

I-A210 時刻歴応答データによる橋梁構造物の損傷同定に関する実験的研究

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
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 及川 昭夫
 (株)三菱重工業 正 員 深井 隆史

1. ま え が き

今日においては、昭和40年代の高度成長期に多数架設された橋梁構造物が供用後30年程度以上経過し、次第に老朽化が目立つものも増加しつつある。特に、近年の交通量の増大や車両そのものの大型化等の影響により、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、この活荷重の増加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。よって、今後は上記のような橋梁に対する維持管理が大きな課題となるが、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は専ら目視にたよる場合が大半であり、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¹⁾。

そこで本研究では、主に鋼橋を対象とした鋼構造物において、ガセットプレート・垂直補剛材等のいわゆる2次部材の溶接部等に生じる損傷に起因す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同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、微小な剛性変化にはあまり追従しない低次の卓越振動数はフィルタを用いて除去し、残留した比較的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行おうとするものである。具体的には、横構を有する2主桁の実験供試体に対して、横構の拘束状態を変化させることにより仮想的な健全・損傷状態を表現し、減衰自由振動実験を行なって所定のデータを得た。実験結果に対して、FIR型デジタルフィルタを適用することにより低次の固有振動数を除去して分散値を計算し、その結果から橋梁構造物の損傷同定における有効性、適用性等に関して検討を試みるものである。

2. 実験供試体

本研究で用いた実験供試体は、2主桁プレートガーダー橋をモデルとした横構を有する支間長11m、幅員0.95mの構造物である。写真-1に実験供試体を示す。健全・損傷状態の設定は、高力ボルトで添接された格点部の拘束条件を変化させることにより行うこととした。なお、主桁と横構はガセットプレートを介して高力ボルト2本を用いることにより接合されている。表-1に実験・解析ケースを示す。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。サンプリング周波数は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、スパン中央において水平方向に4mm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。また、実験に先立ち、固有振動解析を実施して供試体の振動特性を把握した。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ピン結合に変化させることにより仮想的な健全・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当たってはそれら節点の拘束条件を充分考慮に入れる

ような工夫を要した。すなわち、剛性マトリックス **K** および質量マトリックス **M** に関して、上記の健全・損傷状態に解析的に対応するために、それぞれの自由度毎に拘束条件を与えられるように配慮した²⁾。表-2に実験ならび

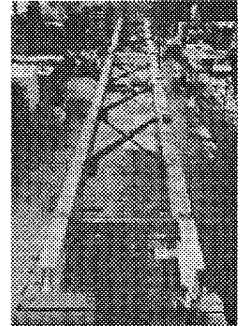


写真-1 実験供試体

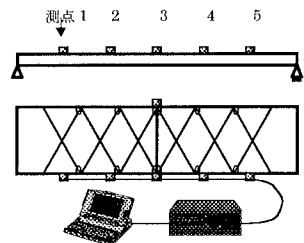


図-1 振動測定システム

表-1 損傷状態の設定

No.	供試体の状態
Case 1	健全状態
Case 2	特定の横構1カ所のボルトを解放
Case 3	スパン中央の格点4カ所を解放

表-2 固有振動数一覧表

Case	mode	鉛直 (Hz)		水平 (Hz)		ねじり (Hz)	
		解析	実験	解析	実験	解析	実験
Case 1	1st	4.924	4.79	11.658	9.14	7.427	5.11
	2nd	20.331	19.36	32.592	32.42	29.123	29.70
	3rd	44.092	41.12	90.661	—	49.745	—
Case 2	1st	4.924	4.79	11.085	9.46	7.427	5.11
	2nd	20.331	19.26	32.658	33.07	29.123	30.57
	3rd	44.092	41.34	90.499	—	49.745	—
Case 3	1st	4.924	4.79	11.123	9.03	7.427	5.11
	2nd	20.331	19.15	32.593	31.66	29.123	29.16
	3rd	44.092	41.34	91.093	—	49.745	—

はそれら節点の拘束条件を充分考慮に入れるような工夫を要した。すなわち、剛性マトリックス **K** および質量マトリックス **M** に関して、上記の健全・損傷状態に解析的に対応するために、それぞれの自由度毎に拘束条件を与えられるように配慮した²⁾。表-2に実験ならび

Keywords: 損傷、同定、減衰自由振動、フィルタリング、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

に解析によって得られた固有振動数の比較を示す。表-2 に着目すると、解析において鉛直・ねじり振動モードは健全・損傷状態とも低次の固有振動数に全く変化が生じていないが、水平方向に関しては損傷の増大に伴って固有振動数が低下していることがわかる。

3. フィルタリングおよび分散値の算定

前述の通り、本研究では減衰自由振動実験によって得られたデータに対して、フィルタリングを行って低次の動的応答を排し、残留した成分の分散値を求めることによって損傷の影響を検討するものである。まず、フィルタリングに関しては、直線位相性を持ち、その設計も容易な FIR 型バンドパスフィルタを用いている。FIR フィルタの入出力関係は以下のように表される。

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

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。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 50Hz～500Hz を用いることとした。また、振動波形に対する分散値は、以下の式で与えられる。

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

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。

4. 実験結果およびその考察

実験結果の一例として、図-2 に各 Case におけるスパン中央の水平方向応答加速度を示す。これらの結果を見る限りにおいては健全・損傷状態で明確な差違は生じておらず、従来と同様に低次の固有振動数のみでは損傷の同定は極めて困難であると思われる。次に、図-3 は測定された水平方向のデータに対し、フィルタリングを行なって分散値を計算した結果である。図-3 に着目すれば、仮想的な損傷が増大するに従い分散値は有意と考えられる変化を示し、その傾向は損傷の増加に対して分散値は減少する形となっている。これは、パスバンド帯に含まれるいくつかの振動モードが剛性の低下に伴って振動数が変化し、パスバンドの外に移行したこと、ボルトの解放によって、ボルト孔や添接板と横構に摩擦が生じ、健全状態では発生した横構固有の振動モードが主桁に伝達されない、あるいはモードそのものが励起されなかったこと等が原因として推定できる。また、図-4 は Case 2 における各測点の分散値をグラフ化したものである。Case 2 においては測点 2 が損傷箇所にも最も近接した測点であり、それに次いで測点 3 が近接したものとなっている。図-4 からは、いくつかの測点で多少の逆転が生じているものの、全体的な傾向は損傷位置の近傍にあるものほど分散値が小さくなっていることが分かる。損傷箇所と分散値の関係については、測定点が損傷箇所により近ければ、分散値の変化は大きくなるのが容易に推定でき³⁾、本研究においてもこの傾向は十分に把握することが可能と考えられる。したがって、さらに多くの測定点を設けて分散値を計算すれば、比較的小さい損傷でも、その発生箇所をある程度特定でき得ると推定され、橋梁構造物の維持管理に適用できる可能性を有するものと思われる。

5. あ と が き

以上のように、本研究は減衰自由振動の測定結果から損傷を同定するための基礎的検討を行うことを目的として、卓越する低次の振動数をフィルタを用いて除去し、残留した比較的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、損傷の影響についての検討を行なったものである。分散値の解析結果からは、仮想的な損傷が増大するに従い分散値は有意な変化を示し、本研究における傾向は損傷の増加に対して分散値は減少することが分かった。また、損傷箇所に近い測点ほど分散値の変化が大きくなるのが判明し、多くの測定点を設けて分散値の計算を行えば、橋梁の2次部材等に生じる損傷でもその発生箇所をある程度特定でき得ると推定され、橋梁構造物の維持管理に適用できる可能性を有すると思われる結果が得られた。

【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) 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。 3) 深井隆史：鋼橋の減衰自由振動データに基づいた損傷同定に関する基礎的研究，北海道大学修士論文，1999。

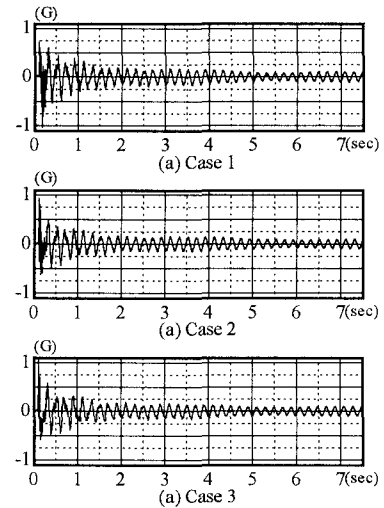


図-2 応答加速度波形

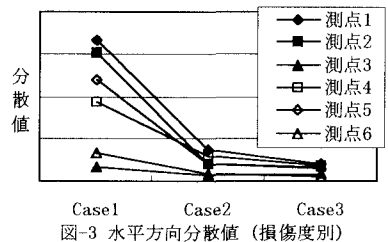


図-3 水平方向分散値（損傷度別）

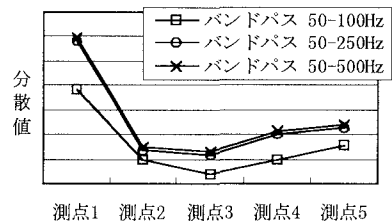


図-4 水平方向分散値 (Case2)