

振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究

Fundamental study on damage identification of steel bridges based on vibration monitoring data

小幡卓司*, 林川俊郎**, 佐藤浩一***, 水草浩一****

Takashi Obata, Toshiro Hayashikawa, Koichi Sato and Koichi Mizukusa

- * 工博, 北海道大学大学院助手, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
 ** 工博, 北海道大学大学院助教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
 *** 工博, 北海道大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
 **** 工学士, 北海道大学大学院, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

Recent years, evaluation method in maintenance inspection of bridges has become very important problem. The purpose of this study is to propose a method of damage identification on steel bridge structures from bridge monitoring data of damped free vibration. In general, the most of damages of steel bridges are occurred in welding of gusset plates or stiffeners and so on. It is considered that the influences of such damages on low natural frequencies are not so large. In this study, low frequency components of free vibration are removed from experimental and analytical data by using Fourier spectrum and FIR digital filter, and the variance of remained high frequency components are calculated. The possibility of application for identifying bridge damage is discussed by these results.

Key Words : vibration monitoring data, damage identification, steel bridges

キーワード: 振動モニタリングデータ、損傷同定、鋼橋

1. まえがき

近年、我が国においても社会資本の充実に伴って供用後 30 年程度以上経過した土木構造物が次第に増加する傾向にある¹⁾。中でも橋梁構造物は、今日の交通量の増大や車両そのものの大型化等により、設計当時の荷重を大きく超過している場合も少なくなく、これらの影響による損傷も数多く発生している可能性が十分に推定し得る。従来は、25~30 年程度の期間で新橋への掛け替えを行う場合も多く見受けられたが、最近の我が国における経済状態、あるいは旧橋取り壊しにおける産業廃棄物の処理に関する環境への配慮等を考慮すると、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、既存の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。これらの背景から、対象となる橋梁の損傷度あるいは健全度に対する現状把握が極めて重要視されるであろうことは自明と思われるが、現行の損傷度等の調査方法は目視にたよる場合が大半であり、これら調査の増加に伴う専門技術者の不足あるいは費用等を考慮すると、より簡便かつ安価な損傷調査・判定手法を早期に確立することが望まれる。

一方、構造物の減衰自由振動特性を測定することによって、その健全度評価あるいは何らかの損傷を同定しようとする発想は、損傷に伴って橋梁の剛性が低下し、固有振動数が小さくなる、あるいは減衰定数が変化する等の可能性が力学的な観点から十分に推定し得るため、比較的古くから提案されている^{2~8)}。まず橋梁関係の研究においては、西村ら⁹⁾によって、格子桁の外桁全体に 30%

の剛性変化が生じた場合には各次の固有振動数が 10~15%程度減少し、減衰定数の変化は、桁剛性が 10~20%以上低下しないと現れないことが報告された。また、加藤ら^{3,4)}は、PC 橋梁において破壊に至るまで載荷を行い、振動測定を実施して損傷が振動特性に及ぼす影響について検討を加えた。

さらに、建築工学あるいは機械工学の分野でもこの種の研究は盛んに行われ、比較的損傷が大きい場合には常時微動等の測定によって得られたモード形状あるいは固有振動数と、固有振動解析結果との比較により、損傷度および損傷位置の同定が可能になりつつある^{5,7,8)}。

しかしながら、鋼橋の損傷を例に考えれば、その主な発生箇所はほとんどがガセットプレート、垂直補剛材等のいわゆる 2 次部材の溶接部に発生することが多いことが知られている。よって、仮にこのような部材にかなり大きな損傷が生じた場合でも、構造物全体としての剛性低下は微小であるため、一般に卓越しやすい低次の固有振動数にはほとんど影響を及ぼさず、測定が比較的困難な高振動数帯に変化が生じる可能性が大きいことが容易に理解できる。したがって、従来の研究のように、主桁に非常に大きな剛性低下が生じた場合においても、固有振動数の変化の割合は、健全時の固有振動数に対しておよそ 20%程度以下であることから^{2,5,8)}、上記のような 2 次部材に微小な損傷が発生した場合には、低次の固有振動数およびモード形状等の測定あるいは解析のみによって、損傷度あるいは損傷位置を同定することは極めて困難であると推定される。

以上を踏まえて、本研究では鋼構造を有する橋梁構造

物を対象として、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、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、減衰自由振動の測定結果から損傷を推定あるいは同定するための基礎的検討を行うことを目的とする^{9),10),11)}。すなわち、従来の研究においてしばしば注目されてきた、低次の固有値が卓越する振動数領域における応答は、デジタルフィルタを適用してこれを除去し、残留した高次の振動数成分を含む波形を対象として、その分散値を算出する。このパラメータとしての分散値について健全時および損傷時における変化を検討することにより、損傷の影響についての評価を試みるものである。具体的には、まず横構を有する2主桁プレートガーダー橋をモデルとした、支間長11mの実験供試体を制作し、減衰自由振動実験を行って所定のデータを得た。損傷状態の設定は、高力ボルトによる主桁と横構の拘束状態を変化させることにより、仮想的な健全状態あるいは損傷状態における剛性変化を表現した。これらの実験結果に対して、フーリエスペクトルとFIR型デジタルフィルタ^{12),13)}を適用することにより低次の固有振動数を削除して分散値の計算を行なった。また、実験結果の妥当性を検討するために、実験と同様の条件でニューマークβ法を用いた直接数値積分法による時刻歴応答解析を実施して、両者の比較検討を試みた。したがって、本研究はこれらの結果の比較検討を通じて橋梁構造物の損傷同定における有効性、適用性等に関して考察を加えるものである。

2. 解析手法

2. 1 実験供試体

前述のとおり、本研究では写真-1に示すような支間長11m、幅員0.95mの2主桁プレートガーダー橋をモデルとした実験供試体を制作し、横構の拘束状態を変化させることにより仮想的な損傷状態を設定して減衰自由振動実験を実施した。なお、主桁と横構はガセットプレートを用いて高力ボルト2本を用いることにより接合されている。ここで、本研究における仮想的な損傷状態とは、主桁と横構の所定の格点部において剛結状態からヒンジ結合に変化させることを意味する。

測定方法は、供試体の支間を6分割して1/6点～5/6点の各点に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^{9),14),15)}。サンプリング周波数は、100Hz～500Hz程度までの振動数領域を解析対象とすることから、1000Hzを用いることとし、各測点におけるデータ個数は9192個として測定を行った。なお、本研究で用いた計測用システムは、LabVIEWを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¹⁵⁾。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。

また、加振方法に関しては、健全時、損傷時を問わずスパン中央に10mmの強制変位を与え、これを急速解放すると同時に測定を開始することとした。実験結果の一例として、表-1に実験供試体の健全時における振動特性の一覧を示す。なお表-1における減衰定数は、波形から

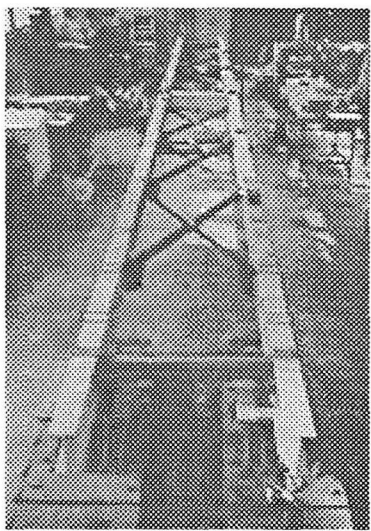


写真-1 実験供試体

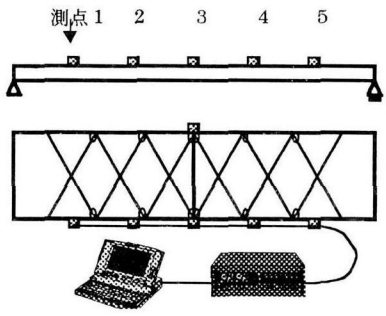


図-1 振動測定システム

表-1 固有振動特性

mode	鉛 直		水 平		ね じ り	
	振動数	減衰	振動数	減衰	振動数	減衰
1st	5.00Hz	1.4%	8.98Hz	2.1%	—	—
2nd	19.23Hz	0.5%	29.98Hz	1.0%	22.84Hz	0.5%
3rd	45.37Hz	0.7%	66.31Hz	0.2%	50.70Hz	1.0%

直接求めた場合とハーフパワー法の両者において一致した、小数点以下1位までで示している。

2. 2 固有振動解析および時刻歴応答解析

一般に、多自由度系の構造物の減衰自由振動に関する運動方程式は以下の式によって表すことができる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 x は変位ベクトル、 M 、 C 、 K はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスである。

この式(1)において、減衰項を無視した場合の変位ベクトル x が固有円振動数 ω で調和振動すると仮定すると、一般解はそのときの振動モードを X として、

$$x = X \exp(i\omega t) \cdots \cdots \cdots (2)$$

で示される。以上より、次の振動方程式が与えられる。

$$\det |K - \omega^2 M| = 0 \cdots \cdots \cdots (3)$$

本研究においては、主桁と横構の部材間の拘束条件を剛結あるいはヒンジ結合に変化させることにより健全および損傷状態を仮定していることから、剛性・質量マト

リックス双方の作成にあたっては、それら節点の拘束条件を解析上表現が可能となるような工夫を要した¹⁶⁾。

具体的には、剛性マトリックス $\mathbf{K}$ を例として説明を加えると、まず節点自由度に関して、梁部材要素に対して右手座標系に準じて、 x 、 y 、 z 軸を配し、1 節点当たりの自由度はそれぞれの軸におけるせん断力、曲げモーメントに加えて、そりねじりを考慮した合計 7 自由度とすることとした。ここで、 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{x}$ を荷重、変位ベクトル、 $\mathbf{K}$ を剛性マトリックスとした場合の一般的な剛性方程式は、 $\mathbf{F}=\mathbf{K}\mathbf{x}$ で与えられ、この際に仮想的な損傷により荷重が伝達されない項を $\mathbf{f}_0$ とおいて並べ替えを行えば、以下の式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{f}_c \\ \mathbf{f}_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{11} & \mathbf{k}_{12} \\ \mathbf{k}_{21} & \mathbf{k}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_c \\ \mathbf{x}_0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

ここで $\mathbf{f}_c$ 、 $\mathbf{x}_c$ は仮想的な損傷の影響を受けない項を表している。式 (4) を展開すると、式(5)、(6)が得られる。

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{k}_{11}\mathbf{x}_c + \mathbf{k}_{12}\mathbf{x}_0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\mathbf{f}_0 = \mathbf{k}_{21}\mathbf{x}_c + \mathbf{k}_{22}\mathbf{x}_0 = \mathbf{0} \dots\dots\dots (6)$$

式(6)より、 $\mathbf{x}_0$ は以下のように表される。

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{k}_{22}^{-1}\mathbf{k}_{21}\mathbf{x}_c \dots\dots\dots (7)$$

式(7)を式(5)に代入して整理すると、

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{k}_{11}\mathbf{x}_c - \mathbf{k}_{12}\mathbf{k}_{22}^{-1}\mathbf{k}_{21}\mathbf{x}_c = (\mathbf{k}_{11} - \mathbf{k}_{12}\mathbf{k}_{22}^{-1}\mathbf{k}_{21})\mathbf{x}_c \dots\dots (8)$$

となり、これをマトリックス表示すると、

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{f}_c \\ \mathbf{f}_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{11} - \mathbf{k}_{12}\mathbf{k}_{22}^{-1}\mathbf{k}_{21} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_c \\ \mathbf{x}_0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

となる。式 (9) に関して再度並べ替えを行うことにより、任意の節点において各自由度の拘束条件を変化させることが可能になる。また、質量マトリックスについても同様の操作を行うこととした。

次に時刻歴応答解析に関しては、前述のとおりニューマーク β 法を用いた直接数値積分法を用いて解析を行った。一般に、時刻歴応答解析においては式(1)の運動方程式の右辺に外力項 $\mathbf{f}(t)$ を加えることにより計算を実施するが、本研究では減衰自由振動を対象としているため、実験時の加振方法に準じて、初期変位を与えることにより解析を行った。すなわち、実験時の初期変位（支間中央で 10mm）となるような荷重を静的解析より算出し、その際の各節点での変位・たわみ角を $t=0\text{sec}$ における初期変位ベクトルとして代入し、各タイムステップにおける応答を求めた。時間刻み Δt は 0.001sec、係数 β は 0.25 とし、5 秒間解析を行なった。また、減衰マトリックス $\mathbf{C}$ については、レーレー減衰マトリックスを採用することとしたが、この際の 1 次および 2 次の減衰定数は自由減衰振動実験における実測値を用いている。

なお、本研究においては、比較的複雑なマトリックス演算を極めて簡便に取り扱うことのできる、MATLAB を用いてプログラミングを行い解析を実施することとした。

2. 3 フィルタリング

一般に、ノイズ等を含んだ信号を処理に必要な情報を

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。本研究においてはフーリエ級数に基づいた FIR 型バンドパスフィルタを用いて実測・解析応答波形における低次の卓越振動の消去を行った^{9,7)}。

FIR 型フィルタの入出力関係は以下のように表される。

$$Y(n) = \sum_{i=0}^k h_i X(n-i) \dots\dots\dots (10)$$

ここで $Y(n)$ 、 $X(n)$ 、 h_i 、 k はそれぞれフィルタ出力、入力、フィルタ係数、フィルタ次数を表している。パスバンドのエッジ周波数を f_l 、 f_u とし、サンプリング周波数を f_s とすると、サンプリング周波数で正規化されたパスバンドエッジの各周波数は、

$$\begin{aligned} \omega_u &= 2\pi f_u / f_0 \\ \omega_l &= 2\pi f_l / f_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

となり、ここで、

$$\begin{aligned} \omega_c &= (\omega_u - \omega_l) / 2 \\ \omega_0 &= (\omega_u + \omega_l) / 2 \end{aligned} \dots\dots\dots (12)$$

とおくとバンドパスフィルタは、 ω_c をカットオフ周波数とするローパスフィルタを左右に ω_0 だけ平行移動したものとなる。

次に、フーリエ級数を利用したローパスフィルタのフィルタ係数 $h_L(i)$ は、以下の式で与えられる。

$$h_L(i) = (1/\pi) \sin(i\omega_c) \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 i は $i=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm k$ (k : フィルタ次数) である。したがってフィルタ係数 $h_{BP}(n)$ は、以下の式により得ることができる。

$$h_{BP}(i) = 2 \cos(i\omega_0) h_L(i) \dots\dots\dots (14)$$

以上のようにして得られたフィルタ係数は、パスバンド中のゲインが振動的に変化する特性を有することになる。そこでこれらに適当な窓関数を適用することにより、パスバンド中のゲインを一定に保持することが可能となる。以下にその式を示す。

$$G(i) = h_{BP}(i) w(i) \dots\dots\dots (15)$$

ここで $w(i)$ は i 次の窓関数であり、 $G(i)$ はバンドパスフィルタのゲインである。

本研究においてはフィルタ次数を 341 とし、窓関数としてハニングウィンドウを用いている。またカットオフ周波数は、減衰自由振動実験結果における低次の固有振動数に応じて適宜決定することとした。

2. 3 分散値の算定

前述のとおり、本研究は実験ならびに解析で得られた波形に対して、フィルタリングを行って必要な振動数帯域の応答波形を抽出し、これらに対して分散値を算定することにより損傷の有無、あるいは発生位置等の検討を試みるものである。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¹⁷⁾。

$$\sigma_{var}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (16)$$

式(16)における $x(i)$ は応答波形の各離散時間における加速度データ、 $\bar{x}$ は加速度応答波形の平均値、 i は離散時間のステップ数である。

ここで、振動波形に含まれる卓越振動数成分の相違による分散値への影響を確認するために、固有振動数が200Hz のみの正弦波と、200Hz と 201Hz の卓越振動数を有する正弦波を用いて分散値の計算を行い比較を行った。具体的には、200Hz の振動波形に対し、201Hz の振動波形の混入率を最大振幅で 0.1~50%まで増減させ、それぞれの場合における分散値の変化について検討を加えた。これは、前述のとおり、損傷の有無によって各モードの有効質量率や減衰定数、あるいは発生するモードそのものが変化することが予想される。このため、健全・損傷の加振方法等が同一であっても、ある振動数帯域に含まれる卓越応答の個数の増減が生じた場合や、卓越応答が単数でその振動数が若干変化したような場合でも、応答量そのものは変動すると思われる、この微小な応答の変化が生じた場合の分散値への影響を確認する必要を有するものと考えられる。これらを考慮して、所定の振動波形に微小な変化が生じた際の分散値を求めることとした。なお、基本となる200Hzの振動波形の最大値は、1.0に設定した。解析結果の一例として、図-2(a),(b)および図-3(a),(b)に混入率がそれぞれ10%、5%の場合の振動波形とフーリエスペクトルを、表-2に得られた分散値の結果を示す。

まず、図-2 および図-3 に着目すると、振動波形・スペクトル共にほとんど変化を生じておらず、これらを見る限りにおいては、その差違を把握することは極めて困難であることがわかる。一方、表-2 からは201Hzの振動波形の増減に伴い、分散値に有意な差が生じているものと考えられる。すなわち、図-2 および図-3 の混入率が5%ならびに10%の場合を比較すると、それぞれ200Hzのみの場合の分散値に対する変化率がおよそ0.5%から1.5%に増大し、有意な変化が極めて容易に把握できる可能性を有するものと思われる。また、201Hzの波形の混入率が増加するにしたがい、分散値の変化率は等比級数的に増大する傾向が認められる。これは、損傷の増大に伴い、振動波形に含まれる卓越成分に変化が生じる、あるいは応答量そのものが増減するような現象が発生する可能性を考慮すれば、分散値あるいはその変化率から損傷を同定できるものと推定される。

以上より、損傷の発生により比較的高次の振動数領域において応答に変化が生じた場合、フィルタリングによって低次の卓越した応答を除去して分散値を求めれば、その変化によって橋梁の損傷度等に関する検討が行える可能性を有するものと考えられる。

3. 実験・解析結果およびその考察

3. 1 固有振動解析結果

以上のような手法を用いて、本研究では鋼橋の損傷同定を試みるものである。まず、減衰自由振動実験および時刻歴応答解析に先立ち、実験供試体の振動特性を把握するために固有振動解析を行った。解析モデルは、図-4のような32節点51部材の3次元骨組構造モデルを用い

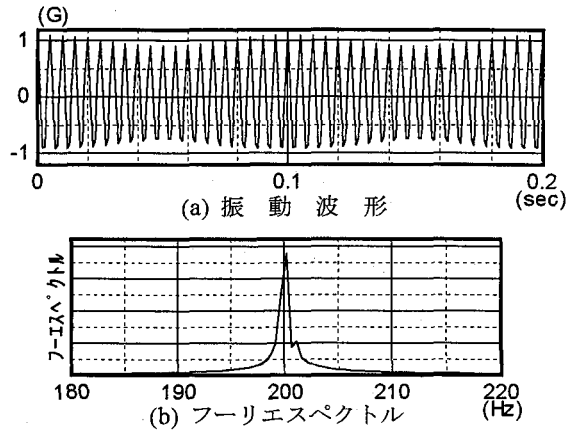


図-2 合成波（混入率10%）

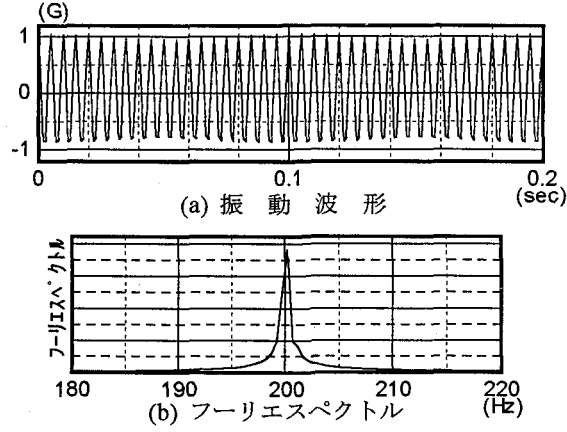


図-3 合成波（混入率5%）

表-2 分散値計算結果

混入率 (%)	分散値	変化率 (%)
0.1	0.50039	0.0048
0.5	0.50050	0.0259
1.0	0.50065	0.0568
5.0	0.50279	0.4841
10.0	0.50771	1.4683
25.0	0.53750	7.4213
50.0	0.63719	27.3444

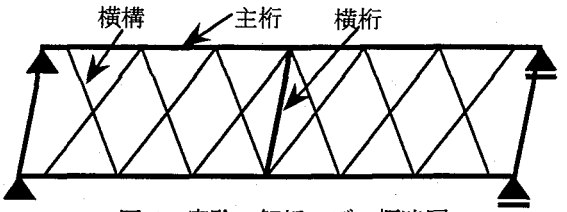


図-4 実験・解析モデル概略図

表-3 損傷状態の設定

case No.	実験供試体の状態
case 1	健全状態（全ての横構を剛結）
case 2	支間中央の格点4カ所を解放
case 3	支間中央から固定支承側の格点全てを解放
case 4	横構と主桁の格点全てを解放

ている。また、解析ケースは、表-3に示すような健全状態ならびにいくつかの損傷状態を設定した合計4ケースである。なお、本研究における仮想的な損傷の有無に関しては、前にも述べたとおり主桁と横構の連結部につい

て、健全状態の際はこれらの部材同士が互いにラーメン構造、損傷状態では各 case に応じて所定の格点をヒンジ結合として実験あるいは解析を行った。表-3 の一例として、case 3 の主桁片側とは、図4 の支間中央横桁に対し、移動支承側における主桁一横構間の添接ボルトを解放するという意味である。また、固有振動解析の結果の一例として、図-5(a),(b)に case 1 および case 4 における、比較的容易に変化が確認できる 16 次～20 次のモード形状を、表-4 に各 case における 1 次～3 次モードの解析結果ならびに減衰自由振動実験で得られた固有振動数を示す。ここで、表-4 の解析結果における比とは、損傷状態の固有振動数を健全状態のそれで除したものである。また、図-5(a),(b)において、左側は平面図、右側は側面図となっている。

図-5 より、健全状態と損傷状態を比較すると、明らかに比較的高次の振動数領域において発生する振動モードに変化が生じていることがわかる。なお、この際の振動数は、およそ 95Hz～105Hz 程度である。さらに、200Hz 程度以上の高次モードにおいては、主に横構の局部振動によるモードが case 1～case 4 において大きく変化することが確認された。これらの高次モードにおいては、損傷が比較的小さい場合でも局部的に発生することは本研究における仮想的な損傷の付加方法を考慮すれば自明と思われるが、図-5 のように振動数が変化するのみではなく、モードそのものが消失あるいは発生する傾向が顕著であることが認められた。よって、これらの変化が仮に応答波形に反映されていれば、分散値を求めることにより損傷の同定が可能になるものと思われる。

次に、表-4 において健全時の解析値と実験値に着目すると、両者はある程度よく一致し、本研究における解析モデルはほぼ妥当であると考えられる。各振動モードにおける解析結果に関しては、鉛直振動とねじり振動については健全状態および損傷状態において固有振動数に大きな変化は見受けられないが、水平振動モードに関しては、損傷が大きくなるに伴って長周期化する傾向が認められる。これは、仮想的な損傷を与える際に横構の連結部分の拘束を弛めたことにより、水平方向の剛性が低下することが主な原因であろう。また、前述のように概ね 10 次以上の振動モードについては、固有振動数のみならず、損傷の増大に応じてモード形状そのものが変化、あるいは消失することが確認された。したがって、これらの固有振動解析の結果により、実験供試体における測定データの概ね 100Hz 程度を越える高振動数領域にも、損傷による影響によって何らかの変化が生じることが十分に推定できるものと思われる。

3. 2 減衰自由振動実験

減衰自由振動実験に関しては、表-3 の横構を拘束した健全状態 (case 1) から横構のボルト全てを解放した損傷状態 (case 4) までを想定した場合について測定を実施した。なお、仮想的な損傷部位において高力ボルトを解放する際には、解析との整合性を考慮して加振時に横構部材が浮き上がらないよう、可能な限り手でボルトを締め付けることとした。実験結果の一例として、case 1 および case 4 の支間中央における振動波形ならびにフーリエ

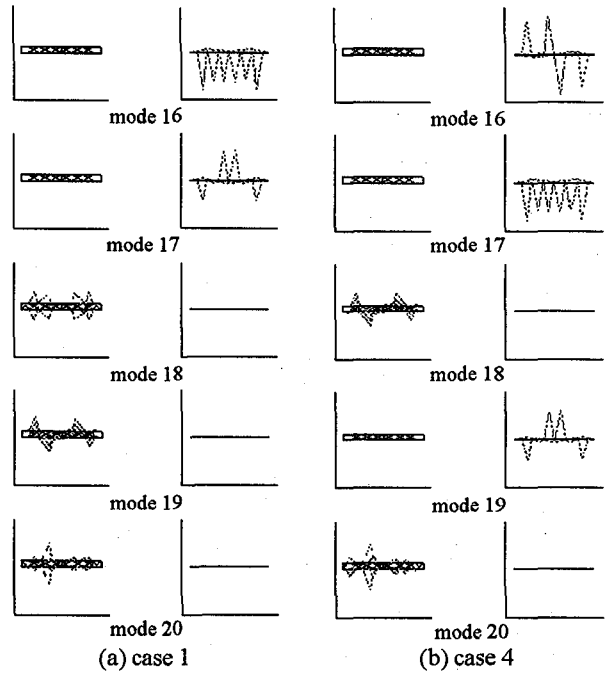


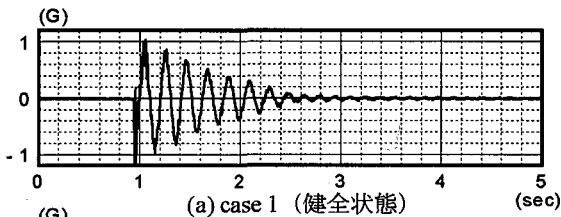
図-5 振動モード (16 次～20 次)

表-4 固有振動解析結果

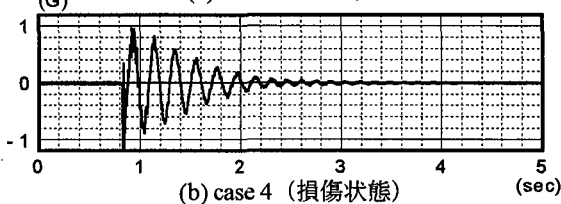
case No.	mode	鉛 直		水 平		ね じ り	
		Hz	比	Hz	比	Hz	比
case 1	1st	4.92	—	10.57	—	6.07	—
	2nd	20.28	—	28.68	—	22.55	—
	3rd	44.88	—	64.37	—	47.91	—
case 2	1st	4.92	1.0	10.57	1.0	6.07	1.0
	2nd	20.28	1.0	28.68	1.0	22.55	1.0
	3rd	44.88	1.0	64.37	1.0	47.91	1.0
case 3	1st	4.92	1.0	10.44	0.989	6.07	1.0
	2nd	20.28	1.0	28.54	0.995	22.55	1.0
	3rd	44.86	0.999	64.10	0.996	47.91	1.0
case 4	1st	4.92	1.0	10.30	0.974	6.07	1.0
	2nd	20.28	1.0	28.40	0.990	22.55	1.0
	3rd	44.85	0.999	63.83	0.992	47.91	1.0
実験	1st	5.00	—	8.98	—	—	—
	2nd	19.23	—	29.98	—	22.84	—
	3rd	45.36	—	66.31	—	50.70	—

スペクトルを図-6(a),(b)ならびに 図-7(a),(b)に示す。これらを比較すると、波形、スペクトルともほとんど有意な変化が認められず、1 次固有振動数が健全・損傷の両者とも大きく卓越していることがわかる。したがって、従来から指摘されているとおり横構等の 2 次部材に損傷が生じた場合には、波形あるいはスペクトル図のみによって損傷の発生等を判断することは極めて困難であると思われる。

次に、測定結果に対して、パスバンド周波数 100Hz～500Hz の特性を有するバンドパスフィルタを適用し、低次の卓越振動数の除去を行った。上記のパスバンドを用いた理由として、固有振動解析において 100Hz 程度以上から損傷に伴うモード性状等の変化が顕著になるためである。なお、この際のフィルタ次数は 341 であり、窓関数としてハニングウインドを用いている。case 1 および case 4 にフィルタを適用した結果を図-8(a),(b)、図-9(a),(b)に示す。また、表-5 ならびに図-10 は、各測定点のフィル

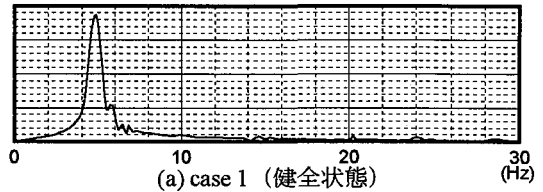


(a) case 1 (健全状態)

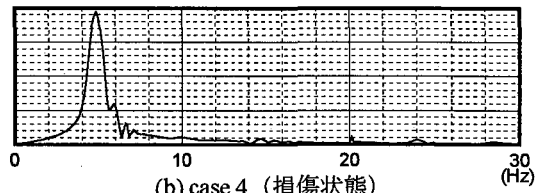


(b) case 4 (損傷状態)

図-6 振動波形

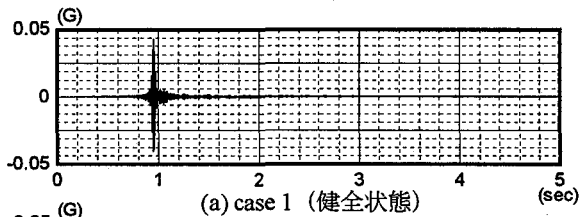


(a) case 1 (健全状態)

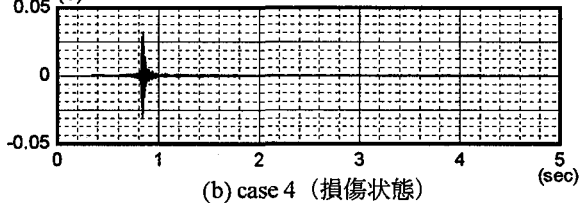


(b) case 4 (損傷状態)

図-7 フーリエスペクトル

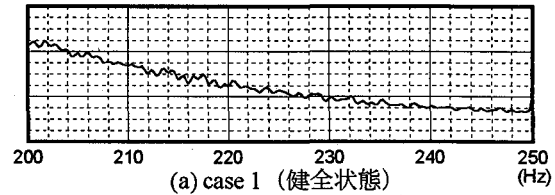


(a) case 1 (健全状態)

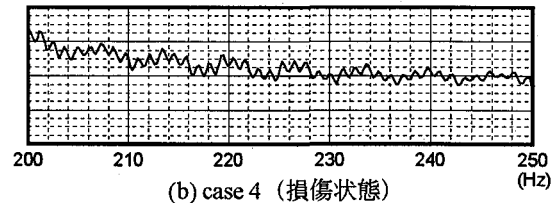


(b) case 4 (損傷状態)

図-8 振動波形 (フィルタリング後)



(a) case 1 (健全状態)



(b) case 4 (損傷状態)

図-9 フーリエスペクトル (フィルタリング後)

表-5 分散値解析結果 ($\times 10^{-3}$)

測点	case 1	case 2	case 3	case 4
1	2.68	2.28	0.691	0.416
2	5.01	1.70	0.797	0.611
3	3.67	3.30	0.710	0.858
4	3.00	1.84	1.36	1.08
5	0.601	0.548	0.225	0.173

タリング後の波形に対して、分散値を算出した結果である。まず図-8 においては、加振直後の 0.2 秒程度に差違が認められる。これは実験時の強制変位に多少の差が生じていたと思われること、FIR 型フィルタを用いているため、大きい応答が含まれる部分ではフィルタ次数分の時間においてその影響を受けること等が挙げられるが、波形を見る限りにおいては損傷の有無は判然としないと考えられる。図-9 のフーリエスペクトルの解析結果に関しては、両者にある程度有意な変化が現れているものと思われる。これは、ボルトの拘束状態の変化によって、固有振動解析で確認された、比較的高い振動数領域における振動モードが消失する、あるいはモード形状が変化する等の影響が生じていることが考えられ、本研究における実験方法においても 200Hz 以上の高次モードがある程度励起されている可能性は高いと推定される。加えて、緩めたボルト孔のクリアランスによって摩擦等の影響が生じ、振動に対して吸収的な作用を及ぼしていることは十分に予想され、これらの原因が重なり合うことによって、スペクトルにある程度の差違が生じたものであろう。

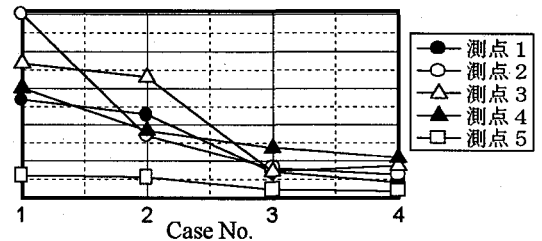


図-10 分散値計算結果

さらに表-5 および図-10 の結果から分散値の変化に着目すれば、各測点とも健全時に比して、損傷が増大するにしがたい分散値は小さくなる傾向を有することがわかる。したがって、振動測定結果からフィルタリングを行い、分散値を算出することによって、従来の目視等による方法に比較して、極めて簡便に比較的小さな損傷もある程度定量的に同定できる可能性を有するものと推定される。

ここで、分散値が損傷の増大に伴い減少する傾向に関して考察を加えると、本研究で設定した仮想的な損傷は、部材にクラックが生じるような現実のものとは異なり、前述のとおり格点部を剛結からヒンジ結合に変化させたものである。このため、一般的なクラックで励起されると思われる、亀裂の擦れあるいは衝突等による高周期の振動はほとんど発生せず、構造系の変化による振動性状への影響が支配的であったことが挙げられる。また、今回の実験では減衰自由振動を対象に行ったことから、仮に、先に述べたような擦れあるいは衝突等による振動が発生しても測定開始直後に減衰してしまい、応答波形には有意な変化をもたらさなかったものと考えられる。

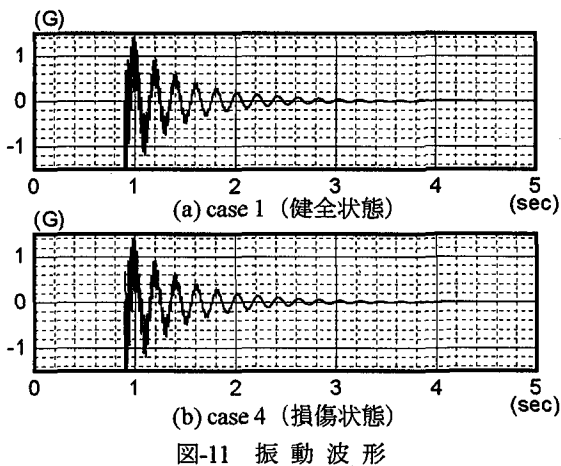


図-11 振動波形

加えて、問題点としては振動測定の精度およびサンプリング周波数の設定が非常に重要であることが判明した。本研究ではごく標準的な 2G 加速度計を用いて測定を行ったため、例えば対称に配置したピックアップにおいても、ゲイン調整等の微妙な差により得られた加速度応答値はある程度の相違が生じており、このことはフィルタリングおよび分散値の計算に少なからず影響を及ぼしているものと思われる。また、サンプリング周波数に関しては、損傷時においてどの程度の振動数帯で変化が生じるのか判然としないため、本研究で実施した実験の範囲においては、概ね 500Hz 以上の比較的高いサンプリング周波数を用いた方が分散値の傾向を把握しやすいことが判明した。したがって、振動測定結果をこのような損傷同定に用いるためには、測定精度および測定方法等に関して十分な検討が必要であると考えられる。

3. 3 時刻歴応答解析に基づいた損傷同定

本研究においては、以上のようにして得られた実験結果の妥当性等について検討を加えるため、時刻歴応答解析を実施して得られた加速度応答値に対して、その分散値を計算し、解析および実験の整合性等に関して考察を行った。まず、解析モデルについては、固有振動解析と同様に、先に図-4 に示した骨組モデルを用いている。解析ケースに関しては、表-3 の 4 ケースに加えて、case 5 として 1 カ所の格点のみをヒンジ接合とした場合についての解析を加えることとした。また、減衰定数は前述の通り自由減衰振動実験における実測値を用いている。解析結果の一例として、図-11(a),(b)および図-12(a),(b)に case 1 (健全状態)、case 4 (損傷状態) の加速度応答波形とフーリエスペクトルを示す。

まず、図-11(a)における健全時の振動波形から、実験値と比較してやや大きな減衰を示しているものの、ある程度高い精度で実験を再現しているものと思われる。よって、固有振動解析同様、解析モデルあるいは減衰定数の評価等はほぼ妥当であると判断できる。図-11 および、図-12 の健全時と損傷時の比較からは、減衰自由振動実験結果でも明らかとなっており波形あるいはスペクトル図のみによって損傷の発生等を判断することは困難であると思われる。

次に、損傷を付加した case 2～case 4 について、解析モデルの各節点においてフィルタリング後の波形に対し分散値を求めた。図-13 に、損傷の大きさと分散値の関係を示す。図-13 から、分散値の変化に着目すれば、実験時に比してその変化は小さいものの、損傷が増大するにしたがい分散値は次第に減少し、実験結果とほぼ一致する傾

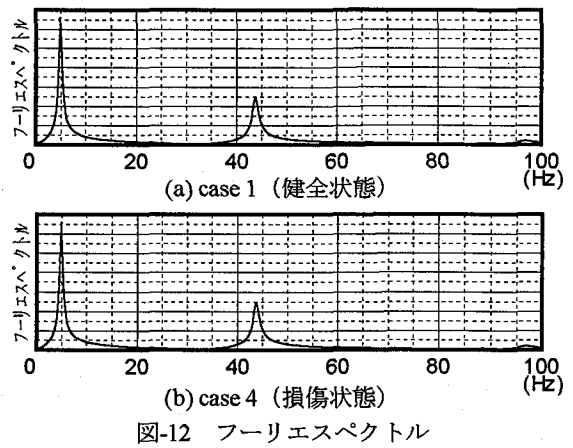


図-12 フーリエスペクトル

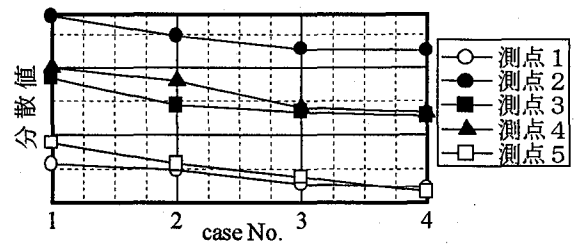


図-13 分散値計算結果

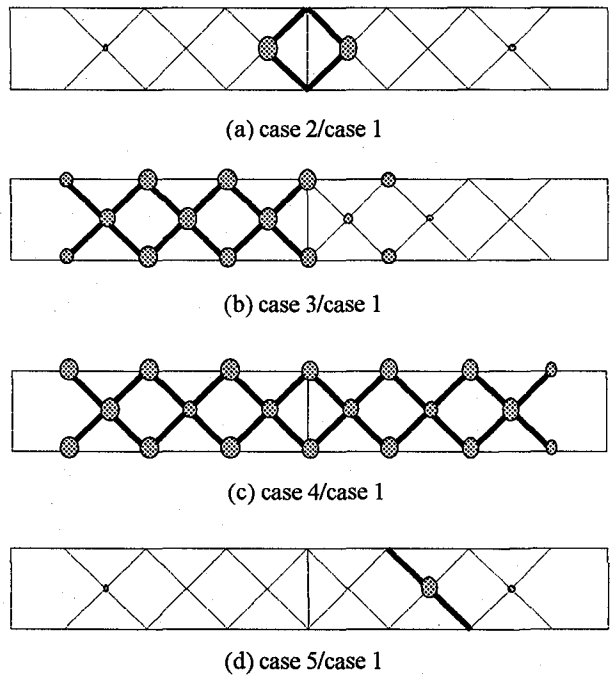


図-14 分散値の分布

向を有することが判明した。なお、解析値が実験値に対してその絶対値、変化率とも小さいことに関しては、解析においては測定装置の電氣的ノイズやピックアップそのものの特性、あるいは起振力の差違等による影響は全く生じないことが大きな原因の一つであろう。

さらに、損傷時の各ケースにおける分散値と健全時の分散値との比を求めた結果を、各節点において図示したものが図-14(a)～(d)である。ここで、図中の○の面積が損傷時/健全時の大小関係を表し、太線で表された横構が仮想的な損傷（ヒンジ結合）を与えた部材を示している。図-14 に着目すると、損傷が大きくなるにしたがって分散値の比も増大する現象が認められ、損傷の大小に伴

って分散値も有意な変化が生じているものと思われる。また、損傷を付加した格点部とその周辺の節点における損傷/健全の分散値比について考察を加えれば、損傷位置に近いほど、その値が大きくなる傾向を有することが確認された。

以上より、解析、実験の両者においてはほぼ同様の傾向を示すことが判明し、また、損傷位置の同定もある程度可能と思われる結果が得られた。したがって、本研究で用いた手法は減衰自由振動の測定結果から、比較的容易に橋梁をはじめとする鋼構造物の損傷を、ある程度定量的に同定あるいは判定できる可能性を有するものと推定される。

4. あとがき

以上のように、本研究は鋼構造を有する橋梁構造物を対象として、2次部材等に生じる損傷によって発生すると考えられる高次の振動数帯における振動特性の変化に着目し、減衰自由振動の測定結果から損傷を推定あるいは同定するための基礎的検討を行うために、FIR型バンドパスフィルタを用いて実験結果から低次の卓越振動数を除去し、残留した高次の振動数成分を含む波形の分散値を求めることにより、その変化を捉えて損傷の影響についての評価を試みたものである。

まず固有振動解析結果から、健全状態と損傷状態を比較すると、概ね10次以上の比較的高次の振動数領域で発生する振動モードにおいて、損傷の増大に応じて固有振動数やモード形状が変化、あるいはモードそのものが消失することが確認された。よって、固有振動解析の結果により、実験供試体における測定データの概ね100Hz程度を越える高振動数領域にも、損傷による影響によって何らかの変化が生じることが十分に推定できるものと思われる。

次に、減衰自由振動実験に着目すると、健全時・損傷時において、波形、およびフーリエスペクトルを見る限りにおいてはほとんど有意な差は認められず、従来から指摘されているとおり横構等の2次部材に損傷が生じた場合には、波形あるいは固有振動数の検討のみによって損傷の発生等を判断することは極めて困難であると思われる。また、測定結果に対してバンドパスフィルタを適用し、低次の卓越振動数の除去を行い、分散値を算定した結果に関して考察を加えれば、本研究の実験結果に関しては、各測点ともに分散値は健全時に比して損傷が増大するにしがたい小さくなる傾向を有することが判明した。したがって、振動測定結果からフィルタリングを行い、分散値を算出することによって、従来の目視等による方法に比較して、極めて簡便に比較的小さな損傷もある程度定量的に同定できる可能性を有するものと推定される。

さらに、時刻歴応答解析によるシミュレーションにおいては、その分散値の変化は実験時に比して小さいものの、損傷が増大するにしがたい分散値は次第に減少し、実験結果とほぼ一致する傾向を有することが確認された。加えて、損傷時の各ケースにおける分散値と健全時の分散値との比を求めた結果、損傷が大きくなるにしたがって分散値の比も増大する現象が認められ、損傷位置に近いほど、その値が大きくなる傾向を有することから、損傷の大小に伴って分散値も有意な変化が生じているものと考えられ、損傷位置の同定もある程度可能と思われる結果が得られた。よって、解析、実験の両者においてはほぼ同様の傾向を示すことから、以上で得られた結果は

ほぼ妥当であると考えられる。したがって、本研究で用いた手法は減衰自由振動等の橋梁モニタリングデータから、比較的容易に橋梁をはじめとする鋼構造物の損傷を、ある程度定量的に同定あるいは判定できる可能性を有するものと推定される。

【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) 西村昭，藤井学，宮本文穂，加賀山泰一：橋梁の損傷評価における力学挙動の有効性，土木学会論文集，No.380/I-7，pp.355-526，1987.
- 3) 加藤雅史，高木保志，島田静雄：PC橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究，土木学会論文集，No.341，pp.113-118，1984.
- 4) Kato, M. and Shimada, S.: Vibration of PC Bridge during Failure Process, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112, No.7, pp.1692-1703, 1986.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 小幡卓司，深井隆史，水草浩一，林川俊郎，佐藤浩一：減衰自由振動データに基づいた鋼構造物の損傷同定に関する基礎的研究，土木学会北海道支部論文報告集，第55号(A)，pp.346-351，1999.
- 12) 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.
- 13) The Math Works Inc.: System Identification Toolbox User's Guide, サイバネットシステム株式会社，1999.
- 14) 小幡卓司，亀井与志，伊藤公彦，林川俊郎，佐藤浩一：歩道橋の実態調査に基づいた応答特性と歩行外力の同定について，橋梁振動コロキウム'97論文集，pp.293-299，1997.
- 15) 岡林隆敏，山森和博，田丸康広，吉村徹：可搬型振動測定システムによる構造物の振動特性推定，土木学会論文集，No.591/I-43，pp.327-337，1998.
- 16) Toshiro HAYASIKAWA: Dynamic Response Analysis of Multispan Bridge Structures by Means of Continuous Mass Method, 北海道大学学位論文，1983.
- 17) 星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版会，1974.

(1999年9月17日受付)