

少数主桁橋の動的応答特性における補修工事の影響

Investigation of repair work on dynamic characteristics of a minor girder bridge

北見工業大学大学院	学生員	○柴田	祐貴 (Yuki Shibata)
北見工業大学	正会員	宮森	保紀 (Yasunori Miyamori)
北見工業大学大学院	学生員	吉中	正滋 (Masaji Yoshinaka)
北見工業大学	学生員	齊藤	茉奈美 (Manami Saito)
日本航空電子工業 (株)		大胡	拓矢 (Takuya Daigo)
日本航空電子工業 (株)	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

我が国の社会基盤はその多くが高度成長期以降に整備され、建設後 50 年以上経過する施設の割合としては 2033 年時点では道路橋で約 63%と見込まれており、増加傾向となっている。そのため、橋梁等の道路構造物においては、2014 年に「定期点検要領」が策定され、5 年に 1 回の点検が義務付けられ、社会基盤の長寿命化を図っている。一方で、人口減少や少子高齢化により維持管理を担う技術者が減少傾向であることから、情報技術などの新技術を用いて健全度を定量的に評価するための手法が必要となる。近年センシング技術やデータ処理技術の高度化により、多量のデータを長期間にわたって蓄積できるようになってきた。こうしたことから、橋梁を長期的にモニタリングし、振動特性を把握することにより、橋梁の健全度を評価する構造ヘルスマニタリングが注目されている。

著者らは、北海道北見市内の橋梁において加速度や温度の長期モニタリングを実施しており、その期間中に実施された補修工事による固有振動特性の変動を確認した。本研究では、この補修工事における固有振動特性の変動について報告するものとする。

著者らは、北海道北見市内の橋梁で 3 軸加速度計を用いて橋梁の振動を 2016 年から計測し、固有振動数の季節変動やばらつきを観測している。計測中の 2019 年に実施された補修工事前後では、橋軸直角方向の曲げモードで卓越振動数の分布に差が見られた。本研究では、この固有振動



図-1 対象橋梁



図-2 計測器の配置



(a) 3 軸加速度計(JA-70SA) (b) 温度計(RTR-502)

図-3 計測器設置状況



図-4 吊り足場



図-5 壁高欄補修概要

数の変動に有意差があるかを統計的に検証したので結果を報告する。

2. 対象橋梁での長期モニタリング

対象とした橋梁の外観を図-1に示す。本橋は、北海道北見市に2007年に架設された橋長212mの4径間連続鋼合成少数主桁橋である。本橋では支間長35mで2主桁となっている第4径間で加速度と温度のモニタリングを実施しており、加速度は2016年8月4日、部材温度は2018年5月16日から計測を開始した。図-2に計測器の配置、図-3に設置した計測器を示す。3軸加速度計(日本航空電子工業JA-70SA)はG-1桁に2基、G-3側に3基の計5基、温度計(ティアンドデイ RTR-502)はG-1桁に3基、G-3側に3基、合成床版下面に3基の計9基設置している。加速度計のサンプリング周波数は1000Hzとし、10分間の測定データを1単位として後述する振動解析を行った。温度計は10分に1回計測をしている。

本橋では2019年9月2日から12月2日の期間でコンクリート製壁高欄の補修工事が行われた。補修工事はコンクリートの剥離が発生しているG-1側(上流側)の壁高欄に対して橋梁の全長に渡って行われた。図-4に工事期間中に設置された吊り足場を示す。補修内容は図-5のように壁高欄の表面30~35mmをはつり、ポリマーセメントモルタルによって断面を修復した。

3. 計測結果

3.1 部材温度の変動

部材温度の経年変化を図-6に示す。図-6(a)はG-3桁の桁に設置した温度計1、図-6(b)はG-1桁に設置した温度計4、図-6(c)は合成床版下面に設置した温度計5、図-6(d)はアメダス観測記録による外気温²⁾である。南側のG-3桁に設置した温度計1は最高47.2℃、最低-25.9℃である。また、9月1日ごろから翌年の4月14日ごろまでは桁に直接日射を受けるため日中の温度変化が大きく、1日の温度変化が最大となる2019年2月10日では1日で47.7℃変化が生じる。同日の温度計4や温度計5、外気温はそれぞれ17.6℃、5.7℃、18.7℃となっており、日射の影響の有無でG-1桁とG-3桁の部材温度は約30℃異なっている。北側に位置する温度計4は最高36.9℃、最低-25.4℃であり、年間通して

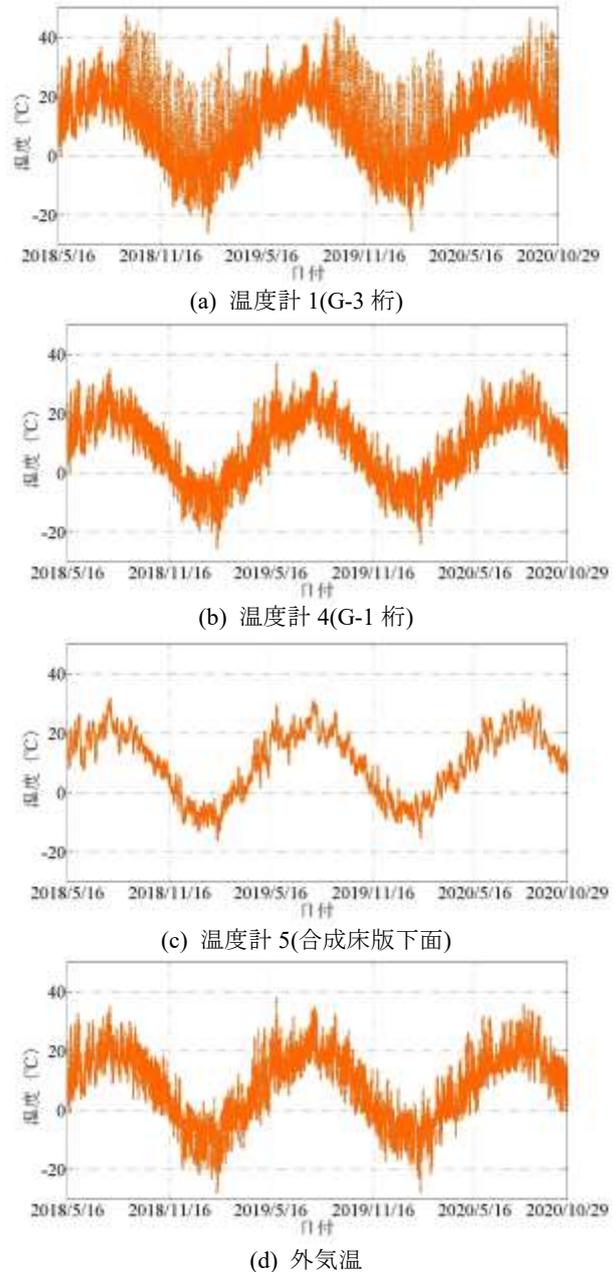


図-6 部材温度と外気温の変動

日陰となっているため外気温と同様の変動をしている。合成床版下面に位置する温度計5では最高31.7℃、最低-16.1℃と桁の温度と比較し温度変化が小さく、1日の温度変化も小さいことが分かった。また、年間の部材温度の変動はおおむね同じ傾向を示している。

3.2 固有振動数の変動

固有振動数の算出は長期的な振動特性変化を簡易的に把握するため、10分間ごとの加速度波形に対してフーリエスペクトルを求めるピークピッキング法を用いた³⁾。この際、スペクトルのピークが経時的に変動するため、モード

ごとに振動数の検索範囲を決め、その範囲内で抽出された卓越振動数の平均を固有振動数とした。このうち低次の4モードについて表-1にまとめ、3次モードと4次モードについてモード形状を図-7に示す。モード形状は1次～3次モードが鉛直方向の曲げモード、4次モードでは鉛直方向のねじれと橋軸直角方向の曲げが連成したモード形状であった。

固有振動数の変動について、図-8(a)に3次モードでの鉛直方向の経時変化、図-8(b)に4次モードでの橋軸直角方向の経時変化を示す。卓越振動数の年変動は冬季の部材温度低下時に高くなり、夏季の部材温度上昇時に低くなる。さらに、補修工事前後での固有振動数の変化を比較するため、図-9に2019年と2020年の1月10日から8月10日の外気温に対する固有振動数の関係を示す。鉛直曲げモードとなる3次モードでは該期間での固有振動数は前年の変動と大きく変わらなかった。一方で橋軸直角方向に卓越する4次モードでは、補修工事後には0℃での固有振動数が前年より0.028Hz上昇していた。この4次モードの固有振動数の差が有意なものであるか統計的に検証した。検定手法としては、2群の母平均の差の検定をするためウェルチの検定を用いた。仮説、有意水準、棄却域の設定は表-2の通りとする。対象は図-9に示したデータから1000データを抽出し、検定を実施した。検定には以下の計算式を用いた。⁴⁾

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{V_1/n_1 + V_2/n_2}} \quad (1)$$

$$V_1 = S_1 / (n_1 - 1) \quad (2)$$

$$V_2 = S_2 / (n_2 - 1) \quad (3)$$

$$S_1 = \sum x_{1i}^2 - \frac{(\sum x_{1i})^2}{n_1} \quad (4)$$

$$S_2 = \sum x_{2i}^2 - \frac{(\sum x_{2i})^2}{n_2} \quad (5)$$

$$\phi = \left(\frac{V_1}{n_1} + \frac{V_2}{n_2} \right)^2 / \left\{ \frac{V_1/n_1}{\phi_1} + \frac{V_2/n_2}{\phi_2} \right\} \quad (6)$$

ここで、 t_0 は検定統計量、 \bar{x}_1, \bar{x}_2 は平均値、 n_1, n_2 はサンプルサイズ、 V_1, V_2 は標本分散、 S_1, S_2 は偏差平方の和、 x_{1i}, x_{2i} は、 ϕ は自由度を示す。ここで算出した検定統計量 t_0 が設定した棄却域 R にあれば有意と判定し、 H_0 を棄却するものとする。表-3に計算結果をまとめるが、 t_0 は3次モードでは4.71、4次モードでは8.61となり有意な結果となった。

表-1 固有振動数とモード形状

モード	検索範囲 (Hz)	固有振動数 (Hz)	モード形状
1	1.5-2.0	1.73	鉛直曲げモード
2	2.6-3.1	2.89	鉛直曲げモード
3	3.4-3.8	3.65	鉛直曲げモード
4	3.8-4.3	4.01	鉛直ねじれモード 橋軸直角曲げモード

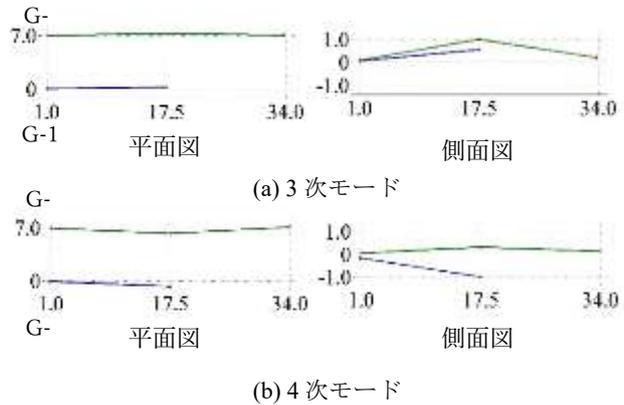
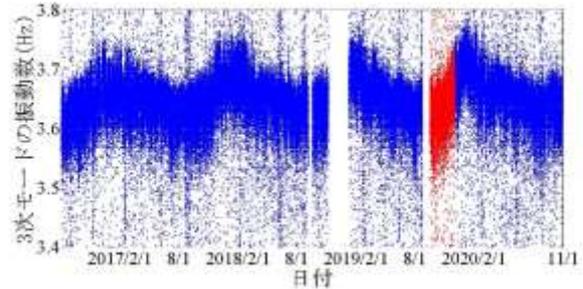
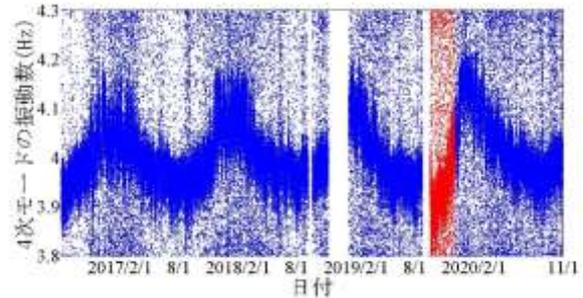


図-7 第4径間のモード形状



(a) 3次モード(鉛直方向)



(b) 4次モード(橋軸直角方向)

図-8 固有振動数の変動

したがって3次モード、4次モードともに固有振動数の差は補修前後で有意に変化したと考えられる。

このような変化の原因として、壁高欄の断面修復により剛性が回復したことが考えられる。壁高欄の劣化は建設後から経年的に進行したため、補修工事前には壁高欄部分の剛性は低下していたと考えられる。補修工事によって壁高

欄部分の剛性が回復したが、壁高欄の断面補修は主に壁面に対して行われており、鉛直方向の曲げ剛性に対しては、主構造である主桁の曲げ剛性と比較してその影響が小さく、3次モードなどの鉛直曲げモードでは影響が少なかったと考えられる。一方、水平曲げ方向については、中立軸から距離があるため曲げ剛性に影響を与え、4次モードの振動数の上昇として表れたものとして考えられる。しかしながら、両モードとも検定結果では有意な差が得られており、剛性変化は構造全体に影響していることが確認できた。

以上のように本研究では、補修による固有振動数の変化を蓄積した振動データを連続処理することで把握できた。また、特定の振動モードで振動数の変化が得られたことは、補修箇所による全体剛性への寄与率の違いを考慮すれば、その位置を特定することが可能なことを示唆している。これは、劣化の進行を検出する構造ヘルスマニタリングとは逆の時系列ではあるが、構造ヘルスマニタリングに応用が可能な結果と考えることができる。

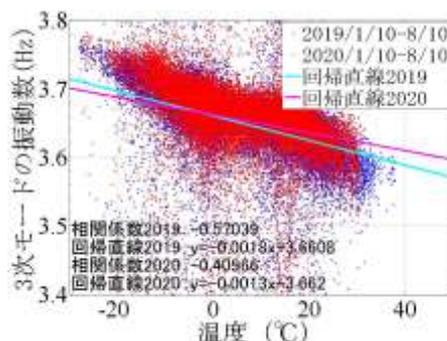
4. まとめ

本研究では長期モニタリングによる固有振動数の経年変化とモニタリング中に実施された補修工事による動的応答特性への影響を調査した。対象橋梁での壁高欄の補修工事による剛性変化により、橋軸直角方向に卓越するモードにおいて卓越振動数の変動が見られた。今後の課題は計画されているG-3桁での壁高欄の補修工事でも同様の傾向が発生するか確認したうえで、損傷同定への適用についてさらに検討する。

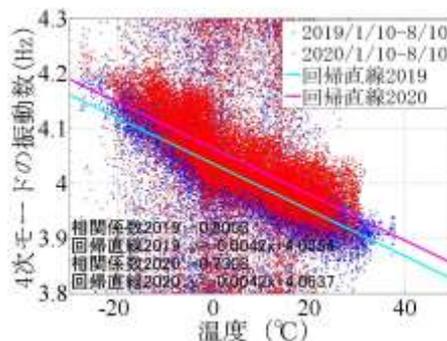
謝辞: 本研究の長期橋梁計測に際しては、国土交通省北海道開発局網走開発建設部北見道路事務所に協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省:令和2年版国土交通白書、pp141-148、2020。
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/pdf/np103200.pdf>
- 2) 気象庁:過去データ
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 3) 吉中正滋、宮森保紀、大胡拓矢、富岡昭浩、宮下剛:長期モニタリングによる鋼桁橋の部材温度が動的特性に



(a) 3次モード(鉛直方向)



(b) 4次モード(橋軸直角方向)

図-9 固有振動数と部材温度の補修前後での比較

表-2 検定における条件

帰無仮説	$H_0: \mu_1 = \mu_2$
対立仮説	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
有意水準	$\alpha = 0.05$
棄却域	$R: t_0 \geq t(\alpha) = 1.96$

表-3 検定における算出結果

	3次モード		4次モード	
年	2019	2020	2019	2020
n	1000	1000	1000	1000
\bar{x}	3.65	3.66	4.00	4.03
V	0.00215	0.00230	0.00689	0.00801
t_0	4.71		8.61	

- 与える影響、令和元年度土木学会北海道支部論文報告集、第76号、A-13、2020。
- 4) 永田靖: サンプルサイズの決め方、pp105-121、朝倉書店、2003