

局部加振法を用いた質量付加による損傷検出評価方法の検討

Investigation of damage detection evaluation by mass addition using a local excitation method

北見工業大学 学正員 ○ 柳原裕平 (Yuhei Yanagihara)
 北見工業大学 正会員 三上修一 (Shuichi Mikami)
 北見工業大学 正会員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
 北見工業大学 正会員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
 北見工業大学 フェロー 大島俊之 (Toshiyuki Ohshima)
 日本仮設(株) 正会員 日向洋一 (Youti Hinata)

1 はじめに

高度経済成長期に建設された多くの橋梁は、建設後50年を経過しようとしており、適切な維持管理により長寿化することが課題となっている。この中で振動計測により実構造物をモニタリングする研究が盛んに行われている。

これまで著者らは圧電アクチュエータを用いた局部加振振動実験によりさまざまな橋梁において損傷位置の特定を行ってきた。坪川ら²⁾が行った損傷検出実験及び高橋ら³⁾が行った損傷検出実験ではその対象橋梁の大きさの違い、損傷の数などから異なる損傷評価手法を用いて損傷検出を行っていた。本研究ではこれまでにやってきた損傷評価手法や解析方法を確認するため、実橋梁構造における損傷評価実験と梁をモデル化した両端固定21質点梁モデルの数値解析とを比較した。今回の実験は再現性を高めるために実際の損傷ではなく、損傷位置に質量を付加して構造を変化させることで損傷を模擬し、損傷評価の比較を行った。

2 損傷検出システムの概要

2.1 実験方法

実験での損傷評価に用いるデータは、構造物に加速度計と加振器を設置し、設置した加振器で局部的にSweep加振を行い、実験橋梁に設置した加速度計で健全状態と損傷状態の応答加速度をそれぞれ測定する。得られた加速度データを次節の損傷評価方法で損傷位置の検出を行った。

2.2 損傷評価方法

健全状態と損傷状態の測点ごとの加速度波形をパワースペクトル密度(以下 PSD と呼ぶ)に変換する。各測点ごとの健全状態と損傷状態の PSD の差を健全状態の PSD で除すことで基準化した式(1)。このデータをマトリックス[D]とした。²⁾

$[D]=[D_i(f_j)]$ は測定位置番号 (i) と解析周波数 (f_j) で表された健全状態と損傷状態の PSD の変化率を表す。 $[D]$ の測定位置(i)毎に周波数方向の要素 $D_i(f_j)$ を合計したベクトルを TC (Total Change)とする(式(2))。

次に、 $[D]$ の同じ周波数(f_j)内で最大の要素を $D(f_j)_{max}$ とし、この最大要素で同じ周波数の要素を式(3)のように除して基準化した重みを $[C]$ とする。 $[C]$ の測定位置 (i)毎に周波数方向の要素 $C_i(f_j)$ を合計したベクトルを DD

$$D_i(f_j) = \frac{|G_i(f_j) - G^*_i(f_j)|}{|G_i(f_j)|} \quad \dots (1)$$

$G_i(f_j)$:健全状態の PSD

$G^*_i(f_j)$:損傷状態の PSD

$$TC = [\sum D_1(f_i) \quad \sum D_2(f_i) \quad \dots \quad \sum D_n(f_i)] \quad \dots (2)$$

$$C_i(f_j) = \frac{D_i(f_j)}{D(f_j)_{max}} \quad \dots (3)$$

$$DD = [\sum C_1(f_i) \quad \sum C_2(f_i) \quad \dots \quad \sum C_n(f_i)] \quad \dots (4)$$

$$DI = TC \times DD \quad \dots (5)$$

(Damage Detection)とする(式(4))。

TC と DD を掛けることにより損傷指数 DI(Damage Index)を算出する(式(5))。DI 値は加速度計ごとに算出され、値が大きい加速度計位置が損傷の影響を受けている可能性が高く、損傷位置を表していると考えられる。

3 実橋梁構造を用いた実験の概要

実験橋梁は桁長:5.950 [m] 全幅:主桁間隔 1.130[m] の 2 主桁鋼板鉄道橋 (図-1、2) を用い、15 個の加速度センサを設置して実験を行った。センサの配置は図-2 のように G1 主桁だけに注目し、垂直補剛材位置とその中間の位置の上フランジに水平方向に設置した。

付加質量は図-3 のように鋼板をクランプで上フランジに固定した。鋼板とクランプの重さは合計 12.44kg とした。損傷位置は単損傷でとして図-2 に示す 2ch、6ch、10ch、14ch センサ付近に付加質量を設置して実験を行った。これら 4 つの損傷パターンを S2、S6、S10、S14 と表記する。複数損傷は S14 を固定し S2 にも付加質量を追加したパターンを S2-S14 と表記する。同様に S6-S14、S10-S14 と 2 つ目の付加質量を移動させることで複数損傷を表す。これら単損傷、複数損傷の 2 つの損傷ケースにおいて実験を行った。

加振の条件は1~800Hzの Sweep 加振、サンプリングレートは 10000Hz、加振時間 20 秒、アクチュエータの初期荷重 50N で行った。加振位置は桁中央センサ 8ch 下側の腹板中央とした。



図-1 橋梁構造物 写真

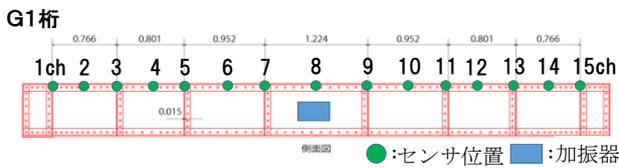


図-2 橋梁構造物 側面図



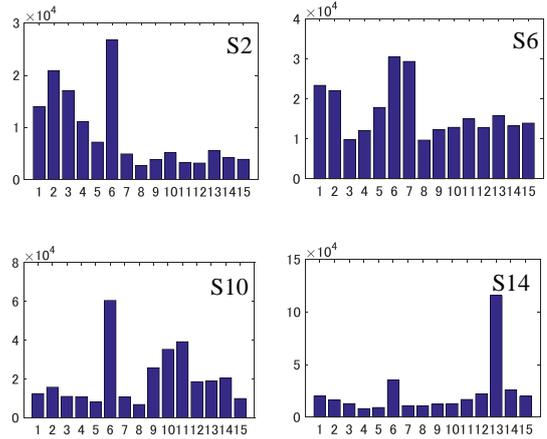
図-3 付加損傷 写真

4 実験結果

損傷パターンを S2~14 の単損傷の結果を図-4 に示す。

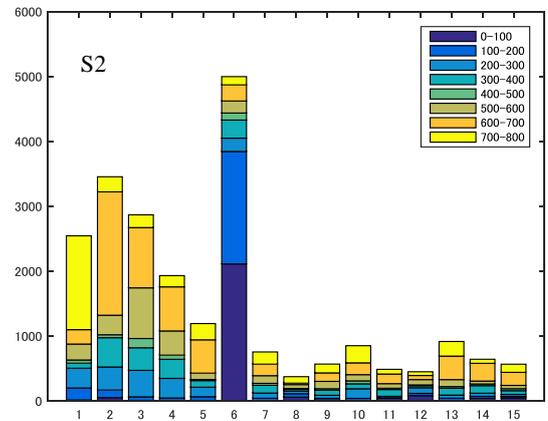
S6、S14 の場合は損傷位置周辺に大きな DI 値が現れ損傷の影響を受けていると考えられるが、損傷位置が S2、S10 の場合は損傷位置ではない 6ch に大きな DI 値表れた。この結果の要因を調べるため 0~800Hz の PSD データを 100Hz 毎に分けて DI 値を算出することで周波数の影響を確認した。図-5 は損傷パターン S2 のときの結果である。

その結果 0~200Hz までのデータで 6ch の DI 値が顕著に大きくなっていることがわかる。この傾向は他の損傷でも同様で 0~200Hz で 6ch に大きな DI 値が出ている。0~200Hz の範囲における健全状態と損傷状態 PSD の純粋な差が非常に小さく、この範囲における Sweep 加振による振動が橋梁振動を励起していないと考えられる。このため 0~200Hz のデータを解析から除外して再度 DI 値を求めることにする。その結果を図-6 に示す。



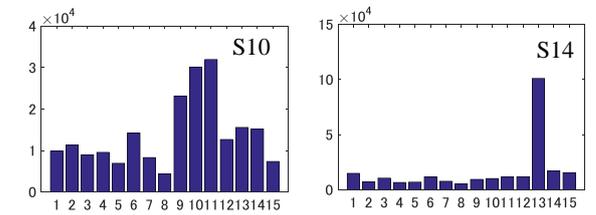
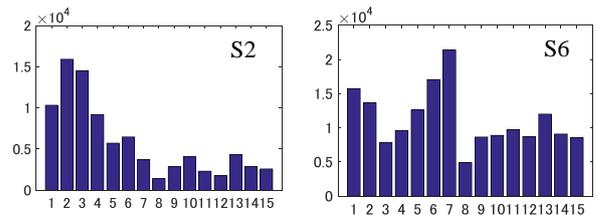
(縦軸:DI 値、横軸:センサ番号)

図-4 単損傷による実橋梁の DI 値 (0~800Hz)



(縦軸:DI 値、横軸:センサ番号)

図-5 DI 値の積上グラフ (S2)

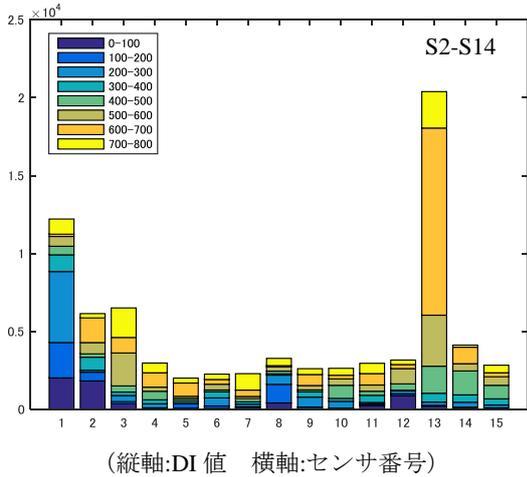


(縦軸:DI 値、横軸:センサ番号)

図-6 単損傷による実橋梁の DI 値 (200~800Hz)

いずれの損傷パターンでも 6ch の DI 値は減り、本来損傷があるセンサ(ch)付近で DI 値が最大になった。周波数範囲を絞ることで損傷検出精度が向上した。

複数損傷も同様に積上グラフ (図-7) で DI 値を調べると 0~300Hz までの間で 1ch に大きな DI 値が現れた。



(縦軸:DI 値 横軸:センサ番号)
図-7 DI 値積上グラフ (損傷 S2-S14)

その周波数範囲の 0~300Hz を取り除いて解析した DI 値を図-8 に示す。300~800Hz の PSD で求めた結果 13ch に大きな変化が現れ、他の損傷がわかりにくい結果となった。しかし、明確ではないがもう 1 方の損傷位置においてもわずかながら DI 値の上昇が見られた。そこで 13ch の変化で顕著に大きい 600~800Hz のデータを削除して DI 値を求めた結果 (図-9)、2 つ目の損傷の変化をより大きく捉えることができた。この結果から損傷評価式は 1 つのものが大きく出てしまうため 2 つ以上の検出が困難になるといえる。次章で、この実験と同様なモデル化を行った数値解析を行い、損傷検出の傾向を確認した。

5 多質点梁モデル解析

5.1 解析の概要

解析モデルは、質点 m_i と減衰を有するばね要素 (ばね定数 k_j 、減衰係数 c_j) で結合した両端固定 21 質点の梁モデル (図-10) を用いて解析を行った。このモデル化でも損傷の変わりに構造の変化(質量付加)として質点の質量を変化させて構造の変化点を検出した。

数値解析は両端固定 21 質点系の運動方程式を用い、解析対象を周波数領域に変換して伝達関数の詳細解析を行った。解析周波数内で入力外力を一定間隔ごとに周波数をシフトし解析することで Sweep 波の加振を模擬した。

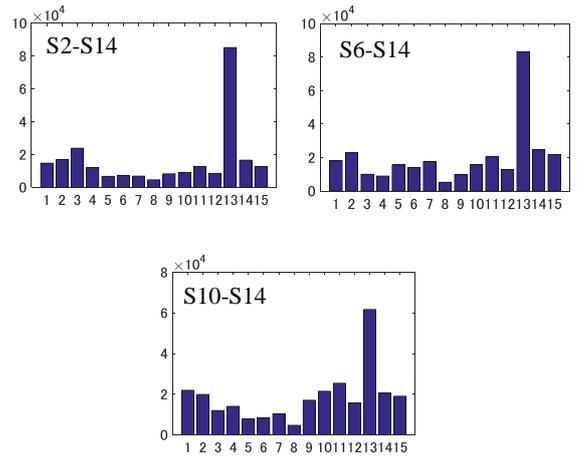
この解析から得られた伝達関数を PSD (G_i) の代わりとして DI 値を算出した⁴⁾。

5.2 解析条件

数値解析は実際の橋梁構造物のデータを参考に作成した。解析に用いた質量とばね定数を表-1 に表す。減衰係数は $c_j = 0.001 \times k_j$ とし、ばね定数は EI/L (EI : 曲げ剛性、 L : 長さ) で算出し、以下の解析ケースについて検討を行った。

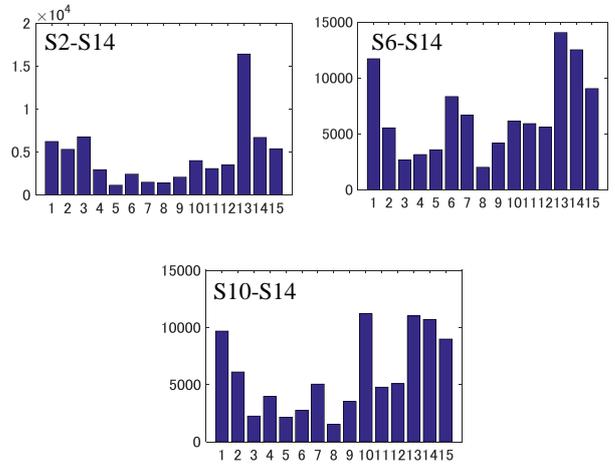
質量変化は、質点の質量を 20% 増加させ、梁の 1 質点に質量付加して損傷を模擬する単損傷と 2 質点に質量付加して損傷を模擬する複数損傷の数値解析を行った。

加振位置は質点 m_{11} 、単損傷は質点 m_2 、 m_7 、 m_{14} 、 m_{20} をそれぞれ質量付加させた 4 パターンの解析をした。次に複数損傷は質点 $m_2 - m_{20}$ 、 $m_7 - m_{20}$ 、 $m_{14} - m_{20}$ に質量付加する 3 パターンで解析した。



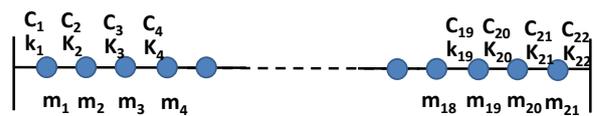
(縦軸:DI 値 横軸:センサー番号)

図-8 複数損傷による実橋梁の DI 値 (300-800Hz)



(縦軸:DI 値 横軸:センサ番号)

図-9 複数損傷による実橋梁の DI 値 (300-600Hz)



(質点 m_i ばね定数 k_j 減衰係数 c_j)

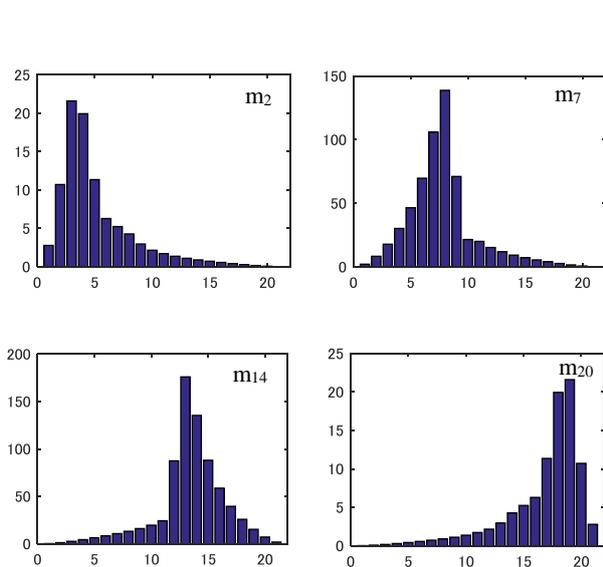
図-10 21 質点梁モデル

表-1 梁モデルの詳細

	質点質量 m (kg)	ばね定数 (N/m)
梁モデル	40.187	653.092×10^6

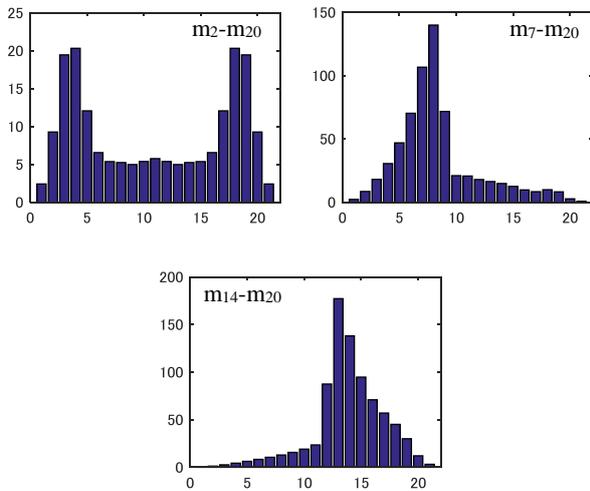
6. 解析結果

単損傷の 4 ケースで解析した結果を図-11 に示す。損傷評価の結果では損傷位置に最も大きな DI 値が出るのではなくの損傷位置の隣の質点に大きな DI 値が現れ、さらに損傷付近における質点の DI 値も全体的に大きくなっており、加振位置の影響と考えられる。



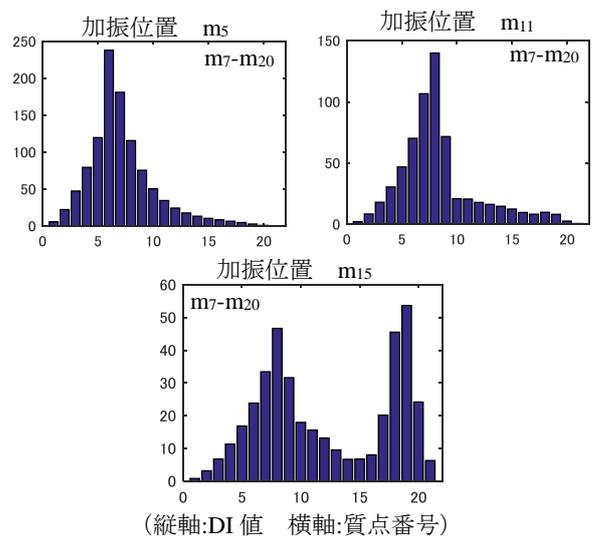
(縦軸:DI 値 横軸:質点番号)
図-11 数値解析単損傷の DI 値

次に複数損傷では加振位置に近い損傷が大きな DI 値として現れる傾向にあり、2つの損傷検出ができたのは2つの損傷位置が加振位置から同じ距離にある m2-m20 の結果だけであった (図-12)。



(縦軸:DI 値 横軸:質点番号)
図-12 数値解析複数損傷の DI 値

加振位置と損傷位置の関係から 2 つの損傷検出できなかった可能性があるため、加振位置を移動させた場合の変化について解析した。損傷位置が m7-m20 として、加振位置を質点 m5、m11、m15 と変化させた結果を図-13 に示す。加振位置を移動させ m15 で加振することで2つ損傷 m7-m20 を確認することができた。以上のことより設置する加振位置の近くの損傷で大きな DI 値が出やすく損傷が2つの場合の検出は2つの損傷と加振位置との距離が同程度である場合に検出ができた。このことから、2 つの損傷検出が困難になる場合があることを確認した。



(縦軸:DI 値 横軸:質点番号)
図-13 数値解析の複数損傷の DI 値(加振位置移動)

7. まとめ

本研究では実験と数値解析の結果を比較し、損傷検出の傾向を確認した。

単損傷の場合、周波数範囲を絞ることで実験と数値解析の損傷指数の結果は同様の傾向に表れた。

複数損傷の場合、数値解析の結果は加振位置と損傷位置の関係が同程度の距離にあったときのみ検出できた。実際の実験では片側の損傷指数が強く出てしまうので 2 つ検出は困難である。数値解析において加振点移動、周波数範囲を絞ることで2つ目の損傷の DI 値に変化が現れた結果などから、加振位置や周波数範囲の関係を精査して検出精度を向上していく必要がある。

周波数範囲は積上グラフなどで周波数間隔ごとの変化を確認し周波数範囲を絞ることで精度向上につながる。0 ~ 300Hz 付近の周波数に問題があるのは Sweep 加振 0 ~ 300Hz 付近の振動が励起されておらず大きな振動になっていないため、TC に異常が出てくる可能性がある。実験ではそれらチェックをすることが検出精度向上につながると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，土木学会，2000。
- 2) 坪川，大島，山崎，三上，宮森：圧電アクチュエータの局部加振による実橋梁の微小欠陥検出に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集 第 1 部，55 巻，905-905，I-453 頁，2010。
- 3) 高橋，大島，三上，宮森，山崎：局部加振法による小規模鋼橋の微小欠陥検出の検討，土木学会北海道支部年次技術研究発表会，Vol.69A、2013。
- 4) 高橋，大島，三上，宮森，山崎：局部加振法による微小構造欠陥の検出法に関する研究：土木学会年次学術講演会講演概要集 第 1 部，I-053，2013。
- 5) 宮森，大島，三上，山崎，高橋：局部加振法による梁部材の微小欠陥検出に関する数値解析，構造工学論文集，Vol.59A，2013。