

損傷を受けた橋梁構造物のヘルスマニタリング手法に関する一考察

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 学生員 三田知幸
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 宮森保紀

1. まえがき

我が国においては、昭和 40～50 年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、現在の社会基盤施設の根底部分を担っている。これらの橋梁は既に供用後 20～30 年以上が経過し、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。また、今後新設される橋梁についても、近年の投資余力減少下においては可能な限りの長寿命化を目指すことが望ましく、既存・新設橋梁を問わず維持管理・補修の強化を行うことにより、長寿命化を目指すことが非常に重要な課題となりつつある¹⁾。このような背景から、振動データや超音波等を用いた土木構造物のヘルスマニタリングあるいは損傷同定手法が近年盛んに研究されている^{2),3)}。

本研究では、橋梁構造物の振動モニタリングデータにおいて、低次から 100Hz 程度までの振動数帯域の範囲から局部的な損傷を同定するための新たな手法に関して考察を加えることを目的とする。具体的には、横構を有する実験供試体を製作し、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・損傷状態を設定して減衰自由振動実験を実施した。得られたデータに対して、バンドパスフィルタを 0.05Hz 程度のピッチで 1.5～100Hz まで移動させながら連続的にフィルタリングを行い、各々のデータについて自己相関関数を計算した。次に、得られた自己相関関数の分散値を求め、パスバンドの中心振動数をパラメータとしてスペクトル状に表現することで、構造物の損傷程度と振動特性の変化に関して検討を行った^{4),5)}。したがって、本研究はこれらの結果を通じて、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の可能性、あるいは適用性等について考察を加えるものである。

2. 解 析 理 論

まずフィルタリングに関しては、バンドパスフィルタとして IIR 型楕円フィルタを採用した。このフィルタは、任意のフィルタタイプの中で求められた設計仕様を最小の次数で与えることが可能であり、一般に鋭いロールオフ特性を示す。また、通過帯域と遮断帯域の両方で等リップルを持つことから、優れた特性を有していることが知られている⁶⁾。フィルタの設計諸元としては、通過周波数帯域を 1Hz、遮断周波数帯域はその前後 1Hz、通過帯域全体におけるリップルを 3dB、遮断帯域で減少させるゲインを 40dB とし、これを 0.05Hz ピッチで 1.5Hz～100Hz 程度まで連続的に移動させることによりデータを得た。

次に、異なる応答振幅を有する測点間の時系列データの比較を行うために、フィルタリング後のデータに対して自己相関関数の算出を行った。一般に、 $x_m(m=0,1,2,\dots,N-1)$ で表される信号データにおいて、自己共分散係数 R_m と平均パワー R_0 の比を取ることによって無次元化すると、

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

となり、自己相関係数、あるいは自己相関関数が得られる⁷⁾。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による影響をある程度排除することが可能になると考えられる。

さらに本研究では、上記で得られた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、健全状態と損傷状態において振動特性が変化し、それが自己相関性に影響を与えれば、その分散値もスカラー量として有意に増減するであろうことが十分に推定可能である。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⁾。

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

ここで、式(2)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(2)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、これを所定のパスバンドでフィルタリングされたデータ毎に計算することにより、パスバンドの中心振動数をパラメータとして、個々の分散値と 1 対 1 対応でスペクトル様に表すことが可能となり、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。

3. 実 験 方 法

本研究で用いた実験供試体は、図-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。なお、実験時において加振を容易にするために、測定は水平振動モードを対象とすることとし、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。

測定方法は、供試体に 5 点の加速度計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

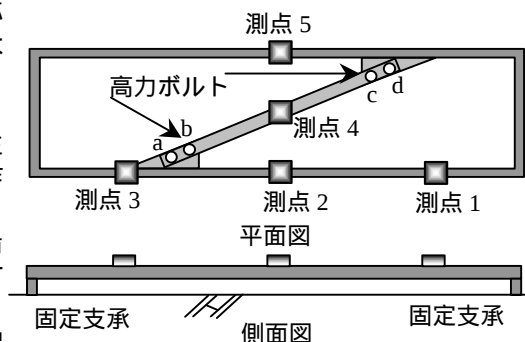


図-1 実験供試体概略図

とにより応答値を得た。サンプリング周波数は 1000Hz を用いている。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-1 に、本研究で設定した損傷状態と弛緩させたボルト位置の関係を示す。

4. 解析結果ならびにその考察

解析結果の一例として、図-2 に測点 2 における分散値スペクトルを示す。図-2(a)に着目すると、各々のケースにおいて 18,23,27, 50,57Hz の振動数付近に明瞭な卓越振動数が確認できる。これらの卓越振動数と実験供試体の固有振動解析結果を比較すると、それぞれ 1,2,4,5,7 次の各振動モードが加振によって励起されたものと考えられる。

ここで、スペクトルのピーク値と損傷状態の関係に関して考察を加えると、1 次および 5 次モードは構造物の全体振動であり、横構添接部の挙動が同位相となるため、損傷の影響はほとんど受けていないと思われる。これに対し、2 次モードは添接部が逆位相となることから、横構の剛性低下に伴いその応答は変化することが予想され、全てのボルトを解放したケース 5 では、このモードは生じていない。また、4 次モードについては、横構単独で振動するモードであり、端部の拘束条件が変化すれば、その応答が変化することは容易に理解できる。さらに、7 次のモード形状は、主桁と横構が逆位相で振動するモードである。よって、ボルトが弛緩するにしたがって断面力が横構に伝達されなくなり、最終的には横構は主桁に対して死荷重を付加するのみの部材となるものと考えられる。

次に上述の結果を踏まえ、より簡便に損傷の程度と分散値の関係を取り扱うために、各ケースにおける分散値スペクトルのスペクトル強度の計算を行った。その結果、損傷の程度が大きくなるに伴って明らかにスペクトル強度が低下する傾向を有することが判明した。

以上より、損傷の程度に応じて振動数が変化する振動モードが存在することから、これらを利用して分散値スペクトルを比較することで損傷の局所的な位置同定等が行えるものと推定される。また、スペクトル強度の値を検討することで構造物の損傷度がある程度判定することも可能であると思われる。

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同定することを目的として、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、分散値スペクトルを用いることによって、比較的小さい損傷を加えた場合でも、構造物の振動性状の変化をある程度容易に捉えることが可能であり、損傷の局所的な位置同定が行える十分な可能性を有することが判明した。また、分散値スペクトルのスペクトル強度については、損傷が増大するにしたがいスペクトル強度が低下する傾向を有することが確認され、構造物の損傷度をマクロ的に判断することも、簡便に行えるものと思われる。

【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) 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. 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) 小幡卓司，三田知幸，林川俊郎，佐藤浩一：橋梁の損傷時における振動特性のモニタリング手法について，土木学会北海道支部論文報告集，第 57 号，pp.108-111，2001. 5) 小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一，水草浩一：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，構造工学論文集，Vol.46A，pp.531-538，2000. 6) 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. 7) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994. 8) 星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版会，1974.

表-1 実験ケース

名称	弛緩したボルト
ケース 1	なし
ケース 2	a
ケース 3	a,d
ケース 4	a,b
ケース 5	a,b,c,d

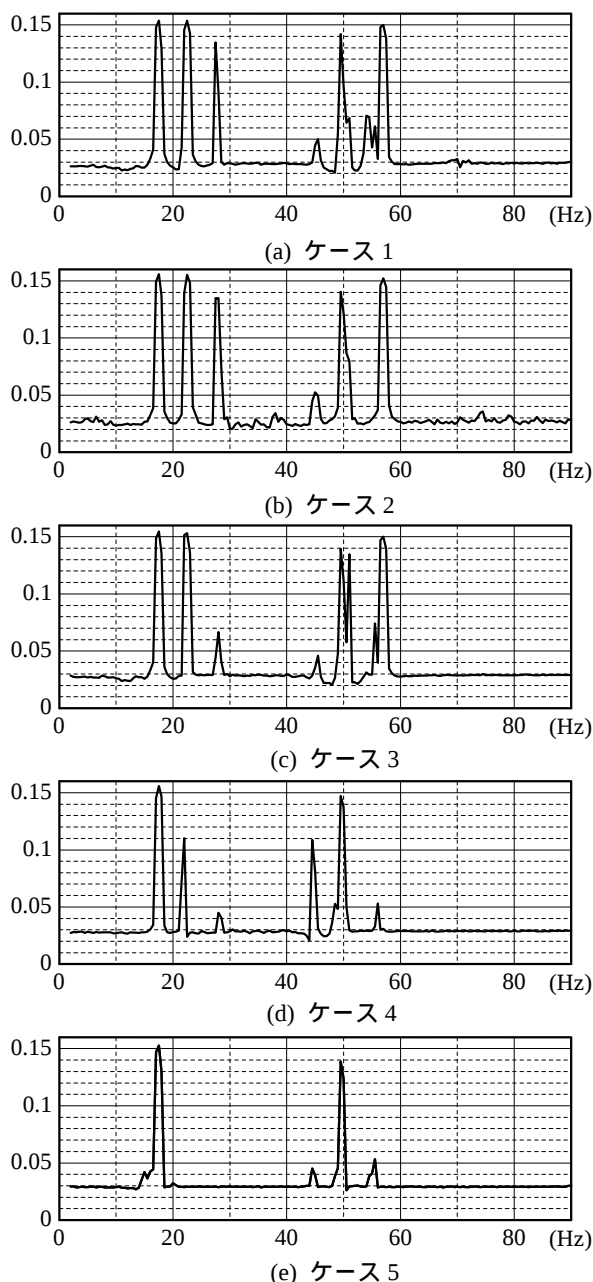


図-2 測点 2 分散値スペクトル