

## 季節 ARIMA モデル推定による長期橋梁モニタリングデータからの 構造状態評価法に関する研究

横浜国立大学 学生会員    ○水谷 純也    横浜国立大学 正会員    西尾 真由子  
横浜国立大学 正会員    勝地 弘    横浜国立大学 フェロー    山田 均

### 1. はじめに

近年、老朽化する橋梁の維持管理への意識が高まる中、さまざまなセンサで得られるデータから客観的・定量的に構造状態を把握しようとする構造ヘルスマニタリングへの取り組みが活発である。センサ技術の進歩、ICT 技術の駆使などによって、精度の高いデータを長期間取得することは可能となり、実橋梁での検証も増えている。しかし、得られた長期データから構造状態をどのように「評価・診断」するかという点に対しては、更なる検証が必要な段階である。筆者らは、新潟県妙高大橋<sup>1)</sup>にて、光ファイバ FBG (Fiber Bragg-grating) センサを用いたひずみと温度の常時計測を行っている。本研究では、長期モニタリングデータからの構造状態評価法として時系列解析を活用する手法を提案し、これまでに取得した 2 年間分のデータを用いて、その有効性を検証した。

### 2. 長期モニタリングデータの概要

長期データ取得を行っている妙高大橋（新潟県妙高市、1972 年完成）は、橋長 300m 幅員 10m の 4 径間連続 PC 箱桁橋である。図 1 に示すように、4 径間のうちの 1 径間で、箱桁内部ウェブで計 12 点の FBG ひずみセンサと補正用温度センサを設置し、2011 年 12 月に常時計測を開始した。計測は 1 時間に 1 回のタイミングで行い、各回ではサンプリング 700Hz 程度の 2 分間連続データを平均した上で、第 1 回目計測時を初期状態としてひずみを導出した。対象径間中央の下フランジ側 P1-4 で得られた時系列データ（2011 年 12 月-2013 年 10 月）を、図 2(a) に示す。データ欠損が生じている箇所はあるが、大きな季節トレンドを捉えている。また拡大すると、24 時間の日周期トレンドも確認された。これに合わせて、新潟県妙高市関山の気象庁観測気温データ<sup>2)</sup>を図 2(b) に示す。ひずみデータと同様のトレンドが認められ、相関係数 0.86 と高い値を確認した。これは、構造物の挙動が環境要因、特に温度に大きく影響を

うけることを示している。実構造物では、このように環境要因によるトレンドを含むデータから、構造状態に関する特徴量の抽出と評価を行わなくてはならない。

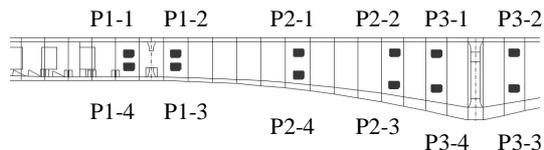


図 1 妙高大橋光ファイバ FBG センサの設置箇所

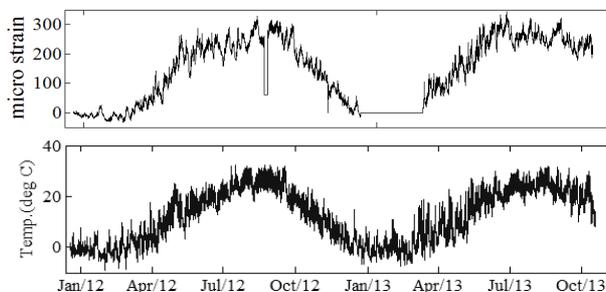


図 2 P1-3 における時系列ひずみ(上)・気温データ(下)

### 3. 季節 ARIMA モデルを用いた構造状態評価法

本研究では、時系列解析に用いる確率モデルの 1 つである季節 ARIMA (seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) モデルを、長期データからの構造状態評価に用いることとした。ARIMA( $p, d, q$ )( $P, D, Q$ )<sub>S</sub> は、次式のように定義される。

$$(1 - \dots - \phi_p B^p)(1 - \dots - \beta_p B^{pS})(1 - B)^d(1 - B^S)^D y_t = (1 - \dots - \psi_q B^q)(1 - \dots - \theta_q B^{qS}) \varepsilon_t \quad (1)$$

ここで、 $y_t$  は時間  $t$  でのデータ値、 $\varepsilon_t$  はホワイトノイズで定義される誤差項、 $B$  は時間遅れ演算子、 $d$  は階差、 $S$  は季節階差、 $\phi_p, \psi_q, \beta_p, \theta_q$  は AR 係数, MA 係数, 季節 AR 係数, 季節 MA 係数であり、 $p, q, P, Q$  はそれぞれの次数である。モデルの係数は、データを出力するシステムの特徴を表しており、本研究では、これらを構造状態評価に用いる特徴量とした。

### 4. 数値解析による基礎検証

提案した手法によって構造状態評価が可能であるか、

キーワード 構造ヘルスマニタリング, 長期モニタリングデータ, 時系列解析, 季節 ARIMA モデル  
連絡先 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 TEL 045-339-4255

数値解析による基礎的な検証を行った。図3に示す単純な形状の箱桁モデルを、有限要素法8節点6面体ソリッド要素で作成し、材料定数と熱特性値に鉄筋コンクリートの一般的な値を与えた。境界条件は両桁端部で単純支持とした。損傷時の解析では、図3中に示す損傷箇所を断面下半分のヤング率を1/10とすることで、局所的な有効断面の欠損を再現した。この箱桁の外側表面に図4に示す温度履歴を与え、得られたA-F点でのひずみ履歴から、季節ARIMAモデルを推定した。各係数の次数は、自己相関関数と偏自己相関関数よりARIMA(0, 1, 0)(1, 0, 1)<sub>24</sub>とした。表1に、C点とD点において推定された季節AR係数および季節MA係数の、損傷有無時の比較を示す。すると特に、損傷部に近いD点において、2つの係数がともに変化した。提案手法によって、時系列データから構造状態の違いを捉えることが可能であることを示した。

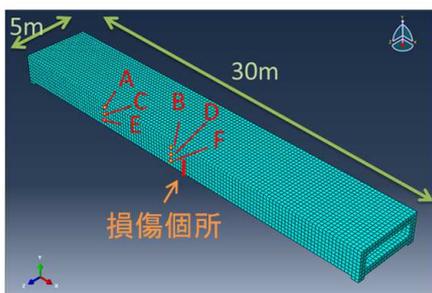


図3 数値解析モデル

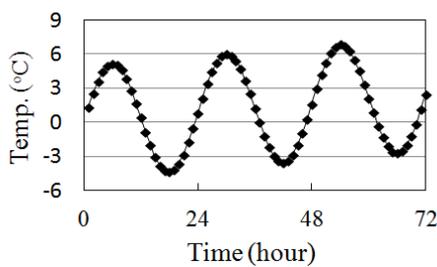


図4 箱桁モデル外側表面への入力温度履歴

表1 損傷の有無による季節AR/MA係数の比較

	損傷なし		損傷あり	
	季節AR	季節MA	季節AR	季節MA
C	-0.167	-0.878	-0.146	-0.816
D	-0.121	-0.858	-0.413	-0.371

### 5. 長期モニタリングデータへの適用

2011年12月から2013年11月までの約690日分の長期データからデータ欠損部を除き、連続する3日間を1時系列として全189時系列に対して、季節ARIMAモデルを推定し、その係数の挙動を調べた。次数は前項と

同様に決定し、ここでもARIMA(0, 1, 0)(1, 0, 1)<sub>24</sub>とした。推定された季節AR係数と季節MA係数の2年間分のプロットが図5である。全プロット数189点であるが、この中で季節ごとにマーカーを変えて示している。全体でも、各季節においても、明らかな負の相関が認められる。計測条件や構造状態のばらつき、計測誤差を含む実データの中で、負の相関関係に回帰する挙動が認められ、この関係が構造状態を表していると考えられる。特に、冬期で現地では積雪がある12-2月のプロットが、全体的に負方向にシフトする挙動が認められた。これは冬期において、積雪による積載重量の増加、境界条件の変化等が捉えられたものと考察される。

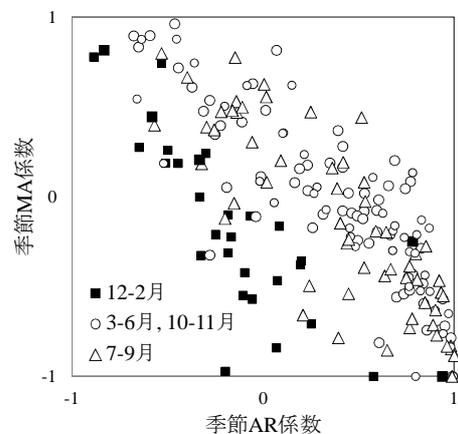


図5 長期ひずみデータからの季節AR/MA係数

### 6. おわりに

本研究では、長期モニタリングデータから構造状態を捉える特徴量として、季節ARIMAモデル係数を用いることを提案し、解析による基礎検証と実データへの適用でその有効性を示した。今後は、実データへの適用結果と具体的な構造状態との関係を明らかにし、確率論的パターン認識を用いた構造状態診断につなげる。

### 謝辞

本研究で用いた長期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、および特定非営利活動法人・光ファイバセンシング振興協会のご協力をいただきました。また実際のデータ取得作業は、東京大学村山研究室(村山英晶准教授)との共同で行いました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 宮下孝ら, 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, 平成24年度北陸地方整備局事業研究発表会, 2012年7月.
- 2) 気象庁 HP: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>