

令和元年6月20日現在

機関番号：13501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06722

研究課題名(和文) 橋梁構造物に発生する振動エネルギーに着目したヘルスマニタリング手法の提案

研究課題名(英文) Proposal of bridge structural health monitoring method based on vibration energy

研究代表者

竹谷 晃一 (TAKEYA, Kouichi)

山梨大学・大学院総合研究部・助教

研究者番号：70803526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、橋梁上部構造の交通環境と振動特性を明らかにした上で、振動エネルギーと関連がある減衰比の同定方法の検討と計測ユニットの構築を行った。

はじめに、複数の橋梁で加速度計測を行い、振動モードや減衰比、振動エネルギーなどの振動特性の分析を行った。交通環境や気温などの外乱によって減衰特性がばらつくため、外乱の影響について分析を行い、減衰評価方法の提案を行った。そのうえで、橋梁の上部構造の動的挙動を観測するための計測・通信・記録装置からなるユニットのプロトタイプを構築し、実橋梁での計測を行い、外乱を考慮した減衰特性の分析方法とシステムの改良を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、橋梁構造物のヘルスマニタリングに期待されている「劣化損傷の早期検知と定量的評価」を大きな目標としており、既存の研究で得られた知見を基に、減衰特性と振動エネルギーという視点から分析検討を試みた。橋梁構造物の振動特性は交通や気温など外乱の影響が相対的に大きく、同定される振動特性が分布を持つことから、汎用的な劣化損傷の検知は困難であった。本研究では、振動エネルギーに関連する減衰特性に着目して外乱の影響を考慮した分析を行っており、得られた成果は橋梁構造物のヘルスマニタリングの社会実装のための学術的・社会的意義を有するものである。

研究成果の概要(英文)：In this research, the traffic environment and vibration characteristics of the bridge superstructure were clarified, and the identification method of the damping ratio related to the vibration energy was examined.

First, acceleration measurements were carried out on three road bridges, and vibration characteristics such as vibration modes, damping ratios, and vibration energy were analyzed. Since the damping characteristics vary due to environmental disturbances such as traffic environment and air temperature, the effects of disturbances were analyzed and proposed a method for evaluating damping ratio. In addition, a prototype monitoring system, which consists of measurement, communication and recording devices to observe the dynamic behavior of the superstructure of the bridge, was constructed. Long-Term monitoring on the actual road bridge has been carried out, and the analysis method of damping characteristics considering disturbances was improved.

研究分野：橋梁構造

キーワード：橋梁 鋼構造 振動特性 構造減衰 逆解析 構造同定

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

現在わが国に存在する橋長15m以上の道路橋は約17万橋といわれ<sup>1)</sup>、その多くが高度経済成長期に建設されており橋齢50年を超える橋梁は今後10年で約半数に達する。一方、維持補修の予算と検査員は十分ではなく、このままでは通行制限や通行止め橋梁の増加、あるいは落橋の危険も想定される。とりわけ地方公共団体が所有する道路橋は維持補修の予算と検査員の十分な確保が困難であり、効率的維持管理が喫緊の課題となっている。そのため、近年、橋梁構造物の効率的維持管理方法について様々な研究が行われており、そのひとつとして、橋梁構造物に設置したセンサを利用して車両通行や風などの外力によって生じる振動を計測し、振動特性の変化から橋梁構造物の状態を継続的に診断するヘルスマonitoring技術がある。しかしながら、特に車両通行や気温変化による外乱の影響で振動特性が時々刻々変化するため、振動特性の変化から明確に劣化を検知する手法は確立されていないのが現状である。加えて、振動特性の変化と劣化部材や損傷レベルの関係に関して十分な議論がなされておらず、ヘルスマonitoring技術の適用範囲と振動特性の分析方法、検知可能な劣化損傷の判断が困難である。橋梁構造物の効率的な維持管理のため、ヘルスマonitoring技術による構造物の劣化損傷の検知手法の提案と、その前提として交通環境に代表される外乱と構造特性変化が振動特性に与える影響の明確化が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究は、交通環境と橋梁構造物の振動エネルギーの関係に着目することで外乱の影響を考慮し、振動エネルギーと関係する減衰振動特性の分析によって劣化を検知する方法を提案することを目的とした。そこで、はじめに、交通環境と振動エネルギーの関係の明確化を行った。実橋梁における計測実験から各振動モードの振動エネルギーを算出し、交通条件との関係を明らかにした。次に、気温などの外乱が橋梁減衰に与える影響の評価を行った。減衰特性の変動の分析によって、変動が環境に起因するものか劣化損傷に起因するものを評価することで、橋梁ヘルスマonitoringによって劣化損傷の検知に活用できる指標の提案を行った。

### 3. 研究の方法

- I. 交通環境と振動エネルギーの関係の明確化：橋梁の加速度応答の分析を行い、橋梁構造物の振動エネルギーと交通による外乱の影響を考慮しその関係性を評価する。実橋梁に振動センサを設置した計測実験を行う。振動エネルギーの算出によって交通条件と振動特性の関係を検討する。
- II. 気温などの外乱が橋梁減衰に与える影響の評価：橋梁の減衰特性は部材の劣化損傷のほか、交通環境や気温などの外乱が構造減衰に与える影響と振動エネルギーの関係を把握するため、実橋梁における実験データから RD 法などの適用とエネルギー的評価によって構造減衰を同定し、交通環境や気温などの外乱と構造減衰の関係を分析する。

### 4. 研究成果

#### I. 交通環境と振動エネルギーの関係の明確化

橋梁構造物の振動エネルギーと交通による外乱の影響を考慮しその関係性を評価するため、実橋梁に複数台の振動センサを設置した計測実験を行った。振動エネルギーの算出によって交通条件と振動特性の関係を検討する。橋梁構造物に加速度センサを設置し振動加速度の計測を行う。対象橋梁 A は高速道路上の3径間連続トラス橋であり、平面図と側面図を図-1に示す。

#### (1) 振動モードの同定

2つの圧電式加速度センサ（感度：6.42pC.s<sup>2</sup>/m）を用いた多点計測によって振動モードの同定を行った。1つの加速度センサ（以下、加速度センサ A）を起点から18mの固定計測点に配置し、もう1つの加速度センサ（以下、加速度センサ B）を1計測毎に設置位置を移動させる。加速度センサ A の設置位置は図-2の青丸で、加速度センサ B の設置位置は赤丸で示している。

各計測において車両交通で励起される橋梁振動が十分計測可能な2分間、サンプリング周波数256Hzで橋梁加速度を収録した。加速度応答から振動モード形を同定するため、本研究では貝戸ら<sup>1)</sup>が提案した未知外力作用下における振動モードの同定手法を用いる。振動エネルギーが大きい低次の振動モードに着目して、同定した5つの振動モードを便宜的に振動数が低い順に1次モードから5次モードと呼称し図-2に2次モードと3次モードを示す。同定された振動モード形に対して、最大モード振幅が1となるように基準化している。

(2) モード質量の同定

次に、橋梁の振動エネルギーを算出するため、振動モード毎の等価質量と減衰を同定する。橋梁の等価質量はモード解析において用いられる固有ベクトル法<sup>2)</sup>を応用して算出する。固有ベクトル法は等価質量同定法の一つで、正規化した固有ベクトルと質量マトリクスを用いて、ある注

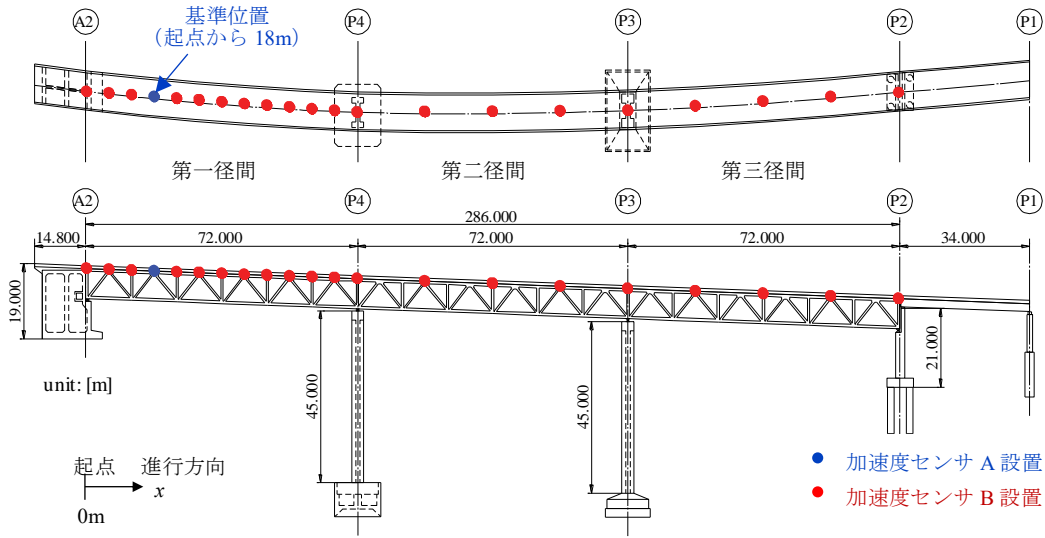


図-1 対象橋梁 A と加速度センサ設置位置の概略

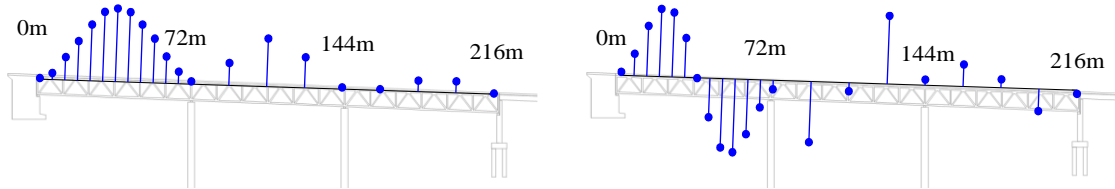


図-2 橋梁 A の加速度応答解析から得られる振動モード  
(a) 鉛直 2 次モード(3.1 Hz) (b) 鉛直 3 次モード(6.1 Hz)

目する振動モード上の任意の点の等価質量を算出する手法で、得られる等価質量は運動エネルギーのつり合いから導かれる物理量である。

本研究では、計測位置を質点に置き換えた 21 自由度系の質点モデルを考える。モデルの質量マトリクスは橋梁上部工の全質量が一樣分布とみなして計測位置の質点に分配した質量条件を用いる。固有ベクトルは図-2 で示した橋軸方向の  $i$  次振動モードを  $j$  点の固有モード成分で正規化したものを用いる。固有ベクトル法を用いて、図-1 で示した起点から 18m 地点( $j=4$ )における対象橋梁の各振動モードの等価質量を表-1 に示す。

(3) 減衰比の同定

橋梁の加速度波形から自由減衰振動区間を抽出し、 $i$  次モードの周波数帯が通過できるバンドパスフィルター処理を行うことで、 $i$  次モードにおける減衰比 $\zeta_i$ を求める。複数の自由減衰振動波形より得られる減衰比が正規分布に従うとして、90%の減衰比が収まる最大の減衰比 $\zeta_i$ を  $i$  次モードの減衰比とする。対象橋梁の各振動モードの減衰比を表-1 に示す。

表-1 各振動モードの振動数, 等価質量, 減衰比

	1 <sup>st</sup> mode	2 <sup>nd</sup> mode	3 <sup>rd</sup> mode	4 <sup>th</sup> mode	5 <sup>th</sup> mode
Vibration Frequency	1.6Hz	3.1Hz	6.1Hz	9.1Hz	12.5Hz
Equivalent Mass $M$	245ton	470ton	233ton	129ton	361ton
Damping Ratio	0.035	0.019	0.017	0.031	0.012

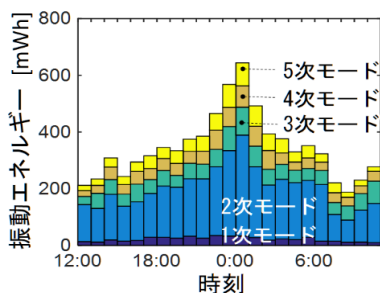


図-3 各振動モードの振動エネルギー

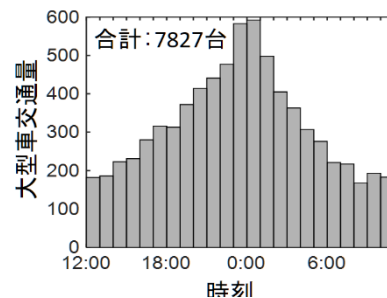


図-4 1 時間毎の大型車交通量

#### (4) 振動エネルギーの算出

加速度センサは第一径間の1/4L地点（起点から18m）の中央縦桁の下フランジ上側に設置した。使用した加速度センサは圧電式加速度センサ（感度： $1\mu\epsilon.s^2/m$ ）で、サンプリング周波数は500Hzとした。橋梁構造物の振動エネルギーと大型車交通量の結果を図-3と図-4に示す。このように交通速度が比較的安定している高速道路橋を対象とした場合、振動エネルギーと大型車交通量に高い相関関係があることを明らかにしている。一方、一般の道路橋では信号や渋滞の影響で通行速度は一定ではないため、交通速度の影響も減衰比や振動エネルギーの変化として検出されることが考えられる。また、評価方法によって減衰比の平均値や分散が異なることが示唆されたため、次節において検討を行った。

## II. 気温などの外乱が橋梁減衰に与える影響の評価

### (1) 減衰比評価方法の検討

高速道路橋である橋梁 A では車両の走行速度は一定であった。しかし、車両の走行速度や橋の構造形式によって振動環境や減衰特性が異なると想定されるため、一般道路橋を対象としてさらに検討を進めた。図-5に示す対象橋梁 B は2径間連続の鋼箱桁 RC 床板の中路橋である。

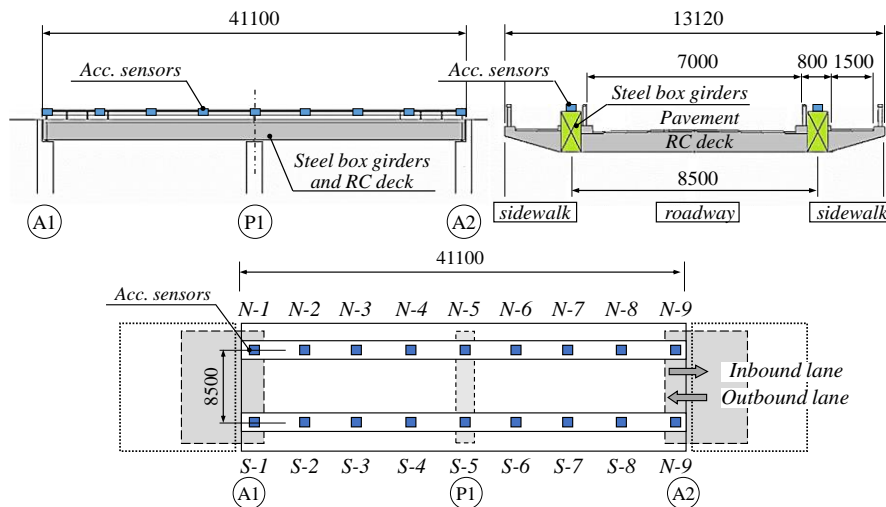


図-5 対象橋梁 B と加速度センサ設置位置の概略

Random Decrement (RD)法を用いた減衰比の同定に必要な窓長とデータ点数の検討を行った。検討した窓長は5, 10, 15, 20波形分の4パターンである（以下、窓長5, 10, 15, 20と呼ぶ）。窓長が短いと対数近似の点数は少なくなるが、重ね合わせ数を増やすことができる。図-6は窓長5, 10の対数近似の一例であり、図-7はデータ長( $n=100$ 秒, 300秒, ...19800秒)に対象振動数[Hz]を掛けて正規化したデータ長と対数近似の決定係数 $R^2$ の関係を表している。灰色の線( $m=1, 2, \dots, 11$ )は異なる時刻データでの結果を示しており、データ選択による分析結果の分散を考慮している。窓長5では決定係数が0.8前後で収束するが、窓長10は決定係数が0.95前後になり近似精度が高い。図-8はデータ数と減衰比の関係を示しており、灰色の線が異なる時刻データ  $m$  での減衰比 $\zeta(n, m)$ 、黒点がデータ数  $n$  毎の平均減衰比 $\bar{\zeta}(n)$ 、赤線が全体の平均減衰比 $\bar{\zeta}_{all}$ であり、 $n$ が十分大きいとき $\bar{\zeta}_{all}$ を減衰比の収束値 $\bar{\zeta}^*$ としている。ここで提案する平均減衰比は以下の式で与えられる決定係数 $R^2$ を重みとした重み付き平均である。

$$\bar{\zeta}_{all} = \frac{\sum_n \sum_m R^2_{(n,m)} \zeta(n,m)}{\sum_n \sum_m R^2_{(n,m)}} \rightarrow \bar{\zeta}^* \quad (1)$$

窓長が15, 20と大きくなるほど決定係数は1に近づくが、重ね合わせ数が減るため減衰比の収束が鈍くなる。以上の検討の結果、最適な窓長は10程度、必要な正規化データ長は40000以上（3.8Hzで約3時間分）である。RD法を用いた減衰比の推定結果を表-2に示す。表-2にはハーフパワー法と呼ばれるパワースペクトルから簡略的に減衰比を算出する方法で推定した減衰比も比較として載せている。

### (2) 実橋梁への適用

対象橋梁 C は山梨県にある道路橋で、構造形式は鋼桁 RC 床板の単純桁である(図-9)。第一径間と第二径間の中央の鋼桁に有線式の加速度センサ(EPSON, M-A550)を設置して半年間以上の長期計測を行った。データロガーはKEYENCE製のNR-600を使用しており、サンプリングレートは100Hzとした。本研究で構築したモニタリングシステムは、太陽光発電パネルを利用してシールドバッテリーに蓄電することで長期計測を行っている。

(3) 減衰比の算出

気温の影響によって基線が数 mm/s<sup>2</sup> 程度変動するため、60 秒移動平均フィルタを用いて基線補正を行った後に閾値 (1.5mm/s<sup>2</sup>) 以下の振動成分を常時微動とみなしてデータの抽出を行った。

RD 法を用いて減衰特性の分析を行った。分析に必要なデータ長は 3 時間、窓長は 10 とした。RD 法により得られた自由減衰波形と減衰包絡線の例を図-10 に示す。

抽出した常時微動データを気温毎に整理して減衰比の分布の算出を行った結果を図-11 に示す。ここで、式(1)に示した RD 法における決定係数を重みとした減衰比の同定手法を利用して、減衰比の気温による変動成分を多項式近似して得られた変動成分の曲線を図-12 の黒破線で示す。

まとめ

橋梁の振動エネルギーに着目して構造特性の中でも特に減衰比を把握する手法を検討し、対象橋梁の加速度から RD 法を用いて減衰比を算出して分析方法を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 3つの異なる構造形式の橋梁に対して加速度の計測を行い、振動モードや減衰比、振動エネルギーの分析を行った。高速道路橋である橋梁 A では振動エネルギーと交通の関係を示し、交通環境によって励起される振動モードが異なり、振動エネルギーのモードごとのバランスが変化することを示した。
- ハーフパワー法と RD 法を用いた減衰比の同定を行い、分析窓長とデータ長を検討した結果、窓長約 10、正規化データ長 40k 以上が最適であることを示した。
- 決定係数で重み付け平均した減衰比の評価方法を提案し、実橋梁実験から、データ選択に依存しにくく自動で減衰比を算出する方法を提案した。
- 減衰比の確率密度分布を同定し、減衰比と気温の関係を明らかにして外乱の影響を評価した。減衰比の推定では固有振動数が高くなるにつれて精度低下があったため、手法の検討をさらに進めて行く。本研究では特に減衰比に着目してその分析方法を検討したが、計算過程で固有振動数や振動モード形を算出しているため、今後これらのパラメータを含めて総合的に評価する方法についても検討を行っていく。構造に起因する減衰について、気温以外の影響などの分析を今後進めていくことでヘルスマonitoringに役立てたい。

【参考文献】

- 1) 貝戸清之, 松岡弘大, 渡辺勉, 曾我部正道, 藤野陽三: 走行列車荷重下における鉄道橋桁の動的応答の特性とその利用, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.3, pp.382-401, 2010.
- 2) 背戸一登, 大熊政明, 山下繁生, 長松昭男: 多自由度系の等価質量同定法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.53, No.485, pp.52-58, 1987.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① K., TAKEYA, K., Ota, S., Takagi, and J., Yoshida : Analysis of Traffic Environment and Dynamic

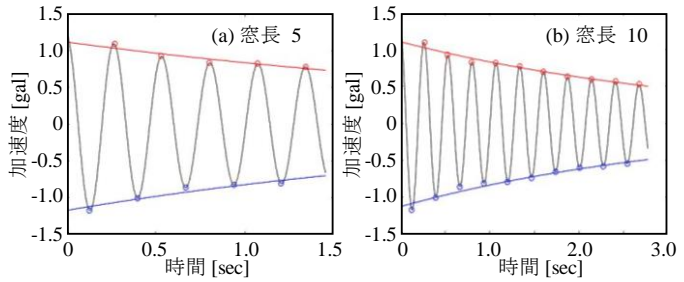


図-6 RD 法による自由減衰波形と対数近似曲線の一例

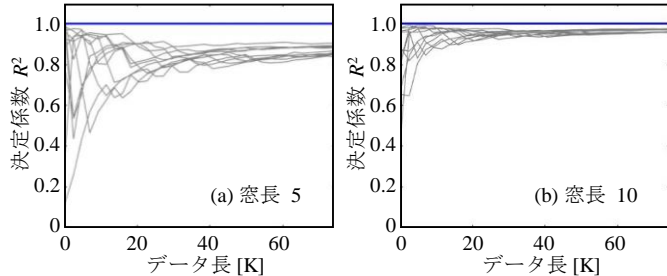


図-7 対数近似曲線の決定係数 R<sup>2</sup> とデータ長の関係

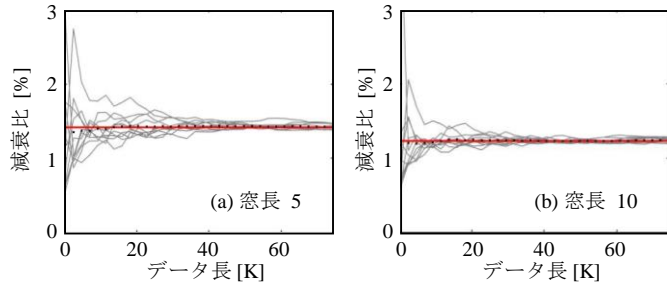


図-8 減衰比とデータ長の関係

表-2 減衰比の分析結果の比較

	ハーフパワー法							
	桁端部(橋軸(Y)方向加速度)				桁中央部(鉛直(Z)方向加速度)			
	N-1	N-9	S-1	S-9	N-3	N-7	S-3	S-7
センサ								
鉛直1次 (3.8Hz)	1.41%	1.44%	1.43%	1.48%	1.36%	1.41%	1.37%	1.42%
鉛直2次 (6.74Hz)	1.19%	1.21%	1.08%	1.07%	0.89%	0.98%	1.10%	1.00%
	RD法							
	桁端部(橋軸(Y)方向加速度)				桁中央部(鉛直(Z)方向加速度)			
	N-1	N-9	S-1	S-9	N-3	N-7	S-3	S-7
センサ								
鉛直1次 (3.8Hz)	1.12%	1.14%	1.17%	1.14%	1.15%	1.16%	1.14%	1.14%
鉛直2次 (6.74Hz)	1.75%	1.65%	1.70%	1.65%	1.40%	1.70%	1.38%	1.39%

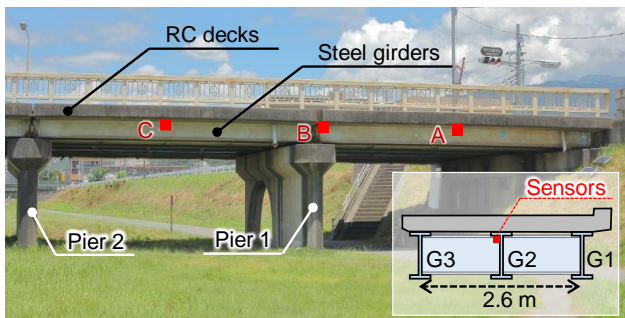


図-9 対象橋梁 C と加速度センサの設置位置

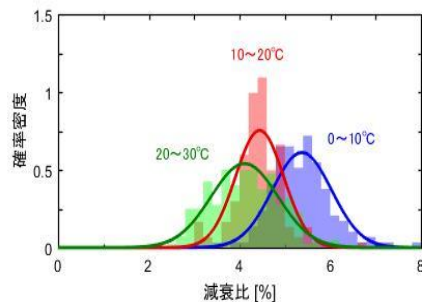


図-11 気温別の減衰比の確率密度分布

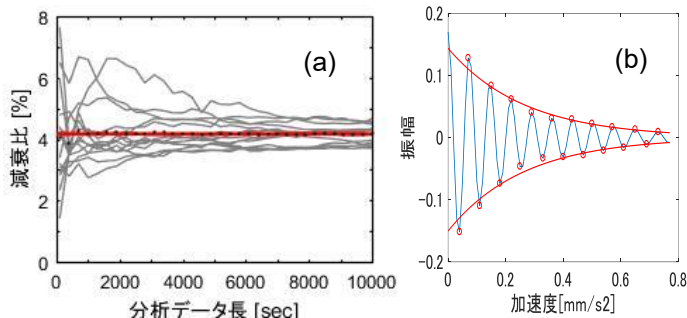


図-10 RD法を用いた減衰比の算出方法の検討  
 (a) 算出された減衰比とデータ長の関係  
 (b) RD法により得られた自由減衰波形と減衰包絡線の例

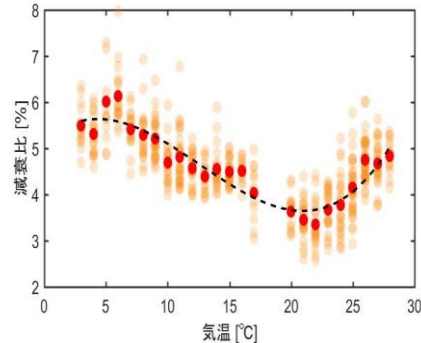


図-12 気温毎の減衰比の分布と重み付き平均および気温による変動成分の推定曲線

Behavior of Bridge Girders based on Image Sensing Techniques, 4th International Conference on Science, Engineering and Environment, 査読有, No.4721, pp.1-6, 2018.

- ② 竹谷晃二, 吉田純司, 太田小春, 高木詩歩: 動画像を用いた橋梁の活荷重挙動の分析方法の基礎的検討, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, Vol.26, No.56, pp.380-385, 2018.

[学会発表] (計 3件)

- ① 竹谷晃二, 小野拓朗: 橋梁桁端部のたわみ角に着目したヘルスマモニタリングの基礎的検討, 土木学会第45回関東支部技術研究発表会概要集, I-46, 2018.  
 ② 太田小春, 竹谷晃二, 佐々木栄一, 小野拓朗: 橋梁桁端部の動的挙動に着目した構造動特性の分析法, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, I-107, 2018.  
 ③ 竹谷晃二, 梅川雄太郎, 佐々木栄一, 小野拓朗: 橋梁ヘルスマモニタリングのための加速度応答に基づく減衰評価方法の検討, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, I-083, 2018.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0件)  
 ○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

山梨大学 竹谷晃一 HP <http://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~ktakeya/home.html>

山梨大学 地域防災・マネジメント研究センターHP <http://desire.yamanashi.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者  
なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 太田 小春

ローマ字氏名: OTA, Koharu

※科研費による研究は, 研究者の自覚と責任において実施するものです. そのため, 研究の実施や研究成果の公表等については, 国の要請等に基づくものではなく, その研究成果に関する見解や責任は, 研究者個人に帰属されます.