

ガスト応答からの非線形性抽出による長大橋の損傷モニタリング

横浜国立大学 学生会員 ○飯山 拓馬 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 フェロー会員 山田 均

1. はじめに概要

構造物の振動特性を用いる構造ヘルスマモニタリングの取り組みは数多く存在するが、特に長大橋のような大きな構造システムでは、局所的な損傷を検知することが、感度の点から困難となる。本研究では、損傷発生に伴う非線形性の発現に着目し、振動データの時系列モデル推定で得られる誤差項の評価から、部材レベルの損傷を検知・評価することを提案する。またこれに、長大橋の動態観測で得られている風応答データを用いることを考え、本研究では解析による基礎検証を行った。

2. 検証に用いた吊橋モデルとガスト応答データの作成

検証には、図-1 に示す明石海峡大橋を基に作成された吊橋の立体骨組みモデルを用いた。主径間は 1,991 m、主塔高さは 298.3 m であり、タワーリンクにより主塔と補剛桁が連結されている。吊橋モデルでは、両端に回転バネを持つ梁要素によって、このタワーリンクをモデル化した。本研究では、このタワーリンクでの損傷を対象とし、検証を行った。梁要素端部の回転バネ剛性にバイニア型の非線形性を与えることで損傷を表した。

損傷タイプは 2 つ設定し、可動部のガタつきである損傷Ⅰと、可動部の摩擦が大きくなるような錆びつき挙動を表す損傷Ⅱとした。それぞれの損傷の非線形特性を図-2 に示す。タワーリンクの動きを表す梁要素数を変えることで、損傷度合いの大小を表した。このモデルに対し、風速 40m/s、乱れ強度 1 の風を作用させ、非線形時刻歴応答解析を行い、加速度応答をデータとして用いた。データ取得位置は図-1 で示している 5 箇所とした。

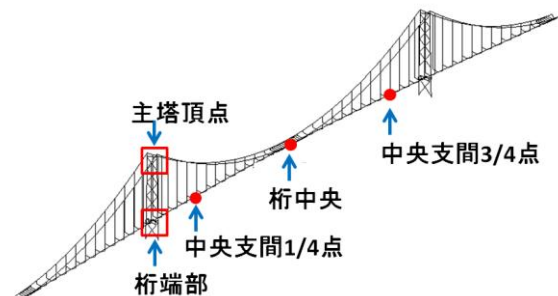


図-1 数値モデルとセンサ位置

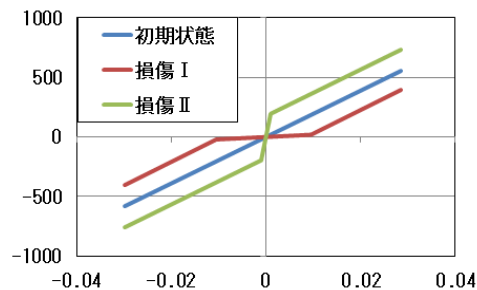


図-2 入力非線形特性

3. AR モデル誤差項による非線形性評価

本研究では非線形性の抽出に、自己回帰(Autoregressive: AR)モデルの推定で得られる誤差項を用いる。ARモデルは式(1)に示すように、ある時間での応答 X_t を過去の実現値 $x_{(t-1)} - x_{(t-k)}$ の線形和で表す確率モデルであり、線形システムの定常応答に対して推定される。

$$X_t = a_1 x_{(t-1)} + a_2 x_{(t-2)} + \cdots + a_M x_{(t-M)} + e_t = \sum_{k=1}^M a_k x_{(t-k)} + e_t \quad (1)$$

ここで、 a_{1-k} はモデルパラメータ、 k はモデル次数、 e_t は誤差項でありホワイトノイズである。しかし、システムが非線形となった場合、この誤差項はホワイトノイズを示さなくなる。このことを用いて構造物の損傷に起因する非線形性抽出を行う。

キーワード 構造ヘルスマモニタリング 非線形性 自己回帰モデル 長大橋 ガスト応答

連絡先 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 TEL 045-339-4243 FAX 045-348-4565

4. 検証結果と考察

損傷の無い線形システムと損傷を入力した非線形システムで各時刻歴応答解析により得られた加速度データに対してARモデルを推定し、誤差項を得た。図-3に誤差項の自己相関関数を示す。線形システムでは、ほぼ0の信頼区間付近の値を示すのに対し、非線形システムでは信頼区間から大きく外れている。この結果は、損傷Ⅰ、Ⅱいずれにおいても得られ、誤差項から非線形性の発現を検知できることを確認した。次に、ホワイトノイズが正規分布を示すことを用いて、誤差項の分布形状から損傷の種類や度合いを評価できるか、センサ位置の感度にも着目しながら検証を行った。図-4に誤差項のヒストグラム、図-5に正規分布では3を示す尖度を、センサ位置と損傷度ごとに示す。加速度データは橋軸方向、損傷Ⅰについてである。特に桁端では、非線形モデルにおいて、値が3より大きくなっていることが分かる。他のセンサ位置でも、損傷の有無の判別が可能であるセンサ位置があり、非線形性の発現が捉えられていることが確認できた。ただし、この尖度では損傷度合いとの相関は、明確に得られなかった。そこで次に、誤差項の標準偏差を示したグラフが図-6である。センサ方向は同じく橋軸方向、損傷Ⅰについてである。分布形状からの散らばりの程度を示す標準偏差は直接的に非線形性の発現を示すものではないが、損傷度が大きくなるにしたがって、値が大きくなることが確認できた。これは非線形性入力による正規分布からの外れ値によるものであり、損傷の度合いについても感度の良い指標であることが確認できた。センサ方向では橋軸方向での結果が最も有意なものとなり、損傷の種類では、損傷ⅠとⅡで誤差項の分布形状の特徴が異なり、ヘルスマonitoringでの損傷の種類の判別可能性も考えられる。

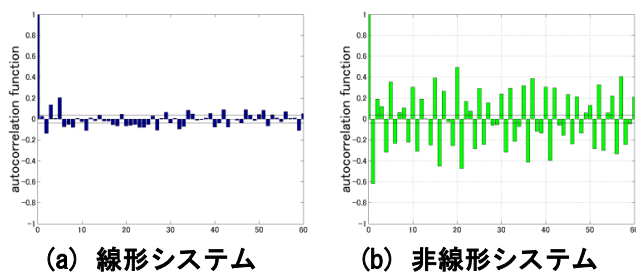


図-3 推定 AR モデル誤差項の自己相関関数

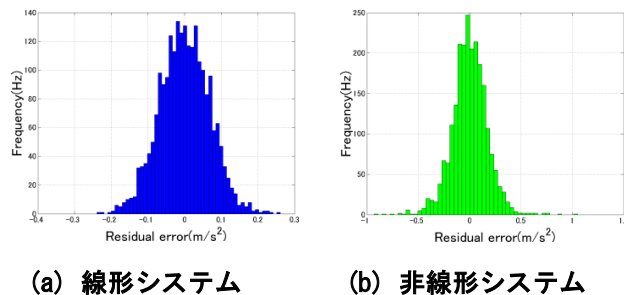


図-4 推定 AR モデル誤差項のヒストグラム

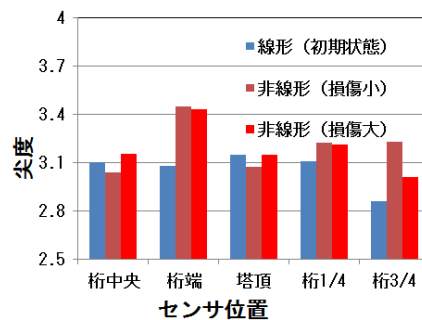


図-5 損傷度別尖度

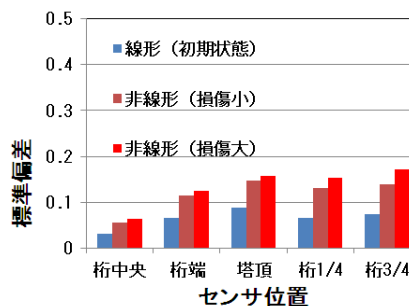


図-6 損傷度別標準偏差

5. まとめ

本研究では、長大橋の動態観測で得られる風応答データを構造ヘルスマonitoringに用いるにあたり、部材に派生する局所的な損傷による非線形性の発現を検知するためにARモデル推定の誤差項を用いることを提案し、その有効性を示すことができた。その中で、損傷の種類や度合いに感度の高い指標が、誤差項の標準偏差であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 藤野陽三, 楠原栄樹, 阿部雅人: 長大橋の対風動態観測記録のヘルスマonitoring研究への応用, 2009