

I - 39

振動モニタリングデータを用いた鋼橋の損傷同定に関する一考察

北海道大学大学院工学研究科○学生員 水草浩一

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 正 員 及川昭夫

1. まえがき

我が国においては、昭和 40 年～50 年の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、既に供用後 20～30 年以上が経過していることから、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ており、また今後数十年にわたって損傷を生じたものや各種使用限界を迎える構造物が増加することが予想されている。従来はこのような橋梁もそれほど多くなく、更新には架け替えという手法を用いることにより充分に対処も可能であったが、この時期に架設された橋梁構造物は、主要幹線道路や幹線鉄道、都市内高速道路等現在の社会基盤の根底部分を担うものが多く、掛け替えによる交通遮断や交通制限が社会生活に与える影響は計り知れない。また今後増加すると思われるそのような橋梁構造物全てに対して、この従来通りの架け替えという対処法を用いることは現実的に非常に困難であると思われる。以上のことから今後橋梁構造物は、維持管理の強化と必要に応じた補修を行うことにより、長寿命化を目指すことが非常に重要な課題になることは明白であり、このような観点から振動データや超音波、あるいは光ファイバケーブル等を用いた損傷同定手法が近年盛んに研究されている¹⁾²⁾。

上記のような手法のうち、減衰自由振動データに注目し、損傷に伴う剛性の低下が引き起こす固有振動数や減衰定数の変化をとらえようとする試みは比較的早くから提案され、研究も数多くなされている。この手法を用いた研究は橋梁構造物の他にも、建築工学や機械工学の分野において比較的多くの研究が知られており、損傷の規模がある程度大きい場合には、常時微動や強制加振によって得られた振動データから固有振動数やモード形状を比較することにより、損傷の程度や位置の同定を比較的高い精度で求めることも可能になりつつある^{3)3),4)}。しかしながら、実際の橋梁構造物において損傷は主に溶接部分や 2 次部材等に生じ、その規模も構造全体の剛性に影響を与えることは少ない場合が多い。従来の低次の固有振動数に着目した手法では、主要部材にかなり大規模な損傷を受けた場合のみ有意な結果が得られると考えられ、またその際にも健全時と比較して固有振動数が概ね 1/100 程度しか低下しないため²⁾⁴⁾、実際の橋梁構造物でこの手法を適用することは不可能ではないものの、かなりの困難を伴うであろうことが推定される。そこで著者らは、前述のような 2 次部材等に生じる損傷によって励起されると考えられる、従来ではほとんど用いられることのなかった比較的高次の振動数帯における振動特性の変化に着目し、振動測定データに対しフィルタリングによって低次の応答を除去し分散値を計算して損傷同定の可能性に関して検討を行った⁵⁾。その結果、橋梁構造物の損傷規模と分散値の間に、ある程度有意な関係が生じていることは確認されたが、分散値の振幅依存性や、実際の測定において高次の振動データに対する測定機器の S/N 比等が定量的な損傷同定において大きな影響を与えることが判明した。

以上を踏まえ、本研究では橋梁構造物における振動モニタリングデータの測定結果において、低次から 100Hz 程度までの高次にわたる振動数帯域全体の範囲から局所的な損傷を推定することの基礎的な考察を加えることを目的とする。前述のように従来の研究では主に低次の卓越振動数付近の成分のみ、あるいは著者らの手法のように高次の振動数帯成分のみに着目してきたが、本研究においては低次から高次まで全ての振動数領域のデータ全体に対して検討を加えることを試みた。具体的には、横構を模した部材を有するラーメン構造の実験供試体を製作し、その横構端部の拘束状態を変化させることにより仮想的な健全状態と損傷状態を設定した。この実験供試体に対して、低次から高次までの所定の振動数における、損傷程度に対する応

Study on Damage Identification of Steel Bridges by Using of Vibration Monitoring Data
by Koichi Mizukusa, Takashi Obata, Toshiro Hayashikawa, Koichi Sato and Akio Oikawa

答性状の変化を把握するため、概ね 100Hz 程度までの正弦波を用いた強制加振実験を実施し、また同時に減衰自由振動実験を行った。得られた強制加振データにおいて、振幅依存による影響を極力排除するために自己相関関数を計算し、その後無次元化されたデータの分散値を求めた。また自由減衰振動の結果に関しては、強制加振の場合との比較を行うために、低次から高次まで連続的にバンドパスフィルタを適用し、自己相関関数からの分散値を算出した。したがって、本研究はこれらの結果の検討を通じて、振動モニタリングデータを用いた橋梁構造物の損傷同定に関する有効性、適用性等について考察を加えるものである。

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。振動台にて強制加振を行う関係上、10Hz～100Hz 程度の範囲に可能な限り多くの固有振動モードが生じるよう配慮して設計を行った。なお、振動台の加振方向の制約から、測定は水平振動モードを対象とし、水平方向を弱軸、鉛直方向を強軸として両者の固有振動数の差を可能な限り大きくすることとした。表-1 に、実験供試体の構成部材の諸元を示す。また、表-2 は実験に先立って実施した固有振動解析結果である。解析結果から、100Hz までの間で6次までの水平モードが存在し、概ね上記の条件を満足するものと思われる。

測定方法は、供試体に5点の加速度ピックアップを設置して計測データを動ひずみ計で増幅し、A/D 変換ボードを介してパソコンに直接データを入力することにより加速度応答値を得た。サンプリング周波数は1000Hzを用いることとし、各測点におけるデータ個数は8192個を基本として測定を行った。なお、本研究では、LabVIEW を計測用システムとして採用することにより、極めて簡便かつ高速な測定を行うことが可能である。図-1 に本研究で用いた振動測定システムの概略図を示す。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-3 に、本研究で設

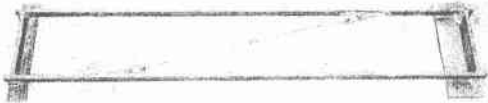


写真-1 実験供試体

表-1 構成部材の諸元

部材	長さ×高さ×幅 (mm)
主桁、端横桁	平鋼 2 500× 65× 22
	平鋼 400× 65× 22
横構（斜材）	丸鋼 1 120× φ9
ガセットプレート	平鋼 263× 9× 69
支承条件	全方向固定

表-2 実験供試体固有値解析結果

モード	振動数(Hz)
水平 1 次	18.08
水平 2 次	28.59
水平 3 次	26.92
水平 4 次	51.03
水平 5 次	60.65
水平 6 次	83.68

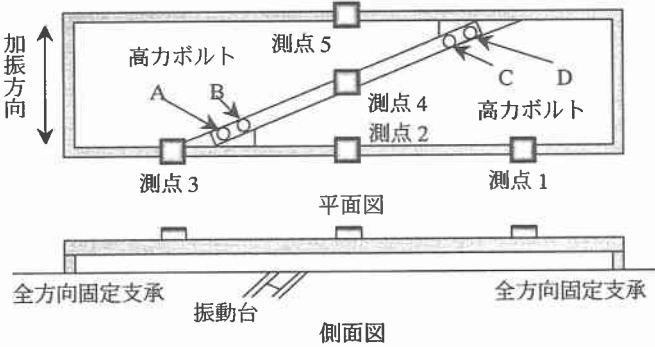


図-1 実験供試体概略図

表-3 損傷の設定

名称	損傷程度	弛緩したボルト
ケース 1	健全状態	なし
ケース 2	損傷状態(小)	A
ケース 3	損傷状態(中)	A・D
ケース 4	損傷状態(大)	A・B・C・D

定した損傷状態と弛緩させたボルト位置の関係を示す。ここで、弛緩させたボルトについては、加振中にその状態が変化しない程度の若干のトルクを導入することとした。加振方法については、まず強制加振実験においては振動台に正弦波を入力し、加振振動数は10Hz～100Hz までとして固有振動数付近では0.5Hz ピッチで、共振点が存在しない振動数領域では1～2Hz ピッチで加振することとした。この際のデータ測定は、供試体の振動が定常状態になったことを確認した後に測定を行っている。なお、振動台の入力加速度は10galである。また、減衰自由振動実験は重錘を水平方向に衝突させることで初期変位を与えることにより測定を行った。

3. 解析理論

3. 1 自己相関関数

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^{6),7)}。通常、振動等の時系列データに対しては、 $t=0\text{sec}$ 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振動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、

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

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。

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

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、

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

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。

したがって、実験によって測定された振動データに対して自己相関関数を用いて無次元化することにより、測点間ならびに個々の測定データ間における振幅の差違による影響をある程度排除することが可能となると思われる。

3. 2 分散値

上記によって得られる自己相関関数は、振動データ全体の周期性と時間遅れに対する一種の時系列データである。また、元の振動データの周期性が高い場合は時間遅れに対する自己相関関数の0への収束度合いが小さくなり、周期性が低い場合は逆に0への収束率が大きくなる。このことから、振動波形そのものよりは応答性状の検討は容易になるものの、自己相関関数は時系列データであるために、例えば軽微な損傷等による微小な変化を目視により判断することは非常に困難であると考えられる。

そこで本研究では、自己相関関数における微小な変化を増幅し、かつ数値化して定量的に扱う手法として、それらの分散値を用いることとし、その結果から損傷の同定を試みることにした。すなわち、健全・損傷時において自己相関性が変化すれば、それに応じて分散値も有意に増減するであろうことが十分に推定できるからである。

一般に、時系列データに対する分散値は、以下の式で与えられる⁸⁾。

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

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。

式(4)からわかるように、分散値の計算結果はある一つの時系列データに対して一つの値を出力するが、これを強制加振実験の入力振動数毎に計算することにより、入力振動数と分散値を1対1対応で表現することが可能となる。したがって分散値を振動数軸に対してプロットすることで、入力振動数により分散値がどのように変化するかを、スペクトルの様なもので表現することができ、これを本研究においては分散値スペクトルと称することとする。

4. 実験、解析およびその考察

以上のような手法を用いて、本研究では強制加振実験を行い、測定データに対する自己相関関数の分散値の算出し、前述の分散値スペクトルを求めた。また、強制加振の結果との比較を実施するため、減衰自由振動実験で得られた測定データにおいて、10Hz～100Hzまでの連続的なフィルタリングを行って、同様に分散値スペクトルを得ることにより考察を加えるものである。その理由として、一般に実橋における強制加振実験は加振装置の設置やその制御等が極めて困難であり、また多額の費用を要することから、その実用性を考慮すれば不十分であると言わざるを得ない。また、このような実験を行うに際しては、事前に詳細な固有値解析や時刻歴応答解析を行っておく必要がある。現実には強制加振実験が行うことができれば、比較的容易に健全状態と損傷状態の明確な差違が見いだすことも可能であると思われるが、以上のような理由により簡便な手法とは言い難い。そこで、強制加振実験より容易に測定が可能と思われる減衰自由振動実験によるデータを用いることによって、同等の結果を得ることができれば、極めて有効であると考えられる。よって、減衰自由振動実験で得られた振動データに対して上記のようなフィルタリングを行い、強制加振実験と同様の解析を実施して、その結果と強制加振で得られた解析結果との間に何らかの相関性があることを確認できれば、減衰自由振動実験結果に基づいた損傷同定を行うことの妥当性についての検討が可能になると思われる。

ここで、減衰自由振動データに対するフィルタリング等の処理に関して具体的な説明を加えると、所定のパスバンドを有するバンドパスフィルタを一定間隔で徐々に変化させながらフィルタリングを行うことにより、1つの自由振動データからパスバンドの中心振動数を主に含むデータを抽出することが可能となる。これら抽出された振動データに対して、強制加振実験の解析と同様に自己相関関数を求め、得られたデータの分散値を計算し、分散値スペクトルを用いて強制振動の場合との比較検討を行うこととした。用いたバンドパスフィルタは、比較的急峻な周波数応答特性を有するIIR型チェビシェフIフィルタと、フィルタ次数の関係からある程度幅を持った緩やかな特性を持つFIR型最小2乗線形位相フィルタの2種類を用いて⁹⁾、フィルタ特性の差違による解析結果への影響についても合わせて考察を行った。なおフィルタの設計諸元として、両フィルタ共に通過周波数帯域は2Hz、遮断周波数はその前後3Hzの比較的鈍いロールオフ特性を持つものを用いた。これは強制加振実験において、加振振動数が共振振動数に接近した場合、ある程度広い入力振動数の範囲で比較的大きな応答が生じることから、その範囲に相当する振動成分を自由振動のデータにおいても考慮するため、上述のようなフィルタ特性を採用することとした。図-2(a),(b)は、本研究で用いたIIR型フィルタならびにFIR型フィルタのゲイン性状である。

次に、以上のようにして得られた強制加振および減衰自由振動実験に対する分散値スペクトルの一例として、図-3に測点1における解析結果を、図-4に測点4における同様の結果を示す。なお、各図の(a),(b),(c)は、それぞれ強制加振時および減衰自由振動での適用フィルタの相違を意味している。

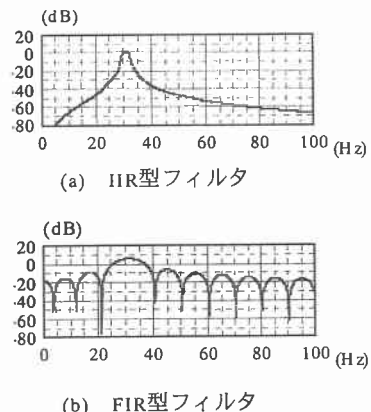


図-2 バンドパスフィルタゲイン

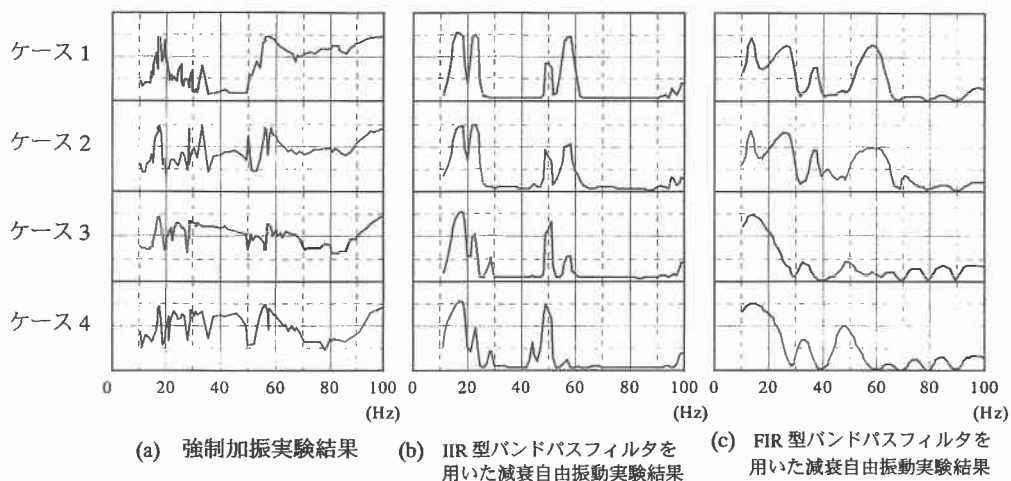


図-3 測点 1 分散値スペクトル

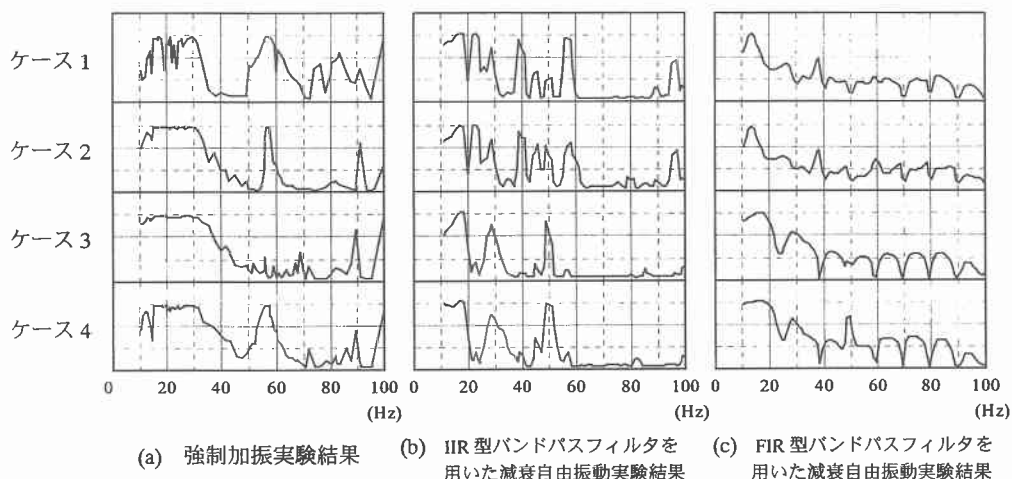


図-4 測点 4 分散値スペクトル

まず、図-3(a)および図-4(a)の強制加振に対する分散値スペクトルに着目すると、1 次～3 次モードの存在する 15Hz～30Hz 付近においては、健全状態では分散値スペクトルの形状が共振振動数付近において比較的明確なピークを示した形状であったが、損傷の程度が大きくなると徐々に丸みを持った形へ変化し、そのピークも不明瞭となっていることがわかる。これは、健全状態では入力共振振動数に一致した場合には非常に大きな応答が生じるが、共振点を僅かにはずれた振動数で加振すると、その応答は急速に減少し振動周期も入力に依存したものになると考えられる。損傷の増大に伴う剛性のあるいは減衰の変化によって、多少共振振動数をはずれた入力に対しても、対象となる振動モードが励起され、ある程度の入力振動数の幅において測定データの周期性が高くなり、健全状態に比してピーク位置が不明確な丸みを帯びた分散値スペクトルに変化したと推定される。

また、振動モードの全く存在しない振動数帯 30Hz～50Hz 付近においては、損傷が大きくなるにつれて、分散値スペクトルの値も大きくなる傾向を有することがわかる。これについては、振動モードが存在しない領域では入力に対する応答倍率が小さいため、入力と出力の関係がほぼ等倍率の関係にあると考えられる。よって、振動台の入力そのものが供試体の振動性状に与える影響が大きいと思われるが、損傷状態の若干の

剛性低下によって健全時よりも応答倍率が増加し、測定データにおけるノイズ等に対する応答の相対的な周期性が高くなったことにより、その結果として分散値も大きくなったと推定される。

次に、図-3(b),(c)および図-4(b),(c)の減衰自由振動の分散値スペクトルに関しては、強制加振で得られた傾向とほぼ一致すると思われる結果が得られた。すなわち、15Hz～30Hz 付近においては、健全状態における共振振動数付近の分散値スペクトルの形状は比較的確なピークを示しており、損傷の程度が大きくなるに伴い、次第になだらかで丸みを持った形となっていることが確認できる。30Hz～50Hz 付近の振動モードの存在しない振動数帯においては、強制加振の場合のような損傷が増大に応じて、分散値スペクトルも大きくなる傾向は見られない。これは、自由振動ではある振動数帯において励起される振動モードがなければ、当然ながら応答も生じないため、健全あるいは損傷の程度に関わらず変化が現れなかったものと考えられる。また、適用したフィルタ特性の相連による影響に関して考察を加えると、得られた分散値スペクトルの局所的な形状等は一致していないものの、全体的には IIR 型と FIR 型の双方とも前述の傾向を有することがわかる。特に共振点のピークが不明瞭になり、尖度が減少し全体に丸みを帯びる傾向は充分に見て取ることが可能である。これらは、他の測点においても概ねこの傾向を見出すことができることから、簡便な減衰自由振動実験の結果を用いても、適切なフィルタを設計することにより強制加振実験で得られた傾向と同等の結果を得ることが十分に可能であると推定される。

5. あとがき

本研究では、橋梁構造物における振動モニタリングデータの測定結果において、低次から 100Hz 程度までの高次にわたる振動数帯域全体の範囲から局所的な損傷を推定することの基礎的な考察を加えることを目的として、強制加振および減衰自由振動実験を行なって自己相関関数を計算し、その分散値を求めることにより、振動モニタリングデータを用いた橋梁構造物の損傷同定に関する有効性、適用性等について検討を試みたものである。

解析結果からは、強制加振、自由減衰振動の両者とも、共振振動数付近の分散値スペクトルの形状が、損傷の程度が大きくなるに伴い、ピークが次第に不明瞭になり、なだらかで丸みを持った形に変化することが判明した。したがって、本研究の手法を用いることにより、比較的容易に測定できる減衰自由振動実験のデータを用いても、損傷の推定あるいは同定を行える十分な可能性を有することが確認できたと考えられる。また、本研究における分散値スペクトルの比較検討の際には、その形状の変化を目視のみで行っているが、その形状の変化あるいは形状そのものを数値化することにより、より正確な損傷程度の判定あるいは位置の同定も可能となると推定される。

【参考文献】

- 1) 山崎智之，三上修一，大島俊之，本間美樹治，斉藤隆行：老朽 RC 橋の損傷付加振動実験，土木学会北海道支部論文報告集，第 52 号(A)，pp.490-493，1996.
- 2) 宗像康一，三好敏晴，濱本卓司：2 軸偏心を有する多層建築物の鉛直・水平 2 段階損傷検出～その 2 振動台実験による損傷検出法の検証～，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.403-404，1998.
- 3) 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.
- 4) 長峰正紀，内田浩：はり構造物におけるクラックの位置と深さの同定，北海道大学工学部研究報告，第 179 号，1997.
- 5) 小幡卓司，深井隆史，水草浩一，林川俊郎，佐藤浩一：振動ノイズの分析に基づいた橋梁構造物の損傷推定について，土木学会北海道支部論文報告集，第 54 号(A)，pp.280-283，1998.
- 6) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
- 7) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993.
- 8) 星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版会，1974.
- 9) 中村尚五：ビギナーズデジタルフィルタ，東京電機大学出版局，1989.