

音響モニタリングデータを用いた鋼橋の損傷同定について

鹿 島 建 設 (株) 正 員 ○ 植田康平
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡卓司
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 佐藤浩一
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 宮森保紀

1. まえがき

我が国においては、高度成長期に社会資本整備の一環として橋梁構造物が数多く建設されてきた。現在では、年々増加する自動車保有台数や陸上交通輸送量、貨物輸送車の大型化による交通活荷重が設計時の予測をはるかに超過し、橋梁の老朽化が今後急激に進行することが指摘されている¹⁾。従来は、30年程度の供用で架け替えを行う場合も見受けられたが、最近の我が国における経済状況や環境問題等を考慮すれば、今後は維持管理を強化し、必要に応じて補修を行うことにより、既存橋梁の長寿命化を目指すことが非常に重要な課題になると考えられる。このような観点から、土木構造物においても各種の損傷同定手法が近年盛んに研究されている²⁾。

そこで本研究では、鋼橋の損傷同定・健全度診断に用いるための、音響モニタリングならびにデータ解析手法について検討を行い、これらの適用の可能性等に関して考察を加えることを目的とする^{3),4)}。具体的には、鋼橋の一部を模した実験供試体を製作し、仮想的な損傷・健全状態を設定して、打撃によって供試体の内部を伝わる音響データを収集した。次に、得られたデータのパワースペクトルから、 $1/f$ 特性に基づき対数関数近似を行い、周波数のべき乗値を計算した。また、音響波形のサウンドスペクトログラムを算出して、その結果を時系列の画像データとして記録を行い、この画像に対するフラクタル次元を求めた。これらの解析結果に対して、健全・損傷状態に関して比較検討を行い、鋼橋の損傷同定あるいは健全度診断における音響モニタリングデータおよびその解析手法の適用の可能性、有効性等について考察を試みるものである。

2. 実験供試体および実験手法

本研究で用いた実験供試体は、橋梁構造物の主桁と横桁および横構によって構成される部分を想定して製作されたモデルである。図-1(a),(b)に本研究で用いた供試体の概略図と各測点を示す。測定に際しては、供試体(1)に5点、供試体(2)に3点の測点に測定用マイクを設置して、に示された部分を硬質ゴムからなる球体により一定の力で打撃し、マイクに入力された計測データを直接パソコンにデジタル録音する。なお、サンプリング周波数は44.1kHzを適用した。仮想的な健全・損傷状態の設定に関しては、横構端部の接合部における所定の高力ボルトを弛緩することによって各種の損傷状態を表現する手法を用いて、損傷の程度により供試体(1)ではcase1(健全)～case7(損傷大)までの7ケース、供試体(2)ではcase1～case8までの8ケースにおいて測定を行った。

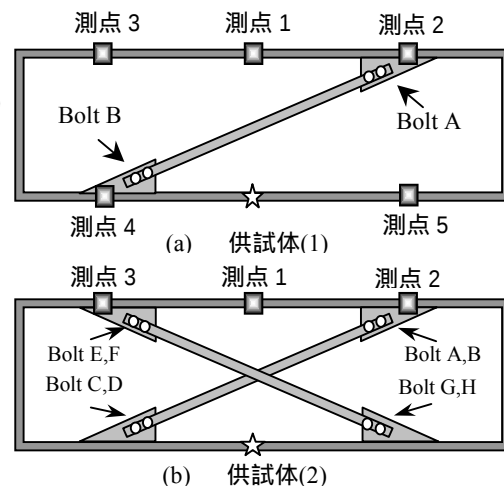


図-1 実験供試体概略図

3. 解析手法

一般に、予測が不可能な時間的・空間的なものの変化や、その不規則な変化の程度をゆらぎと称しており、人間の生体リズムや様々な自然界の現象等が時間的ゆらぎであることで知られている⁵⁾。 $1/f$ ノイズは、この時間的ゆらぎを周波数成分分析すると、パワースペクトルの包絡線の傾きは周波数のべき乗に反比例する式(1)のような関数の形で表される⁶⁾。

$$y = 1/f^n \dots \dots \dots (1)$$

ここで、式(1)における y はパワースペクトル密度であり、 f は時間的变化を分析した結果得られる周波数、 n はそのべき乗値である。健全時および損傷時の測定データについて $1/f$ ノイズのべき乗値を計算することにより、測定された音響データの周波数特性の情報を個々のスカラー量で得ることができるため、これらの比較検討を通じてある程度の定量的評価を行える可能性を有すると推定される。なお、本研究では式(1)の $1/f$ ノイズのべき乗値を、 n 値と称することとする。

また、本研究ではサウンドスペクトログラム⁷⁾から、時間、振動数およびスペクトルの情報を持つ3次元的なデータに対して直接フラクタル次元を求めることにより、その変化を捉えて損傷による影響の評価を試みるものである。フラクタル次元の算出に際しては、写真等の画像データに高い適用性を有するボックスカウンティング法(box-counting法)を採用して解析を行う。この方法は、図形 X が1辺 d の正方形 $N(d)$ 個で覆われているとし、ある定数 k_0 および正の定数 μ において、任意の1辺に対し正方形の個数 $N(d)$ を測定すると、 $N(d)$ と d^{-k_0} の間に比例関係、

$$N(d) = \mu \cdot d^{-k_0} \dots \dots \dots (2)$$

があれば、 k_0 を図形 X の正方形の細分によるフラクタル次元と定義される⁸⁾。

4. 実験・解析およびその考察

以上のような手法を用いて、本研究では打撃実験から得られた測定データに対して、パワースペクトルから $1/f$

キーワード：損傷同定、音響モニタリングデータ、 $1/f$ ノイズ、フラクタル次元

連絡先（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 TEL, FAX:011-706-6172）

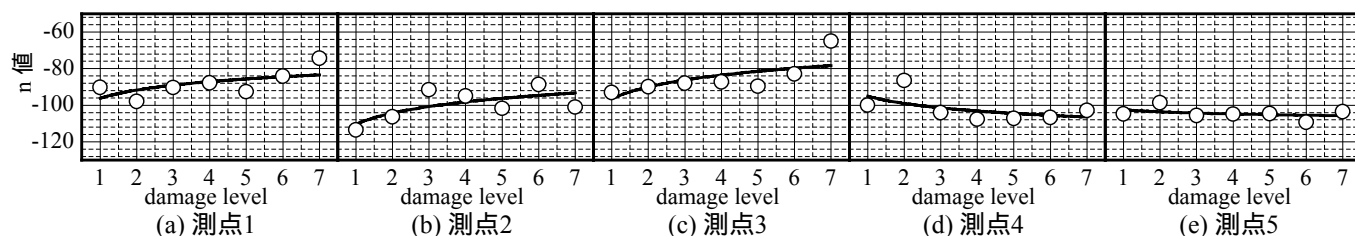
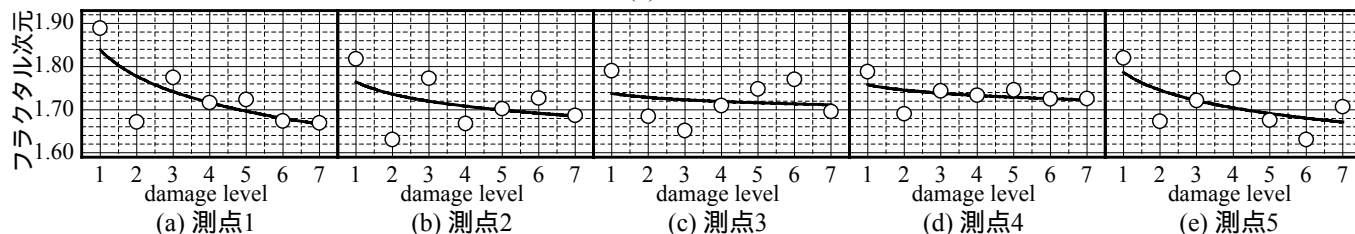
図-2 供試体(1)における損傷と n 値の関係

図-3 供試体(1)における損傷とフラクタル次元の関係

ノイズの n 値、あるいはサウンドスペクトログラムの画像データからフラクタル次元を計算し、本研究で使った供試体における仮想的な損傷との関係について比較検討を行った。図-2~5に供試体(1),(2)における損傷 level と n 値およびフラクタル次元の関係を示す。なお、図中の曲線は、解析結果に対して、最小二乗法によって対数関数近似を行って表示したものである。

図-2,4 から、損傷と n 値の関係は、損傷の増大に応じてべき乗値も増加しているものも多いが、全体的には大きくばらつき、各測点において共通の特徴を見出すことは比較的困難である。一方、図-3,5 のフラクタル次元と損傷との関係は、すべての測点においてフ

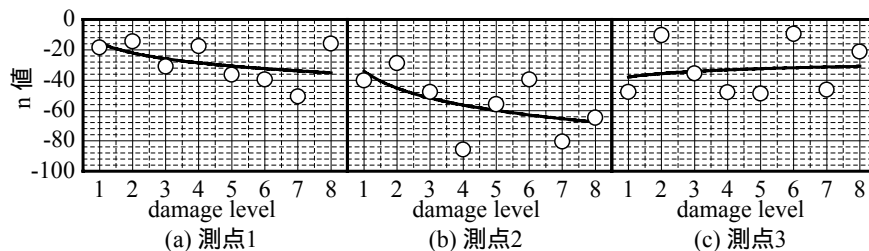
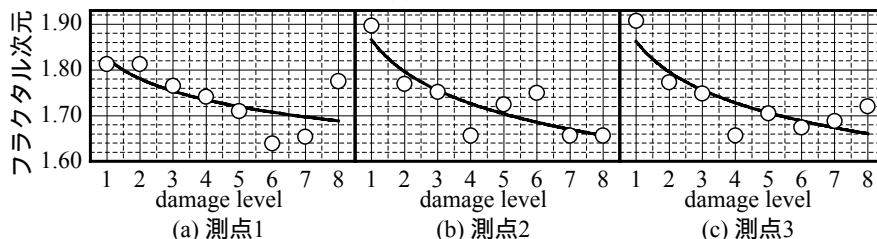
図-4 供試体(2)における損傷と n 値の関係

図-5 供試体(2)における損傷とフラクタル次元の関係

ラクタル次元は概ね減少傾向を示しており、損傷の程度によってばらつきは生じているものの、健全時と比較すればすべての場合でフラクタル次元は低下していることがわかる。以上の結果から、 $1/f$ ノイズは、データ全体における周波数毎の応答の最大値しか考慮されないのに対し、フラクタル次元は時系列を考慮するため、音響データの各卓越周波数の応答と減衰の変化を同時にスカラー量として具体的に表現しているものと考えられ、それぞれの損傷条件に対してある程度定量的な変化の傾向が把握できると思われる。したがって、本研究の解析手法は、対象となる構造物の損傷度あるいは健全度の評価・検討に用いる十分な可能性を有するものと推定される。

5. あとがき

本研究では、音響モニタリングデータを用いて、鋼橋の損傷同定あるいは健全度診断を行うためのデータ解析手法に検討を加えたものである。 $1/f$ ノイズは、2次元の周波数領域における音響特性に基づいて計算されるため、入力の変異や計算する周波数範囲によって、 n 値の傾向そのものが変化するとと思われるが、フラクタル次元は時系列を考慮することから、多少のばらつきはあるものの、ほぼすべての測点において各損傷 level に対する解析値は概ね減少傾向を有することが認められた。特に健全時に対しては、すべての損傷ケースでフラクタル次元が低下することが判明した。したがって、フラクタル次元解析を適用することにより、音響データに含まれる周波数応答の時間的な変化を、スカラー量として具体的に把握できるものと考えられ、橋梁構造物の損傷度・健全度の定量的な評価等に用いることは可能であると思われる。

【参考文献】

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1-10，1994.2) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，土木学会，pp.4-7，2000.3) 小幡卓司，植田康平，林川俊郎，佐藤浩一，宮森保紀： $1/f$ ノイズ特性に基づいた鋼橋の損傷同定に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第9巻，pp.569-574，2001.4) 植田康平，小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一，宮森保紀：鋼橋の損傷同定におけるフラクタル次元解析の適用性について，土木学会北海道支部論文報告集，第58号，pp.32-35，2002.5) 武者利光：ゆらぎの科学8，ゆらぎ現象研究会，森北出版，1998.6) 中村健太郎：音のしくみ，ナツメ社，1999.7) 吉井貞照：デジタル音声処理，東海大学出版会，1985.8) 石村貞夫，石村園子：フラクタル数学，東京図書株式会社，1992.