

既存 PC 橋長期モニタリングデータの温度相関分析と ARX モデル推定による 構造状態評価法の提案

横浜国立大学 学生会員 ○伊藤 駿

横浜国立大学 正会員 西尾 真由子

1. はじめに

近年のセンサ技術の進歩により橋梁モニタリングでは長期間安定してデータを取得することが可能となっており，これを活用して時系列的に構造状態の評価を行う手法がもとめられる．また橋梁モニタリングデータの分析では温度など環境因子の影響を無視できないことが多くの既往研究で示されており，特に長期間の時系列データに対して環境因子の季節変動や日変動を考慮した評価手法が必要である．本研究では，著者らが既存 PC 橋で 2011 年より実施してきている長期光ファイバひずみ・振動モニタリングデータについて，構造躯体の温度分布に着目した相関分析を行った．その上で，特に多点ひずみ時系列データへの ARX(Auto-Regressive with eXogenous)モデル推定による評価手法を提案し，その有効性を検証した．

2. ひずみ・振動データと躯体温度分布との相関分析

本研究での対象橋梁は新潟県にある 4 径間連続 PC 箱桁橋（1973 年完成）であり，著者らは 2011 年より光ファイバ FBG センサによるひずみと振動のモニタリングを行ってきている．図 1 には，特に本研究で用いたひずみの計測点(8 点)と加速度センサの位置を示す．

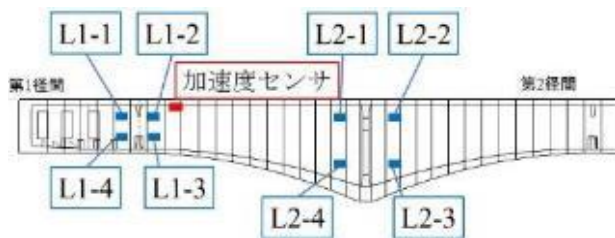


図1 ひずみ計測点および加速度センサの位置

これまでの取得データでも季節変動や日変動が認められていたが，それを詳しく分析するため 2015 年 11 月 26 日～2016 年 11 月 26 日の 1 年間，ひずみと振動データとともに気温と箱桁内部での温度分布の取得を行った．ひずみデータは，モニタリングを開始した 2011 年 12 月時点からのひずみとしており，1 時間毎に 2 分間

700Hz 程度でのサンプリングの FBG 波長平均値をひずみに換算して記録している．加速度計測も 1 時間毎に 15 分間サンプリング周波数 200Hz でデータ取得を行い，パワースペクトル密度推定から安定的に抽出できる 1.0Hz、1.4Hz、3.9Hz のピーク周波数を抽出した．図 2 に対象とした 1 年間の図 1 中 L1-1/2/3/4 のひずみ時系列データを，図 3 に 3.9Hz 付近で安定して抽出された固有振動数の時系列を示した．

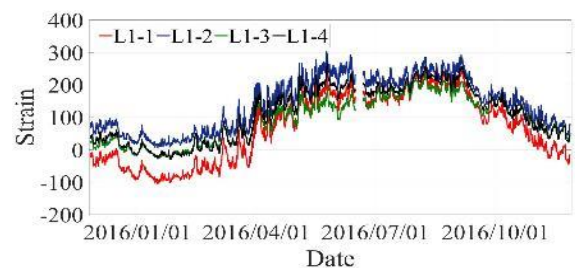


図2 1年間ひずみ時系列データ

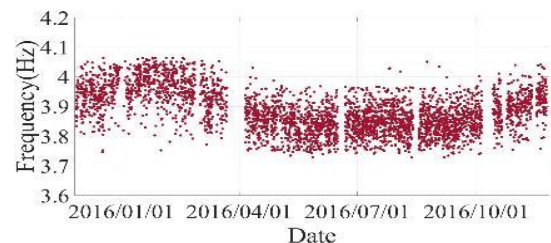


図3 3次モードの固有振動数

環境因子には気温や日射，積雪の影響が考えられるが，これらは橋梁躯体の温度分布に影響を与えると考えた．温度分布の計測から，特に箱桁の上下面，橋軸方向，左右のウェブ間の温度差で，日射や季節ごとの傾向の違いが生じていることが認められた．そこで，これらの温度差に桁外気温も含め，これらとひずみおよび固有振動数データとの相関分析を行った．その結果，1 年間のひずみデータと桁外気温は 0.9 以上の高い相関係数を示し，上下面，上面側の橋軸方向，左右のウェブ間の温度差と相関係数 0.5 前後で中程度の相関を持つことを示した．また温度差とひずみデータの相関係数について季節ごとに値を求めると，各季節によって 1 年間に

キーワード：長期モニタリングデータ，環境因子，相関分析，ARX モデル

連絡先：〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 TEL 045-339-4041

おける相関係数とは異なる傾向を示すことが分かった。また固有振動数に対しては、1.0Hz や 1.4Hz の低次モードでは気温や温度分布とはほとんど相関がなく、3.9Hz の高次モードでは相関係数 0.5 前後で中程度の相関を持つことを示した。

3. 長期時系列データへの ARX モデル適用による構造物の変状の判定手法の提案

ARX モデルとは外生変数を考慮した自己回帰モデルであり、式(1)で定義される。

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nb-nk+1) + e(t) \quad (1)$$

ここで、 $y(t)$ は時間 t での出力、 $u(t)$ は時間 t での外生変数、 $e(t)$ は時間 t でのホワイトノイズであり、 na , nb , nk はモデル係数である。対象とした 2015 年 11 月 26 日～2016 年 11 月 26 日（期間①）のひずみデータのうち安定して FBG 計測ができていた L1-1/2/4, L2-1 でのひずみデータを 72 時間ごとに分割し、それぞれに対して ARX モデルを推定しモデル係数を得た。さらに比較を行うデータとして 2013 年 8 月 2 日～2014 年 7 月 8 日（期間②）の同じ計測点でのひずみ時系列データに対しても同様に ARX モデル係数を推定した。外生変数には、前章の相関解析の結果に基づき各季節で相関の高かった躯体温度差と気温データを採用し、すべての変数は標準化して用いた。ARX モデルの次数は AIC に基づき決定した。L1-1 における ARX モデルの推定結果を図 4 に示す。残差 $e(t)$ に対して Jarque-Bera 検定による正規性の検定を行い 5% 有意水準で帰無仮説が採択されたもののみ特徴量として採用した。

72 時間毎の時系列に対して、L1-1/2/4, L2-1 各ひずみ計測点で推定された ARX モデル係数を成分とする特徴量ベクトル $\mathbf{x}$ を構築し、式(2)で定義されるマハラノビス距離をもとめて確率論的な比較を行った。

$$D_M(\mathbf{x}) = \sqrt{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})} \quad (2)$$

ここで、 $\boldsymbol{\mu}$ は $\mathbf{x}$ の平均ベクトル、 $\boldsymbol{\Sigma}$ は共分散行列である。

ここでは、2013-14 年の期間②データから 2015-16 年の期間①データへの変化を調べた。はじめに、期間②の 72 時間毎の時系列に対する ARX モデル係数ベクトルを式(2)に適用し $D_M^{\textcircled{2}}$ をもとめ、つぎに期間①に対しても同様に $D_M^{\textcircled{1}}$ を得た。ただし、期間②からの変化を調べるため $D_M^{\textcircled{1}}$ の導出に期間②データでの平均ベクトル

$\boldsymbol{\mu}^{\textcircled{2}}$ と共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}^{\textcircled{2}}$ を用いた。マハラノビス距離は $\mathbf{x}$ の各成分が正規分布を示すとき、ホテリングの T^2 法によりカイ二乗分布に従うとされており、自由度 8 の上側有意確率 0.05 での値 15.5 を変化検知の閾値とした。図 5 に 2 つの期間のマハラノビス距離と閾値を示す。2 つの期間で共に概ね閾値以下の値となった。この結果から、対象とした径間の全体的なひずみ分布挙動には 2 つの期間で大きな変化は生じていないといえる。

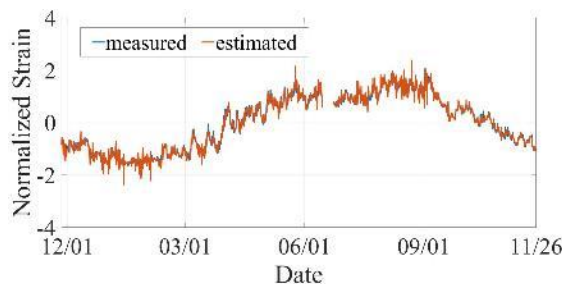


図 4 ARX モデル推定結果

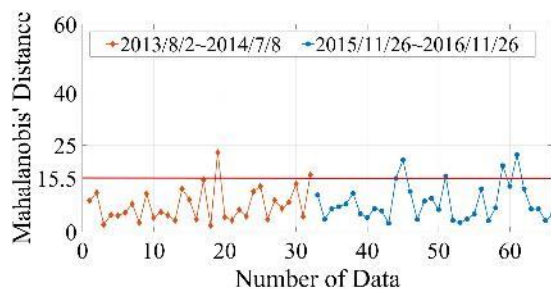


図 5 マハラノビス距離

4. 結論

長期橋梁モニタリングデータと温度計測の相関分析から、ひずみ時系列データが橋梁躯体の温度分布と高い相関を示すこと、固有振動数は高次であれば中程度の相関を示すことを明らかにした。また ARX モデル推定による長期時系列データの評価法を提案し、推定されたモデル係数の推移から、環境因子を考慮した構造物の挙動の変化を判定可能であることを示した。

謝辞

本研究で用いた構造モニタリングデータの取得には、国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮下孝ら. (2012). 妙高大橋の PC ケーブル損傷に伴う外ケーブル補強と今後の維持管理について. 北陸地方整備局事業研究発表会
- 2) James D. Hamilton. (1994). Time Series Analysis. Princeton University Press
- 3) 井手剛, 杉山将. (2015). 異常検知と変化検知. 講談社