

橋梁支承部付近の回転振動特性に着目した 減衰特性および健全度評価方法の提案

Proposal of the evaluation method of damping characteristics focusing on
rotational vibration near bridge bearings

研究代表者 山梨大学土木環境工学科 助教 竹谷晃一*

Kouichi Takeya

In this study, we focused on the behavior in the rotational vibration near the bridge bearings. The rotational vibration was measured by using MEMS accelerometers, and the structural parameters, including the damping ratio, were analyzed by a statistical approach. First, the vertical deflection at the center of the girder and the modal damping ratio of the bridge girders were analyzed from the deflection angle at the bridge bearings. Next, the factors of the fluctuation of the damping ratio were analyzed considering the influence of temperature and traffic on the bridge.

要旨

本研究では、多くの橋梁構造物で安全かつ容易にアクセス可能な支承部付近に発生する回転方向の挙動に着目し、回転振動データの分析とエネルギー的観点から統計的アプローチによって減衰特性の分析を試みた。はじめに、桁中央部の鉛直たわみや橋梁桁部のモード減衰比などの橋梁の動的特性を、橋梁支承部に生じるたわみ角から分析を行った。つぎに、橋梁構造物の振動応答を用いた減衰比評価において、減衰比のばらつきを要因を整理し、気温や交通による影響の定量的な評価を試みた。

1. まえがき

橋梁の戦略的な維持管理が求められている今日、その実現には橋梁の状態を定量的かつ効率的に把握する方法の確立が不可欠である。その方法のひとつとして振動センサを用いて橋梁上部構造物の構造応答を長期的に計測・分析する橋梁ヘルスマニタリング（以下、BHM）がある。振動センサの中でも加速度センサは比較的安価かつ小型で扱いが容易なため数多くの橋梁に導入しやすいという利点がある。しかしながら、BHMで主に用いられる振動やたわみ量といった情報はその感度が大きい桁中央部で計測することが必要であるが、物理的に桁中央部に振動センサを設置することが困難な橋梁も多い。

一方、橋梁支承部付近はアクセスが比較的容易であるが、鉛直方向の振動は小さいため積極的には橋梁桁部のBHMに用いられてこなかった。しかし、桁端部の動的挙動に着目すると、車両走行などの活荷

重による桁部の鉛直たわみや卓越振動モードに応じて桁端部ではたわみ角が生じていると考えられる。

また、BHMで着目される構造パラメータの中でも減衰比は橋梁の床板や主桁などの上部構造物や支承、橋脚、地盤を含むシステム全体の振動エネルギー収支特性に依存する。橋梁部材に劣化や損傷が生じるとエネルギー収支のバランスが変化すると減衰比の変動として観測できると考えられる。しかしながら、減衰比はほかの構造パラメータと比較してバラつきが大きく、その要因として気温や交通などの環境外乱によってエネルギー収支のバランスが変動することや、計測や分析方法の影響が挙げられる。構造パラメータのバラつきを考慮した評価方法として、ベイズ推定などの統計的な処理が研究されてきた⁽¹⁾。

本研究は、多くの橋梁構造物で安全かつ容易にアクセス可能な支承部付近に発生する回転方向の挙動に着目し、回転振動データの分析とエネルギー的観点から統計的アプローチによって減衰特性を把握すべく、以下の検討を行った。

はじめに、桁中央部の鉛直たわみや橋梁桁部のモード減衰比などの橋梁の動的特性を、橋梁支承部に生じるたわみ角から分析する方法を検討し、模型実験及び実橋梁での計測データを用いて分析を行った。

つぎに、外的要因によって変動する橋梁の減衰比を適切に評価し、実用的なヘルスマニタリングを提案するため、分析方法の検討を行った。減衰比の分析には、計算処理が比較的軽いRandom Decrement

* 助成決定時所属 山梨大学大学院総合研究部

(RD)法を用いて減衰比の収束条件・評価方法について検討を行った。

その上で、橋梁構造物の振動応答を用いた減衰比評価において、減衰比のばらつきの要因を整理し、気温や交通による影響を定量的に評価することを目的とした。実橋梁において長期的な振動計測を実施して減衰比の分析方法の検討を行い、環境外乱の影響を考慮した減衰比の統計的な評価を試みた。

2. 桁端部のたわみ角と桁中央の鉛直たわみの関係

2.1 簡略モデルを用いた定式化

単純桁の場合の橋梁桁端部の模式図を図1に示す。車両通行などによって橋梁に鉛直たわみが生じるとき、桁端部では支承の支点を中心とした回転挙動を示すと考えられる。このとき、支点を原点(0, 0)とした場合、高さ H 、水平方向 L に設置した動的挙動の計測点の $t = 0$ [sec]における位置は (L, H) と表せる。支点を中心にしたたわみ角 $\theta(t)$ が生じたとき、計測点の水平方向変位 $y(t)$ を用いて次式のように表せる。

$$\theta(t) = \sin^{-1}\left(\frac{y(t)+L}{\sqrt{H^2+L^2}}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{L}{\sqrt{H^2+L^2}}\right) \quad (1)$$

桁端部の動的挙動の計測方法として ① 加速度センサ、② 変位計を考え、それぞれの方法を表1に簡潔にまとめた。本研究では、桁中央部の鉛直たわみが変位計(LK-500, KEYENCE製)で直接計測できる模型橋梁で桁端部のたわみ角と桁中央部の鉛直たわみの関係の評価を行なった。その上で、実橋梁における動的挙動をMEMS式加速度計(M-A351, EPSON製)で計測し、振動モードやモード減衰比の評価を行った。

2.2 模型実験による検証

模型橋梁を用いた実験の様子を図2に示す。橋梁模型のスパン長は700 mm、主桁は長方形断面($h = 4$ mm, $w = 50$ mm, 材質:ポリカーボネート)であり、鉄球を通過させるための2本のレール(一辺5 mmの直角三角形, 材質:ABS)が主桁に固定されている。28g,

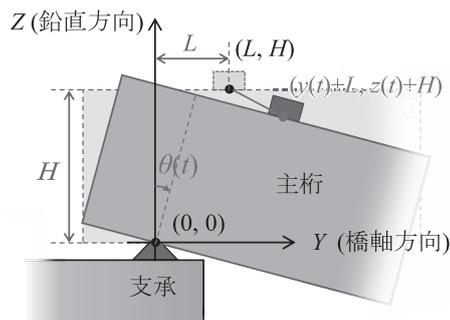


図1 桁端部の模式図

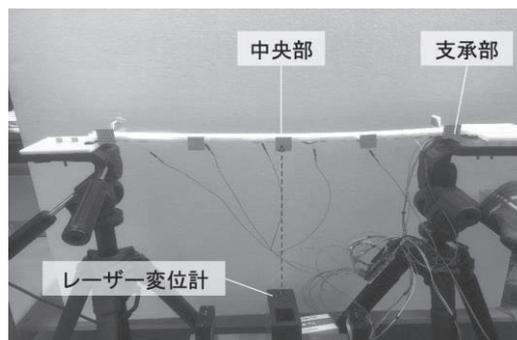


図2 桁端部のたわみ角と 桁中央の鉛直たわみの関係

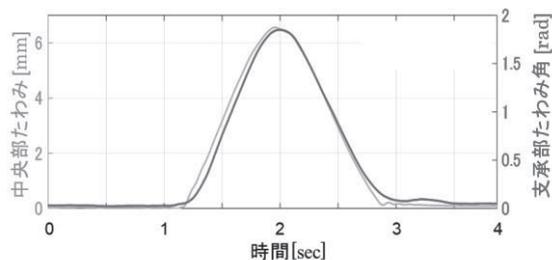


図3 桁端部のたわみ角と 桁中央の鉛直たわみの関係

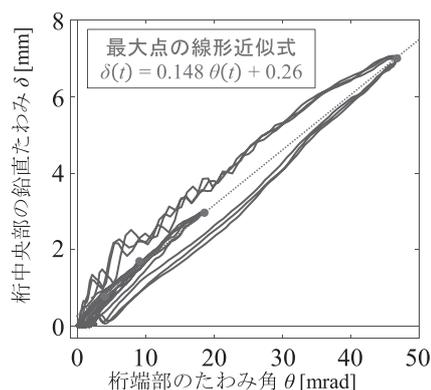


図4 桁端部のたわみ角と桁中央の鉛直たわみの関係

表1 桁端部の動的挙動の計測方法

		メリット	デメリット
① 加速度センサ	MEMS式	小型で消費電力が小さく設置が容易.	低周波域の精度が低い.
	サーボ式	精度が高く積分処理でも誤差が小さい.	電源の確保が必要. 比較的高価.
② 変位計	接触式	橋台・橋脚が不動点とみなせる場合, 直接変位が計測できるため高精度.	設置が複雑. 電源の確保が必要.
	非接触式		電源の確保が必要. 比較的高価.

64g, 110g, 260g の鉄球を通過させた時の桁端部の水平変位をレーザー変位計で計測し、式(1)を用いてたわみ角に変換した。算出したたわみ角 $\theta(t)$ と桁中央部の鉛直たわみ $\delta(t)$ の関係を図3と図4に示す。移動荷重の条件下では桁端部のたわみ角と桁中央部の鉛直方向変位は図4の青線で示す軌跡を描くため1対1の関係とはならないが、各値が最大となる点(図4の赤点)に着目し、最小二乗法によって直線近似すると以下の関係式が得られた。

$$\delta(t) = 14.8 \theta(t) + 0.26 \text{ [mm]} \quad (2)$$

以上より、桁端部のたわみ角を観測することで、桁中央部の鉛直たわみが簡略的に把握することができると考えられる。実用的には、今後実橋梁での計測・

分析を進めていくことで、橋梁の桁端部の最大たわみ角を計測することで橋梁上部構造物の健全度を長期的に評価するなどの活用が期待できる。

3. 減衰評価方法の検討

3.1 対象橋梁と加速度計測

対象橋梁は2径間連続鋼床版箱桁中路式であり、片側1車線の対面交通、交通量は毎時300~600台である。図5に対象橋梁の外観を示す。図6(a)(b)は対象橋梁の概略図であり、図6(c)は3軸MEMS式加速度センサの設置位置を示している。使用したMEMS式加速度センサはEPSON製M-A351である。

桁端部に設置した4つの加速度センサ(N-1, N-9,

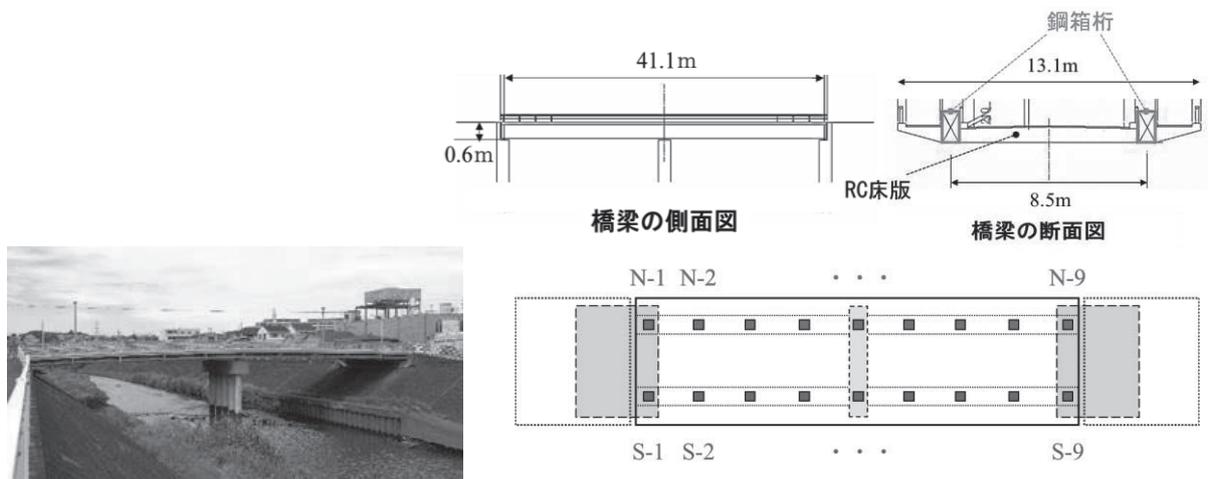


図5 対象橋梁の外観

図6 対象橋梁の模式図と加速度センサの設置位置

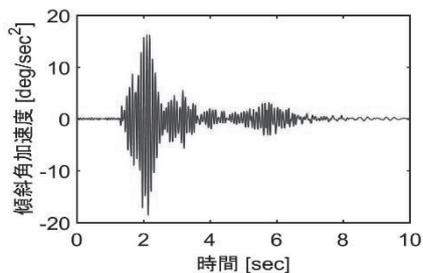


図7 桁端部(S-9)における傾斜角加速度の時刻歴

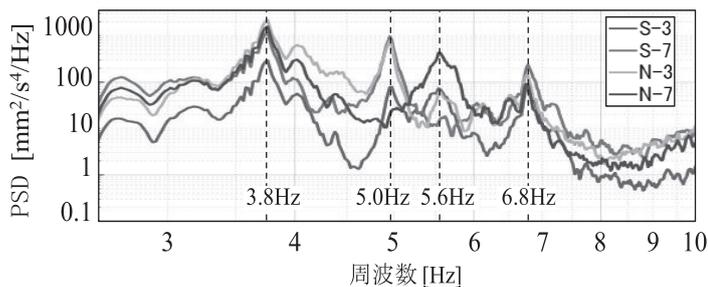


図8 支間中央部の鉛直加速度のパワースペクトル密度

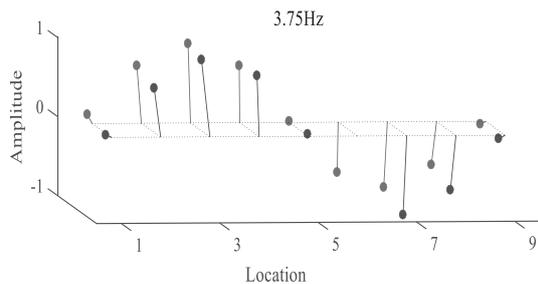


図9 対象橋梁の鉛直1次振動モード(3.8Hz)の3次元形状

表2 減衰比の算出結果の比較

分析データ	鉛直1次振動モード(3.75Hz)の減衰比 h
桁中央(N-3, N-7)の鉛直加速度	$h_z = 0.0116$ (平均値)
桁端部(N-1, N-9)のたわみ角加速度	$h_\theta = 0.0113$ (平均値)
相対精度 $(1 - h_\theta - h_z /h_z) \times 100$ [%]	97.8 %

S-1, S-9)の支点からの位置は $L = 0$ mm, $H = 600$ mm とした. 図 7 は大型車が単独で走行した時の桁端部 (S-9 地点)において加速度計測から式(1)を用いて得られる傾斜角加速度の時刻歴を示している. 車両通行時の傾斜角加速度のピーク値は数十 deg/s^2 程度であった. 図 8 は S-3, S-7, N-3, N-7 の鉛直(Z)方向加速度から算出した PSD である. 3.8Hz, 5.0Hz, 5.6Hz, 6.8Hz にピークがあり対象橋梁の固有振動数と考えられる. 不定外力下でのモード形状分析法^②で得られた結果より, ここでは 1 次鉛直振動モードである 3.8Hz に着目して分析を進めた. 桁全体の動的挙動を把握するため, N-3 の鉛直方向加速度を基準として各センサとの伝達関数を算出し, 対象振動数におけるゲインと位相から 3 次元のモード形状を得た. 鉛直 1 次振動モード(3.8Hz)のモード形状を図 9 に示す.

3.2 RD 法を用いた減衰比の評価

振動モード毎の減衰比の分析を RD 法によって行った. バンドパスフィルタで対象振動モードの加速度波形を取り出し, 1800 秒間のデータを時間窓 5 秒 (オーバーラップ 80%) で区切った波形の重ね合わせから自由減衰波形を抽出して減衰比を推定した. 桁端部(N-1, N-9)の角加速度 [deg/s^2] と桁中央(N-3, N-7)の鉛直加速度 [gal] から算出した減衰比を表 2 に示

す.

RD 法^③による減衰推定手順は以下の通りである.

- 1) 対象振動数の波形をフィルタリングで抽出
- 2) 対象データを時間窓で区切り平均化
- 3) 自由減衰波形の対数近似から減衰比を算出

RD 法は計算が簡便で軽い一方, 同定される減衰比がフィルターの設計値や対象データの選択, 窓長に依存すると考えられ, 結果の収束条件の検討が必要である.

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 10 は窓長 5, 10 の対数近似の一例であり, 図 11 はデータ長 ($n=100$ 秒, 300 秒, \dots 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 12 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

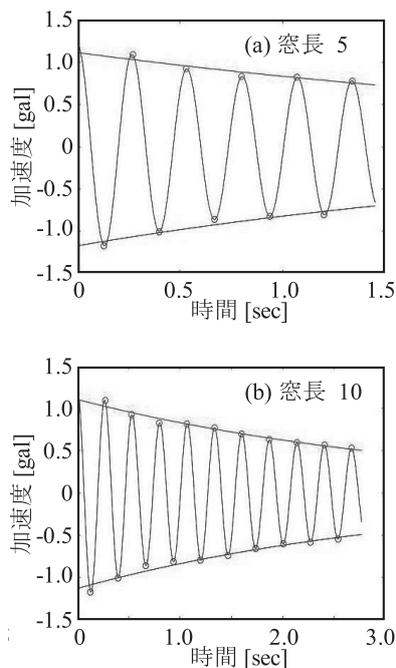


図 10 RD 法による自由減衰波形と対数近似曲線の一例

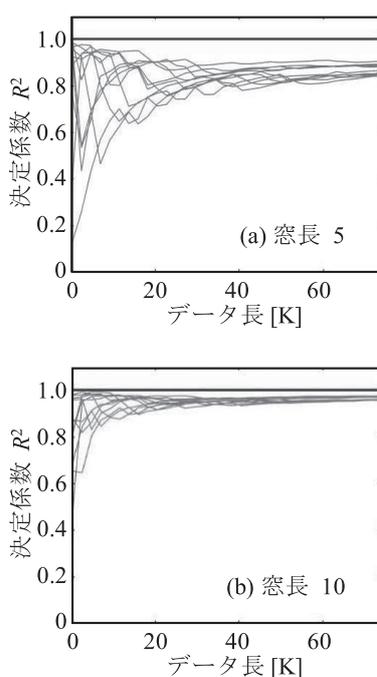


図 11 対数近似曲線の決定係数 R^2 とデータ長の関係

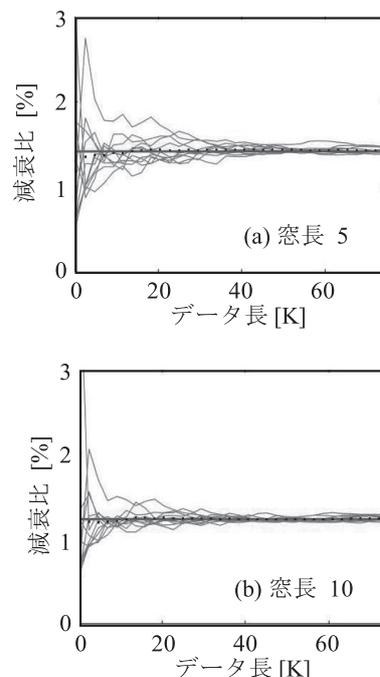


図 12 減衰比とデータ長の関係

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.

$$\bar{\zeta}_{all} = \frac{\sum_n \sum_m R_{(n,m)}^2 \zeta_{(n,m)}}{\sum_n \sum_m R_{(n,m)}^2} \rightarrow \bar{\zeta}^* \quad (3)$$

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) であった.

つぎに, 振動モード毎の減衰比の分析を RD 法によって行った. バンドパスフィルタで対象振動モードの加速度波形を取り出し, 1800 秒間のデータを時間窓 5 秒 (オーバーラップ 80%) で区切った波形の重ね合わせから自由減衰波形を抽出して減衰比を推定

した. 桁端部 (N-1, N-9) の角加速度 [deg/s²] と桁中央 (N-3, N-7) の鉛直加速度 [gal] から算出した減衰比を表 3 に示す.

4. 環境外乱が橋梁の減衰特性に与える影響の統計的評価

4.1 対象橋梁と振動応答計測

対象橋梁は山梨県甲府市の一般道路橋であり, 9 径間単独鋼桁橋で各支間長は約 10m, 片側 1 車線の対面交通で交通量は毎時 600~900 台である. 対象橋梁の断面図を図 13 に示す. 計測地点は図 14 に示すように, 第 1・2 径間の支間中央と支承部の 3 点 (第 1 径間から順に計測点 A~C) において, 中央桁の上フランジ下側に MEMS 型加速度センサ (EPSON, M-A550) をネオジウム磁石によって強固に接着している. ソーラーパネルと 12V シールドバッテリーを用いて継続的な電気供給を可能にした.

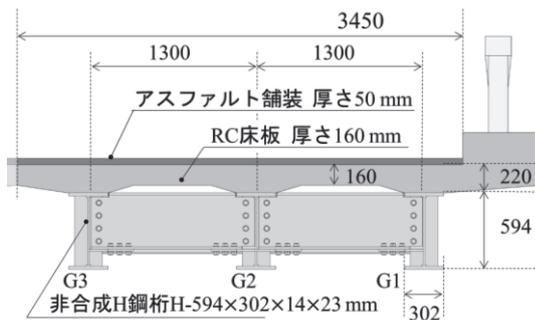


図 13 対象橋梁の断面図

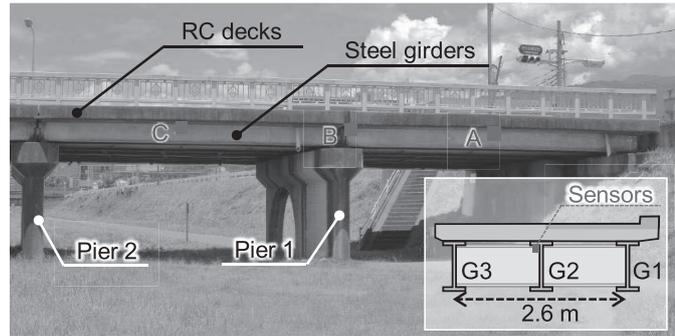


図 14 加速度センサの設置位置

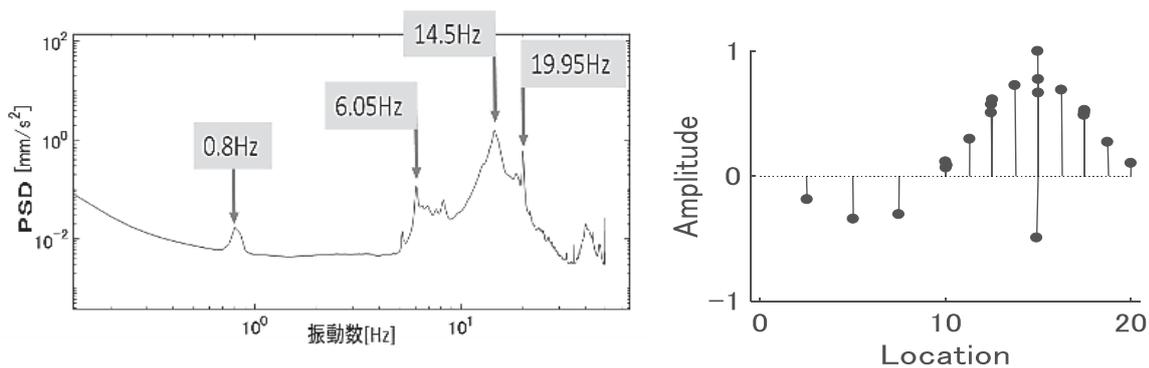


図 15 計測点 A における加速度応答の分析結果

(a) パワースペクトル密度, (b) モード形状分析 (14.5Hz).

表 3 RD 法を用いた減衰比の推定結果

	N-3	N-7	S-3	S-7	平均
3.74 Hz	1.228 %	1.269 %	1.288 %	1.230 %	1.254 %
6.74 Hz	1.306 %	1.348 %	1.332 %	1.258 %	1.311 %

分析対象とする振動モードを決定するため、計測点 A における加速度計測からパワースペクトル密度 (PSD) を算出した結果を図 15(a) に示す。卓越振動毎にモード形状を算出するため位相解析を利用した多点移動計測を行った⁽²⁾。その結果、図 15(b) に示すように 14.5Hz が鉛直 1 次振動モードと考えられ、本研究の対象振動モードとした。

4.2 減衰比の算出

4.2.1 常時微動データの抽出

気温の影響によって基線が数 mm/s^2 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^2) 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。

4.2.2 データ長および窓長の検討

本研究では比較的使用しやすいことや分析時間が短いことから算出方法は RD 法を適用する。RD 法適用時の課題としてあるデータ長・窓長の検討を計測データの分析から検討した結果を図 16(a) に示す。結果からデータ長は 3 時間、窓長は 100Hz とした。分析は交通を含むデータ (計測データ) と常時微動データを月別に分け行った。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 16(b) に示す。

4.2.3 減衰比の確率密度分布

交通時の振動を含む計測データと常時微動時の計測データについて月別に減衰比の分析を行った結果、減衰比の分布が変化することが明らかとなった。代表的な結果として夏季 (8 月) と冬季 (12 月) における減衰比の確率密度分布を図 17 に示す。このことから減衰比は気温と負の相関があることが推測できる。

4.2.4 気温の影響分析

より詳細に気温の影響を分析するため、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 18 に示す。ここで、3 章で提案した 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 18 の黒破線で示す。

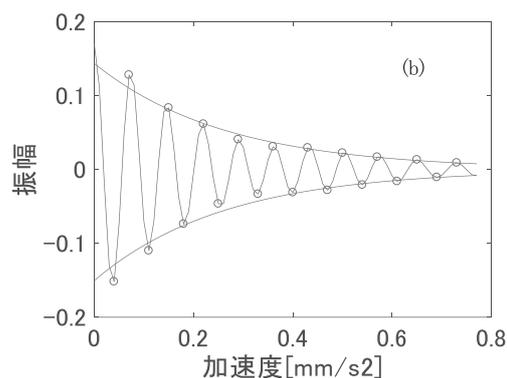
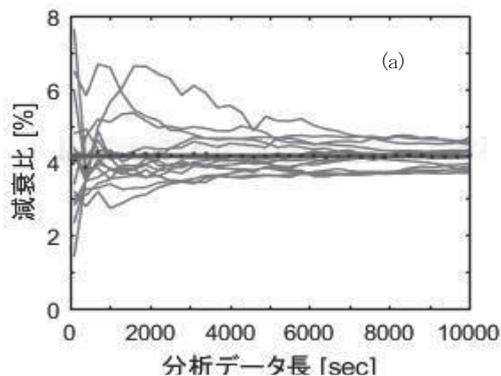


図 16 RD 法を用いた減衰比の算出方法の検討

(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

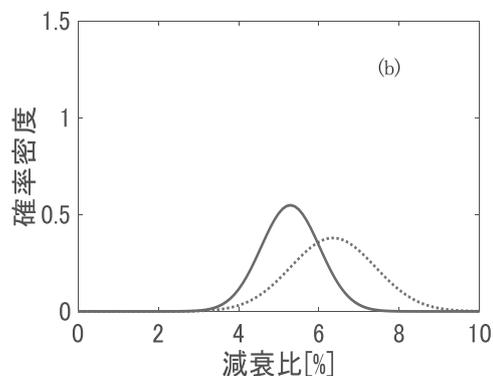
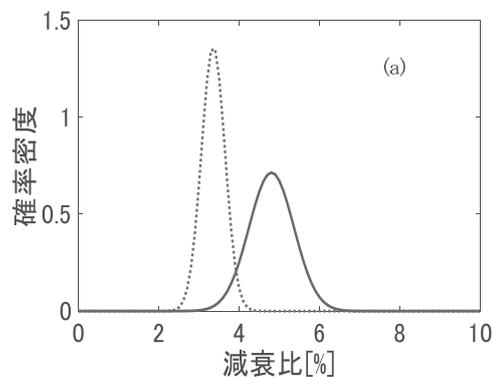


図 17 夏季 (8 月) と冬季 (12 月) における減衰比の分布の比較

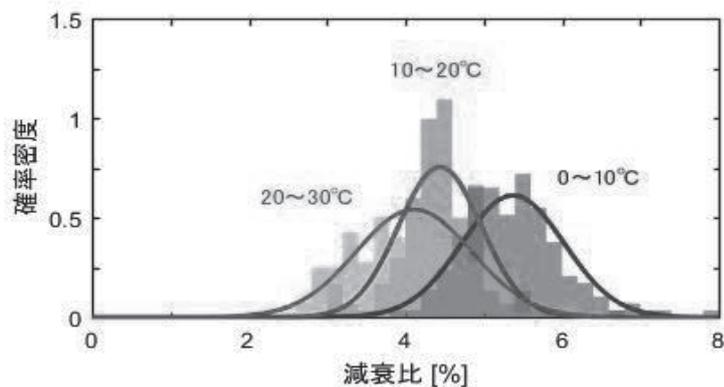


図18 気温別の減衰比の確率密度分布

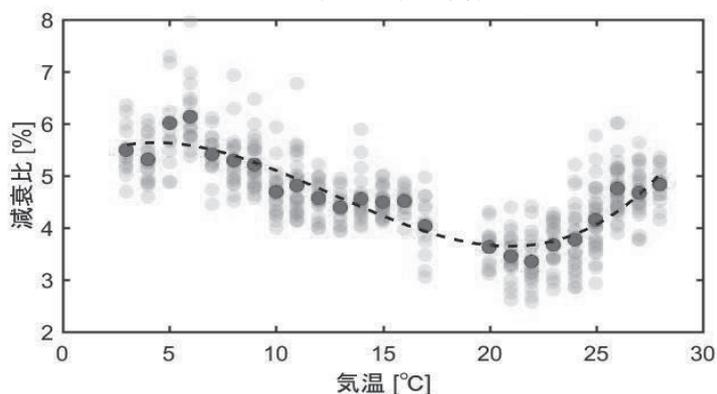


図19 気温毎の減衰比の分布と重み付き平均
および気温による変動成分の推定曲線

まとめ

橋梁桁端部のたわみ角と桁中央の鉛直たわみの関係を模型実験から示し、最大値に着目した BHM の可能性を示した。その上で、実橋梁での振動測定より、桁端部に設置した加速度センサの振動データから角加速度を算出し、RD 法を用いて鉛直振動モードの減衰比を推定できることを示した。

RD 法による減衰比の算出において、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。加えて、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、データ選択に依存せずに自動で減衰比を算出できることを示した。

外乱が減衰比に与える影響を評価するため、実橋梁において加速度の長期計測を行い、減衰比の確率密度分布を同定した。その上で、交通の有無や気温との関係を明らかにした。

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、今後は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う

考えである。また、本研究では減衰比のばらつきの要因について整理し、構造に起因する成分の同定を試みた。今後、構造状態の変化が減衰比などの構造パラメータに与える影響の原因について分析を進めていくことで構造ヘルスマonitoringによる健全度の評価につなげられると考えている。

発表論文

- [1] K., Ota, S., K., Takeya, and J., Yoshida: Statistical Analysis of the Influence of Traffic and Environmental Disturbances on Damping in a Bridge, 5th International Conference on Science, Engineering and Environment, No. 5628, pp.1-6, 2019, Nov, Bangkok, Thailand.
- [2] 太田小春, 竹谷晃一, 吉田純司: 環境外乱が橋梁の減衰特性に与える影響の統計的評価, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, 1-49, 2019 年 9 月.
- [3] 竹谷晃一, 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, Vol. 26, No. 56, pp. 380-385, 2018 年 11 月.
- [4] 竹谷晃一, 梅川雄太郎, 佐々木栄一, 小野拓朗: 橋梁ヘルスマonitoring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.

- [5] 太田小春, 竹谷晃一, 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.
- [6] 竹谷晃一, 小野拓朗: 橋梁桁端部のたわみ角に着目したヘルスマ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.

参考文献

- (1) 五井良直, 金哲佑, 區兆駒: 統計的不確かさを考慮したベイズ推定による長大斜張橋の振動モード同定に関する検討, 土木学会論文集 A2, Vol. 72, No. 2, pp. 751-762, 2016.
- (2) 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, 382-401, 2010.
- (3) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 454, pp. 29-38, 1993.