

橋の損傷検知を目的とした分散型光ファイバセンシングによる振動応答の統計分析

日本電気株式会社 正会員 ○ Petladwala Murtuza
日本電気株式会社 正会員 久村 孝寛

日本電気株式会社 正会員 美島 咲子
京都大学大学院 正会員 金 哲佑

1. はじめに

経年劣化する橋梁の数が増加するなかで、熟練技術者は減少しており、定期的な点検や維持管理の効率化が課題になっている。本研究は、この課題に対するひとつの解決策として、通信用光ファイバをセンサとして用いる分散型光ファイバセンシング (Distributed acoustic sensing; DAS) による橋のモニタリングの可能性に注目している。加速度センサなど従来のモニタリング手法の多くは橋にセンサを取り付ける必要があるが、DAS は、橋に専用センサを取り付けることなく、通信用に敷設されている光ファイバのレイリー後方散乱光の位相情報を利用して振動計測する。線状センサとしての光ファイバの特徴を活かして、ひとつの橋の複数の計測点をまとめて観測することや、複数の橋を同時に観測することが可能である。このような特徴をもつ DAS を使って、人工的な損傷を与えた模型橋梁の振動データを統計的に分析することで、損傷状態の違いを検知することを試みる。

2. 実稼働モード解析

本報告では、DAS で得られる振動データを実稼働モード解析することで振動モード周波数を抽出して統計分析する。実稼働モード解析は、一般的な振動解析手法のひとつで、構造物の実稼働時の振動計測データのみから振動特徴であるモード周波数やモード形状を同定する。本報告では実稼働モード解析のひとつである FDD (frequency domain decomposition) 法¹⁾ を使って橋の振動モードを分析する。未知加振入力 $x(t)$ とその応答 $y(t)$ の間の応答スペクトルの関係は次式で表現できる。

$$G_{yy}(j\omega) = \bar{H}(j\omega)G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (1)$$

ここで、 $G_{xx}(j\omega)$ は r 行 r 列の入力パワースペクトル密度行列、 r は入力の数、 $G_{yy}(j\omega)$ は m 行 m 列の応答パワースペクトル密度行列、 m は応答の数、 $H(j\omega)$ は m 行 r 列の周波数応答関数行列を表す。振動モード分解はスペクトル行列の特異値分解 (singular value decomposition; SVD) と同じ式で表現できるので、角周波数 $\omega = \omega_i$ における $G_{yy}(j\omega)$ の推定値 $\hat{G}_{yy}(j\omega_i)$ は次式のように特異値分解される。

$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (2)$$

ここで、 U_i は各列がモード形状の列ベクトルで構成されるユニタリ行列、 S_i は実数特異値からなる対角行列である。行列 S_i の k 番目のモードに対応するピークが対象のモード周波数である。上付き添字 H はエルミート転置を表す。本研究では、行列 S_i を使って橋の振動モード周波数を抽出する。

3. 実験と結果

図1に示す長さ 5.6m の模型橋梁が計測対象である。模型橋梁の上で台車が走行する際の振動応答を DAS および加速度センサで計測する。DAS で使用する光ファイバは、模型橋梁の桁裏面に粘着テープで貼り付けたシングルモード光パッチケーブル $\phi 2\text{mm}$ である。

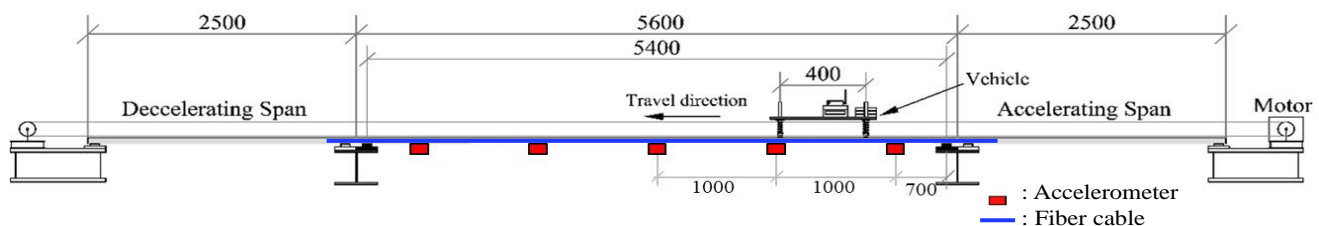


図1 実験構成，模型橋梁の側面図(単位 mm)

キーワード 分散型光ファイバセンシング，レイリー後方散乱光，振動モード解析，橋梁ヘルスマニタリング
連絡先 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753 日本電気株式会社 E-mail : murtuza@nec.com

異なる損傷状態の振動応答を比較するため、桁両側に鉛直方向の人工亀裂を与える場合（損傷）と、それを補強した状態（健全）と、それぞれで計測する。台車の重り4種と速度2種のパラメータ設定を用意し、各パラメータ設定で台車を10回ほど模型橋梁の上を往復させる。合計80走行の各走行イベントから4秒間の自由振動をモード解析して、3次までの振動モードを抽出する。

以上のような計測によって抽出されたモード周波数のヒストグラムを図2に示す。図2上段は加速度センサ(ACC)のモード周波数の、同下段はDASのモード周波数の、同左列は1次モード周波数の、同中列は2次モード周波数の、同右列は3次モード周波数の、ヒストグラムをそれぞれ表す。図2の各ヒストグラムには、モード周波数の頻度分布が正規分布に従う仮定のもとで推定された確率分布形状も示してある。図2のいずれのヒストグラムにおいても、「健全(緑色)」と「損傷(赤色)」のふたつの状態においてモード周波数の頻度分布が異なっていることがわかる。

「健全」と「損傷」のふたつの状態のモード周波数の分散に注目し、それらが統計的に異なるか否かをF検定で分析する²⁾。図2に示したヒストグラムをもとにF検定した結果を表1に示す。表1によれば、ACCもDASも、1次および2次のモード周波数の分散については仮説「H1：健全と損傷のモード周波数の分散は異なる」を支持する結果となった。今回の実験で与えた人工的な損傷については、ACCでもDASでも違いを検知できると言える。

4. おわりに

橋の異常検知を目的として、分散型光ファイバセンシング(DAS)で模型橋梁の振動応答を計測し、それを振動モード解析して、モード周波数の頻度分布を分析した。その結果、加速度センサおよびDASのいずれでも、模型橋梁の「健全」と「損傷」のそれぞれの状態のモード周波数（1次および2次）の分散が異なると言える結果が得られ、異常検知への応用可能性を示した。

5. 参考文献

- 1) Brincker R. et.al., Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, pp. 625-630, 2000.
- 2) 大島義信ら, 橋梁の損傷検知を目的とした車両振動の統計的分析, 構造工学論文集 Vol.60A, 2014年.

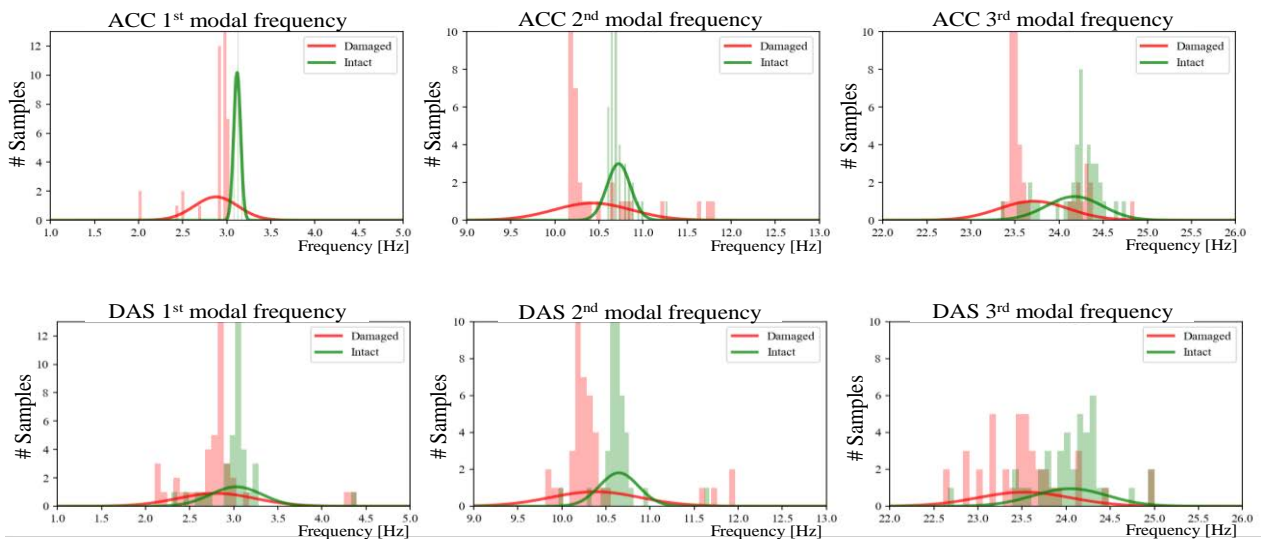


図2 模型橋梁の振動応答から抽出されたモード周波数のヒストグラム，正規分布を仮定した推定確率分布

表1 模型橋梁の振動応答から抽出されたモード周波数の分散に関するF検定

モード周波数	1次		2次		3次	
センサ種別	ACC	DAS	ACC	DAS	ACC	DAS
p値	1.1×10^{-16}	3.8×10^{-3}	9.9×10^{-12}	6.3×10^{-14}	7.4×10^{-2}	1.7×10^{-1}
採択仮説	H1	H1	H1	H1	H0	H0

H0：「健全」と「損傷」のモード周波数の分散が異なるとは言えない。H1：「健全」と「損傷」のモード周波数の分散は異なる。F検定における信頼区間を95%とする。