

I-56

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

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	学 生 員	深井 隆史
北海道大学工学部		水草 浩一
北海道大学大学院工学研究科	フェロー	林川 俊郎
北海道大学大学院工学研究科	フェロー	佐藤 浩一

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。一般に橋梁構造物は、その利用形態から地震、風雪あるいは塩害等の自然環境からの影響を受けやすく、また年々増加する交通荷重によってもその構造に損傷を生じる可能性が大きいことが知られている。従来は、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の変化を考慮すれば、今後は維持管理を強化し、必要に応じて補修等を行うことにより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。

一方、橋梁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、¹⁾損傷に伴って橋梁の剛性が低下し、その結果固有振動数が小さくなる、あるいは損傷部に生じる摩擦等の影響により、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、比較的早くから提案されている。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場合が多い。上記のような部材にかなり大きな破損等がみられる場合においても、構造物全体としての剛性低下は極めて微小であるため、卓越し易い低次の固有振動数にはほとんど影響を及ぼさず、測定が困難な、かなり高い振動数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。

以上を踏まえて、本研究では橋梁構造物における上記のような損傷を、減衰自由振動の測定結果から推定するための基礎的検討を行うことを目的とする。すなわち、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るものである。具体的には、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実験供試体を制作して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を設定し、各種のサンプリング周波数を用いて減衰自由振動実験を実施した。これらの実験結果に対して、FFT と FIR 型デジタルフィルタ²⁾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い、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。

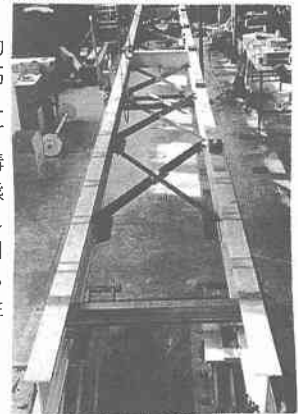


写真-1 実験供試体

2. 解 析 手 法

2-1. 実験供試体

上記のとおり、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。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。³⁾サンプリング周波数は 500Hz あるいは 1000Hz を用いている。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。加振方法に関しては、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 に実験供試体の振動特性の一覧を示す。

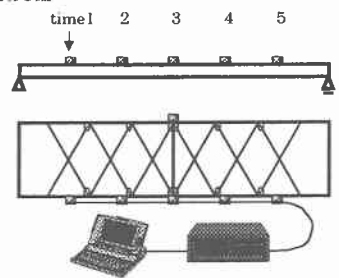


図-1 振動測定システム

*Estimation of Damages on Bridge Structure Based on Vibration Noise Analysis
by Takashi OBATA, Takashi FUKAI, Kouiti MIZUKUSA, Toshiro HAYASHIKAWA and Koiti SATO*

2-2. バンドパスフィルタ

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、バンドパスフィルタ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応答波形における低次の卓越振動の消去を行った。^{2) 3)}

FIR フィルタの入出力関係は以下のように表される。

$$Y(n) = \sum_{i=0}^k h_i X(n-i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

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、

$$\begin{aligned} \omega_u &= 2\pi f_u / f_s \\ \omega_l &= 2\pi f_l / f_s \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2-a,b)$$

となり、ここで、

$$\begin{aligned} \omega_c &= (\omega_u - \omega_l) / 2 \\ \omega_0 &= (\omega_u + \omega_l) / 2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3-a,b)$$

と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。

$$h_L(i) = (1/\pi i) \sin(i\omega_c) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 i は $i = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm k$ (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。

$$h_{BP}(i) = 2 \cos(i\omega_0) h_L(i) \quad \dots\dots\dots (5)$$

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。

$$G(i) = h_{BP}(i) w(i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

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

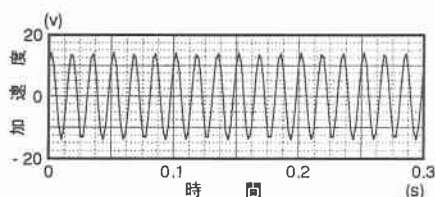
前述のとおり、本研究においては、実験結果についてフィルタリングを実施して必要な振動数帯域の応答波形を抽出し、これらに対して分散値を算定することにより損傷の有無を検討するものである。一般に、振動波形に対する分散値は、以下の式で与えられる。⁴⁾

$$\sigma^2_{Var} = \frac{n}{i=1} \left(x^2(i) - \bar{x}^2 \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

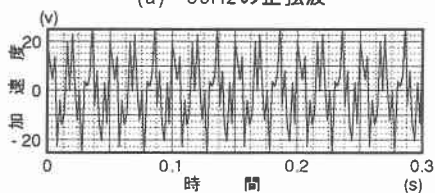
式(7)における $x(i)$ は応答波形の各離散時間における加速度データ、 $\bar{x}$ は応答波形の平均値、 i は離散時間のステップ数である。ここで、振動波形に含まれる卓越振動数の相違による分散値への影響を確認するために、振動数が 60Hz のみの正弦波と、60Hz と 200Hz の卓越振動数を有する正弦波を用いて分散値の計算を行い比較を行った。図-2(a),(b)および図-3(a),(b)に解析に用いた振動波形とフーリエスペクトルを、表-2 に得られた分散値の結果を示す。表-2 から、2 個の卓越振動数を有する場合において明らかに分散値が増大することが理解できる。したがって、損傷により比較的高次の振動

表-1 振動特性一覧表

振動モード	振動数 (Hz)	振動モード	振動数 (Hz)
鉛直 1 次モード	5.10	水平 1 次モード	16.1
鉛直 2 次モード	20.5	水平 2 次モード	34.7
鉛直 3 次モード	46.5	水平 3 次モード	70.5



(a) 60Hzの正弦波



(b) 60Hzと200Hzの合成波

図-2 解析に用いた振動波形

表-2 分散値の計算

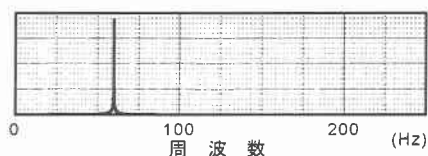
	60Hz	60Hz+200Hz
分散値	11461.160	15468.980

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。

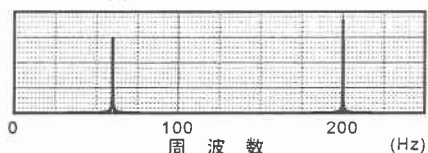
3. 実験・解析結果およびその考察

まず、減衰自由振動実験に関しては、横構を拘束した健全状態と、横構のボルト全てを解放した損傷状態を想定した場合について測定を実施した。その設定を表-3 に示す。支間中央におけるそれぞれの状態の振動波形ならびにフーリエスペクトルを図-4.5(a),(b)に示す。なお、サンプリング周波数は500Hzである。これらを比較すると、両者とも1次固有振動数が大きく卓越し、従来から指摘されているとおり波形あるいはスペクトル図を見る限りにおいては損傷の発生等を判断することは極めて困難であることがわかる。

次に、測定結果に対して図-6 のような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。その結果を図-7および図-8(a),(b)に示す。また、表-3 ならびに図-9 は、各測定点のフィル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。図-7,8 に着目すると、健全、損傷の各状態において波形を見る限りにおいてはその差は判然としないが、FFT 解析結果に関しては両者に有意な変化が現れているものと考えられる。これは、ボルトの拘束状態の変化によって、低次の固有振動数以外の比較的高い振動数を有するモードが生じない、あるいは緩めたボルト孔のクリアランスが吸収的な作用を及ぼしているものと推定される。さらに表-4 および図-9 から分散値の変化に着目すれば、一部の測点において逆転しているものの、平均値で考えると健全時よりも損傷を与えた場合の方が分散値は小さくなっていることがわかる。したがって、本研究の手法を用いれば、振動測定を行うことにより比較的簡単に橋梁の損傷度を定量的に判定で



(a) 60Hzの正弦波のFFT



(b) 60Hz-200Hzの合成波のFFT

図-3 振動波形のFFT

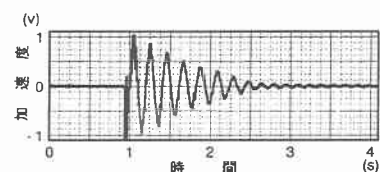
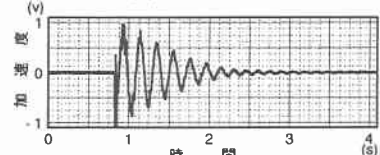
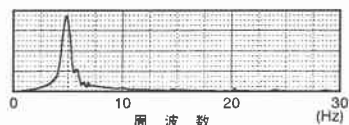


図-4 (a) 健全状態の振動波形

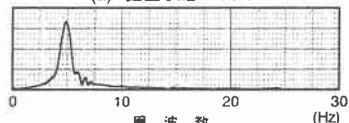


(b) 損傷状態の振動波形

図-4 実験の振動波形



(a) 健全状態のFFT



(b) 損傷状態のFFT

図-5 実験波形のFFT

表-3 実験供試体の case 設定

	実験供試体の状態
case1	健全状態
case2	主桁中央部のボルトを開放
case3	右側半分の主桁に繋がるボルトを開放
case4	主桁に繋がる全てのボルトを開放

表-4 分散値の計算

	case 1	case 2	case 3	case 4
time1	1.40e-06	1.16e-06	2.42e-07	2.16e-07
time2	9.03e-07	8.16e-07	3.23e-07	2.61e-07
time3	1.48e-06	1.20e-06	5.18e-07	3.05e-07
time4	5.79e-07	5.40e-07	5.03e-07	4.04e-07
time5	7.26e-07	1.09e-06	3.00e-07	2.58e-07
time6	3.77e-06	1.92e-06	1.01e-06	9.44e-07

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、ゲイン調整の微妙な差により得られた加速度応答はある程度大きい相違が生じており、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。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、本研究の実施した数回の実験においては可能な限り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わかった。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、測定精度等に関して十分な検討が必要であると考えられる。

4. あとがき

以上のように、本研究は橋梁構造物における損傷を、減衰自由振動の測定結果から推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、フィルタリング後の波形からは、健全、損傷の各状態において応答の最大値に明らかな差違が生じており、FFT 解析結果に関しても両者に有意な変化が現れていることが確認された。よって、損傷時にはかなり高い振動数領域において健全状態で発生していた振動モードが消失する可能性が大きいと推定できる結果が得られた。

また、フィルタリング後の波形における分散値の変化に着目すれば、健全時よりも損傷を与えた場合の方が分散値は小さくなる傾向を有することが判明した。各測点の値を比較すると、一部を除いてこの傾向はほぼ同一であることから、より多くの測点を設置して減衰自由振動波形を計測し、分散値の分布を 3 次元的に展開して評価を行えば、局所的な損傷についての同定も出来得るものと考えられる。

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) 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.
- 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.
- 4) 星谷勝: 確率論手法による振動解析, 鹿島出版会, 1974.

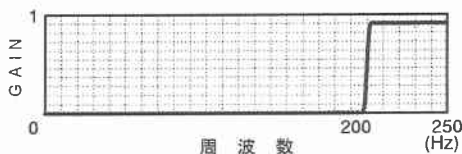
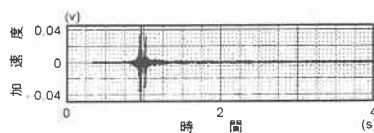
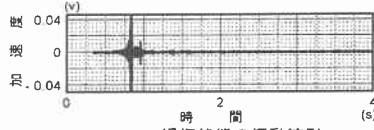


図-6 周波数特性

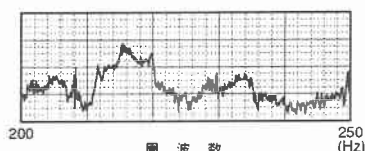


(a) 健全状態の振動波形

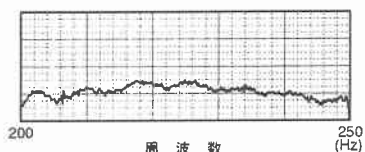


(b) 損傷状態の振動波形

図-7 フィルタ後の振動波形

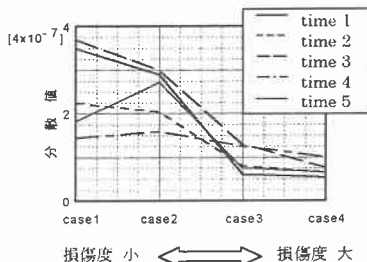


(a) 健全状態のFFT



(b) 損傷状態のFFT

図-8 フィルタ後のFFT



損傷度 小 ← → 損傷度 大

図-9 分散値の計算