

応答曲面法を用いた統計的異常検知手法の橋梁構造物ヘルスマニタリングへの適用

東京大学 正会員 村山英晶
 東京大学 ○布 一馬
 東京大学 正会員 影山和郎

1. 緒言

近年日本では建造物の老朽化が社会問題化している。大量のインフラの建て替えには膨大な時間と費用がかかるため、既存の建造物をより長く使えるよう状態を自動で診断する、構造ヘルスマニタリング(SHM)に期待が寄せられている。

SHMの診断手法の一つとして、応答曲面法を用いた統計的異常検知手法¹が提案されている。本手法は構造の数値モデル化や損傷の物理的解釈、破壊実験による損傷データの取得が必要ないため、既存の橋梁構造物に適用すればメリットが大きいと思われるが、これまでに適用例はない。本研究では本手法を橋梁構造物へ適用するアルゴリズムを提案する。

2. 応答曲面法を用いた統計的異常検知手法

応答曲面法は、関係が未知である被説明変数 y と説明変数 x_i の関係式を実験的に近似する手法である。応答曲面式は一般に次式で表される。

$$y = f(x_1, L, x_k) + \varepsilon \quad (1)$$

ε は誤差を表す。関数形は任意のものが利用できるが、実用的には取り扱いの容易な1次や2次の多項式が用いられることが多い。高次関数を用いる場合でも、高次項を変数変換することで次式のように線形回帰モデルへの変換が可能である。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{p-1} \beta_i x_i \quad (2)$$

ここで $p-1$ は線形化された変数の数であり、 p は応答曲面の自由度と呼ばれる。 $m(>p)$ 個の標本データを用いて式(2)を行列表示すると次のようになる。

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

式(3)の誤差項 ε の二乗和 $\varepsilon^T \varepsilon$ を最小化する回帰係数 β の推定値 b は、最小二乗法により次式のように得られる。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (4)$$

得られた応答曲面と標本データの残差平方和(SSE)は次式で計算される。

$$SSE = y^T y - b^T X^T y \quad (5)$$

2つの標本群から2つの応答曲面が得られた場合、それらの間に差異があるのか、F検定を用いて統計的に検定することができる。2つの応答曲面を

$$\begin{aligned} y_1 &= X_1 \beta_1 + \varepsilon_1 \\ y_2 &= X_2 \beta_2 + \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (6)$$

とすると、応答曲面の同等性の仮説は $H_0: \beta_1 = \beta_2$ で表される。 H_0 は次式に表される統計量 F_0 によって検定される。

$$F_0 = \frac{SSE_0 - (SSE_1 + SSE_2) \cdot \frac{n-2p}{p}}{(SSE_1 + SSE_2)} \quad (7)$$

SSE_1, SSE_2 は各標本群から作成された応答曲面の残差平方和、 SSE_0 は両群を合わせた標本群から作成された応答曲面の残差平方和、 n は全標本数を表す。 F_0 の確率分布は帰無仮説 H_0 のもとでF分布 $F(p, n-2p)$ に従うことが知られ

ている。仮説棄却領域は次式のようになり、有意水準 α によって統計的検定が可能である。

$$F_0 > F_\alpha(p, n-2p) \quad (8)$$

3. 橋梁モニタリングのデータ

3.1. モニタリング概要

妙高大橋は新潟県と関東とを結ぶ国道18号を形成する長さ300m、幅9mのPC4径間連続箱桁橋であり、2011年12月19日よりセンサによるモニタリングが行われている²。

本研究で着目したのはFiber Bragg Grating (FBG) ポイントひずみセンサ³(以下センサ)である。Fig.1に示すように、センサは長野側の第一径間部を中心に計12個設置されている。3本の光ファイバによって配線されており、1本のラインあたり桁の上下2個ずつ、4個のセンサが割り当てられている。本論文ではFig.1のようにライン番号とセンサ番号を振る。計測はアンリツデバイス社製SF3041Aによって、毎時2分間、サンプリング周波数約700Hzで連続的に行われている。

3.2. 応答曲面法の適用可能性

ライン3で取得された2011年12月19日0時の2分間のひずみデータを時刻歴でプロットしたグラフをFig.2に示す。桁上部のセンサ3-1と3-2、および下部のセンサ3-3と3-4はグラフの形状がほぼ相似形であること、また上下のセンサで正負が反転していることがわかる。この4つのセンサ出力間の強い関係性は、車両通行による桁の変形を表していると考えられる。例えば車両が第一径間の中央部を通過するとき、ライン3の位置する橋脚部では桁の上部が引っ張られ、下部が圧縮される。上下で正負反対の出力が得られるのはこのためである。このような強い関係性は他のラインにも見られる。

桁部に損傷が生じた場合、構造に非線形性が生じ、この関係性が変化すると思われる。よって各センサのひずみ値を変数として応答曲面法を適用すれば、統計的な異常検知が可能になると考えられる。

4. 応答曲面法の適用

4.1. 応答曲面の定式化

1本のラインごとに得られる、同時刻における4つのひずみデータの間を、次のように2次多項式で近似した。

$$x_s = \beta_0 + \sum_{i \neq s} \beta_i x_i + \sum_{i \neq s} \sum_{j \neq s} \beta_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

s は被説明変数に選ぶセンサの番号、 x_i はセンサ i のひずみデータを表す。

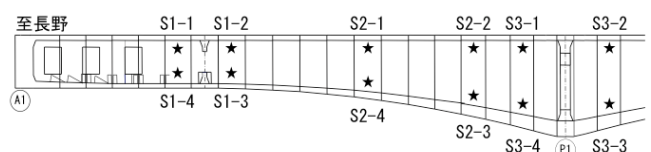


Fig.1 第一径間部・FBG ポイントひずみセンサ設置位置

キーワード 構造ヘルスマニタリング, 異常検知, 橋梁構造物, 応答曲面法, 光ファイバセンサ, FBG

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, Tel: 03-5841-6514

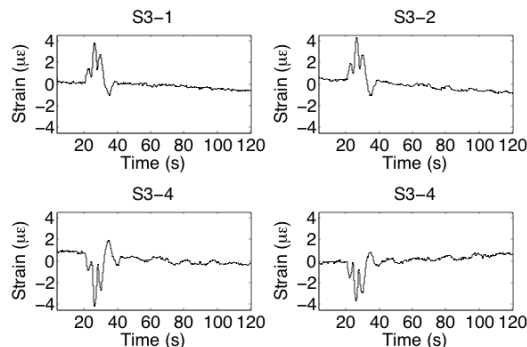


Fig.2 ライン3・各センサの時刻-ひずみの関係

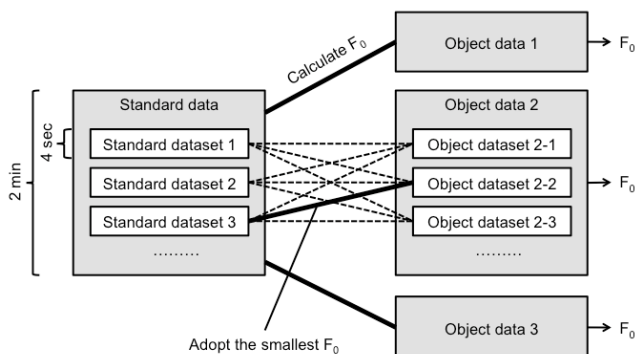


Fig.3 応答曲面法を用いた統計的異常検知手法の処理の流れ

4.2. 処理の流れ

応答曲面法を用いた統計的異常検知手法の処理の流れを Fig.3 に模式的に示した。以下に詳しい手順を示す。

4.2.1. データセットの標準化

2分間の連続計測データに、ローパスフィルタ処理を施し、平均値を除算することで正規化する。2分長のデータから、車両荷重に大きく応答している部分のデータのみを抽出し、さらにそのデータを4秒ごとに区切る。この4秒のまとまりをデータセットと呼ぶことにし、応答曲面計算の単位とする。

4.2.2. F_0 の計算

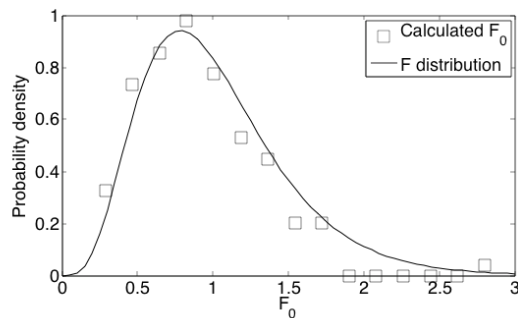
損傷がないということが予めわかっている健全状態のデータを基準データとする。基準データと診断対象のデータから得られた2つのデータセットを用いて式(7)の計算を行う。1つのデータからは複数のデータセットが得られるが、全ての組み合わせから計算された F_0 のうち、最小の値を採用する。これは応答の多岐性を考慮した処理である。基準データを固定し、診断対象データを入れ替えて F_0 を計算していく。

4.3. 利用データ

基準データとして2011年12月23日12時のデータを利用した。診断対象データ群として2011年12月31日から2012年1月31日までの1ヶ月間768個のデータを利用した。

4.4. 適用結果

結果はライン3で $s=2$ としたものを紹介する。計算された F_0 のうち、有意水準 $\alpha=0.99$ のもとで H_0 の棄却された割合は0.30となった。これは総データの3割が異常状態と診断されたことを表すため、高い確率で異常が疑われることになる。しかし実際に診断対象の1ヶ月間で構造に異常が生じたとは考えにくいいため、これは非整合的な結果であると言える。

Fig.4 提案手法による F_0 の計算結果

5. 提案手法

4.2.の処理で用いるパラメータに、ローパスフィルタのカットオフ周波数 f_l がある。当初の計算では $f_l=2.0$ Hzが用いられていたが、一般にカットオフ周波数はデータを損なわない範囲で恣意的に決められることが多いため、データ処理のために f_l を調整しても構わないと考えられる。そこで本論文では、最適な f_l の値を選ぶ下記のような処理を行った。

基準データは4.3.と同じものを用い、診断対象データ群として2011年12月24日から12月30日までの1週間168個のデータを利用し、 f_l を1.0, 2.0, ..., 10 Hzと10通りに変えて計算を行った。各 f_l の値で F_0 の頻度グラフを作成し、F分布に最もよく当てはまる f_l の値を採用した。当てはまりの指標には、適合度検定における χ^2 を用いた。

6. 結果

χ^2 の値が最小となった $f_l=7.0$ Hzを用い、4.3.のデータを用いて再度4.2.の処理を行った。その結果、 H_0 の棄却割合は0.0080となり、有意水準 $\alpha=0.99$ と照らし合わせてほぼ整合的な結果が得られた。Fig.4に示すように、 F_0 の頻度グラフはF分布によく適合していることがわかる。この結果から、提案手法によって短期間のデータを取得して f_l を調整することができれば、その後長期に亘って安定的に診断を行える可能性が示唆される。

6. 結言

応答曲面法を用いた統計的異常検知手法を橋梁構造物に適用した。健全状態のデータを利用してローパスフィルタのカットオフ周波数を調整する提案手法によって、長期間に亘って安定的に診断を行える可能性が示唆された。損傷状態のデータを入力したときの診断結果を得るために、今後はシミュレーションを利用した解析を行っていくことが必要である。

謝辞

本研究で利用した妙高大橋のデータは、国土交通省高田河川国道事務所ならびに光防災センシング振興協会のご協力のもと取得することができました。また本論文の執筆に当たっては、群馬大学の岩崎篤准教授にご助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩崎篤他, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, pp.289-290, 2008
- 2) 国交省高田河川国道事務所: 妙高大橋のPCケーブル損傷における調査結果と今後の対応について, 2011
- 3) Kersey et al, *J. of Lightwave Technol.*, 15, 8, pp.1442-1463, 1997