

多質点系モデル解析を用いた局部加振法による欠陥検出評価方法の検討

Investigation on detect dition estimation of using Numerical analysis of malti mass model

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)

1 はじめに

現在建設されている橋梁の多くは高度経済成長期に建設されており、建設されてから数十年経過した現在では構造物になんらかの損傷が生じていると考えられる。これらの使用限界を超える構造物すべてを建て替えることは我が国の財政状況では困難である。そのため構造物の老朽化に対して適切な維持管理と長寿命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¹⁾。

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部材において損傷位置の特定を行ってきた。坪川らが行った損傷検出実験²⁾及び高橋らが行った損傷検出実験^{3)~5)}ではその対象橋梁の大きさの違いなどから異なる損傷評価方法を用いている。しかし損傷評価手法をどのように使い分ければよいのか詳細な検討を行っていない。本研究では既往の研究の損傷評価方法の違いを確認するために小型、中型、大型の規模の異なる桁をモデル化した両端固定21質点梁モデルにて数値解析を行い、これまで実橋梁で行った損傷検出評価方法の検討を行った。

2 欠陥検出概要

2.1 実験方法

実験橋梁に加速度計と加振器（アクチュエータ）を設置した。設置した加振器で局部的にSweep加振を行い、実験橋梁各部に設置した加速度計にて加速度を計測する。損傷がない状態（以下、健全状態と呼ぶ）と損傷がある状態（以下、損傷状態と呼ぶ）の応答加速度をそれぞれ測定する。

2.2 損傷評価方法

健全状態と損傷状態の測定点ごとの加速度波を高速フーリエ変換により、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 $D_i(f_j)$ とする。各測点毎の健全状態と損傷状態の PSD の差を基準化したデータを D マトリックス [D] とする。この基準化には 2 つの方法が考えられており、ひとつは $D_i(f_j)$ を PSD の健全時の値で除することで求められる式(1)²⁾と、もうひとつは $D_i(f_j)$ を健全時と損傷時の PSD の最大値を比較し小さい方で除算する式(2)^{3)~5)}、この 2 つの方法が考えられている。これは各加速度計における変位を基準化するために行う。今回この 2 つの方法の式(1)を D1、式(2)を D2 とする。

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

$$D_i(f_j) = \frac{|G_i(f_j) - G^*_i(f_j)|}{|G(f_j)_{max}, G^*(f_j)_{max}|_{min}} \quad \dots (2)$$

$D_i(f_j)$: PSD の変化率を評価する式

$G_i(f_j)$: 健全状態の PSD

$G^*_i(f_j)$: 損傷状態の PSD

PSD 解析データを上記の式で計算した変化率を設置加速度計番号(i)と解析周波数(f)ごとに算出し、マトリックス[D]とする。マトリックス[D]を行列表示すると式(3)のようになる。また式(4)のようにマトリックス[D]の周波数方向に合計したマトリックスを本研究では TC (Total Change)と呼ぶ。

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_2(f_1) & \dots & D_n(f_1) \\ D_1(f_2) & D_2(f_2) & \dots & D_n(f_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_1(f_m) & D_2(f_m) & \dots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \quad \dots (3)$$

$$TC = [\sum D_1(f_i) \quad \sum D_2(f_i) \quad \dots \quad \sum D_n(f_i)] \quad \dots (4)$$

次に、マトリックス[D]において周波数毎に比べ、同じ周波数内で PSD の変化率が最大の要素を検出する。この最大の要素で各周波数の要素を基準化したデータを C マトリックス[C]とする。この基準化にも 2 つの方法があり、式(5)のように検出された加速度チャンネルの変化率ですべての加速度チャンネルの変化率を除算する方法^{2)~5)}と式(6)のように最も大きい加速度チャンネルを 1 としそれ以外を 0 とする方法^{2)~5)}がある。それぞれ C1、C2 と表記しマトリックス[C]を行列表示したものが式(6)となり、マトリックス[C]を周波数ごとに合計したマトリックスを本研究では DD (Damage Detection) (式(8))と呼ぶ。

$$C_i(f_j) = \frac{D_i(f_j)}{D(f_j)_{max}} \quad \dots (5)$$

$$C_i(f_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad \cdots (6)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1(f_1) & C_2(f_1) & \cdots & C_n(f_1) \\ C_1(f_2) & C_2(f_2) & \cdots & C_n(f_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_1(f_m) & C_2(f_m) & \cdots & C_n(f_m) \end{bmatrix} \quad \cdots (7)$$

$$DD = [\sum C_1(f_i) \quad \sum C_2(f_i) \quad \cdots \quad \sum C_n(f_i)] \quad \cdots (8)$$

マトリックス[D]のチャンネルごとの合計値である TC と、マトリックス[C]のチャンネルごとの合計値である DD を掛けることにより損傷指数(Damage Index)を算出する。DI の値はチャンネルごとに算出され、値が大きい加速度計周辺に損傷の影響を受けている可能性が高いことを表している。本研究では式(4)と式(8)をそのまま掛け合わせたものを DI0 と呼ぶ。また、実験で算出された DI0 では全チャンネルで大きく損傷指数が出る傾向にあったため、損傷指数をより明確にする手法を施した。TC の標準偏差を δ 、DD の標準偏差を λ と定義する。TC 引く 2δ を SD2、DD 引く 2λ を SC2 と定義する。SD2 と SC2 をかけ合わせた値を損傷指数 DI2 として算出する。実験による損傷評価は DI2 の値で行った。

3 実験橋梁による実験

3.1 実験内容

実際に橋梁で測定した加速度を用いて損傷検出手法の検討を行う。実験橋梁に加振器（アクチュエータ）を設置する。設置した加振器で Sweep 波による局部加振を行い、加速度計にて加速度を計測して、健全時と損傷時の加速度応答波形を得る。対象橋梁は過去の研究^{2)~3)}で損傷評価方法に違いのある2つの加速度データについて検討した。

3.2 実験橋梁評価方法

実験橋梁の損傷評価は図-1、図-2 に示すような形式であり諸言は下記に示す。

実験橋梁 A では D1-C1 より損傷評価ができることが既往の研究からわかっており実験橋梁 B では D2-C1 により損傷評価することができる。このように大きさの変化により損傷評価式が変わっているため検証を行っている式を用いた場合での損傷評価の違いを確認する。

実験橋梁 A²⁾ の諸言

形式：4 径間連続曲線鋼桁橋

橋長：119.4[m]（実験は第4 径間を用いた図-1）

全幅：9.700[m]

16ch 付近の腹板にて加振、損傷は 4ch、6ch

実験橋梁 B³⁾ の諸言

形式：2 主桁鋼板鉄道橋（図-2）

橋長：5.950 [m] 全幅：1.130 [m]

腹板中央にて加振を行い、損傷は横構 L2

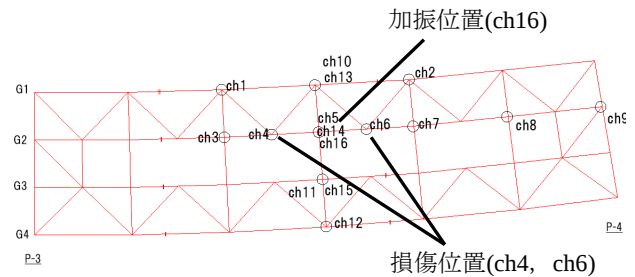


図-1 実験橋梁 A 平面図

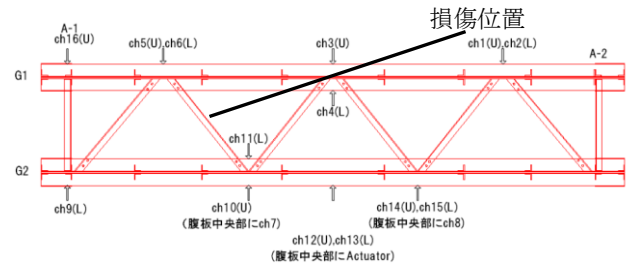


図-2 実験橋梁 B 平面図

3.3 実験結果

実験により得られた加速度波形より PSD を算出、式(1)、式(2)にてマトリックス[D]を求め式(5)式(6)にてマトリックス[C]を算出し、DI2 を算出した。D1-C1、D1-C2、D2-C1、D1-C2 の4パターンによる実験橋梁 A の結果を図-3 に示す。

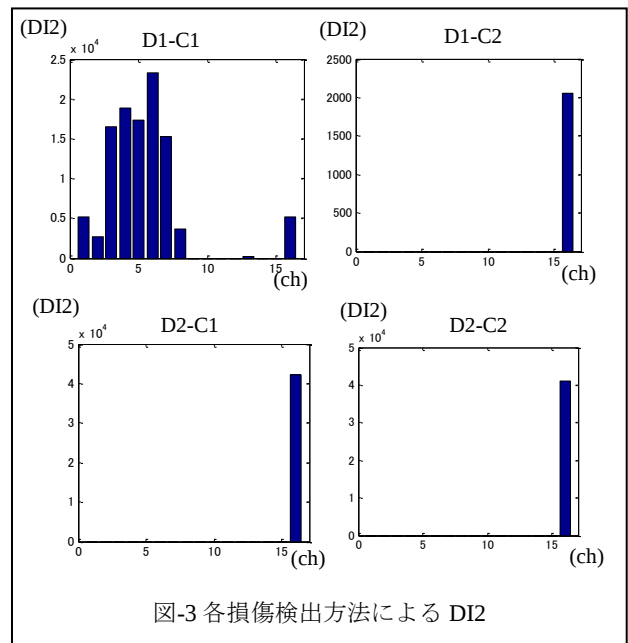


図-3 各損傷検出方法による DI2

実験橋梁 B では D2-C1 にて損傷を特定することができたが実験橋梁 A では D1-C1 では損傷付近の4、6chに損傷が表れ、ほかの結果では加振位置周辺の16chに損傷があると評価された。このことから単一の損傷評価方法で求められないケースを確認した。

4 多質点梁モデル解析の概要

4.1 解析内容

解析モデルは質量をばね定数と減衰係数で結合した両端固定 21 質点の梁モデルを用いて損傷検出を行う。損傷はばね定数の剛性低下で表し、損傷個所のばね定数を 80%まで低下させたモデルを図-4 に示す。



図-4 21 質点梁モデル

丸が質点 m_i で結線はばね定数 k_i と減衰係数 c_i とする。

数値解析は運動方程式から出発し、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う。解析周波数域内にて入力外力を一定間隔ごとにシフトし解析を行うことで Sweep 波の加振を模擬し、伝達関数を PSD の代わりとして用いた⁶⁾。

4.2 解析条件

数値解析は実際の橋梁や鋼材のデータを参考に小型、中型、大型の 3 パターンに分け、その質量、剛性の値を用いて行った。質点とばねにモデル化した数値解析に用いた値を以下の表-1 に示す。減衰係数は $c_i = 0.001 \times k_i$ とした。

表-1 3 パターンの梁モデル

	各質点質量 (kg)	剛性係数(N/m)
モデル A(小型)	10.08	35.897×10^9
モデル B(中型)	40.187	653.092×10^6
モデル C(大型)	225.64	8.82×10^6

以下の 3 つの解析ケースについて検討を行った。

- (1) 損傷とする場所は支点と質点 m_1 を結ぶばね定数 k_1 を低下させた。加振位置は質点 5 の位置で加振を行った。その後 2 章で説明した D1、D2、C1、C2 を用いて損傷評価を行った。
- (2) 梁モデル C を用いて加振位置を質点 m_5 の場所にし、損傷個所を $k_1 \sim k_{21}$ 間を 4 間隔で変化させて損傷評価を行った。
- (3) 損傷位置を k_9 として、加振位置を質点 m_5 から質点 m_{15} まで 2 質点間隔で移動させて得られた DI0 の平均をとり損傷評価を行った。

5 解析結果

解析ケース 1 では 3 パターンの梁モデルで損傷評価計算におけるマトリックス[D], [C]の各パターン D1-C1、D1-C2、D2-C1、D2-C2 を用いて DI0 を算出した。損傷評価の結果を図-5, 6, 7 に示す。図-5 はモデル A、図-6 はモデル B、図-7 はモデル C の結果を示す

解析ケース 1 の中型のモデル B の場合 D1 の式を用いた場合のみ図-6 のように質点 m_3 で損傷指数が現れた。図-5~図-7 の D1-C1 のグラフを見ると大型のモデルになると損傷が顕著なものになることがわかる。ほかの梁モデルではどの損傷検出評価方法を用いても損傷のある質点 m_1 で損傷指数が大きく表れた。

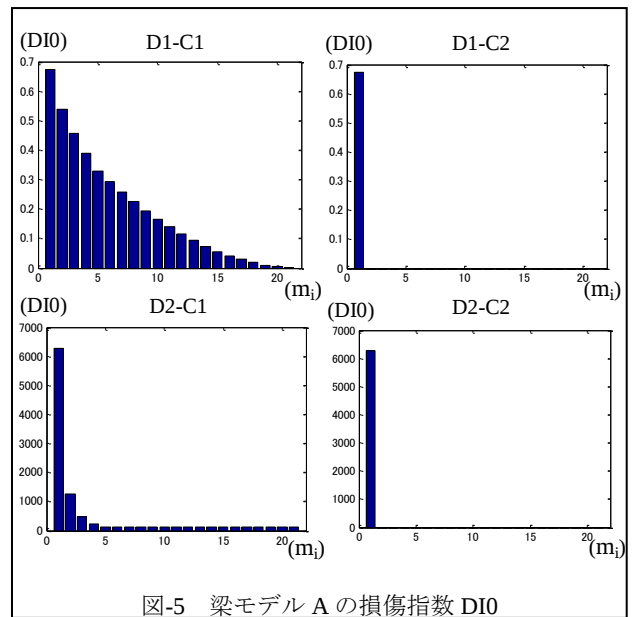


図-5 梁モデル A の損傷指数 DI0

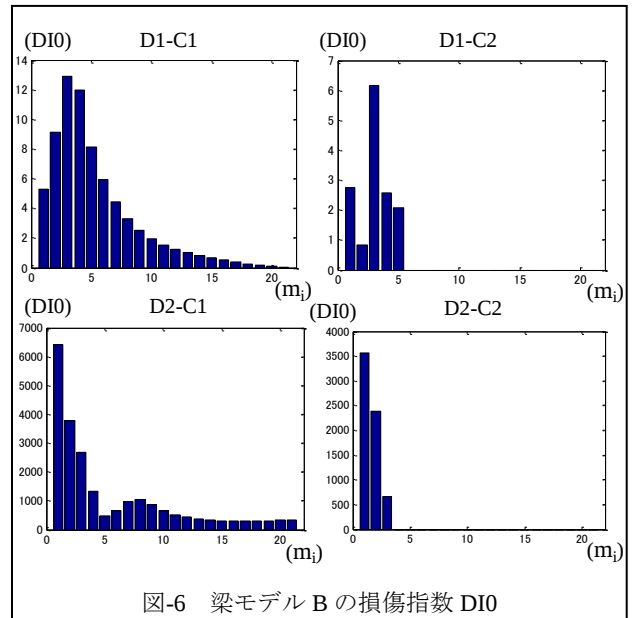


図-6 梁モデル B の損傷指数 DI0

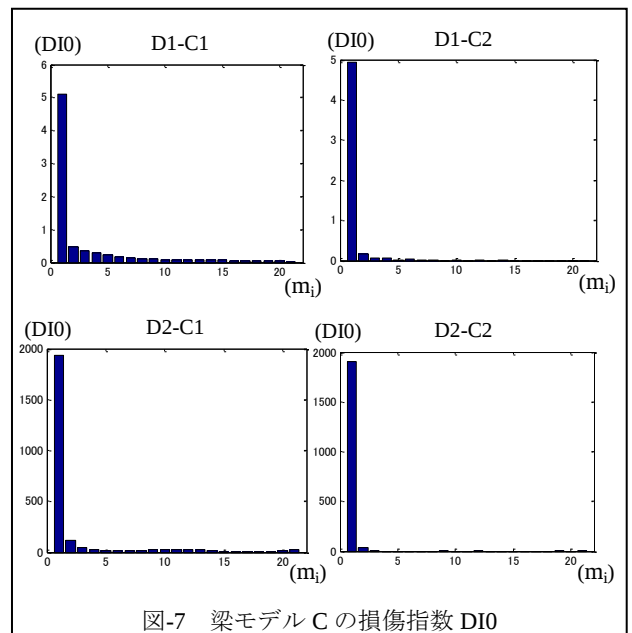
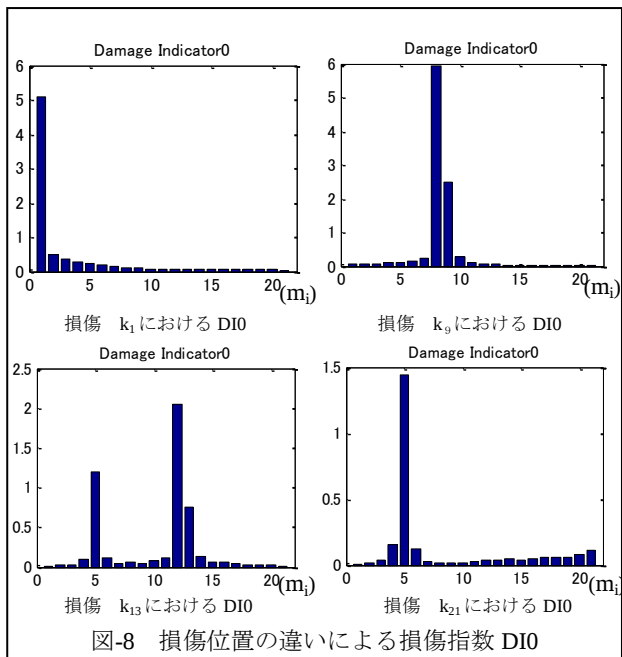
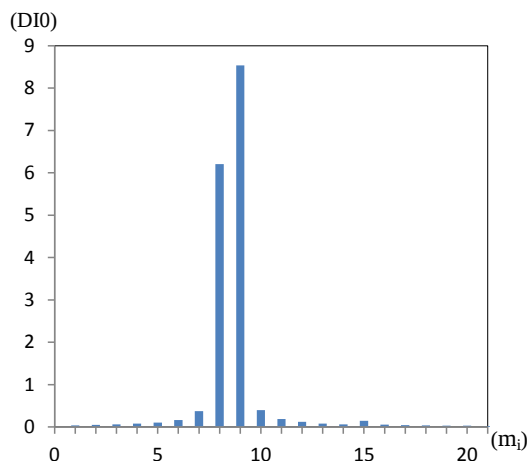


図-7 梁モデル C の損傷指数 DI0



解析ケース 2 では損傷評価方法による違いが見られなかったので D1-C1 を用いた評価結果を図-8 に示す。

損傷位置が k_1 から k_9 まで変化させた結果ではその損傷位置だけに DI0 が大きく現れたが、 k_{13} から k_{21} では加振位置の質点 m_5 にも DI0 が表れ、特に k_{17} と k_{21} では損傷位置に DI0 は現れず、加振位置のみに DI0 が現れた。このことから損傷位置が加振位置から離れると検出するのが困難であり、損傷位置の近くで加振させる必要がある事が分かった。しかし実際に損傷位置を知ることはできないため加振位置を移動しその損傷指数の平均値で損傷検出評価を行うこととした(解析ケース 3)。



解析ケース 3 で求めた移動加振の平均を図-9 に示す。図-9 は損傷検出評価計算の D1-C1 での結果で、他の評価式を用いた場合でも同様の結果が得られた。移動加振平均の損傷評価により質点 m_9 と質点 m_8 に損傷指数が大きく現れた。損傷は k_9 で質点 m_9 と質点 m_8 を結ぶ梁であるため正しく損傷評価が行われている。損傷指数が

質点 m_9 から左側の加振では質点 m_8 に大きく損傷が見られ、右側では質点 m_9 が大きくなっていったため右側の加振データが多いことで質点 m_9 が最も大きな差となって表れた。

6 まとめ

本研究は既往の研究で行った実橋梁の損傷検出手法の有効性を確認するため単純な 21 質点梁モデルにて損傷評価を行った。中型のモデルでは評価式のよって損傷位置とは異なる位置に損傷指数が現れた。加振位置と損傷位置の関係では加振位置の損傷指数が最も大きくなる現象が見られ、損傷位置が明確に検出できない場合がある。

実橋梁で行った損傷評価方法によって正しく結果が出ないケースが見られるが本研究により確認した解析ケース 3 の移動平均法を用いることでさらに損傷検出の精度を高めることが確認できた。

今回の研究では損傷検出手評価法において数値解析ではその違いを明確に表すことができなかった。しかし実橋梁での損傷検出手法の違いでは損傷検出できないケースが存在する。損傷検出手法の使用範囲を確かめるためにも今後、梁モデルの質量変化、剛性変化、減衰変化による損傷評価指数の変化をより細かく調べることや詳細なモデルにて損傷評価をする予定である。

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，Vol69A，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) 高橋，大島，三上，宮森，山崎：局部加振平均法による小規模模鋼橋の微小構造欠陥の検討，土木学会北海道支部年次技術研究発表会，Vol70A，2014.
- 6) 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.