

# 熱伝導解析による橋梁の部材温度推定と振動数変化に関する基礎的検討

Fundamental study on estimation of member temperature by heat transfer analysis and change of natural frequency of a bridge

|             |      |                          |
|-------------|------|--------------------------|
| 北見工業大学      | ○学生員 | 吉中正滋 (Masaji Yoshinaka)  |
| 北見工業大学      | 正会員  | 宮森保紀 (Yasunori Miyamori) |
| 北見工業大学      | 学生員  | 柴田祐貴 (Yuki Shibata)      |
| 北見工業大学      | 学生員  | 齊藤茉奈美 (Manami Saitoh)    |
| 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

2014年から始まった5年を1サイクルとした橋の点検が2019年3月までに全国のほぼすべての橋で終了した。これらの点検結果をまとめたインフラ健康診断書<sup>1)</sup>では橋の健康度の維持・向上のための処方箋の一つとして健全度や重要度、施設管理者の財政・技術力に応じたメンテナンス技術を適材適所に導入すると述べている。

現状では近接目視点検の効率化を図るため、様々なモニタリング技術の実用化に向けた取り組みが行われている<sup>2)</sup>。構造物の変位や振動計測データを用いて剛性変化から損傷の検出が期待される構造ヘルスモニタリングもその一つである。構造ヘルスモニタリングでは損傷検知が期待される一方で、自然環境下にある橋梁は温度のような環境要因の影響を受けて構造特性が変化するため、これらの影響を考慮する必要がある。特に温度による桁の伸縮やコンクリート、アスファルト部材の剛性変化のような構造特性の変化は構造ヘルスモニタリングを行う上で考慮すべき課題である。

著者らは、北海道北見市の橋梁を対象に2016年8月から振動計測を用いた長期モニタリングを行っている。既往の研究<sup>3)</sup>では、温度による固有振動特性の変化として弾性係数の変化に着目した。FEMモデルを用いて部材温度が一律に変動するとして弾性係数を変化させて固有振動解析を行った。その結果、弾性係数の変化が固有振動数の変動に大きく影響することがわかった。しかし、この解析ではすべての部材温度を一律に変化させており、実橋梁での部材毎の熱容量の違いや日射の有無による温度変化を考慮していない。構造ヘルスモニタリングの実用化に向けては温度による固有振動特性の変動を詳細に把握することで本来の目的である損傷による微小な固有振動特性の変化を検出できる可能性がある。そのため、部材毎の温度変化を把握して、固有振動特性の変動に寄与する部材温度の影響を考慮する必要がある。

そこで、本研究では対象橋梁の部材温度変化を推定し、固有振動数に与える影響について基礎的検討を行う。部材温度はこれまでに計測した主桁や合成床版の下鋼鉄だけでなく、温度による剛性変化が考えられる舗装や床版も対象とした。舗装や床版の温度は実測していないため、FEMを用いて非定常熱伝導解析を行うことで推定した。そして、推定した舗装と床版温度と固有振動数の相関を

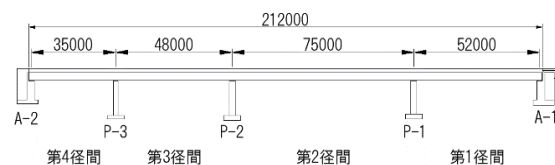


図-1 対象橋梁

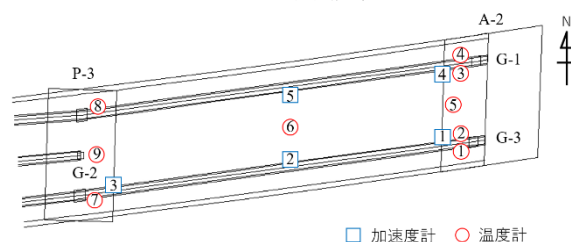


図-2 センサ配置

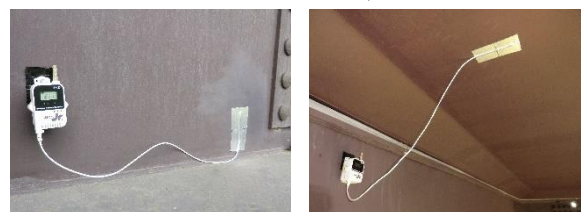


図-3 温度計

らこれらの温度が固有振動数に与える影響について検討する。

## 2. 対象橋梁と計測内容

対象橋梁は、2007年に北海道北見市に架設された4径間連続鋼合成鉄桁橋である（図-1）。本橋は橋長212m、幅員は取付道路に接続するため、径間ごとで異なる。第1径間～第3径間は3主桁、計測対象の第4径間は2主桁である。支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承、床版は合成床版を採用している。

2016年8月4日から加速度計測、2018年5月16日から部材温度計測を行っている。加速度計測には日本航空電子工業製の3軸加速度計JA-70SA、温度計測はディアドディ製RTR-502を図-2のように配置している。加速度計は主桁下フランジに5基設置し、サンプリング周

波数 1000Hz で常時計測している、温度計（図-3）は両主桁のウェブと合成床版の下鋼鈑に計9基設置し、10分間に1回計測している。なお、対象橋梁では2019年9月から2020年1月まで壁高欄の補修工事が行われた。そのため、本研究では補修工事が影響がない2019年8月24日までのデータを対象とする。

### 3. 計測結果

#### 3. 1. 部材温度

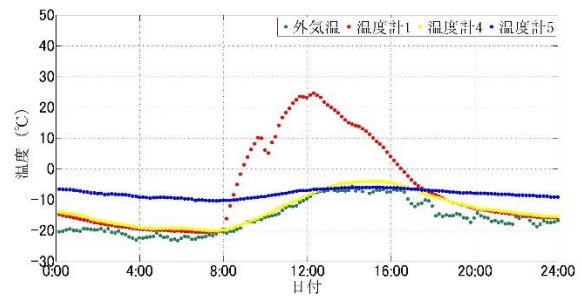
計測結果の例として、G-1、G-3 両主桁端部の外側に設置した温度計1、温度計4とA-2 橋台側の合成床版の下鋼鈑に設置した温度計5、北見市のアメダス外気温データ<sup>4)</sup>の日変動と年変動を図-4に示す。図-4(a)より、日射の影響を受けるG-3 桁は日陰側のG-1 桁や外気温に比べて温度変化が大きく、G-1 桁と比較して最大で33.3℃の差がある。また、下鋼鈑の温度は両主桁や外気温と比較して温度変化が小さい。図-4(b)より、G-3 桁の温度は太陽高度や方位角の条件により日射の影響を受ける9月から5月までは温度変化が大きいことが分かる。G-1 桁は1年を通じて日陰であり、外気温と同様に変動する。下鋼鈑の温度は主桁や外気温に比べて変動が小さい。これは、合成床版内の熱容量が大きいコンクリート部材の影響を受けるためと考えられる。

以上のように、部材毎の温度変化は部材毎の熱容量のみならず、日射の有無や接触する他部材からの熱エネルギーの伝達によって大きく異なることが分かった。

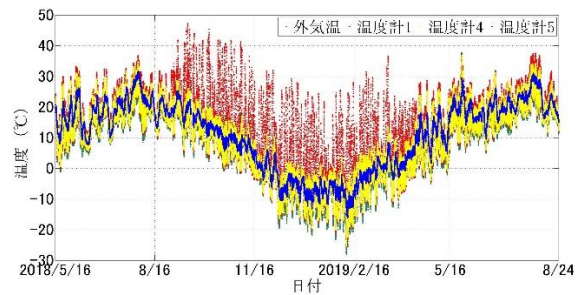
#### 3. 2. 温度による固有振動数の変動

計測した10分間の加速度波形から固有振動数を算出する。加速度計測は広範囲の振動数帯まで把握できるように1000Hzで計測しているが、本報告では低次の振動モードに着目して、長期的な動特性変化の傾向を把握する。そこで、固有振動数の算出には簡易的なピーク・ピーキング法を用いた。具体的には10分間の加速度データからパワースペクトルを算出し、スペクトル振幅のピーク値を固有振動数とする。本研究では、3.4～3.8Hzで卓越する第4径間の鉛直曲げモードを対象とする。これは0～5Hz間でスペクトル振幅が最も卓越するモードである。支間中央に設置した測点5の鉛直方向で計測した加速度波形から算出した固有振動数の変動を図-5に示す。振動数は夏季に低下し、冬季に上がるような季節変動が確認できる。季節変動の要因として温度の影響が考えられる。

温度の影響を把握するため、例として図-6のような北見市のアメダスによる外気温と固有振動数の相関を算出した。図-6に示すように相関係数や回帰係数から負の相関性があることがわかった。また、0℃以下で固有振動数が回帰直線から外れており、0℃以下の回帰係数は-0.0031で0℃以上のデータに比べて変化が大きい。これは、アスファルトやコンクリート内の水分が凍結することで舗装、床版の剛性が上がり、固有振動数の変動に影響したと推測する。そこで、舗装、床版温度が固有振動数の変動に与える影響について検討する。舗装や床版の温度は計測していないため、熱伝導解析により推定する。



(a) 日変動 (2019年1月30日)



(b) 年変動 (2018年5月16日～2019年8月24日)

図-4 部材温度の変動

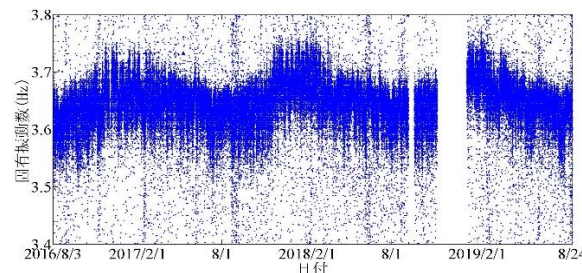


図-5 固有振動数の変動

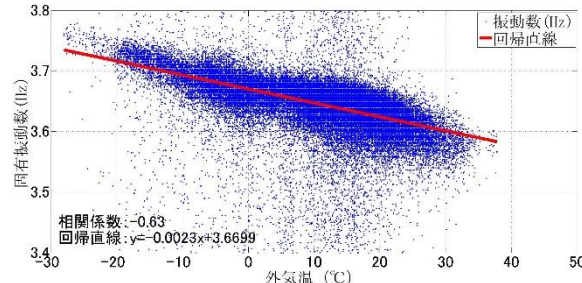


図-6 外気温と固有振動数の相関

### 4. 非定常熱伝導解析による舗装、床版温度の推定

#### 4. 1. モデル化と解析条件

舗装や床版温度を推定するため、有限要素解析プログラム midas NFX を使用して非定常熱伝導解析を行う。橋梁全体系のモデル化はせず、図-7のように第4径間の桁端部の断面を500mm延長したモデルを構築した。構成要素は主桁、合成床版（以下、合成床版のコンクリート部を床版、鋼鈑部を下鋼鈑と呼ぶ）、舗装、壁高欄をソリッド要素でモデル化した。出力する解析結果は図-7に示した節点の温度とする。なお、スタッドや横リブは合成床版の温度変化に影響する可能性があるが、今回は基礎的検討として床版内部の複雑な温度挙動を検討していないためモデル化しない。要素サイズは50mmを基本

を追加したものを図-10 に示す。舗装は日射を考慮しており、日射量の増加に伴って温度変化が大きくなっていることがわかる。床版はピーク温度に達する時間が外気温や舗装に比べて4時間程度遅れている。このような床

版の時間遅れは文献10)でも確認されている。

以上の結果より、非定常熱伝導解析によって部材温度が概ね推定できることを確認した。

## 5. 舗装、床版温度と固有振動数の相関

舗装や床版温度が固有振動数の変動に与える影響についての基礎的検討として、推定した舗装、床版の温度固有振動数の相関を算出した。推定する部材温度は実測に合わせて2018年5月16日から2019年8月24日までの約1年3か月分を算出した。また、固有振動数は推定した温度データの日に合わせて抽出したため、データ数は図-6で作成した相関の約1/6の9248個となった。

推定した舗装、床版温度と固有振動数の相関に外気温と固有振動数の相関を追加したものを図-11, 12に示す。図-11より、舗装温度と固有振動数の相関では相関係数、回帰係数ともに外気温とほとんど差異がなかった。これは、舗装温度が日射により温度が高くなる時間帯があるものの、それ以外の時間帯では外気温との差は一定であるため、回帰係数に影響がなかったと考える。図-12より、床版温度も相関係数が外気温よりもやや小さく、回帰係数にはほとんど差異が確認できなかった。舗装や主桁と異なり、温度変化に時間遅れがある床版温度は固有振動数の変動に支配的でないことがわかった。

以上より、一つの部材温度が固有振動数の変動に支配的な影響を与えるものでないと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、橋梁の部材ごとの温度変化を推定して、部材温度の変化が固有振動特性に与える影響についての基礎的検討を行った。計測結果より部材毎の温度変化は日射の有無や他部材からの熱エネルギーの伝達によって大きく異なることが分かった。また、外気温と固有振動数の相関から0℃以下で振動数の変動傾向が異なることを確認した。これは低温環境下における舗装や床版の剛性変化が影響したためと考える。

第4径間桁端部の断面モデルを構築して非定常熱伝導解析を行うことで舗装、床版温度を推定した。解析による下鋼鈑の温度が実測の変動と概ね一致していることから解析の妥当性を確認した。また、床版温度のピーク値は日射の影響を直接受ける部材に比べて4時間程度遅れることも確認した。

推定した舗装、床版温度と固有振動数の相関を算出した。回帰係数や相関係数は外気温と固有振動数の相関と比べてほとんど差異が見られなかった。舗装温度は日射により温度が高くなる時間帯があるものの、それ以外の時間帯では外気温との差は一定であるため、回帰係数に影響がなかったと考える。

以上より、日射の有無や時間遅れなど橋梁全体の温度変化は複雑であり、一つの部材温度が固有振動数の変動に支配的でないことがわかった。

今後は、部材間の温度挙動を考慮し、温度が固有振動特性に与える影響について検討することが重要である。一方で、構造ヘルスマニタリングの実用化に向けては橋梁全体として複雑な温度変化は考慮せず、部材毎の温度

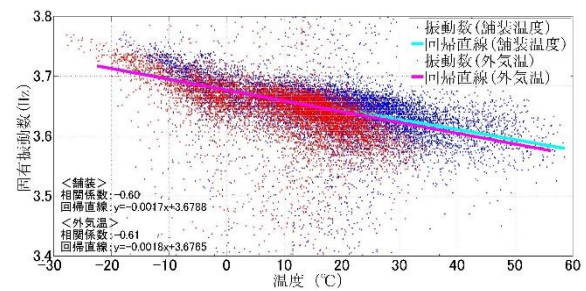


図-11 舗装温度と固有振動数の相関

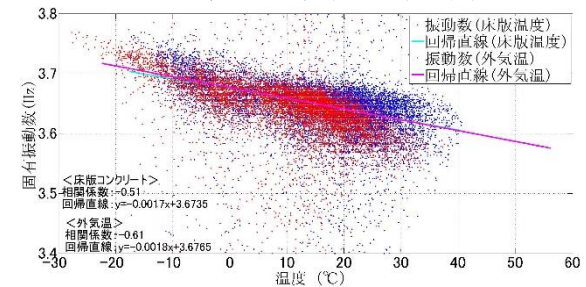


図-12 床版温度と固有振動数の相関

差が小さい時間帯に限定して温度の影響を検討することもある必要である。

## 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) 土木学会：インフラ健康診断書，道路部門，2020。  
<https://committees.jsce.or.jp/reportcard/reportcard2020>
- 2) 安藤剛，夏目孝之：再挑戦のモニタリング，日経コンストラクション，第742号，pp.24-43，2020。
- 3) 吉中正滋，柴田祐貴，宮森保紀，大胡拓矢，富岡昭浩，宮下剛：部材温度の変化を考慮した鋼鈑桁橋モデルの固有振動特性，土木学会第75回年次学術講演会概要集，I-254，2020。
- 4) 気象庁：過去データ  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 5) MIDAS Information Technology Co., Ltd.:midas NFX User Manual, 2014.
- 6) 姫野賢治，渡辺隆，勝呂太：アスファルト舗装の内部温度の推定に関する研究，土木学会論文集，第366号/V-4，pp.123-pp.132，1986。
- 7) 国立天文台編：理科年表平成17年，2004。
- 8) 秋田宏，尾坂芳夫：日射を受けるコンクリート壁の温度分布に関する考察，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.147-155，1987。
- 9) 坪川将丈，水上純一，齊藤泰，前川亮太：空港アスファルト舗装の夜間施工時の降温時間に関する解析的検討，国土技術政策総合研究所資料，第653号，2011。
- 10) 山村浩一，岩崎正二，日下徹，出戸秀明，櫻田和志，高橋諒：温度日変動に伴う既設合成I桁橋の変形挙動の実態と検討，土木学会東北支部技術研究発表会，I-26，2011。