

1/f ノイズの分析に基づいた鋼橋の損傷同定に関する一考察

Consideration on Damage Identification of Steel Bridge Structures based on 1/f noise analyses

北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡卓司 (Takashi Obata)
 北海道大学大学院工学研究科〇学生員 植田康平 (Kouhei Ueda)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 佐藤浩一 (Koichi Sato)

1. まえがき

わが国は第二次世界大戦後の国土の復興とその後の高度経済成長において、新幹線、高速道路、港湾、空港を始めとする非常に多数の社会基盤施設が建設されてきた。中でも橋梁構造物は、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、橋梁構造物の老朽化が今後急激に進行することが知られており、近い将来これが社会問題となるであろうことが指摘されている¹⁾。従来は、25～35年程度の期間で新橋への架け替えを行う場合も見受けられたが、近年の我が国における経済状態、旧橋取り壊しによる産業廃棄物の処理に関する環境への配慮、あるいは一般の経済活動に対する影響等を考慮すると、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ものと考えられる。このような観点から、土木構造物のみならず、建築工学あるいは機械工学の分野においても、振動等のモニタリングに基づいた損傷同定手法が近年盛んに研究されている²⁾。

一方、構造物や機械部品の健全度検査において、ハンマー等による打音を利用した方法は、古くは蒸気機関車の動輪や、近年ではトンネルのコンクリートの検査まで広く応用されていることが知られており、最近ではこれをパソコンに記録するシステムも開発されている。この手法は特別な装置等をほとんど必要とせず、簡便に検査が可能であること等優れた特性を有しているが、構造物の維持管理の調査・点検に基づく工学的評価・判定の現状は、専ら専門技術者の判断に委ねられる場合がほとんどであり、豊富な知識や経験、高度な熟練を要する。よって、今後の熟練技術者の不足、あるいは人件費の高騰等の問題等を考慮すると、対象となる橋梁の損傷度あるいは健全度診断に際して、何らかのシステムを構築し、測定から結果の診断まで一貫して行える手法を確立することが極めて重要であることは容易に推定できる。

以上を踏まえて、本研究では鋼橋の損傷同定あるいは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、まず鋼橋の横構を模した実験供試体を作成し、仮想的な損傷・健全状態を設定して、打撃による供試体の内部を伝わる音響データを収集した。次に、得られたデータのサウンドスペクトログラムを算出して周波数特性を把握し、さらにパワースペクトルの最大応答値を基準としてスペクト

ルの音響レベルに対して無次元化を行い、最小二乗法により $1/f^n$ 曲線に近似して周波数のべき乗値を計算した。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解析手法適用の可能性について考察を試みた。したがって、本研究はこれらの結果を報告するものである。

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写真-1に示すような、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模型を想定して制作されたものである。この実験供試体の両端は固定支持されており、地面から供試体に直接伝わる音を遮断するための緩衝材がそれぞれの支点部に配置されている。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、供試体の5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性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、収録の際の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

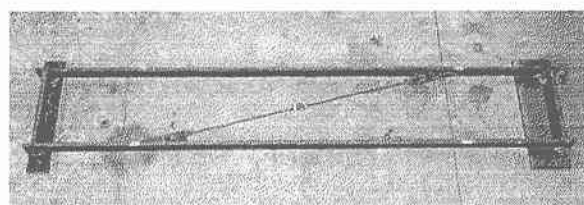
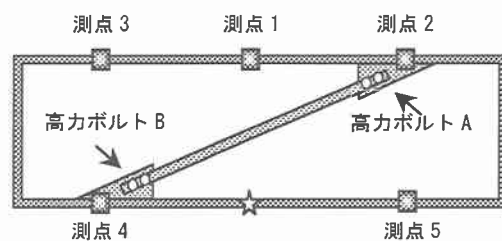
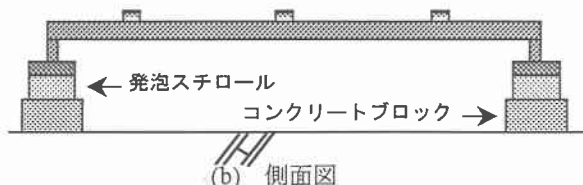


写真-1 実験供試体



(a) 平面図



(b) 側面図

図-1 実験供試体概略図

表-1 実験供試体の損傷設定

case.No	損傷 level	実験供試体の状態
case1	健全状態	全ての高力ボルト剛結
case2	損傷 小 ↑ ↓	ボルト A ヒンジ結合 B 剛結
case3		ボルト A 剛結 B ヒンジ結合
case4		ボルト A 完全解放 B 剛結
case5		ボルト A 剛結 B 完全解放
case6	損傷 大 ↓	全てのボルトをヒンジ結合
case7		すべての高力ボルト解放

接合部における高力ボルトの拘束力を変化させることにより、全てのボルトが締結されている場合を健全状態とし、所定のボルトを弛緩することによって各種の損傷状態を設定する手法を用いた。表-1 に、本研究で設定した損傷状態と弛緩させたボルトの位置関係を示す。なおここで、弛緩させたボルトについては、測定中にボルトの拘束状態が変化しない程度に若干のトルクを導入したものと完全に解放したものを採用している。

3. 解析理論

3. 1 サウンドスペクトログラム

一般に、サウンドスペクトログラム⁵⁾とは、音響スペクトルの時間的な変化を図形の濃淡によって視覚的に判断できるように表示したものであり、色の濃い部分がスペクトル成分の大きい部分を示している。すなわち、サウンドスペクトログラムは音響振動波形のランニングスペクトルを求めて、その強度を色の濃淡で表したものである。通常、これは声紋分析等に多く用いられているが、上述のようにスペクトルの時間的な変化を極めて容易に捉えることができるため、構造物の損傷によるスペクトルの変化の検討にも適用が可能と考えられる。計算方法は、デジタル音響信号に対して適当な長さで分割してウィンド関数を適用し、離散時間フーリエ変換を行ってこれを表示するものである。時間の分割は、任意に設定することが可能であるが、フーリエ変換を行うデータ長の半分程度に設定するのが一般的である。本研究では、フーリエ変換を行うデータ長を 2048 個（約 0.046 秒）、時間間隔をおよそ 0.023 秒に設定し、窓関数には Kaiser ウィンドを適用して計算を行った。

3. 2 1/f ノイズ

一般的に、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この時間的ゆらぎにあてはまると言われている。1/f ノイズ⁶⁾は、その時間的ゆらぎを周波数成分分析すると、スペクトルのピークを結んだ包括線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。

$$y = \frac{1}{f^n} \cdot \dots \cdot \dots \cdot (1)$$

ここで、式(1)における y はスペクトルの応答レベルであり、 f は時間的な変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。

本研究では、実験によって測定された音響データに対してパワースペクトルを算出して、その最大応答レベルを基準として無次元化を行った。さらに、スペクトルのピーク値を結ぶ曲線を式(1)で示される関数に近似するが、その関数の形状そのものによる定性的判断は困難になることが予想される。このため、周波数のべき乗値を計算し、個々の測定データ間の評価を行うこととした。これは、それぞれの測定データに対して、健全時および損傷時の 1/f ノイズのべき乗値を計算して、比較・検討することにより、測定された音響データの周波数の情報を個々のスカラー量で得ることができるため、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。したがって、打音実験によって、対象とする構造物から損傷に起因すると考えられる異常音が測定データに含まれた場合、1/f ノイズのべき乗値に健全時と比較して有意な数値的差違が与えられる、あるいは損傷の程度に応じた何らかの傾向を有する可能性が高いものと考えられる。

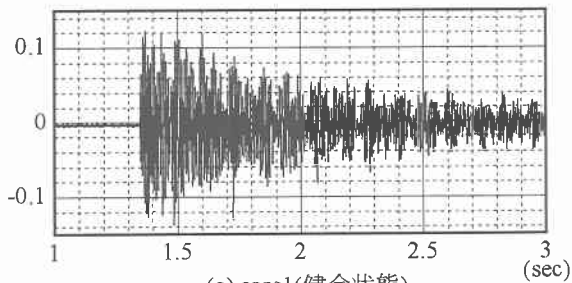
なお、実際の解析に際しては、データ解析・制御系設計グラフィカル言語 MATLAB⁷⁾を用いてプログラムを作成し、サウンドスペクトログラムあるいは 1/f ノイズのべき乗値の計算まで一貫して行えるシステムを構築して解析を実施した。

4. 解析結果とその考察

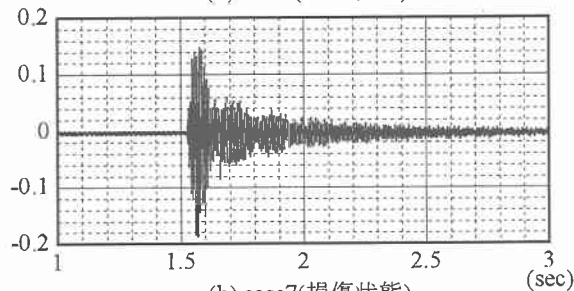
以上のような手法を用いて、本研究では打音実験を行い、測定データに対して波形・フーリエスペクトルならびにサウンドスペクトログラムによって周波数特性等を把握し、測定システムおよび得られたデータの妥当性を検討した。さらにパワースペクトルの最大応答レベルに対して各周波数成分を無次元化して、1/fⁿ 曲線に近似し周波数のべき乗値を算出した。打音実験に際しては、表-1 の横構を拘束した健全状態(case1)から横構のボルト全てを解放した損傷状態(case7)までを想定した場合について測定を実施した。実験結果の一例として、case1 および case7 の測点 1 における音響波形ならびにフーリエスペクトルを、図-2(a),(b)ならびに図-3(a),(b)に示す。

まず、波形に関して、打音後の減衰に着目すると、case1 に比べて case7 の減衰が明らかに大きくなることが確認できる。また、フーリエスペクトルの比較から、500Hz 以下の周波数領域において、損傷時の主な応答成分が健全時よりも小さくなる特性を有することが判明した。これらの結果から、損傷の有無による打音後の音響特性の相違が明確に現れていることが容易に判断でき、本研究で用いた測定システムを用いることによって、ある程度有意な結果が得られたものと考えられる。

次に、上述した音響波形データのサウンドスペクトログラムを算出した結果を図-4(a),(b)に示す。これらの色の濃淡を比較すると、case1 では音響波形データの 0~2000Hz 付近における応答周波数成分が比較的長時間継続していることが確認できるが、損傷の程度が大きい case7 に関しては、打音後速やかに減衰し、供試体内部を伝わる音響特性に極端な相違が生じていることがわかる。著者らの従来の研究においても、サウンドスペクトログラムを用いるこ

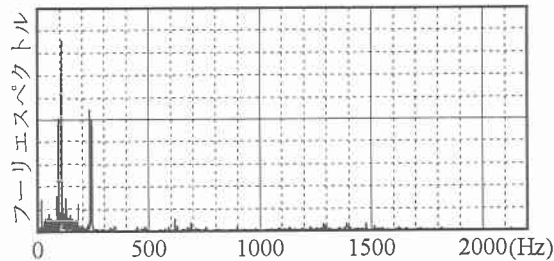


(a) case1(健全状態)

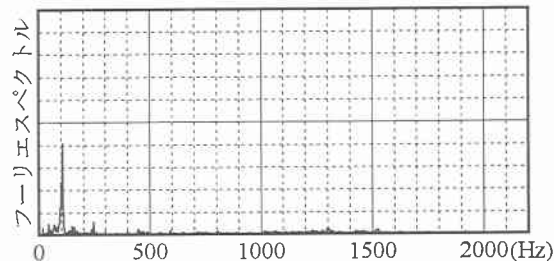


(b) case7(損傷状態)

図-2 音響波形

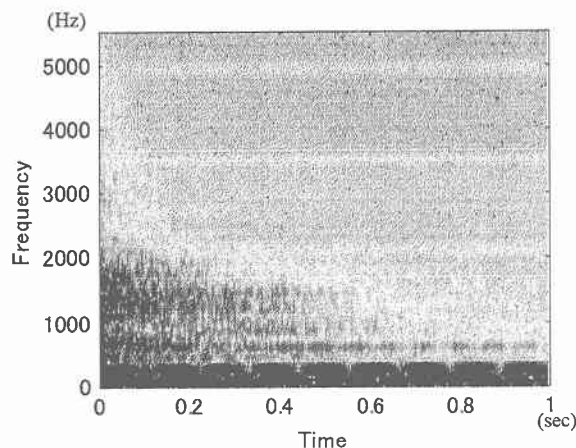


(a) case1(健全状態)

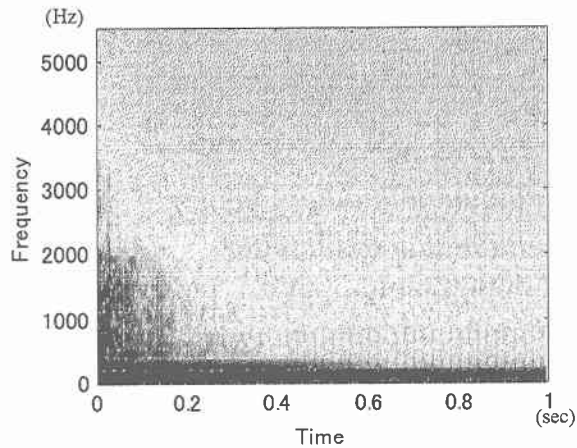


(b) case7(損傷状態)

図-3 フーリエスペクトル



(a) case1(健全状態)



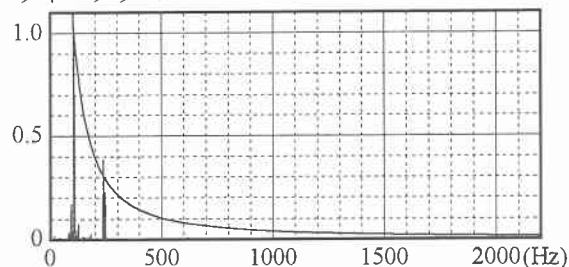
(b) case7(損傷状態)

図-4 サウンドスペクトログラム

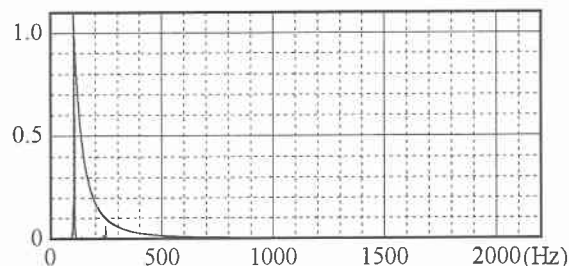
とにより、その図形の濃淡から損傷時における定性的な応答の変化は、ある程度把握出来る結果が得られており、本研究においても同様な傾向が確認された^{3),4)}。よって、このような音響解析手法を応用することにより、鋼橋の損傷同定等を行える十分な可能性を有するものと推定される。

また、パワースペクトルを算出し、その最大のピーク値で無次元化を行った結果が図-5(a),(b)である。これらと比較すると、損傷状態の 250Hz 付近の応答が、健全状態のそれに比べて小さくなっていることがわかる。図中の太線で示された曲線は、音響データの周波数と無次元化したスペクトルのピーク値の $1/f^n$ ノイズを最小二乗法により曲線近似したものであるが、その曲線の形状は、2つの状態において明らかな相違が確認できる。

さらに、本研究において実施した case1~7 の打音による音響モニタリング実験で得られたデータに対して、 $1/f^n$ 近似曲線を求めて n 値を算出した結果が図-6 である。なお図中に示された曲線は、損傷条件と周波数のべき乗値に対して最小二乗法によって対数関数近似を行ったものである。これらに着目すると、各測点毎の傾向は見受けられないが、全体的にはべき乗値そのものにある程度のばらつきはあるものの、損傷レベルが大きくなるにつれて n 値は概



(a) case1 (健全状態)



(b) case7 (損傷状態)

図-5 無次元化されたスペクトルと $1/f^n$ 曲線

ね増大する傾向を有していると考えられる。したがって、これらの結果から、 $1/f^n$ 曲線の n 値はサウンドスペクトログラム等で見られた健全・損傷時における周波数特性の定

性的変化を、より具体的かつ増幅した形で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数値的に有意な差を与えられることから、対象となる構造物の損傷度あるいは健全度を、ある程度定量的に評価・検討する十分な可能性を有すると考えられる。

5. あとがき

以上のように、本研究は鋼橋の損傷同定あるいは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関して検討を加えるために、本研究で用いた実験供試体に対して打音による音響データの収集を行い、サウンドスペクトログラムを算出して周波数特性を把握し、さらにパワースペクトルを無次元化して $1/f^n$ 近似曲線の n 値を求めることにより、損傷同定におけるこれらの適用の可能性について考察を試みたものである。

解析結果からは、従来から指摘されているとおり、サウンドスペクトログラムを用いることによって、比較的容易に周波数特性を把握することが可能であり、周波数の時間的変化を3次元で把握できることから、従来より明確な周波数分析が行えると考えられる。よって、このような音響解析手法を応用することにより、鋼橋の損傷に対して精度よく定性的な検討を行える可能性を有するものと考えられる。

また、損傷と $1/f^n$ 近似曲線の n 値の関係は、損傷の程度が増大するにつれて n 値は増加する傾向を有することから、その結果に基づいた健全時および損傷時の比較・検討を試みることによって、ある程度の定量的評価が十分に行えるであろうことが認められる。

したがって、以上のような音響解析手法を適用して、打音によってその各種特性値等を把握し、健全状態と損傷状態において比較・検討を行うことにより、鋼構造物の損傷同定等に適用することが可能であると推定される。

加えて、問題点としては、 $1/f^n$ 曲線を最小二乗法によって近似する際、スペクトルのピーク値の抽出に何らかの統一基準を適用する必要があるものと思われる。

【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) 近藤一平，濱本卓司：振動台実験のランダム応答データを用いた多層建築物の損傷検出，日本建築学会構造系論文集，第473号，pp.67-74，1995.
- 3) 小幡卓司，植田康平，林川俊郎，佐藤浩一：鋼橋の損傷同定における音響モニタリングの可能性に関する一考察，土木学会北海道支部論文報告集，第56号(A)，pp.196-199，2000.
- 4) 小幡卓司，植田康平，林川俊郎，佐藤浩一：鋼橋の損傷同定に関する音響データの適用性に関する一考察，鋼構造年次論文報告集，第8巻，pp.611-616，2000.
- 5) 古井貞熙：デジタル音声処理，東海大学出版会，1985.
- 6) 中村健太郎：音のしくみ，ナツメ社，1999.
- 7) The Math Works Inc.: MATLAB Signal Processing Toolbox User's Guide, サイバネットシステム株式会社，1999.

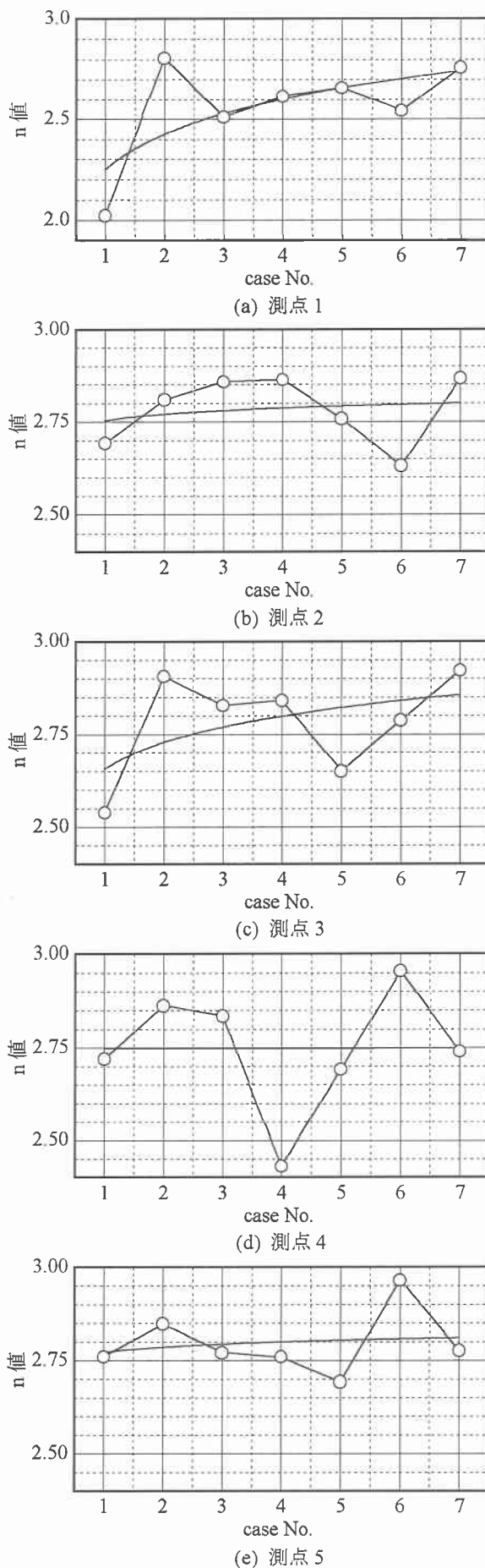


図-6 $1/f^n$ 曲線の n 値