

鉄道廃線橋梁を用いた局部加振法による損傷検出の研究

Research on damage detection of abolished railway bridge by using local excitation method

北見工業大学 学正員 ○坪川良太
北見工業大学 フェロー 大島俊之
北見工業大学 正員 三上修一
北見工業大学 正員 宮森保紀
北見工業大学 正員 山崎智之

1. まえがき

戦後の国土復興期とその後の高度経済成長期に作られた社会基盤施設は、建設されてから 50 年以上経過しており、何らかの損傷を生じているものもある。そのため、目視点検以外の簡便かつ容易な性能評価方法の確立が必要である。本研究では、平成 18 年に廃線となったふるさと銀河線の鉄道橋梁を使用して実験を行っている。実験橋梁に積層圧電アクチュエータを使用して局部加振実験を行い、振動特性の変化を測定・解析して、損傷を同定する。実験結果から積層圧電アクチュエータによる局部加振法が鋼構造部材の損傷検出に有効であることを検証する。ここでは解析時に注目周波数の違いについて検証を行った。



図-1 実験橋梁(A-2 から)

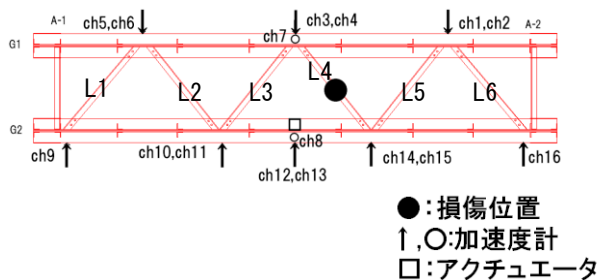


図-2 実験橋梁平面図

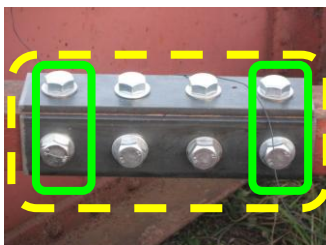


図-3 損傷状況(L4)

2. 実験概要

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。設置した加速度計で実験橋梁を局部加振し、

加速度応答を計測する。実験橋梁には損傷を加えている。損傷を加えていない状態(健全状態)と損傷を入れた状態(損傷状態)の応答加速度を測定する。

2.2. 実験橋梁

実験橋梁は平成 18 年に廃線となったふるさと銀河線の鉄道橋を使用している。橋梁名は信濃川橋、橋長は 6960[mm]、主桁間隔は 1130[mm]となっている。実験の写真を図-1 に示した。

2.3. 実験条件

実験橋梁の平面図は図-2 に示す。加速度計は上下のフランジに水平方向と鉛直方向に設置した(以下の説明や平面図では加速度計の番号を ch1、ch2…とする)。水平方向に設置した加速度計は合計 14 個で ch(1、3、5、9、10、12、14、16)を上フランジに設置し、ch(2、6、11、13、15)を下フランジに設置した。鉛直方向に設置した加速度計は合計 2 つで ch(7、8)を主桁 G1 と G2 の中央部の上フランジに設置した。

実験橋梁の横構 L4 は図-3 に示す様に一度切断し鉄板と 8 本のボルトにより連結されている。損傷は横構(L4)のボルトを段階的に弛緩することにより行った。弛緩の段階は 2 段階で行い、1 段階目を case1 と 2 段階目を case2 とした。case1 は図-3 の写真の実線の部分で示してある 4 本のボルトを弛緩し、case2 は図-3 の点線部分に示している 8 本全部のボルトを弛緩した。

加振器は橋梁全体をねじり加振する目的で設置した。加振器は図-2 に示す位置に垂直方向に設置した。加振は sweep 波による加振を行った。加振周波数は 1-750[Hz]まで一様に変化する sin 波(sweep 波)として、加振時間を 20[sec]とした。振動の発生源には積層圧電アクチュエータ(10×10×20mm)を用いた。この積層圧電アクチュエータは電圧(0-100[V])をかけることで体積が増減し、その体積の増減を利用して振動を起こしている。橋梁に振動を与えるため、アクチュエータには荷重(初期荷重)をかけて起振力を与えている。本実験では初期荷重は 294[N]とした。加速度応答を計測する際のサンプリング周波数は 10000[Hz]とした。

2.4. 損傷評価方法

実験で得られた加速度波形から高速フーリエ変換を用いてパワースペクトル密度(PSD)を算出し、ボルトを弛緩した状態(損傷状態)の PSD と損傷を入れていない状態(健全状態)の PSD の差を算出する。算出された PSD の差は周波数ごとに算出している。加速度計ごとに算出された PSD の差の中で一番大きい値($R_i \max$)を検出し、PSD の差を検出された値で除算する。算出された結果を PSD の変化率とした。

キーワード PSD 損傷指数

連絡先 〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地 tel 0157-26-9529

PSD の変化率の式は以下に示す。

$$D_i(f) = \frac{|G_i(f) - G_i^*(f)|}{R_i \max}$$

$D_i(f)$: PSD の変化率

$G_i(f)$: 健全状態の PSD

$G_i^*(f)$: 損傷状態の PSD

$R_i \max$: 健全状態の PSD と損傷状態の PSD の差の最大値

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(n)と解析周波数(m)ごとに算出し、マトリックス $[D]$ で表す。

$$D = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_1(f_2) & \cdots & D_1(f_m) \\ D_2(f_1) & D_2(f_2) & \cdots & D_2(f_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \cdots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad T.C = \left\{ \begin{matrix} \sum_{i=1}^m D_1(f_i) \\ \sum_{i=1}^m D_2(f_i) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m D_n(f_i) \end{matrix} \right\}$$

次に、マトリックス $[C]$ として各周波数で最大のパワースペクトル密度変化 (マトリックス $[D]$ における列要素の最大値 ($D_{\max}(f_m)$)) を選択して、他のパワースペクトル密度変化を最大のパワースペクトル密度変化で割った値を計算する。マトリックス $[D]$ は行要素の損傷の影響について計算しておりマトリックス $[C]$ は列要素の損傷の影響について計算している。

$$C = \begin{bmatrix} c_1(f_1) = \frac{D_1(f_1)}{D_{\max}(f_1)} & c_1(f_2) = \frac{D_1(f_2)}{D_{\max}(f_2)} & \cdots & c_1(f_m) = \frac{D_1(f_m)}{D_{\max}(f_m)} \\ c_2(f_1) = \frac{D_2(f_1)}{D_{\max}(f_1)} & c_2(f_2) = \frac{D_2(f_2)}{D_{\max}(f_2)} & \cdots & c_2(f_m) = \frac{D_2(f_m)}{D_{\max}(f_m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_n(f_1) = \frac{D_n(f_1)}{D_{\max}(f_1)} & c_n(f_2) = \frac{D_n(f_2)}{D_{\max}(f_2)} & \cdots & c_n(f_m) = \frac{D_n(f_m)}{D_{\max}(f_m)} \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad D.D = \left\{ \begin{matrix} \sum_{i=1}^m C_1(f_i) \\ \sum_{i=1}^m C_2(f_i) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m C_n(f_i) \end{matrix} \right\}$$

マトリックス $[D]$ の合計値である total change と、マトリックス $[C]$ の合計値である damage detection を掛けることにより損傷指数(damage indicator)を算出した。損傷指数(damage indicator)の値は ch 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。損傷評価は損傷指数の大きい場所をより明確にするために T.C と D.D の値と T.C と D.D の標準偏差の 2 倍の値の差を算出し、その結果を掛け合わせるにより損傷指数 2(D.I 2)を算出して損傷の評価を行った。

3. 解析方法の検討

本章では解析方法による検討を行った。検討ではマトリックス $[C]$ とマトリックス $[D]$ の周波数の範囲を加振周波数範囲(1-750[Hz])で損傷指数を算出した場合と微小欠陥の影響を受ける周波数範囲に絞り損傷指数を算出した場合の比較を行った。これまでの研究から微小欠陥の影響を受ける周波数範囲は 400-650[Hz]であることがわかっている。図-4 ではグラフを 3 つ示した。グラフの横軸に加速度計の ch 番号(加速度計の設置位置)、縦軸には損傷指数を表している。損傷指数の値が大きい場所に損傷があると評価する。(a)は解析周波数を加振周波数(1-750[Hz])にし case1 の損傷指数を算出した。(b)、(c)は解析周波数を微小欠陥の影響を受ける周波数範囲に絞り損傷指数を算出した。(b)は case1、

(c)は case2 である。(a)と(b)の周波数による検討、(b)と(c)の損傷の程度による検討を以下にまとめた。

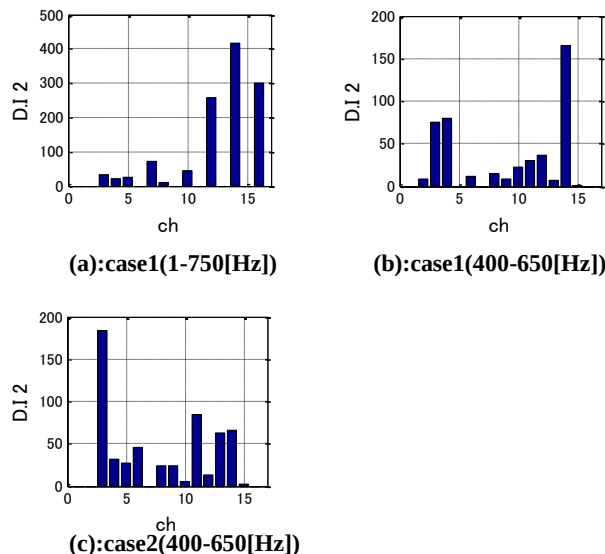


図-4 損傷指数

(a)のグラフでは ch(12、14、16)の D.I 2 の値が大きくグラフからは ch(12、14、16)周辺に損傷があると評価される。しかし、ch16 は損傷位置から遠い位置である。次に、グラフ(b)では ch(3、4、14)の D.I 2 の値が大きく ch(3、4、14)の周辺に損傷があると評価できる。実際の損傷位置に近い加速度 ch 番号は ch(3、4、14、15)なので損傷位置の評価ができています。損傷の程度を大きくした case2 の結果を示しているグラフ(c)では ch(3、11、13、14)の D.I 2 の値が大きく、グラフからは ch(3、11、13、14)周辺に損傷があると評価できる。この中でも ch(3、14)は損傷位置である横構(L4)に近いが ch(11、13)は損傷位置と近接である。ch11 は横構(L4)とは反対側の横構(L3)に近く、ch13 は ch11 と ch14 の間の下フランジに設置されている。case2 は case1 よりも損傷の程度が大きいため損傷の影響を受ける範囲が広がり ch(11、13)の損傷指数が大きくなったと考えられる。

4. まとめ

今回の実験で得られた損傷指数から損傷位置や損傷の影響を与える位置の評価ができた。鋼構造部材を圧電アクチュエーターで局部加振し、得られた加速度応答から損傷を評価する本手法は鋼構造部材の損傷検出に有効であることが証明された。他の損傷に対しても本手法を用い損傷が評価できる。

参考文献

- 1) 三上, シェリフ・ベスキロウン, 山崎, 大島: 振動帯域を考慮した圧電アクチュエータ加振によるコンクリート部材の損傷検出に関する研究、応用力学論文集、Vol.10、pp.77-88、2007.8
- 2) S.Mikami, S.Beskyhroun, Y.Miyamori, T. Oshima: Application of a vibration-based damage detection algorithm on a benchmark structure、tructural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Vol.3, CD-ROM(No.55), 2007
- 3) 土木学会: 橋梁振動モニタリングのガイドライン, 2000