

省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発 3 (特性分析)

東京工業大学 正会員 ○佐々木 栄一, Natdanai Sinsamutpadung, Porjan Tuttipongsawat
 オムロンソーシアルソリューションズ(株) 正会員 黒田卓也, 正会員 西田秀志, 正会員 高瀬和男

1. はじめに：近年、橋梁等のインフラ構造物に対する維持管理の重要性が指摘されてきている。筆者らは、共同研究として、省電力ワイアレスセンサによる橋梁モニタリングシステムの開発を進め、これまで複数の橋梁に適用し、それぞれ異なる目的での長期計測を実施している。開発した橋梁モニタリングシステムは、加速度、温度、湿度、ひずみ等必要な情報を選択し、カスタマイズすることで汎用的に様々な目的、橋梁に適用できるように構成されている。また、センサ情報をマルチパーパスに利用することにより、センサ種類数を抑えコンパクトなシステム構成となるよう考慮されている。例えば、加速度計のデータは、変位分析、構造同定、構造パラメータ分析、位相空間分析等、異なる特性分析手法に用いられ、様々な特性を継続的に監視できる。また、橋梁は、基本的に個別生産であり、個性と呼ぶべき固有の特性があると考えられる。提案する橋梁モニタリングシステムでは、その個性を「特性カルテ」と呼ばれる形で経時的に監視し、状態診断に用いている。

ここでは、国土交通省の現場を対象とした橋梁モニタリングシステムの実証実験プロジェクトにおいて、構築した橋梁モニタリングシステムの特性分析に関わる部分について、その概要を述べる。特に、加速度データを用いた構造同定、ベイズ推定を用いた構造パラメータ分析、位相空間分析について示す。

2. 対象橋梁およびセンサ配置：本プロジェクトで対象とした橋梁は、RC 床板を有する 3 径間連続鋼箱桁橋梁であり、非合成桁として設計されたものである。これまでの点検等から、中央スパンの RC 床板に顕著なひび割れがあり、また鋼桁に腐食損傷も生じていることから、点検との連携を考慮したセンサ等のシステムカスタマイズがなされている。図-1 にセンサ配置を示す。センサノードは基本的に温度、湿度、3 軸加速度を取得に、幾つかの断面でそのほかピエゾフィルムセンサによるひずみ計測を行っている。

3. 特性分析手法の概要と結果例

(1) 構造同定分析：構造同定分析においては、加速度センサにより得られたデータを用いて、NExT-ERA による振動数、減衰等の分析を行っている。長期にわたり計測を行っているため、継続的な振動数変化などを捉えることとなる。例として、図-2 に冬（1 月）と夏（7 月）のデータの分析結果を横軸温度として示す。温度上昇に伴い、振動数が微減していることが確認される。

(2) ベイズ推定を用いた構造パラメータ分析：構造パラメータ分析として、NExT-ERA により得られた振動数のうち、1 次、2 次、3 次の 3 つのモードの振動数を考慮して、ベイズ推定により FEM モデル（図-3）の材料パラメータの確率分布評価を行っている。対象橋梁の中央径間の床板において損傷等を考慮し、FEM モデルでは、床板をソリッド要素、鋼桁部をシェル要素、支承をバネ要素でモデル化し、ベイズ推定で着目するパラメータとしては、事前分析の結果から影響の大きいパラメータを選定し、鋼材剛性 (E_s)、床板コンクリート

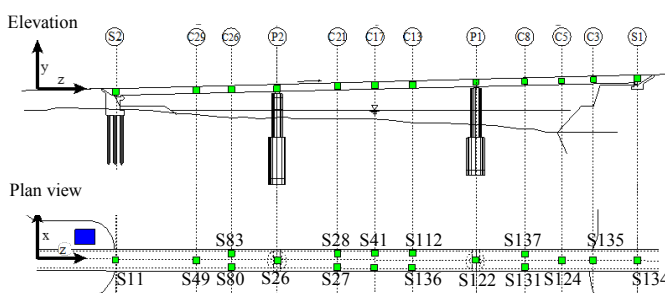


図-1 対象橋梁とセンサ配置

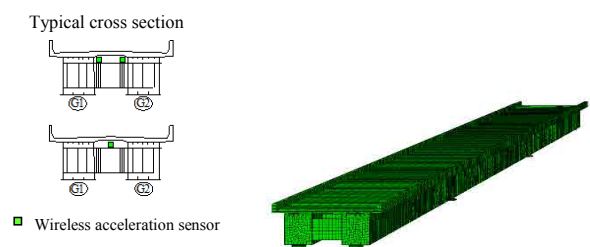


図-3 FEM モデル

キーワード 橋梁, モニタリング, 特性分析, 位相空間, 構造パラメータ

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-23 東京工業大学環境・社会理工学院 TEL 03-3734-3099

剛性 (E_c), ゴム支承の剛性 (E_{r1} (橋台上), E_{r2} (橋脚上)) とした. 特に, 床板コンクリート剛性 E_c については, 中央径間にひび割れが顕著に確認されていることから, 中央径間 ($E_{c,center}$) と側径間 ($E_{c,outer}$) に区別し, 部材位置毎の違いを考慮できるように設定した. 解析サンプル数 1,000 として分析した結果の例 (1 月) を図-4 に示す. 中央径間の床板コンクリート剛性の低下傾向を確認することができる. このような材料パラメータ分析を継続的に実施することにより, 構造特性の変化を追跡する仕組みとなっている.

(3) 位相空間分析: 加速度の時系列データ $x(n)$ を用いて, $\mathbf{x}(n)=[x(n), x(n+T), \dots, x(n+(d-1)T)]$ (T : 遅れ時間, d : 埋込み次数) に表される時系列データの位相空間を構成し, 位相空間での軌跡形状を分析することを位相空間分析と呼び, システムに取り入れている. 構造パラメータの変化により, 時系列データに現れる変化を捉える手法として様々な分野での応用があるが, 筆者らの用いている手法は, 位相空間での軌跡形状を極座標表示し, 角度区分ごとの変化を追跡するようなアルゴリズムを採用している. 位相空間分析においては複数のインデックス (特徴量) を定義可能であるが, 図-5 に示すセンサ位置における, 位相空間における重心移動量, SOC (Smooth Orthogonal Coordinate) と呼ばれる固有値について結果の例を図-6 に示す.

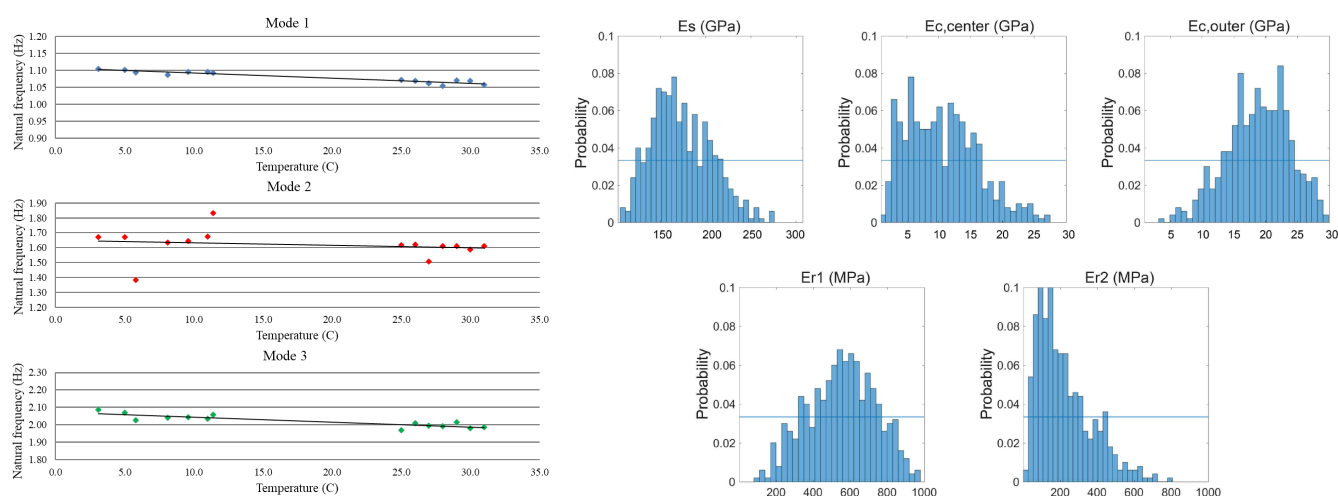


図-2 構造同定により得られた振動数と温度の関係例

図-4 推定された構造パラメータの分布 (1 月)

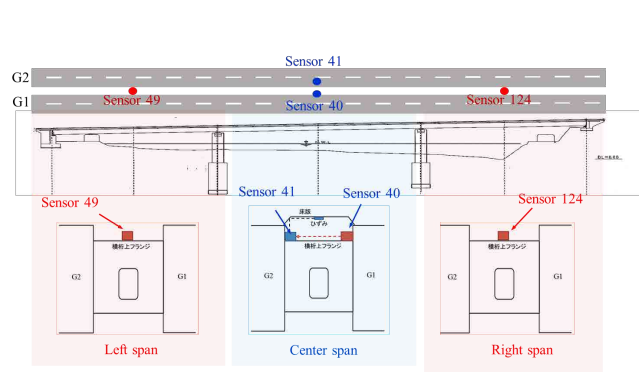


図-5 位相空間分析に用いたセンサの位置

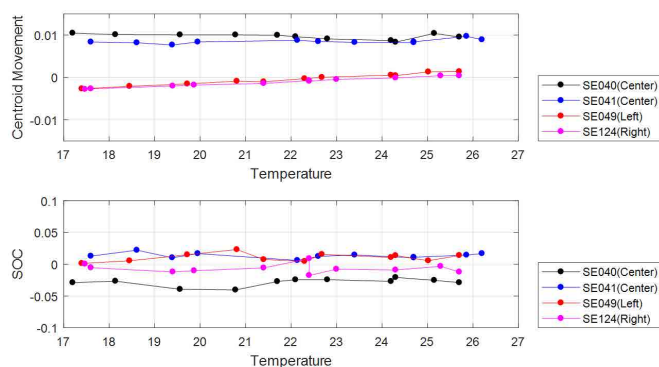


図-6 位相空間分析結果例 (上: 重心移動量, 下 SOC)

4. まとめ: 本稿では, 筆者らが開発した橋梁モニタリングシステムにおける特性分析手法についてその概要と結果例を示した. 継続的なデータ取得により, 構造的変化を捉えることが可能となると考えている. なお, 本研究は, 内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」に関連した国土交通省の「社会インフラへのモニタリング技術の活用推進に関する技術研究開発」の下で実施したものである.

参考文献 D. Chelidze and M. Liu, 'Reconstructing slow-time dynamics from fast-time measurements', Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, vol. 366, no. 1866, pp. 729-745, 2008. 西尾真由子, 藤野陽三: ベイズ推定による既存構造物数値モデルの不確定性定量化とキャリブレーション, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 69, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 16), pp. 711-718, 2013. ほか