

長期橋梁モニタリングによる少数主桁橋の固有振動数の変動

Fluctuation in natural frequencies of a minimized girder bridge by long term bridge monitoring

北見工業大学 ○学生員 小川大智 (Daichi Ogawa)
 北見工業大学 高橋友弥 (Tomoya Takahashi)
 北見工業大学 正会員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
 日本航空電子工業 大胡拓矢 (Takuya Daigo)
 日本航空電子工業 正会員 富岡昭浩 (Akihiro Tomioka)
 長岡技術科学大学 正会員 宮下 剛 (Takeshi Miyashita)

1. はじめに

近年では橋梁の老朽化対策として、構造物にセンサを設置して、振動応答などを計測し、解析することで構造物の健全度評価を行う構造ヘルスモニタリングへの関心が高まっている。

振動を利用した構造ヘルスモニタリングは、加速度センサによって鉛直方向の振動を測定することが一般的に行われる。測定した構造物の振動波形や固有振動特性の変化から損傷の有無、位置、程度を把握する。しかし、構造物の固有振動数は健全であっても環境温度などの影響で変動する^{1), 2), 3)}。

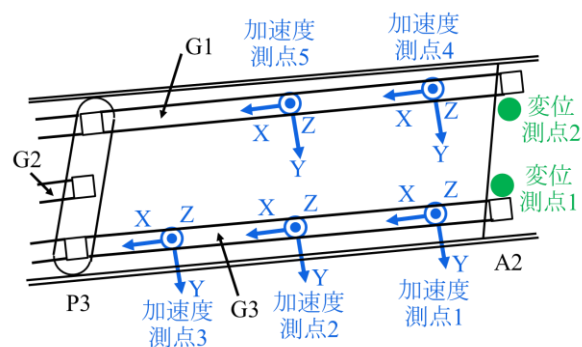
一方、橋軸方向については、変位センサも用いられることが多い。大地震や損傷があると、支承や伸縮装置の変形量に異常が発生する可能性があるが、常時においても温度変化による桁の伸縮は発生するので、伸縮量をあらかじめ評価しておく必要がある。

本研究の目的は構造ヘルスモニタリングの基礎的検討として、気温の季節変動や環境要因が固有振動特性や橋桁の変位にどのような影響を与えるのかを実橋梁を対象として長期橋梁モニタリングを行い、振動特性や変位の変化について検証しようとするものである。

に示す。加速度センサは3軸加速度計(JA-70SA)を用い、P3-A2間のG3側3台、G1側2台、計5台設置した。変位センサはレーザー変位計(CD22-100-485M122)を用い、A2橋台の2箇所の支承に1台ずつ設置した。

振動加速度の測定はサンプリング周波数を1000Hzとし、連続して振動計測を行っておりデータを10分毎に収録した。変位はソールプレートとサイドブロックの間の橋軸方向変位を振動加速度と同様に計測している。

振動加速度と変位は同時に測定し、本報では2016年8月4日から2017年8月4日までの1年間の測定結果について述べる。



加速度計

変位計

図-2 センサ配置図と設置状況

2. 測定概要

2.1 対象橋梁

本研究で対象とする橋梁は2007年に架設された北海道北見市に位置する4径間連続少数主桁橋である。図-1に対象橋梁側面図を示す。本橋は4径間連続橋で各支点はゴム支承で弾性支持されている。また、幅員が変化するため第1径間～第3径間は3主桁、第4径間は2主桁である。床版は合成床版を採用している。

2.2 モニタリング内容

加速度センサ、変位センサの配置図と設置状況を図-2

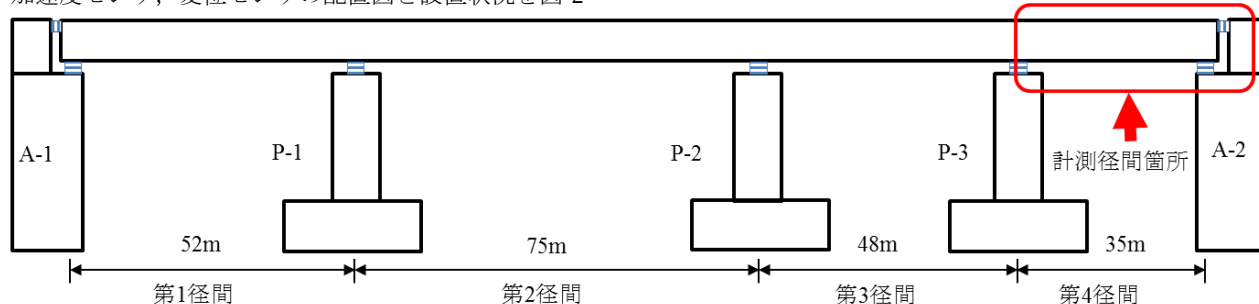


図-1 対象橋梁側面図

3. 測定データの処理方法と基本的応答特性

3.1 振動加速度の処理方法と固有振動特性

測定結果の一例として、測点 2 の Z 軸方向における 2016 年 8 月 29 日 5 時 30 分から 10 分間の時刻歴加速度波形を示す。図-3 では、車両の通過によって加速度が大きくなっており、車両が通行していない常時微動状態では 1gal 未満の振幅になっている。固有振動特性を得るために 10 分間の時刻歴加速度波形から減衰自由振動波形を抽出する。減衰自由振動波形は車両が通過した後で、時間が経過するにつれて振動振幅が減少している時間帯を目視で抽出した。図-4 は図-3 の 117.0s から約 4 秒間抽出したものである。

固有振動数の算出方法はピークピッキング法を用いた。各測点 Z 軸方向の減衰自由振動波形をフーリエ変換し、得られた各測点のフーリエスペクトルのピーク値を平均して固有振動数とした。図-5 に減衰自由振動波形のフーリエスペクトルを示す。図-5 では、第 1 ピーク値が 3.66Hz、第 2 ピーク値が 5.62Hz であることが確認できる。さらに各測点の振動波形にこれらの振動数を含むバンドパスフィルタを適用し、振幅の極大値について各測点の Z 軸の振幅比をモード形状とした。減衰自由振動波形から算出したモード形状を図-6、図-7 に示す。図-6 より、支間中央の測点の振幅が他のどの測点よりも大きく位相差がないため曲げ 1 次モード形状だと考えられる。図-7 では、支間中央の測点の振幅が逆位相を示しており、ねじれ 1 次モード形状だと考えられる。これらのモード形状から、曲げ 1 次固有振動数は 3.66Hz、ねじれ 1 次固有振動数 5.62Hz となる。減衰定数は図-5 のフーリエスペクトルの第 1 ピークと第 2 ピークにそれぞれハーフパワー法を適用して、各測点の平均値を減衰定数とした。3.66Hz、5.62Hz の減衰定数はどちらも 0.04 である。

3.2 桁端変位と伸縮量

図-8 に A2 側 G3 桁端の橋軸方向変位、温度変化を示す。変位は年間の変動の傾向を確認するため 1 日分の変位データの平均を求めた。温度データはアメダス観測記録を用い、1 日の平均温度を用いた。北見市の気象観測システムは北見市広郷にあり⁴⁾、本研究で計測対象となる橋梁の西へ 3.35km 離れたところに位置している。本橋では、図-2 に示した他にも記録用のコンピュータの動作環境を監視するために温度センサを設置しているが、測定値の変動が大きいためここではアメダス観測記録を用いる。図-8 より、G3 変位は季節が変わることによって桁端の橋軸方向の変位が変化する傾向が確認できる。また、G1 変位は G3 変位とほぼ同じ挙動を示した。変位とアメダス観測記録に着目すると G3 変位は温度と同じように変化しているため、温度に対する変化を確認するために図-9 に温度と G3 桁端の変位の関係を示す。図-9 から G3 の変位は温度に対して正の相関があることが確認できる。この原因は部材温度の変化によって橋桁が伸縮したためと考えられる。

熱膨張による橋桁の変化量の理論値 ΔL は線膨張係数 α 、桁長 L 、温度差 ΔT を用いて以下のように表される⁵⁾。

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (1)$$

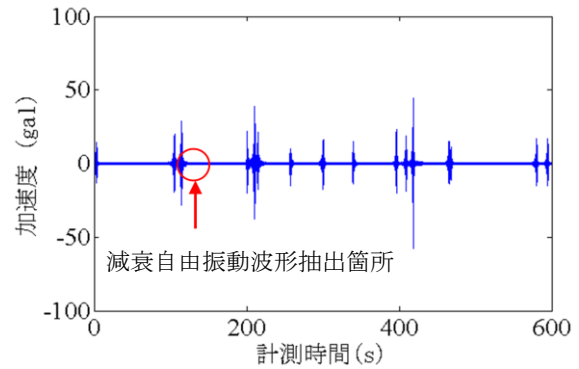


図-3 10 分間の時刻歴加速度波形

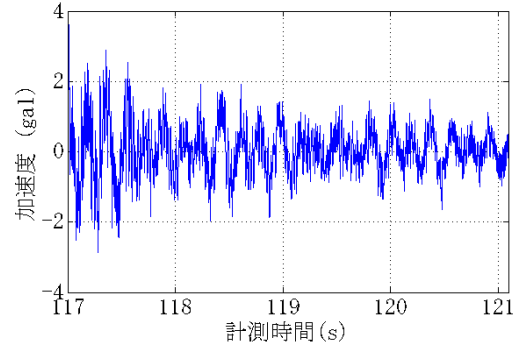


図-4 減衰自由振動波形

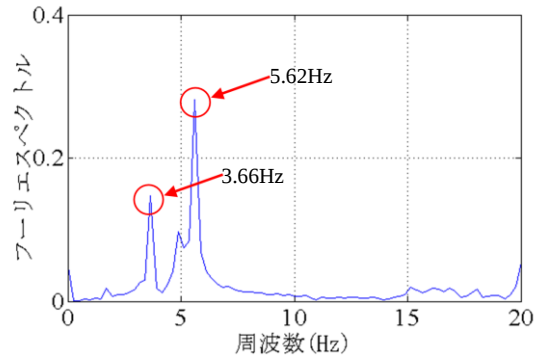


図-5 減衰自由振動波形のフーリエスペクトル

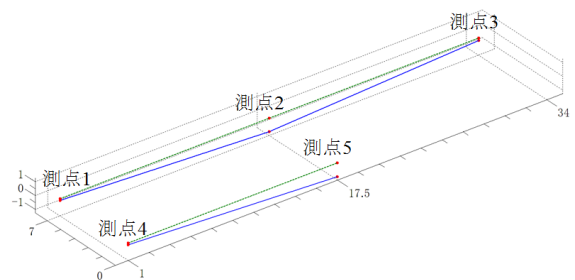


図-6 曲げ 1 次モード形状

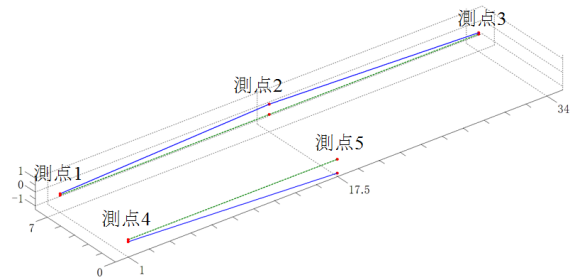


図-7 ねじれ 1 次モード形状

桁長は 211m であるが、本橋はゴム支承で弾性支持されているため $L=211/2$ として求める。線膨張係数 $\alpha=1.2 \times 10^{-5}$ 、温度差 $\Delta T=32.1^\circ\text{C}$ として(1)から求めた橋桁の伸縮量は 40.8mm であり、実際に計測した変位量は 49.0mm である。算出された値よりも計測値が大きいのは、ここでは温度データを部材温度ではなくアメダス観測記録を用いているからだと考えられる。

4. 固有振動数の変動

図-10 に図-3 の 10 分間の時刻歴加速度波形のフーリエスペクトルを示す。図-10 では、第 1 ピークの振動数は 3.68Hz、第 2 ピークの振動数は 5.58Hz である。図-5 とピークの振動数が異なるのはスペクトルの周波数分解能が異なるためである。図-5 では $\Delta f=0.2442\text{Hz}$ 、図-10 では $\Delta f=0.0016\text{Hz}$ となる。

まず、曲げ 1 次モードの振動数の変動を確認するため、図-10 のような 10 分間のフーリエスペクトルを計測期間に渡って連続的に求め、曲げ 1 次固有振動数近傍の 3.2Hz~4.5Hz でのパワースペクトルの最大値を抽出し時刻に対してプロットしたものが図-11 である。すなわち図-11 は曲げ 1 次固有振動数の変化となる。図-11 では、0.15Hz 程度のばらつきはあるものの曲げ 1 次振動数は 3.6Hz 付近で季節によって変化し、夏から冬にかけて大きくなり冬から夏にかけて小さくなることを確認できる。さらにこの抽出したピークについて、振動数とパワースペクトルのピーク値の関係を図-12 に示す。図-12 より 3.6Hz 付近の点はピークが大きく振動が卓越していることから、固有振動モードであると確認できる。4.2Hz~4.5Hz にも点が分布しているが、ピーク値は小さく分布もばらついているため固有振動モードではないと考えられる。

曲げ 1 次固有振動数の温度に対する変化を検討するために図-13 に温度と曲げ 1 次固有振動数の関係を示す。温度データはアメダス観測記録を用いた。図-13 から曲げ 1 次固有振動数は温度に対して負の相関がある。桁端変位の変化は総桁長 211m に対して 0.05% であるが、振動数の変化が 6% であるため、固有振動数の変動に与える影響は桁の伸縮が主因ではないと考えられる。既往の研究^{2), 3), 6)}では、温度変化がコンクリートやアスファルトの動弾性係数に影響を与えていることが知られており、本測定における固有振動数の温度依存性も合成床版のコンクリートやアスファルトの動弾性係数の変化が主な要因であると推測できる。また、固有振動数のばらつきについては温度データを部材温度ではなく、アメダス観測記録を用いているからであり、また、日射により主桁や床版内の温度勾配による影響も考えられる。

次に、ねじれ 1 次固有振動数の変動を確認するために曲げ 1 次固有振動数と同様に 10 分間のフーリエスペクトルからねじれ 1 次固有振動数近傍の 5.2Hz~6.0Hz でパワースペクトルの最大値を抽出し、時刻に対してプロットしたものが図-14 である。図-14 では、ねじれ 1 次固有振動数はおおむね 5.4Hz~5.7Hz の範囲で変動している。曲げ 1 次振動数の変化とは傾向が異なり、数ヶ月程度の周期で変動する傾向がある。図-15 でも 5.4Hz ~

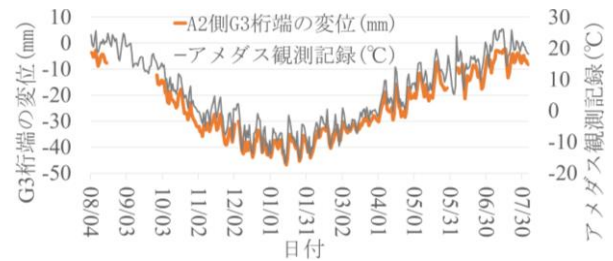


図-8 G3 桁端の変位と気温の時刻歴波形

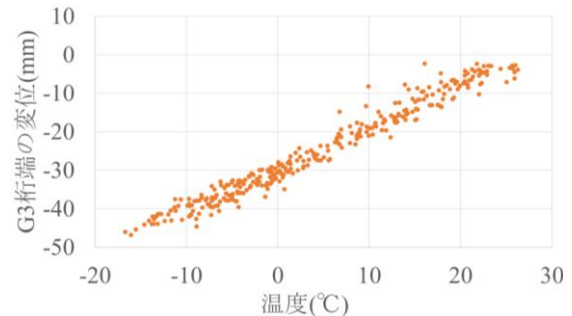


図-9 温度と G3 桁端の変位

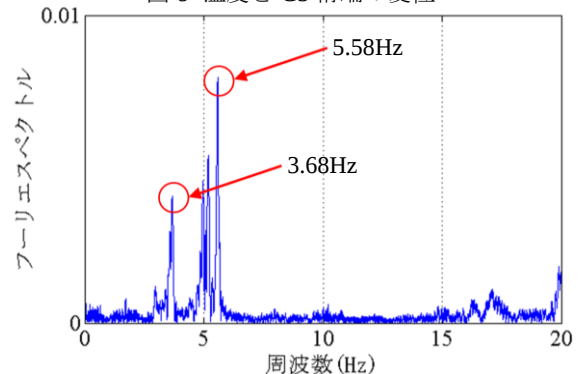


図-10 10 分間のフーリエスペクトル

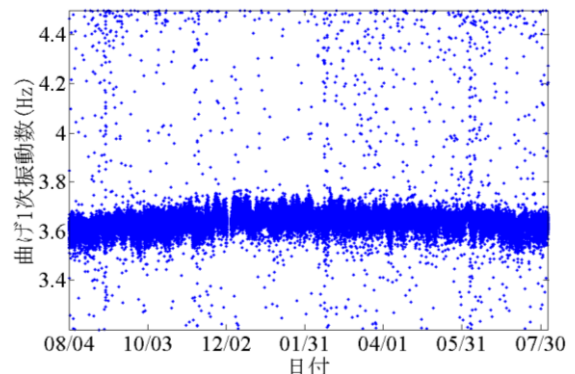


図-11 曲げ 1 次振動数の変化

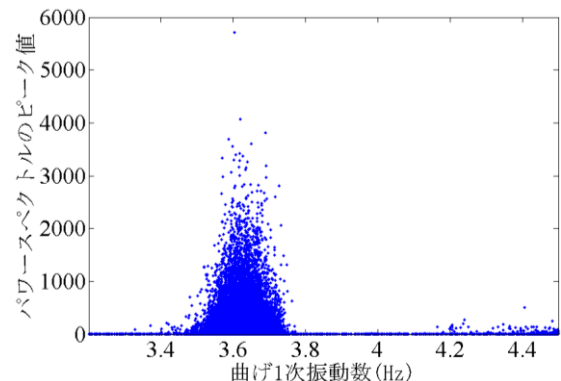


図-12 曲げ 1 次振動数とスペクトルのピーク値

5.7Hz の範囲でピーク値が大きくなっていることから、これらがねじれ 1 次振動数であることが分かる。図-14 では、5.4Hz より低い振動数にもピークがあるが、図-15 ではピーク値が小さいため固有振動モードではないと判断できる。曲げ 1 次モードの図-12 と比較するとピーク値の分布はなだらかになっており、より卓越しにくく、また環境要因によって変動しやすいと考えられる。

ねじれ 1 次モードについても振動数の温度に対する変化を検討するために図-16 に温度とねじれ 1 次固有振動数の関係を示す。図-13 と比較するとねじれ 1 次振動数はばらつきが大きく温度に対して弱い負の相関となっている。このことから、ねじれ 1 次モードは温度以外の原因が主となって固有振動数が変動していると考えられるが、この原因については今後の検討課題である。

5. まとめ

本研究では、気温の季節変動や環境要因が固有振動数や橋桁の変位に与える影響について、実橋梁を対象とし長期橋梁モニタリングを行うことによって検討した。データ処理では、サンプリング周波数を 1000Hz、データ長を 10 分間とすることで周波数分解能を上げ固有振動数の微小な変化をとらえることができた。温度変化は実橋梁に損傷が生じていなくても固有振動数や桁伸縮に影響を与えた。曲げ 1 次固有振動数は気温による影響を比較的大きく受けたが、ねじれ 1 次固有振動数については別な要因を検討する必要がある。

今後の課題として、観測データの蓄積を続けながら、温度以外の環境要因を明らかにするとともに、部材温度の計測についても実施する。

謝辞：本研究の一部は科学研究費基盤研究(C)15K06176 によって実施されました。また、長期橋梁計測に際しては国土交通省北海道開発局網走開発建設部北見道路事務所に協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 奥松俊博, 岡林隆敏, 田代大樹, 要谷貴則, Jawaid Bashir AHMAD: 橋梁遠隔モニタリングシステムによる鋼ランガートラス橋の固有振動数の推移観測, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.844-852, 2007.
- 2) 宮下剛: モニタリングデータの活用と性能照査型維持管理に向けて-橋梁ヘルスマニタリングの事例を通じた所感-, 第 18 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.79-87, 2015.
- 3) 宮森保紀, 小川大智, 齊藤剛彦, 山崎智之: 部材温度と振動振幅が単純 PC 梁の固有振動特性へ与える影響, 平成 28 年度土木学会北海道支部論文報告集, 73 号, A-019, 2017.
- 4) 気象庁: 過去の気象データ, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2017.
- 5) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, 社団法人 日本道路協

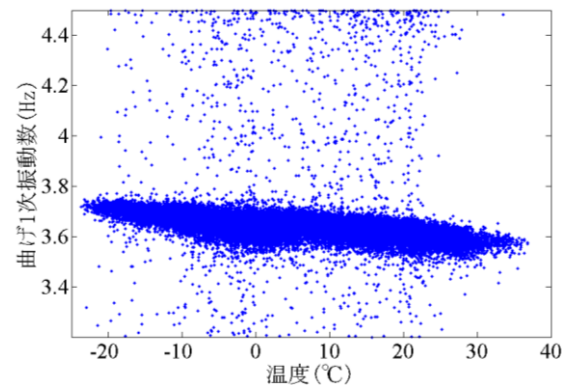


図-13 温度と曲げ 1 次振動数

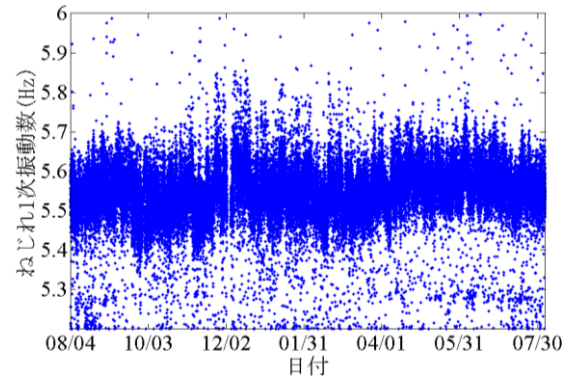


図-14 ねじれ 1 次振動数の変化

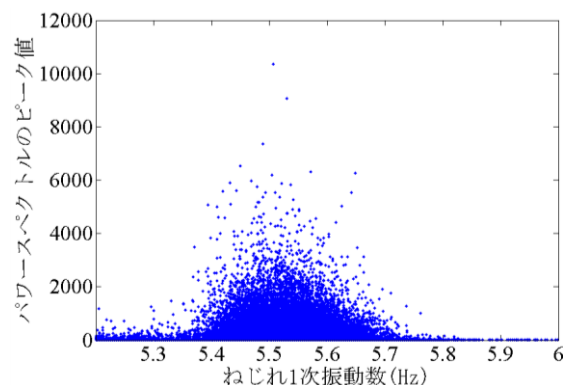


図-15 ねじれ 1 次振動数とスペクトルのピーク

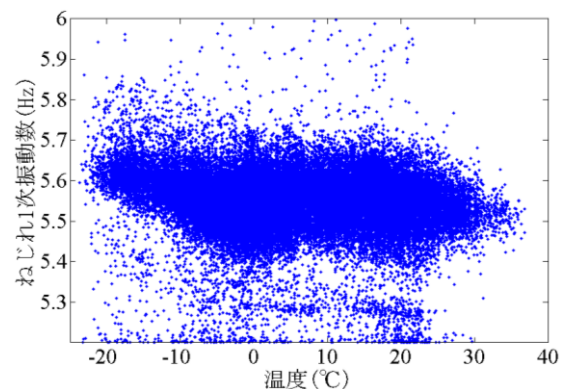


図-16 温度とねじれ 1 次振動数

会, p.93, 2012.

- 6) 高橋和雄: コンクリートの動弾性係数に及ぼす因子に関する究研(Ⅱ), 農業土木研究別冊第 3 号, pp.58-62, 1960.