

I - A211 減衰自由振動データに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究

三菱重工業株式会社 正 員 深井 隆史
 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 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。従来は 30 年程度の期間で新橋への架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を測定することによって、何らかの損傷を同定しようとする発想¹⁾は、損傷に伴って橋梁の剛性が低下し、その特性値が変化する可能性が十分に推定し得るため、比較的古くから提案されている。しかし、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く、構造物全体としての剛性低下は微小であるため、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領域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、減衰自由振動データ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、減衰自由振動データから低次の卓越振動数帯を除去し、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の横構の拘束状態を変化させ、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。また実験供試体をモデル化して、横構の拘束条件を変化させた複数のケースに対して時刻歴応答解析を行った²⁾。これらの結果に対して、FFT とデジタルフィルタ³⁾を適用し低次の固有振動数を除去して分散値の計算を行い、実測値および解析値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. 減衰自由振動実験

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 0.85m 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ている。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ている。サンプリング周波数は 1000Hz を用いている。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。

2-2. 固有振動解析および時刻歴応答解析

本研究では、実験供試体の振動特性を把握するために実験供試体をモデル化し固有振動解析・時刻歴応答解析を行った。時刻歴応答解析は Newmark-β 法を用いて解析を実施し、実験値との比較検討を行った。その結果については 3 章に示す。また、固有振動解析において実験供試体の振動モードの確認を行ったところ、ほぼ 100Hz 程度の振動数帯、20 次モード以上において損傷に起因した変化が生じていることが確認された。また、本研究の実験供試体においては、損傷を仮定した際に水平振動モードにその影響が比較的顕著に見られたことも同時に確認された。



写真-1 実験供試体

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。本研究では、制御系設計ソフト MATLAB を用いて FIR 型バンドパスフィルタの設計とそのフィルタリングを行った³⁰⁾。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、

表-1 振動特性一覧表

フィルタ次数を表している。本研究では、カットオフ周波数は、固有振動解析の結果を考慮して 100Hz～500Hz を用いることとした。

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

振動モード	実験値	解析値(鉛直)	解析値(水平)
1 次モード	4.88Hz	4.92 Hz	17.18 Hz
2 次モード	18.80 Hz	20.33 Hz	33.95 Hz
3 次モード	43.92 Hz	44.12 Hz	80.69 Hz

Keywords: 損傷、減衰自由振動、デジタルフィルタ、分散値

北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 TEL:011-706-6172 FAX:011-726-2296

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⁹⁾。

$$\sigma^2_{Var} = \sum_{i=1}^n (x^2(i) - \bar{x}^2) \dots\dots\dots (2)$$

式(2)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。

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、主桁と横構の添接ボルトを解放した、仮想損傷状態について測定を実施した。時刻歴応答解析については、横構の拘束条件を変化させて損傷を仮定した。そのケースを表-2に示す。図-2は、支間中央における健全状態の減衰自由振動実験と時刻歴応答解析による振動波形である。これらを比較すると、比較的近い形の振動波形が得られており、固有振動解析の結果とあわせると本研究で用いた解析モデルは実験供試体の振動特性をある程度正確に再現しているものと考えられる。また、両者においてケースごとに比較を行うと、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った。

次に、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その分散値を計算した。図-3に実験の振動データに対する分散値の計算結果を示し、図-4に時刻歴応答解析の振動データに対する分散値の計算結果を示す。図-3,4に着目すると、健全、損傷の各状態において両者にある程度有意な変化が現れているものと考えられる。本研究においては損傷状態が進むにつれて分散値は減少傾向にあった。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高次の振動に対して吸収的な作用を及ぼしているものと推定される。また、図-5は時刻歴応答解析を行った32節点のデータに対しフィルタリングを行い、分散値を計算して健全状態に対する変化量の比を取りモデル上に分布させたものである。太線は拘束条件を変化させた部材で、図中の丸印が大きくなるほど分散値が健全状態に対して大きく変化していることを示す。図-5に着目すると、多くの部位に対して損傷を仮定したもの

の方が分散値は大きく変化をし、また損傷を仮定した横構に近い節点の分散値が、そのほかのそれと比較して大きく変化していることが確認された。したがって本研究のような手法を用いることにより、橋梁の損傷度をある程度定量的に判定できる可能性を有するものと推定できる。

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、減衰自由振動データ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、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。

実験ならびに解析結果からは、フィルタリング後の波形における分散値に有意な変化が現れていることが確認された。今回のように仮想的な損傷を与えた場合においては、分散値は健全時に比して明らかな差違が生じており、よって橋梁の損傷度をある程度定量的に判定できる十分な可能性を有するものと思われる。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推定される。

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り、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。

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) 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。
- 3) 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。
- 4) The Math Qorks Inc.：Using MATLAB，サイバネットシステム株式会社，1975。
- 5) 星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版会，1974。

表-2 実験供試体ケース一覧

	供試体の状態
case1	健全状態
case2	中央のボルトを解放
case3	片側のボルトを解放
case4	全てのボルトを解放
case5	特定のボルトを解放(解析のみ)

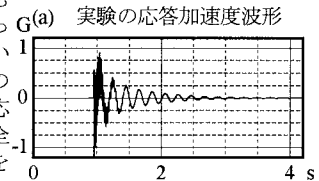
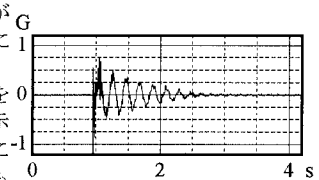


図-2 振動波形

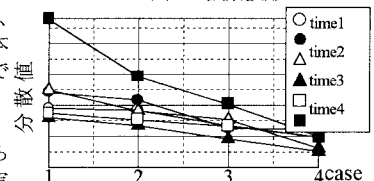


図-3 実験の分散値

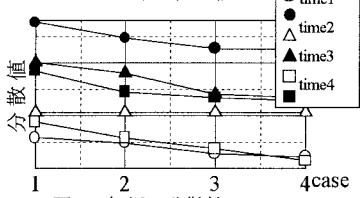


図-4 解析の分散値

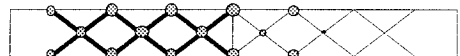


図-5 分散値の変化