

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06176

研究課題名(和文) 構造全体系サーモグラフィと高密度モード同定によるハイブリッド損傷同定手法の開発

研究課題名(英文) Hybrid damage detecting method with high density modal identification and thermographic examination of infrastructural system

研究代表者

宮森 保紀 (Miyamori, Yasunori)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00363383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：振動波形を利用した構造ヘルスマニタリングの実現に際しては、構造物の動的応答は健全であっても環境温度などの影響で変動する。そこで本研究では、コンクリート供試体や実橋で振動計測を行い、季節や部材温度による振動特性の変化が損傷同定に重要であることを確認した。特に、プレストレストコンクリート供試体では、温度変化に加えて、ひび割れを発生の有無により振動特性の変化を検討した。この結果、大きな損傷が生じた場合には温度変化以上の振動特性の変化が発生するが、小さな損傷では温度変化などの影響が大きいことが明らかになった。なお、サーモグラフィカメラの温度計測は実環境では測定値の変動が大きいことも分かった。

研究成果の概要(英文)：To realize structural health monitoring using vibration measurement data, even though the structure keeps intact condition, its dynamic characteristics fluctuate due to the influence of temperature and other environmental conditions. Therefore, in this study, vibration measurement was carried out on concrete specimens and actual bridge, and it was confirmed that the change of the vibration characteristics by internal temperature is important for identifying structural damages. In particular, in the prestressed concrete specimen, effects of both temperature change and cracks of concrete member was examined. As a result, the vibration characteristics change caused by large damage exceeds the effect of the temperature change while temperature effects is still large for small damaged or intact structure. In addition, it was also found that the measured value fluctuated greatly in the temperature measurement of the thermographic camera in the real environment.

研究分野：橋梁工学、構造動力学

キーワード：構造ヘルスマニタリング 温度依存性 固有振動数

1. 研究開始当初の背景

高度成長期以降に架設された社会基盤施設が老朽化することの問題は、2012年の笹子トンネルの事故をきっかけに社会一般にも認識が広まり、対策が求められるようになった。各種のセンサ技術や情報処理技術、ロボット技術を社会基盤の維持管理に応用しようという機運が急速に高まり、政府や民間の投資も活発化している。構造物の損傷を見つける技術には、技術者による目視点検をロボットに置き換える技術や、事前に予測した損傷箇所や微小な損傷が出現している箇所にセンサをとりつけて進展を監視する技術、損傷箇所を事前に特定せず損傷位置を発見する技術などに分類できる。このうち、
とについては、実用化に向けた技術開発投資が活発化しているが、本研究が課題とするの損傷位置と程度を構造全体から特定する技術は研究段階である。

申請者は、橋梁に加速度センサを取り付けて振動応答を測定し、損傷前後の振動特性の変化から損傷位置を同定する方法について研究開発を行ってきた。これらの研究から、損傷を受けた構造物では損傷近傍で振動モード形の変化が検出されるものの、損傷を受けていない場合でもモード特性の変化が生じる場合が多々ある。この理由の一つとして、測定時の温度や日照の違い、それらの部材間でのばらつきによって部材にひずみや応力の偏りが発生し、モード特性にばらつきが生じたことが考えられる。この種の損傷同定手法では、建設時の初期値や定期的に測定しておいた通常時の測定結果と、現在の結果を比較して構造特性が変化した箇所を検出するが、実構造物で測定条件を完全に同一にすることは極めて難しい。部材の温度分布は一様ではなく、特に鋼構造では部材温度の変動が大きく、ゴム支承やアスファルト舗装では温度による剛性変化の影響が大きい。固有振動数やモード振幅などの振動特性の変化は局所的な損傷による変化よりも、このような温度による変化の方が大きく、これらの影響を除去したうえで、構造特性の変化を把握することが実構造物の健全度診断技術では不可欠になる。

2. 研究の目的

前述の背景から、本研究では構造物全体の部材温度やそのばらつきを把握し、振動モード形と固有振動数の関係を整理し、さらに健全時と損傷時を比較することで、明確に損傷位置を同定する手法の開発を目指す。

具体的な手法として、構造部材の温度を測定するには、一般に熱電対や放射型温度計による「点」の計測が行われる。温度分布を「面」で把握するには、赤外線サーモグラフィカメ

ラが用いられるが、橋梁全体の温度分布を測定できるような機器はこれまできわめて高価であった。しかし近年の技術開発により比較的 low 価格で屋外使用可能な機器も市場で入手できるようになりつつあり、本研究ではこのような赤外線サーモグラフィカメラを用いて測定を行う。これに、申請者が従来研究を行ってきた振動計測と、詳細モデルを用いた FEM 解析を組み合わせ、構造全体系における損傷同定技術の実現可能性を向上させるものである。

3. 研究の方法

構造部材の温度分布を面的に把握するため、廃止となったコンクリート鉄道橋の主桁および床版部分について赤外線サーモグラフィカメラを用いた測定を行った。同時に、スマートセンサシステムによる高密度振動計測も実施し、橋梁の固有振動特性を把握した。橋梁の計測は季節ごとに複数回繰り返すことで、固有振動特性の季節変動を確認するとともに、屋外計測におけるサーモグラフィカメラの適用性を検討した。

気温や振動振幅などが構造物の固有振動特性に与える影響を理論的に整理するため、大学構内に長さ 3m のプレストレストコンクリート(PC)製の梁を設置し、温度計測、振動計測を行った。温度計測については、部材の表面温度および内部温度と、赤外線サーモグラフィで収録した温度との相関関係を検討した。振動計測を一定期間行った後で、PC 桁の端部 0.6m 区間にひび割れを発生させて、損傷による固有振動特性の変化と、温度による固有振動特性変化の関係を同時に把握した。

また、実際の道路橋における固有振動特性の季節変動を確認するために、高規格道路の橋桁に加速度計を設置して長期モニタリングを実施した。さらに、高密度振動計測によって構造変化が把握可能であることを検証するため、実験場内の鋼桁の振動計測データに対して、ディープラーニングによる構造変化位置の検出を行った。

4. 研究成果

(1) コンクリート鉄道橋における測定結果 表面温度分布の実態調査

図-1 はサーモグラフィカメラによって撮影した対象橋梁側面の温度分布であり、図-1(a)は6月の晴天時、図-1(b)は2月の曇天時の結果である。2つの撮影結果から、橋梁の部材表面の温度は一様ではなく、特に晴天時は分布のバラつきが大きい。部材に対する日射の状況は時々刻々と変化するため、振動特性に影響を与える部材内部の温度については、より詳細な検討が必要であることが分かった。

固有振動特性の変動

図-2 は対象橋梁の1次固有振動数の変動状

況を示している。本橋は同じ径間長の単純桁が5径間連続する形式であるが、測定結果から Span1～Span5 まで径間ごとで振動数が異なり、径間長のみならず橋脚高さの違いにも影響を受けることが明らかになった。

また、固有振動数の季節変動については、実験前の予測通り全体として夏季は低く、冬季は高い傾向が確認できた。しかしながら、温度がほぼ同一でも、振動数が異なる場合があった。橋梁の状況を詳細に観察したところ、橋梁上に敷設されたバラスト中の水分の凍結に大きな影響を受けていた。このことから、構造物の動的特性は単に温度だけでなく、それによって部材の特性が部分的に変化することの影響を受けることが明らかになった。

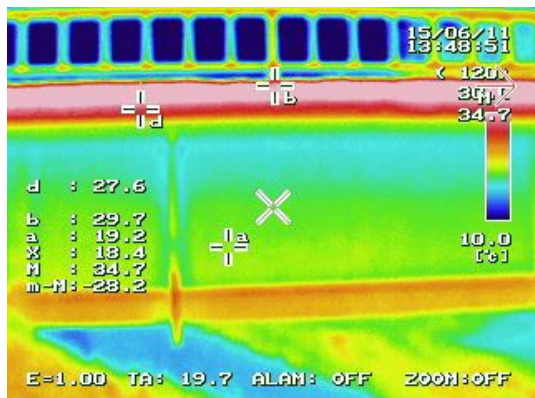


図-1(a) コンクリート桁の温度分布（晴天）

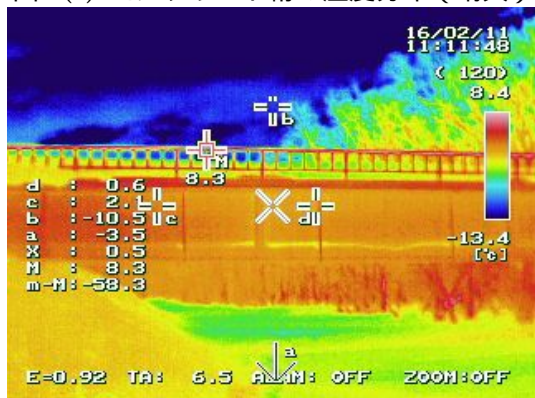


図-1(b) コンクリート桁の温度分布（曇天）

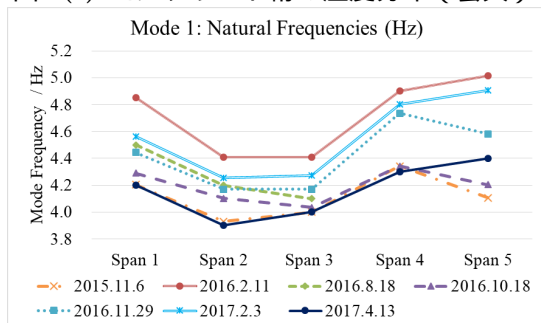


図-2 1次固有振動数の変動

(2) プレストレストコンクリート梁の実験温度分布

図-3 はサーモグラフィカメラによる PC 桁表面の温度分布であり、供試体表面を複数の

領域に分割して平均を求めた表面温度と熱電対で測定した表面温度の差はほとんどなかった。一方、サーモグラフィカメラの出力値は使用時の気温によって変動し、特に低温時は安定しないため、同一箇所の温度変化を経時的に追跡しようとする場合、その精度が低下することが明らかとなった。これは、カメラの機構によるものであり、本研究の範囲ではこれを根本的に解決することは困難であった。これらの結果から、部材温度については、安定して長期計測が可能な熱電対を用いることとして、部材表面と削孔した内部にそれぞれ熱電対を設置して温度計測を行ったところ、この PC 桁では相関係数 0.98 で、表面温度と内部温度に高い相関性があることを確認した。

固有振動特性の変動

図-4 に PC 桁の内部温度と固有振動数の関係を示す。○・ はひび割れを発生させる前で、○● はひび割れ発生後である。また、図-5 は PC 桁の端部に静的破碎材を注入して発生させたひび割れの状況である。図-4 からひび割れの有無にかかわらず、固有振動数は内部温度により 10～20%近く変動することが確認できる。また、ひび割れが発生することによって固有振動数は 10%低下している。ひび割れは、桁端部の一部区間に導入したもののだが、図-5 のように断面性能を最大で 40%程度低下させるほどのものであり、かなり大規模なものである。それにも関わらず、ひび割れによる固有振動特性変化の影響より温度変化の影響が大きい。

図-6 には PC 桁の内部温度と減衰定数の関係を示す。減衰定数では損傷の影響は少なく、温度により不連続に変化していることが見受けられる。これは支点部の凍結状況が関係していると推測される。

以上のコンクリート鉄道橋と PC 桁の実験結果をまとめると、構造物の動的特性は温度によって変動し、部材の損傷よりもその影響は大きくなり得る。また、温度変化に付随する部材の凍結などの影響も把握する必要がある。さらに、温度測定手法として赤外線サーモグラフィは、対象構造物の表面温度分布を機動的に測定できるが、測定時の環境温度によっては精度が低下するため、構造物の継続的な測定では注意が必要である。

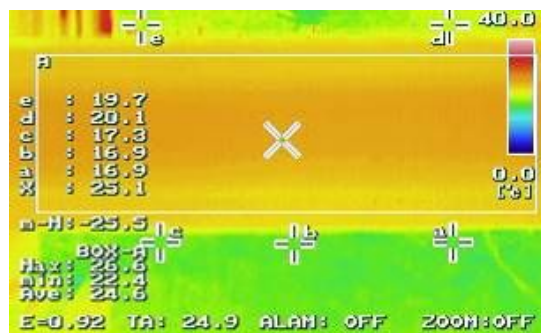


図-3 PC 桁の表面温度分布

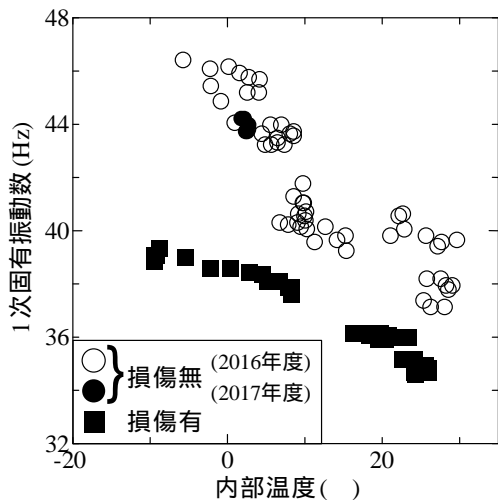


図-4 PC 桁の内部温度と1地震動数



図-5 ひび割れ発生状況
(上：断面、下：桁端部平面)

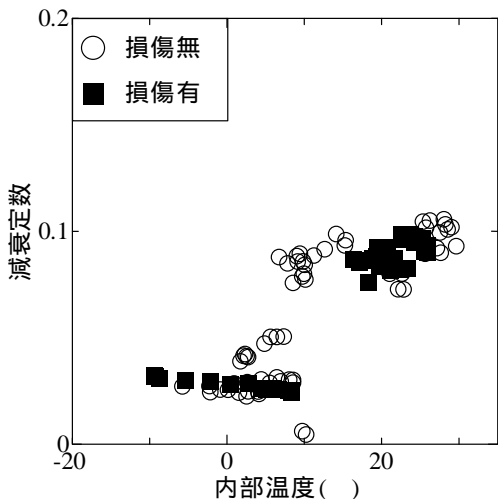


図-6 PC 桁の内部温度と減衰定数

(3) 実橋梁での長期測定実験

図-7 のような多径間の道路橋において測径間に加速度センサを取り付け、長期振動計測を行った。図-8 は曲げ1次固有振動数の経時変化であり、本橋のような実橋梁でも本研究で検討対象とした固有振動数の変化が発生していることを確認した。



図-7 測定対象橋梁

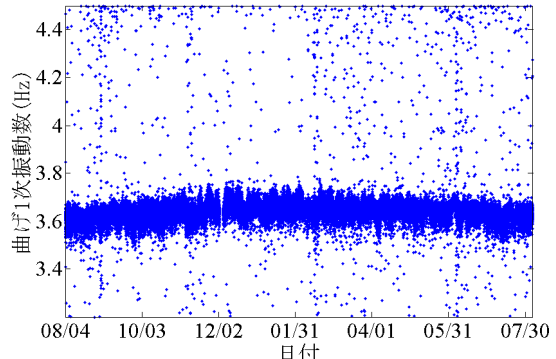


図-8 1次固有振動数の経時変化

(4) 高密度振動測定データを用いた損傷検出実験

図-9 のような実験場に設置した長さ 6m の鋼桁に加速度計 15 台を取り付け、振動計測実験を行った。振動計測に際しては、部材の一部に図-10 のような鋼板を取り付け、局部的に質量と剛性を变化させた計測も行い、全 6 パターンの計測ケースについて多数回の振動測定を行い、合計 8595 サンプルを得た。このうち 80%を訓練データ、20%を検証データとして畳み込みニューラルネットワークにより、鋼板取り付け位置が認識可能となるかを調べた。表-1 はその結果であり、99.87%で鋼板取り付け位置が判別できた。

この実験は温度や日射の条件がほぼ同一の連続した2日間で行ったものであるが、本研究の一連の実験で明らかになった周辺環境の影響を考慮することと組み合わせれば、高密度振動計測により構造物の損傷同定が十分可能であることを示している。



図-9 実験対象鋼桁



図-10 付加鋼板

表-1 混同行列

Count	Predicted additional element location							Accuracy	
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Total		
Actual additional element location	S1	1277	1	1	0	0	0	1279	99.84 %
	S2	0	1411	0	0	0	3	1414	99.79 %
	S3	1	1	1360	0	0	0	1362	99.85 %
	S4	3	0	1	1282	0	0	1286	99.69 %
	S5	0	0	0	0	1181	0	1181	100 %
	S6	0	0	0	0	0	2073	2073	100 %
Total	1281	1413	1362	1282	1181	2076	8595	Overall: 99.87%	

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1)Y. Zhang, Y. Miyamori, T. Kadota, T. Saito: Investigation of Seasonal Variations of Dynamic Characteristics of a Concrete Bridge by Employing a Wireless Acceleration Sensor Network System, Sensors and Materials, 査読あり, Vol. 29, No. 2 (2017) 165-178, <https://doi.org/10.18494/SAM.2017.1421>

〔学会発表〕(計 13 件)

1)小川大智, 高橋友弥, 宮森保紀, 大胡拓矢, 富岡昭浩, 宮下剛: 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, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2018.

2)張友奇, 宮森保紀, 門田峰典, 白川雄太, 齊藤剛彦: Study on Dynamic Characteristic Variations of a Ballasted Railway Bridge, 土木学会年次学術講演会, 2017.

3)小川大智, 宮森保紀, 齊藤剛彦, 山崎智之: 部材温度の変動が単純 PC 梁の固有振動特性へ与える影響, 土木学会年次学術講演会, 2017.

4)Y. Zhang, Y. Miyamori, Y. Shirakawa, T. Saito: Significant Dynamic Parameter Variations of a Ballasted Railway Bridge Investigated by Employing a Wireless Smart Sensor Network System, The 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, 2017.

5)Y. Zhang, Y. Miyamori, T. Oshima, Y. Shirakawa, S. Mikami, T. Saito: Effect of Ballast State on Dynamic Parameters of a Multispan Ballasted Prestressed Concrete Railway Bridge, 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2017.

6)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, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2017.

7)Y. Zhang, Y. Miyamori, T. Kadota, Dynamic parameter variations of a 5-Span Prestressed Railway Bridge, 土木学会北海道支部年次技術研究発表会, 2017.

8)Y. Miyamori, N. Kouso, S. Mikami, T. Oshima, T. Kadota, T. Saito: Early damage localization of steel structures based on changes of modal amplitude, 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2017.

9)Y. Miyamori, T. Kadota, Y. Zhang and S. Mikami, Dynamic characteristics of a damaged pedestrian overpass measured by wireless sensor array, the International Conference on Smart Infrastructure and Construction, 2016.

10)宮森保紀, 張友奇, 中島齋, 門田峰典: 5 径間単純 PC 鉄道橋の固有振動数の季節変動と供試体実験, 土木学会年次学術講演会, 2016.

11)Y. Miyamori: Vibration characteristics of a damaged pedestrian overpass measured by dense wireless sensor array, Cambridge Conference on Wireless Sensor Network for Civil Engineering and Infrastructure Monitoring, 2015.

12)T. Kadota, Y. Miyamori, R. Watasaki, S. Mikami, T. Saito: Structural vibration characteristics of a pedestrian bridge by the 3D acceleration sensing of smart sensors and detailed 3D-FEM model, IABSE Conference Nara 2015 Elegance in Structures, 2015.

13)綿崎良祐, 宮森保紀, 門田峰典: 横断歩道橋を対象とした 3 次元振動特性同定と損傷位置同定, 土木学会年次学術講演会, 2015.

6. 研究組織

(1)研究代表者

宮森 保紀 (MIYAMORI, Yasunori)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 00363383