Ⅰ－40

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

北海道大学大学院工学研究科　正　員　小幡卓司
北　海　道　大　学　工　学　部　学生員　植田康平
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

１．まえがき

近年の社会資本の充実に伴う構造物の老朽化は、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]。橋梁構造物においては、昭和 40 年～50 年に非常に多数が建設され、供用後 20～30 年以上が経過して何らかの損傷が生じているものも数多く見受けられるようになってきた。従来はこのような橋梁もそれほど多くなく、架け替えを行うことにより対処することも可能であったと思われる。しかしながら、老朽化した橋梁の急激な増大により、その建設コスト、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、その診断は専ら人間の経験的な知識に基づくため、高度な熟練を要求される。よって、熟練技術者の不足、あるいは人件費の高騰等の問題を考慮すると、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。具体的には、まず鋼橋の格点部を想定した実験供試体を作成し、これに入力用マイクと出力用スピーカを設置し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、さらに音響波形の自己相関関数を計算してその分散値を求めた。これらの解析結果に対して、仮想的な健全・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 に示すような鋼橋の格点部を想定したボルト接合を有するＴ字型の供試体である。健全・損傷状態の設定は、接合部のボルトを締結する、あるいは開放することにより行うこととした。データ収録システムは、２台のパソコンを用いて、一方でスピーカを駆動して供試体を加振し、他方でマイクより入力したデータを、直接 wave ファイルとしてデジタル録音を行なった。なお、サンプリング周波数は、44.1kHz を用いている。図-1 に本研究で用いた収録システムを示す。

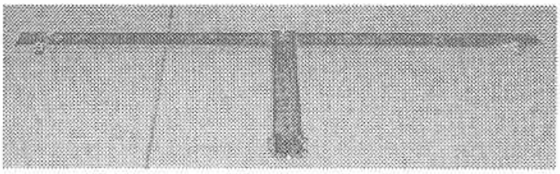


写真-1　実験供試体

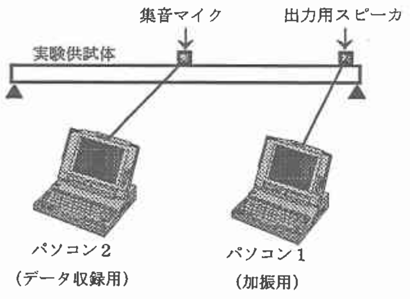


図-1　データ収録システム

実験方法は、まず単一の周波数を有する振動波形を作成し、これを音響データに変換してスピーカより出力して構造物に振動を発生させる。加振により構造物の振動が定常状態になったことを確認した後に、構造物内を伝搬する音をマイクにより直接パソコンに記録する。加振周波数に関しては、まず予備実験としてハンマーによる打撃によってデータ収集を行い、そのフーリエスペクトルを算出して健全時および損傷時の音響特性を把握して決定することとした。具体的には、スペクトルのピークに相違が見られた 787Hz,788Hz の２周波数

Study on Applicability of Sound monitoring data for Damage Identification of Steel Bridge Structures
by Takashi Obata, Kouhei Ueda, Toshiro Hayashikawa and Koichi Sato

に着目し、加振周波数はこのピークそのものである 787Hz,788Hz および 560Hz から 750Hz の 10Hz 刻みの 20 通りとして実験を実施することとした。

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[3]とは、音響スペクトルの時間的な変化を図形の濃淡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ところを示している。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変化を極めて容易に捉えることが出来るため、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インド関数を適用し、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、計算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 1024 個（約 0.23 秒）、時間間隔をおよそ 0.11 秒に設定し、窓関数には Kaiser ウィンドウを適用して計算を行った。

３．２　自己相関関数と分散値

自己相関関数は、１つの系列におけるデータ自体の中で、相隔たったデータ間の相関を算出するものである[4]。通常、振動あるいは音響等の時系列データに対しては、t=0sec の際のデータと、それに対して時間遅れが生じた個々のデータにおける相関性を求める。自己相関関数は、パワースペクトルの逆変換として知られており、元の信号に含まれる卓越する周波数の情報をより増幅する形で得ることができ、その結果は無次元量となるため、異なる測点間の時系列データを比較することも、ある程度容易になると考えられる。

一般に、$x_m(m=0,1,2,\cdots,N-1)$で表される信号データにおいて、

$$R_j=\frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1}x_m x_{m+j} \quad\cdots\cdots(1)$$

によって計算される自己共分散係数 $R_m(m=0,1,2,\cdots,N-1)$が得られる。ここで、２つの標本点 m と $m+j$ 間の時間間隔を時間遅れと表現する。今、$j=0$ の場合、すなわち x_m と x_m の相関を考えると、以下の式が得られる。

$$R_0=\frac{1}{N}\sum_{m=0}^{N-1}x_m^2 \quad\cdots\cdots(2)$$

この式(2)は、標本値の２乗平均であり、一般的には平均パワーを表している。ここで、式(1)と式(2)の比を取ることによって自己共分散係数を無次元化すると、

$$\rho_j=\sum_{m=0}^{N-1}x_m x_{m+j}\Big/\sum_{m=0}^{N-1}x_m^2 \quad\cdots\cdots(3)$$

となり、これを自己相関係数あるいは自己相関関数と称している。

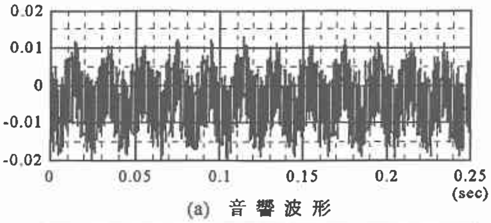
次に、本研究では実験によって得られた音響測定データに対して、上記のように自己相関関数を用いて無次元化を行ない、その分散値を求めることにより振動あるいは音響性状の変化を捉えて損傷の同定を試みた。ここで、振動性状の相違による分散値の変化に関して考察を加えれば、任意の入力信号に対して、損傷に起因する入力信号とは異なる周波数を有する応答が測定データに含まれた場合、自己相関性は健全時に比較して低下するであろうことは自明である。よって、自己相関関数に対してその分散値の計算を行えば、自己相関性が低い場合には分散値は小さくなるものと考えられ、また、それぞれの測定データに対してスカラー量で得ることが出来るため、健全時および損傷時の分散値を比較することにより、ある程度の定量的評価を行える可能性も有するものと推定できる。

一般に、振動波形に対する分散値は、以下の式で与えられる[5),6)]。

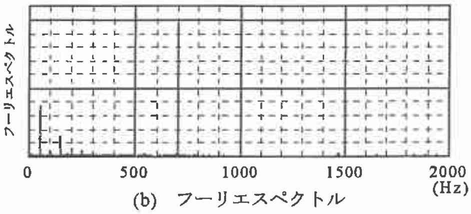
$$\sigma_{Var}^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x(i)-\bar{x})^2 \quad\cdots\cdots(4)$$

ここで、式(4)における $x(i)$ は自己相関関数の各時間遅れにおけるデータであり、$\bar{x}$ は自己相関関数の平均値、i は時間遅れの離散ステップ数である。

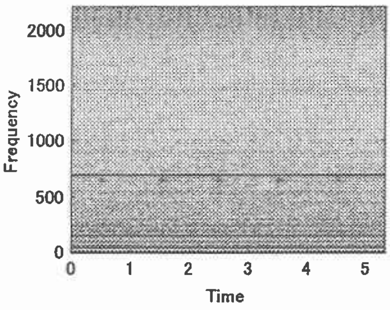
また、本研究で測定された音響データにおいては、その入力レベルが比較的小さいことから交流電流によるノイズが無視できないことが判明した。一般に、ノイズ等を含んだ信号を処理し必要な情報を取り出す手法の一つとして、フィルタリングが有効であることが知られている。そこで本研究では、比較的低い次数で良好な周波数特性を得ることができる IIR 型楕円ハイパスフィルタを採用して電気的なノイズの除去を行う



(a) 音 響 波 形

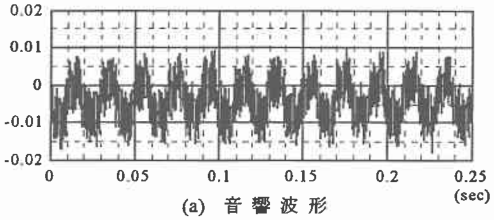


(b) フーリエスペクトル

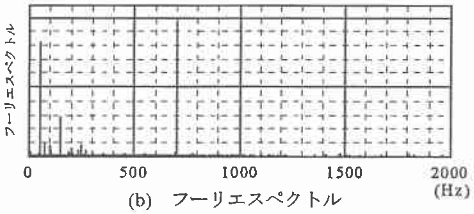


(c) サウンドスペクトログラム

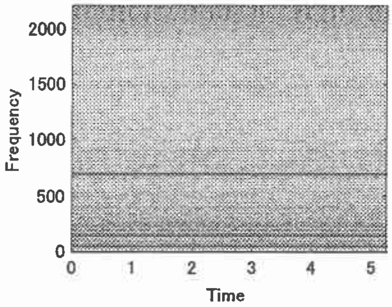
図-2 健 全 状 態



(a) 音 響 波 形



(b) フーリエスペクトル

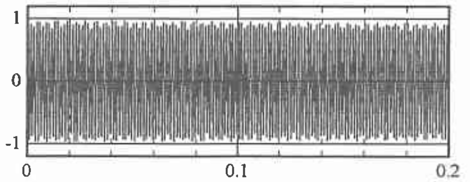


(c) サウンドスペクトログラム

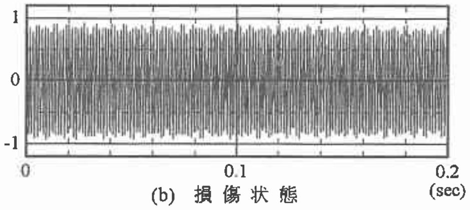
図-3 損 傷 状 態

こととした。

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 MATLAB[7]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、フィルタリングから分散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。



(a) 健 全 状 態



(b) 損 傷 状 態

図-4 自己相関関数

4．解析結果ならびにその考察

以上のような手法を用いて、本研究では音響モニタリングデータに対して自己相関関数とその分散値の計算を行った。まず、実験結果の一例として、図-2(a),(b),(c)および図-3(a),(b),(c)に 700Hz 加振時の際の健全時・損傷時における振動波形と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を示す。これらに着目すると、まず波形に関しては、健全時および損傷時において若干の変化は見受けられるものの、交流電源のノイズ成分の影響が大きく、実際に損傷によって差違が生じたのかは判然としない結果となっている。一方、フーリエスペクトルおよびサウンドスペクトログラムを比較すれば、スペクトルを見る限りにおいては、波形と同様に損傷の有無による明確な変化は現れていないが、サウンドスペクトログラムでは、健全時における 1500Hz 付近の応答が、損傷時にはやや不明瞭になり、さらに健全時には無い 1800Hz 付近の応答が新たに生じていることがわかる。その理由として、フーリエスペクトルはデータ全体における卓越周波数の比を表しているのに対し、サウンドスペクトログラムは時間を考慮することから面的に応答周波数の変化を捉えることが可能であることが挙げられることから、比較的容易に振動特性の変化が把握できるものと思われる。よって、サウンドスペクトログラムを用いることにより、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ものと思われる。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。

次に、測定データに対してカットオフ周波数 100Hz のハイパスフィルタを適用して交流電源のノイズを除去した後、自己相関関数を求めた結果が、図-4(a),(b)である。図-4 より、損傷時の場合が健全時に比して自己相関性が低下しているだろうことがある程度推定可能であり、サウンドスペクトログラムにおける両者の差違を裏付けるような結果となっているものと考えられる。これは、上述のように健全時には生じていなかった 1800Hz 付近の応答等によって周波数特性が変化することにより、波形データの自己相関性に少なからず影響を与えることから、このような結果となったものと思われる。

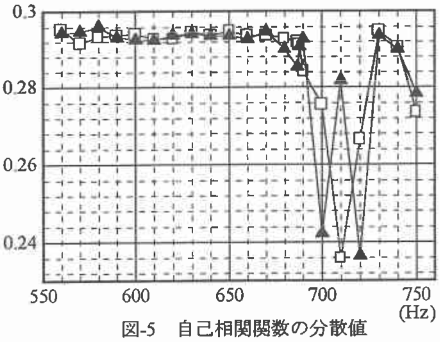


図-5 自己相関関数の分散値

さらに、上記の自己相関関数に対して分散値を算出した結果が図-5 である。なお図中の□は健全状態、▲は損傷状態を示している。これらの分散値の変化に着目すると、サウンドスペクトログラム等においても健全・損傷時の変化がほとんど確認されなかった 560Hz～670Hz および 730Hz 以上の分散値に関しては、両者ともほぼ一致しているが、ある程度の周波数特性の差違が生じていた 700Hz～720Hz の範囲においては、分散値は大きく変化することが判明した。同様に、打音実験を行った際にスペクトルの変化が見られた 787Hz、788Hz の周波数においても、分散値に少なからず変化が現れていることが認められた。これらの傾向は、筆者らの他の研究においても、ある程度一致することが確認されている。加えて、実験において加振周波数の間隔をさらに小さくすることにより、より詳細に分散値の傾向を把握することが容易になるであろうことが判断できる。これらの結果から、自己相関関数の分散値は、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、それぞれの加振周波数に対して数値的な差違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、ある程度定量的に検討する十分な可能性を有すると思われる。

したがって、橋梁構造物における、定性的、定量的な健全度診断あるいは損傷同定等に音響モニタリングデータを適用することは、その測定方法が比較的簡便であることから、非常に有効であると考えられる。

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、鋼橋の格点部を想定した実験供試体に対して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、音響波形の自己相関関数を計算してその分散値を求めることにより、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、波形・スペクトル図を見る限りにおいては、損傷状態を判断することは困難ではあるが、サウンドスペクトログラムによって容易に周波数特性を把握することが可能であることが判明した。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、フィルタリングによってノイズの除去を行なって自己相関関数を求め、その分散値を算出することにより、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。さらに、損傷と分散値の変化の関係は、筆者らの他の研究に、ある程度一致することが確認されているため、概ね可聴域程度の比較的高い周波数帯におけるデータに関しても、鋼構造物の損傷同定等に応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、データ収集の際の入力レベルが極めて大きな影響を及ぼすことが判明した。これは、データ記録時のマイクの状態により、入力レベルがある程度以下に低下した場合、交流電流等のノイズの影響がフィルタリング等を用いても無視できず、実験の再現性等に課題が残る結果となっている。したがって、音響モニタリングの実用化には入出力をはじめとするデータ収録システムの改良が今後必要であると思われる。

【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) 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) 古井貞熙：デジタル音声処理，東海大学出版会，1985. 4) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994. 5) 星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版会，1974. 6) 小幡卓司，深井隆史，水草浩一，林川俊郎，佐藤浩一：振動測定データに基づいた橋梁構造物の損傷同定に関する一考察，鋼構造年次論文報告集，第 6 巻，pp.457-462，1998. 7) The Math Works Inc.: MATLAB Signal Processing Toolbox User's Guide，ｻｲﾊﾞﾈｯﾄｼｽﾃﾑ株式会社,1999.