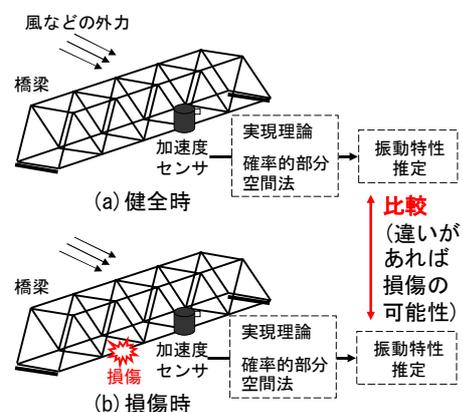


図 1 振動特性に着目した橋梁の損傷検出

足しあわされたものであるため、低次振動の推定においては高次振動が、高次振動の推定においては低次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すことで着目している領域外の振動成分を除去する。具体的には、低次振動の推定時はローパスフィルタ、高次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、本研究では全て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。動的応答データのサンプリング周波数は100(Hz)程度とする場合が多いが^{6),9)}、低次振動の推定時は時間刻みを大きくすることで高次成分の影響を小さくできる。具体的な処理は動的応答データの間引きを行い、時間刻みを大きくしている。一方、高次振動の推定時は時間刻みを小さくするが、これだけでは低次振動の影響を軽減できない。しかし、後述するデータ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。内挿方法にはいくつか種類があるが、本研究では個々のデータを3次関数で結ぶ3次スプラインを用いる。3次スプラインを用いたのは既往研究¹⁴⁾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ためである。

最後に、振動特性推定に使うデータ長の調整を行う。低次振動は波形の周期が長いいため極力計算に使うデータ長を大きくする。一方、高次振動は計算に使うデータ長を短くすることで低次振動の影響を小さくする。

以上3つの一連の処理を本稿では「応答データ処理」と呼ぶ。解析および実橋梁にて計測された動的応答データに応答データ処理を施し、固有振動数の推定を行う。

3. 解析による応答データ処理の有効性の検証

本章では応答データ処理の有効性を解析により検証する。

(1) 対象橋梁と加速度応答計算

対象橋梁はA橋であり、1980年に架設された橋長115(m)、幅員10(m)の鋼アーチ橋である。図3に示す平面モデルを用い、A橋の全ての部材を梁要素でモデル化した。外力は図4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。時間刻みは $dt=0.01$ (秒)とし、下弦材の全節点の速度応答をNewmark β 法により算出した。

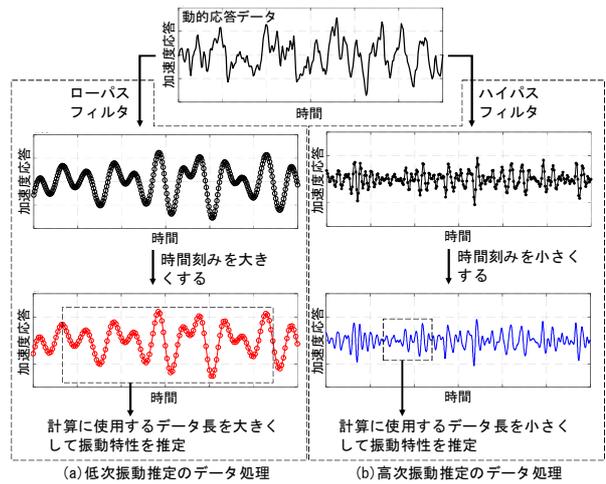


図2 応答データ処理手順

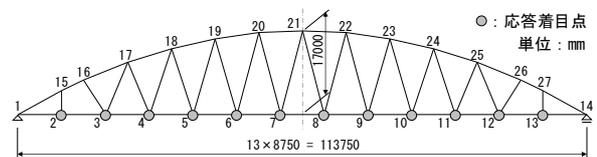


図3 解析モデル

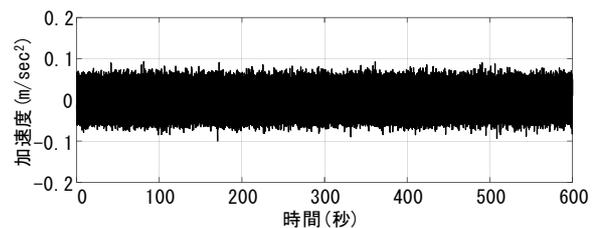


図4 常時微動外力

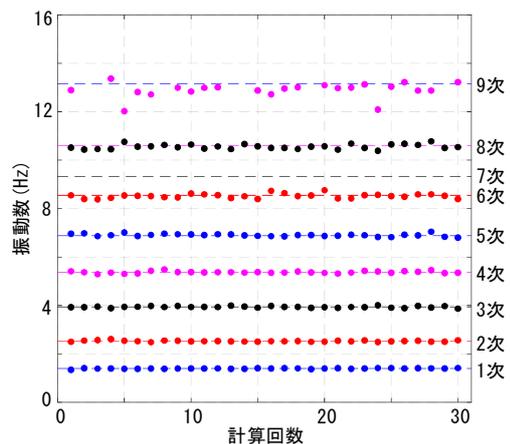


図5 固有振動数推定結果

(2) 応答データ処理前の固有振動数推定結果

Newmark β 法より算出した動的応答データから固有振動数の推定を行った。推定には確率的部分空間法の1種である前進SSIを用いた^{6),9)}、1回の計算に使うデータ長は20(秒)とし、計30回の推定を行った。図5に推定結果を示す。図

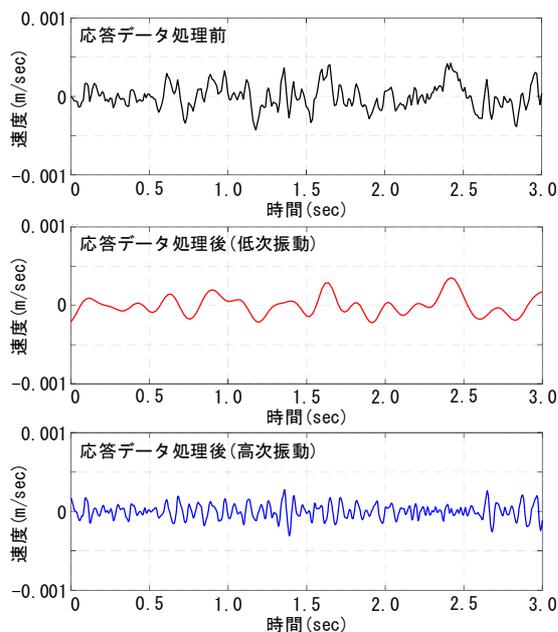


図6 応答データ処理前後の応答(節点2)

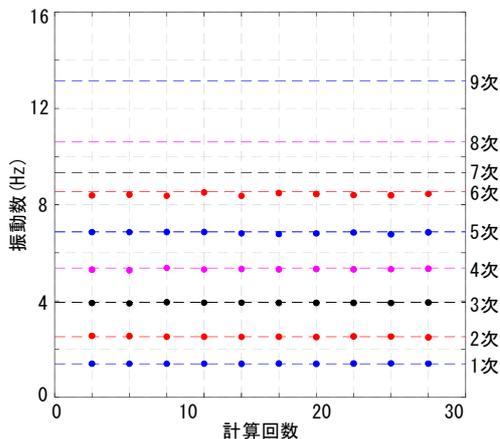


図7 固有振動数推定結果(低次)

中の丸印が前進 SSI による固有振動数の推定結果であり、破線は固有値解析より得られた固有振動数を示している。図より、概ね固有値解析の結果に近い推定値が得られているが、7次は推定が行えておらず、6次以上はばらつきが大きくなっている。また、9次モードは推定値の欠損が見られた。

(3) 応答データ処理方法と固有振動数推定結果

図5の結果は多くの次数で固有振動数に近い結果を得られたが、7次モードは推定を行えていなかった。そこで、6次と7次の間の9(Hz)を境として9(Hz)未満を低次振動、9(Hz)以上を高次振動とここでは定義する。

低次振動の応答データ処理はの手順で行う。はじめにローパスフィルタで9(Hz)以上の振動成分をカットする。時間刻みは元の $dt=0.01$ (秒) よりも小さい $dt=0.02$ (秒)となるよう間引きを行

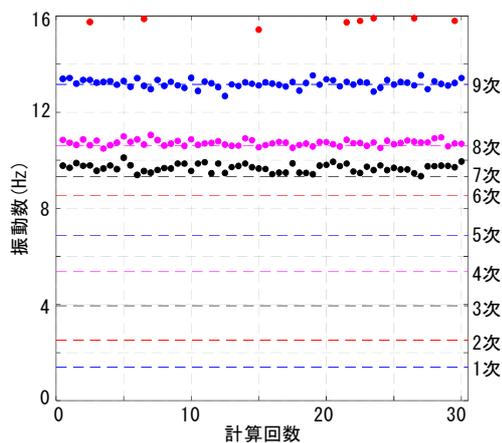


図8 固有振動数推定結果(高次)

表1 統計値

	固有値解析 (Hz)	低次振動領域(図-7)			高次振動領域(図-8)		
		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 (%)
1次	1.39	1.40	0.006	0.4	—	—	—
2次	2.52	2.52	0.018	0.7	—	—	—
3次	3.94	3.93	0.012	0.3	—	—	—
4次	5.37	5.32	0.026	0.5	—	—	—
5次	6.87	6.83	0.035	0.5	—	—	—
6次	8.55	8.42	0.046	0.6	—	—	—
7次	9.33	—	—	—	9.68	0.164	1.7
8次	10.61	—	—	—	10.72	0.119	1.1
9次	13.16	—	—	—	13.19	0.162	1.2

い、計算に使用するデータ長は元の20(秒)よりも長い60(秒)として計10回の推定を行う。一方、高次振動の応答データ処理は、はじめにハイパスフィルタで9(Hz)以下の振動成分をカットする。時間刻みは元の時間刻みよりも小さい $dt=0.005$ (秒)となるよう3次スプライン補間による内挿を行い、計算に使用するデータ長は元の20(秒)より短い10(秒)として計60回の推定を行う。図6に応答データ処理前後の動的応答データを示している。違いが分かるよう3秒間分のみ示すが、低次振動を抽出した波形(赤線)では処理前と比較して高周波成分が、高次振動を抽出した波形(青線)では低周波成分が見られなくなっている。

図7, 8に低次, 高次振動の応答から推定した固有振動数, 表1に統計値を示す。低次振動の結果は、6次で固有値解析の結果よりも若干過小評価となっているが、いずれのモードもほとんどばらつきが見られず、変動係数も小さい。高次振動の結果は7次の推定値が得られており、欠損が多かった9次モードも良好な結果が得られている。一方、7次モードの振動数は固有値解析の結果と比べてやや過大評価となっている。

以上の結果より、解析的に得られた応答データについては、一部改善が必要な箇所はあるものの応答データ処理の有効性を確認できた。

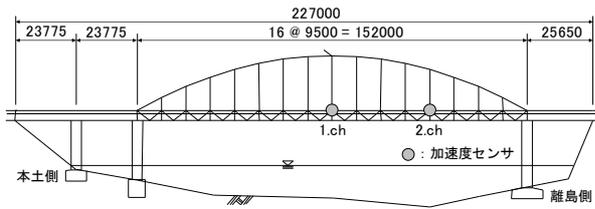
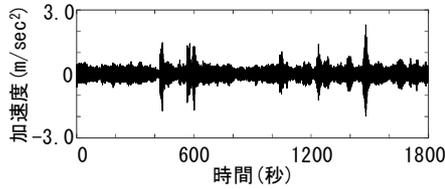
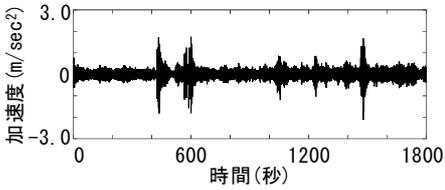


図9 一般図と加速度センサ設置位置



(a) 1.ch



(b) 2.ch

図10 計測した動的応答データ

4. 動的応答データの計測と固有振動数推定

解析では応答データ処理の有効性を確認できたが、本章では実橋梁計測データを使った検証を行う。

(1) 対象橋梁と動的応答データの計測

実橋梁であるB橋にて動的応答データの計測を行った。B橋は1986年に架設された橋長152(m)、幅員9.5(m)の鋼ランガ－桁橋であり、本土と離島を結ぶ渡海橋である。図9にB橋の一般図を示す。

動的応答データの計測は供用環境下の鉛直方向の加速度応答とし、支間中央、支間1/4点の2箇所に加速度センサを設置した。加速度センサの設置位置を図9に示している。計測のサンプリング周波数は100(Hz)とし、30分間の計測を行った。図10に計測した動的応答データを示している。

(2) 固有振動数の推定

図10に示す動的応答データから固有振動数の推定を行った。推定には前章と同じ前進SSIを用い、1回の計算に使うデータ長は30(秒)として計40回の推定を行った。

図11に固有振動数の推定結果を示す。振動数図の左の灰色の実線は動的応答データのパワースペクトルであり、横軸は対数表示としている。図より、0.8, 1.1, 1.9, 2.4, 2.8, 3.9, 6.1, 6.8, 8.0(Hz)付近(★部)に卓越した振動数が確認でき、パワースペクトルのピークの位置と概ね一致し

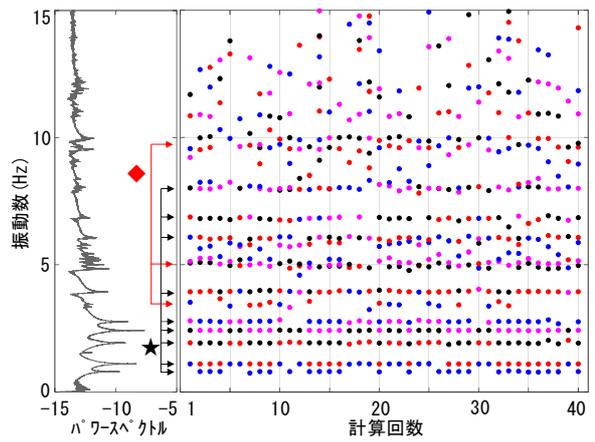


図11 固有振動数推定結果

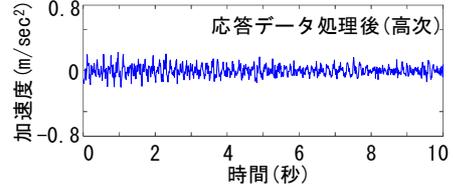
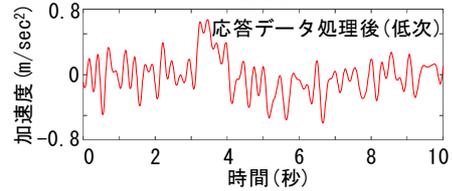
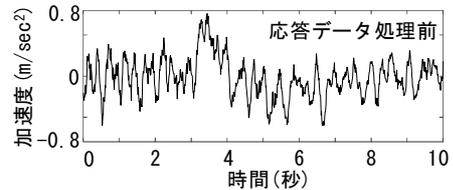


図12 応答データ処理前後の加速度応答

ている。しかし、一部の結果には推定値の欠損が見られる。3.5, 5.0, 9.6(Hz)付近(◆部)にも卓越した振動数が確認できるが、3.5, 9.6(Hz)付近の結果は推定値の欠損が非常に多い。5.0(Hz)付近には多くの推定結果がプロットされているが、近接した固有振動数が存在すると考えられ、それを上手く分離できていないと考えられる。

以上のように、計測した動的応答データからそのまま固有振動数の推定を行った場合でもある程度良好な結果は得られているが、ばらつきや推定値の欠損も見られるため推定精度の改善が必要である。

(3) 応答データ処理

計測した動的応答データに応答データ処理を行い、固有振動数推定精度の改善を図る。

図11の結果では3(Hz)程度までは概ね良好な推定結果が得られ、5(Hz)付近で近接する固有振動数を上手く分離できていないと想定される結果が見られた。そこで、5(Hz)を境として5(Hz)

未満を低次振動, 5(Hz)以上を高次振動とここでは定義する。

低次振動の応答データ処理は次の手順で行う。はじめに矩形窓のローパスフィルタで 5(Hz)以上の振動成分をカットする。時間刻みは元の $dt=0.01$ (秒)よりも小さい $dt=0.02$ (秒)となるよう間引きを行い, 計算に使用するデータ長は元の 30(秒)よりも長い 60(秒)として計 20 回の推定を行う。一方, 高次振動の応答データ処理は, 初めに矩形窓のハイパスフィルタで 5(Hz)以下の振動成分をカットする。時間刻みは元の時間刻みよりも小さい $dt=0.005$ (秒)となるよう 3 次スプライン補間による内挿を行い, 計算に使用するデータ長は元の 30(秒)より短い 20(秒)として計 60 回の推定を行う。

図 12 に応答データ処理前後の動的応答データを示す。違いが分かるよう 10 秒間分のみ示している。

(4) 5(Hz)未満の範囲の固有振動数推定結果

図 13 に低次振動の応答から推定した固有振動数, 表 2 上段に固有振動数の統計値を示す。図 13 の左側のパワースペクトルの図は図 11 と同じものである。

図より, 推定値の欠損は大幅に改善されており, 良好な推定結果が得られている。図 11 で見られた 3.5(Hz)付近の推定値の欠損も改善が見られた。また, 5(Hz)付近に近接した固有振動数が存在すると予想していたが, 4.9(Hz)付近に明瞭な結果が得られ, 近接した振動数を分離できた。統計値を見ると, 変動係数は最大で 1.6(%)と小さい値であった。応答データ処理前でも低次の振動数はある程度推定が行えていたが, 高次振動の成分がノイズとなり, 推定精度を悪化させていたと考えられる。

故に, 本研究で用いた応答データ処理手法は低次の固有振動数の推定精度向上に有効であると言える。

(5) 5(Hz)以上の範囲の固有振動数推定結果

図 14 に高次振動の応答から推定した固有振動数, 表 2 下段に固有振動数の統計値を示す。図より, 5.1, 5.5(Hz)付近に推定結果が得られているが, パワースペクトルのピークは複雑な形状となっており, 固有振動数であるかどうかは不明である。6.1(Hz)付近の振動数は図 11 よりも明瞭に推定結果が得られており, 9.6(Hz)付近の振動数はかなりばらつきが大きいものの図 11 の結果と比較して改善が見られた。一方, 6.8, 8.0(Hz)付近の結果は卓越した振動数が確認できるものの図 11 よりばらつきが大きくなっている。また, 統計値を見ると低次振動と比べて標

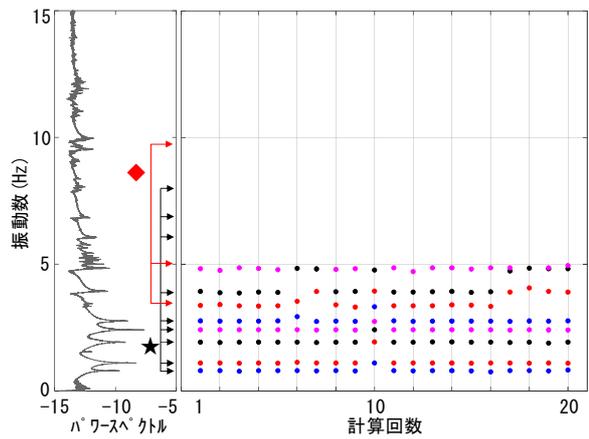


図 13 固有振動数推定結果(5(Hz)未満の範囲)

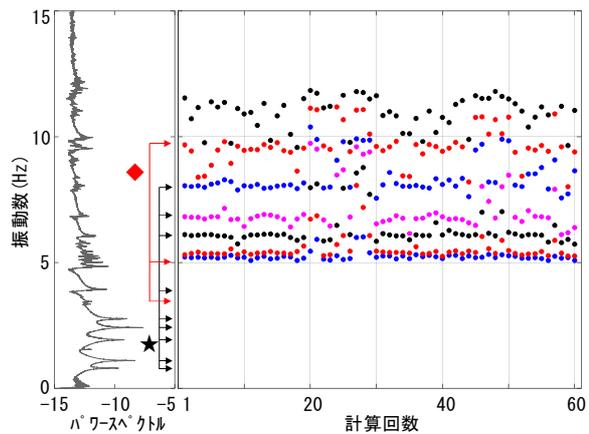


図 14 固有振動数推定結果(5(Hz)以上の範囲)

表 2 固有振動数の統計値

	平均値 (Hz)	標準偏差 (Hz)	変動係数 (%)	備考
1次	0.80	0.013	1.6	低次 0~5 (Hz)
2次	1.11	0.008	0.7	
3次	1.92	0.010	0.5	
4次	2.41	0.003	0.1	
5次	2.77	0.040	1.4	
6次	3.38	0.050	1.5	
7次	3.92	0.039	1.0	
8次	4.82	0.043	0.9	
9次	5.25	0.182	3.5	高次 5(Hz)~
10次	5.56	0.497	8.9	
11次	6.31	0.673	10.7	
12次	7.11	0.888	12.5	
13次	8.42	0.708	8.4	
14次	9.65	0.754	7.8	

準偏差, 変動係数は非常に大きくなっている。

以上の結果より, 高次振動についても一定の効果は確認されたが, 改善が必要な箇所も見られた。今回は 5(Hz)を境に低次と高次を分けて固有振動数の推定を行ったが, フィルタの閾値をより細かく設定して固有振動数の推定を行うことや応答データ処理のパラメータの見直し等の対策により, 推定精度をより向上できる可能性がある。また, 機材の都合上観測点を 2 点とし

たが、観測点を増やし多くの振動モードを検出できるようにすることも必要である。

5. まとめ

本研究では橋梁の振動特性に着目した損傷検出のため、橋梁の動的応答データにフィルタ処理、時間刻み変更、データ長調整を統合した応答データ処理を適用し、振動特性の推定精度向上を図った。また、実在する鋼アーチ橋、鋼ランガー桁橋を対象として解析、実橋梁計測データを用いて固有振動数推定を行い、応答データ処理の有効性について検証を行った。これらの結果から、応答データ処理手法について一定の有効性を確認することができた。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 応答データ処理手法の3つの計算過程について述べ、鋼アーチ橋のA橋、鋼ランガー桁橋のB橋を対象とした解析、実橋梁計測データによる固有振動数推定の手順を示した。
- 2) 低次の振動数は時間刻みを大きく、データ長を大きくすることで高次振動の影響を軽減し、良好な推定結果を得ることができた。また、解析にて固有振動数が近接していると考えられる結果が見られたが、フィルタの閾値を適切に設定することで良好な推定結果を得ることができた。
- 3) 高次の振動数は時間刻みを小さく、データ長を小さくすることで低次振動の影響を軽減し、近接した固有振動数の分離と推定結果の欠損の改善が確認された。

本研究で得られた結果を踏まえ、応答データ処理手法の各種パラメータを一義的に決定する方法について検討していく予定である。

6. 謝辞

本研究は、一般社団法人九州建設技術管理協会「建設技術研究助成」を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

7. 参考文献

- 1): 国土交通省, 国土交通白書 2021, p.45, 2021.
- 2): 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.
- 3): 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.
- 4): 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.

- 5): 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.
- 6): 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.
- 7): Akaike, H., Stochastic theory of minimal realization, IEEE Trans, Autom. Control, vol.19, pp.667-674, 1974.
- 8): Overschee, P. V., and Moor, B. D., Subspace identification for linear systems: Theory - Implementation - Applications, Kluwer, Dordrecht, Netherlands., 1996.
- 9): 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.
- 10): 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.
- 11): 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.
- 12): 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.
- 13): 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.
- 14): 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.