

局部加振法のための多質点系モデルを用いた損傷検出評価方法の検討

北見工業大学大学院	学生員	○柳原 裕平	北見工業大学	正会員	三上 修一
北見工業大学	正会員	山崎 智之	北見工業大学	正会員	宮森 保紀
北見工業大学	フェロー	大島 俊之	日本仮設(株)	正会員	日向 洋一

1 はじめに

現在使用中の橋梁の多くは高度経済成長期に建設されており、建設後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り、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いたが、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手法の違いを確認するため規模の異なる桁(大型、小型)をモデル化した両端固定21質点梁モデルに2箇所⁴⁾の損傷がある場合の数値解析を行い、これまで実橋梁で行った損傷検出評価手法の検討を行った。

2 損傷検出概要

2.1 実験方法

実験での損傷評価は、実験橋梁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、実験橋梁各部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で欠陥検出を行った。

2.2 損傷評価方法

健全状態と損傷状態の測定点ごとの加速度波形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 の差を基準化したデータ ($D_i(f_j)$) をマトリックス [D] とする。この基準化には 2 つの方法が考えられており、式(1) は健全時と損傷時の PSD の差を健全時の

PSD で除した方法²⁾ と、式(2)は PSD の差を同じ周波数 (f_j) 内で加速度計 (i) の健全時、損傷時の PSD の最大値の小さいほうで除した方法³⁾ の 2 つの方法がある。本文ではこの 2 つの方法の式(1)を D1、式(2)を D2 と表記する。

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

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

$D_i(f_j)$: 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

[D] は加速度計番号 (i) と解析周波数 (f_j) で表された健全状態と損傷状態の変化率を表すデータとなる。[D] の加速度計 (i) 毎に周波数方向の値を合計したベクトルを TC (Total Change) と呼ぶ。

次に、[D] において、同じ周波数 (f_j) 内で PSD の変化率が最大の要素 $D(f_j)_{max}$ を検出し、この要素 $D(f_j)_{max}$ で各加速度計番号の要素を除して基準化したデータ (式(3)) をマトリックス [C] とする。[C] の加速度計 (i) 毎に周波数方向に合計したベクトルを DD (Damage Detection) と呼ぶ。

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

TC と DD を掛けることにより損傷指数 DI (Damage Index) を算出する。DI 値は加速度計ごとに算出され、値が大きい加速度計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。

3 多質点梁モデル解析の概要

3.1 解析内容

解析モデルは、質点 m_i を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-1 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、損傷箇所のばね定数を 20% 低下させた。

キーワード：パワースペクトル密度, 局部加振法, 損傷検出評価方法

連絡先：〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地 TEL(0157)26-9471 (三上修一)

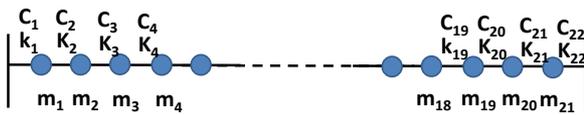


図-1 21 質点梁モデル

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う。解析周波数域にて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 を算出した⁴⁾。

3.2 解析条件

数値解析は実際の橋梁データを参考に大型、小型 (モデル A、B) の 2 パターンに分け、その質量とばね定数は表-1 の値を用いて行った。減衰係数は $c_j = 0.001 \times k_i$ とし、ばね定数は EI/L (EI : 曲げ剛性、 L : 長さ) にて算出し、以下の解析ケースについて検討を行った。

損傷は、ばね要素の剛性低下により模擬し、梁の 2 箇所の要素を損傷位置とした。加振位置は m_{10} 質点、損傷位置は k_{18} を固定とし、 k_3 、 k_6 、 k_{11} をそれぞれ損傷させた 3 ケースを k_3 - k_{18} 、 k_6 - k_{18} 、 k_{11} - k_{18} と呼び、解析によって損傷評価手法の違いを検討した。

表-1 2 パターンの梁モデル

	質点質量 m (kg)	ばね定数 (N/m)
モデル A(大型)	225.64	8.82×10^6
モデル B(小型)	40.187	653.092×10^6

4 解析結果

対象モデル A について 3 ケースで解析した結果の一部を図-2 に示す。D1 を用いた損傷評価手法では損傷位置から外側の位置にも損傷指数が大きく現れ、損傷の外側に影響を与える傾向にある。図-2 (a), (c))。D2 を用いた評価手法では PSD の差が大きい質点をより大きく見せる手法をとっている。2 つの損傷の PSD の差が同程度である場合 2 つの損傷が特定できたが (図-2 (b))、PSD の差に違いがある場合は差の大きい片側にしか現れない結果になった (図-2 (d))。

モデル B についても同様の解析を行い、その結果の一部を図-3 に示す。小型モデルでは全体を通して広い範囲で損傷による影響が見られた。図-3 (a) と (b) を見ると D1 に比べ D2 のほうが k_{11} の位置における損傷指数が顕著に現れた。

5 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

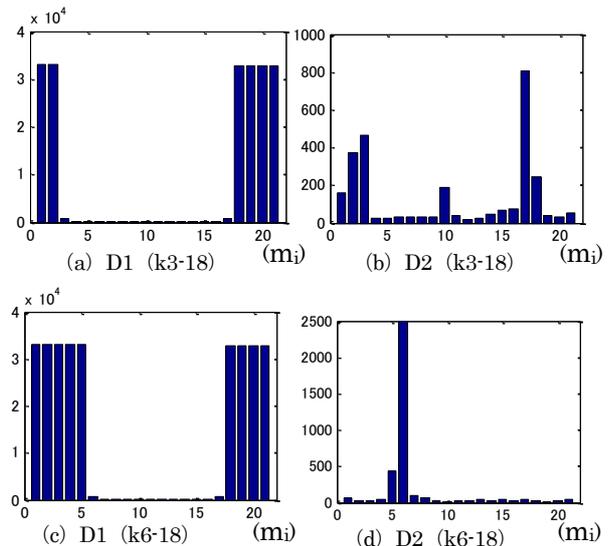


図-2 梁モデル A による DI

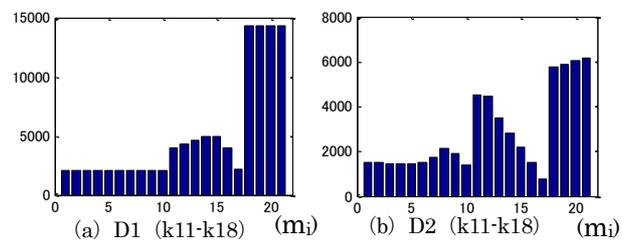


図-3 梁モデル B による DI

有効性を確認するため単純な 21 質点梁モデルで損傷評価を行った。

今回の研究では大型モデルを用いた場合、個々の質点を基準化する D1 では全ての損傷を捉えることができたが、損傷位置より外側にも影響が現れた。小型橋梁を用いた場合では D2 でより顕著な損傷評価を行うことができた。これは全体の質点における最大値で基準化しているため損傷位置の PSD の差に変化の少ない小型橋梁で特定できた。本解析で 2 つの損傷検出方法の特徴をつかむことができた。今後は解析結果を確かめる上でもモデルに対応させた実橋梁による実験を行い損傷検出方法の検討する必要がある。

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, I-453, 905-905, 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) 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.