

積層圧電アクチュエータによる局部加振法を用いた

実橋梁の損傷評価に関する研究

Research on damage evaluation of real bridge by using local excitation method with
piezo-electric actuator

坪川良太*, 大島俊之**, 山崎智之**, 三上修一**, 宮森保紀**

Ryota Tsubokawa *, Toshiyuki Oshima **, Tomoyuki Yamazaki **, Shuichi Mikami **, Yasunori Miyamori **

*北見工業大学大学院土木開発工学専攻 2 年

**北見工業大学工学部社会環境工学科

The detection of the damage of a steel structural member in the composite girder bridge is dealt with in this paper. The actuator and the accelerometer for local excitation were set up on the object bridge. The response acceleration spectrum will change due to the occurrence of damage. PSD (Power Spectrum Density) is calculated by using FFT of the response acceleration spectrum, and the difference of PSD between undamaged and damaged states is calculated. The damage index given by the difference of PSD is calculated, the location of the accelerometer with large damage index is specified, and the place is evaluated as the location of damage.

1. まえがき

現在、建設されている橋梁の多くは高度経済成長基に建設されており、建設されてから数十年経過しておりなんらかの損傷が起こっている可能性があると考えられる。また、今後使用限界を超える建造物が増えることが予想される。使用限界を超える構造物を造り直すことは我が国の財政状況では困難である。そのため、構造物の長寿命化を目指すことが急務となっている。構造物の長寿命化を行うために構造物の使用評価を行う必要がある。増えてくる使用限界を超える構造物の使用評価を行うために目視点検以外の簡便かつ容易な方法の確立が急がれている。本研究では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。

2. 損傷評価方法

本研究では実験橋梁に加振器、加速度計を設置して行う。実験橋梁を加振し、加速度計設置点ごとの

加速度を測定する。測定は基準となる健全状態と人為的に損傷を加えた損傷状態で行う、また加速度計の位置は損傷位置と関連付けるために同じ加振方法で実験をしなければならない。損傷評価方法は測定された加速度をパワースペクトル密度(PSD)に変換し、健全状態と損傷状態での PSD の違いから判断する。

健全状態と損傷状態の PSD の違いは数値計算で行う。 $G_i(f)$ はある周波数間隔における加速度計番号で測定されるパワースペクトル密度の大きさを示す。健全状態の PSD を $G_i(f)$ 損傷状態の PSD を $G_i^*(f)$ と定義する。健全状態と損傷状態の PSD の変化率を $D_i(f)$ とし、算出方法を式(1)とする。

$$D_i(f) = \frac{|G_i(f) - G_i^*(f)|}{1 + |G_i(f)|} \quad \dots (1)$$

周波数間隔のデータとして $f_1 \sim f_m$ とし、さらに測定加速度計位置を $D_1 \sim D_n$ と表すとき、状態変化による PSD の変化率をマトリックス $[D]$ で定式化する。

$$D = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_1(f_2) & \cdots & D_1(f_m) \\ D_2(f_1) & D_2(f_2) & \cdots & D_2(f_m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \cdots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \quad \cdot \cdot (2)$$

マトリックス $[D]$ による各列は同じ周波数におけるそれぞれの測定点の PSD の変化率を示す。しかし、パワースペクトル密度変化だけだと判断しにくい。損傷の位置を明確に決定するために以下の手順を使用する。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。

$$C = \begin{bmatrix} C_1(f_1) = \frac{D_1(f_1)}{D_{\max}(f_1)} & C_1(f_2) = \frac{D_1(f_2)}{D_{\max}(f_2)} & \cdots & C_1(f_m) = \frac{D_1(f_m)}{D_{\max}(f_m)} \\ C_2(f_1) = \frac{D_2(f_1)}{D_{\max}(f_1)} & C_2(f_2) = \frac{D_2(f_2)}{D_{\max}(f_2)} & \cdots & C_2(f_m) = \frac{D_2(f_m)}{D_{\max}(f_m)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n(f_1) = \frac{D_n(f_1)}{D_{\max}(f_1)} & C_n(f_2) = \frac{D_n(f_2)}{D_{\max}(f_2)} & \cdots & C_n(f_m) = \frac{D_n(f_m)}{D_{\max}(f_m)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

マトリックス $[D]$ の行要素の合計値を total change(式④)と、マトリックス $[C]$ の行要素の合計値を damage detections(式⑤)と定義した。

$$T.C = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m D_1(f_i) \\ \sum_{i=1}^m D_2(f_i) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m D_n(f_i) \end{bmatrix} \quad \cdot \cdot \cdot (4)$$

$$D.D = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m C_1(f_i) \\ \sum_{i=1}^m C_2(f_i) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m C_n(f_i) \end{bmatrix} \quad \cdot \cdot \cdot (5)$$

T.C と D.D を掛けることにより損傷指数(damage indicator)を算出した。損傷指数の値は列要素(加速度計番号)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. 実験

実験は橋梁に設置した加振器で橋梁を局部的に加振し、加速度計で応答加速度を計測している。加振器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。加振器は橋梁の大きさに合わせ個数や初期荷重を設定している。加速度計の設置位置は損傷が起こりうる位置に設置しており、健全状態と損傷状態で加振方法、加速度計設置位置は同じでなければならない。本手法が有効であることを検証するために 2 種類の実橋梁を対象にし、損傷同定実験を行った。一つ目は全長 120[m]の中の一径間で行い、二つ目は全長 6[m]の橋梁で行った。

3.1. 実験橋梁 A(図 1,図 2)

実験橋梁 A の形式は 4 径間連続曲線鋼桁橋、橋長 119.4[m]、全幅 9.700[m] の橋梁の第 4 径間で行った。



図 1 実験橋梁 A 全景



図 2 第 4 径間

3.1.1. 加速度計、加振器設置位置

実験橋梁Aの平面図を図3に示す。加速度計は16箇所に設置して実験を行った。加速度計番号をch1-ch16としch1-ch12は主桁下フランジに設置し、ch13-ch15までを横桁下フランジに近い主桁腹板に設置した。ch16は主桁腹板に設置した。加速度計の設置方向はアクチュエータによる加振方向と同じ方向になるように設置した。加振波はsweep波による加振を行い、加振方法は周波数が1-650[Hz]まで一様に変化するsin波(sweep波)として、20[sec]の加振を行った。サンプリング周波数は8000[Hz]で実験を行った。実験橋梁Aでは加振器を2つ使用しており初期荷重は294[N]とした。設置位置は図3の矢印の位置である。

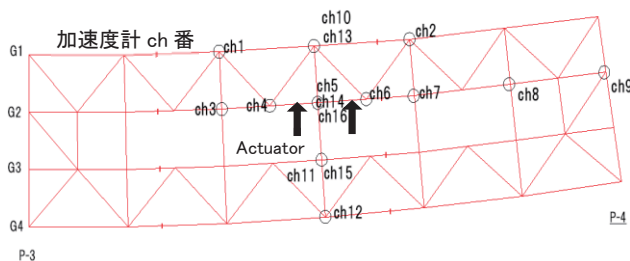


図 3 平面図(実験橋梁 A)

3.1.2. 損傷

この実験では損傷モデルとしてボルトの弛緩させることにより損傷をあたえた。すべてのボルトが固定されているときを健全状態とした。損傷状態は横構と横桁を固定しているボルトを弛緩させた、損傷位置を図4、図5、図6に示す。損傷の程度は横桁の損傷の程度を変え2種類設定し、D1、D2とした。

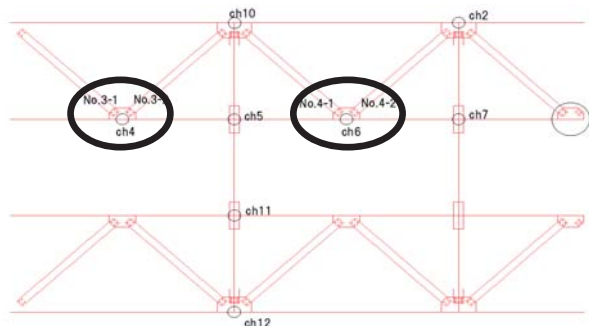


図 4 横構損傷位置

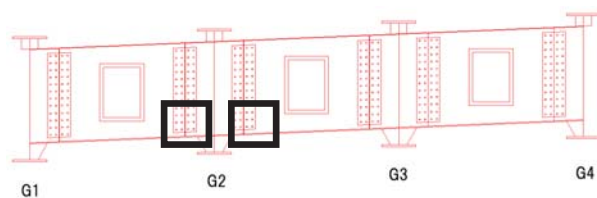


図 5 横構損傷位置(D1)

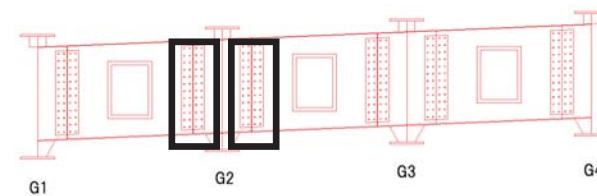


図 6 横桁損傷位置(D2)

横構(図4)の丸で囲まれている位置にあるボルトを緩め、さらに横桁のボルトを緩めた。横桁のボルトは図5、図6の四角で囲まれている位置にあるボルトを緩めた。横桁のボルトの3分の1緩めた損傷をD1(図5)、横桁のボルトを全て緩めた状態をD2とした(図6)。

3.1.3. 実験結果

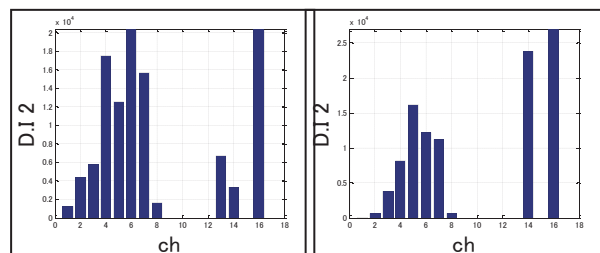


図 7 損傷指数
(左 : D1、右 : D2)

実験結果を図7に示した。横軸が加速度計の番号、縦軸が損傷指数 D.I.2 となっている。損傷指数が大きい加速度 ch に損傷があると評価する。D1の結果から主桁 G2 に設置した ch3-9 の内、ch4-ch7 の損傷指数が大きいことがわかる。損傷が加えられている箇所は ch4、ch6 に近い横構、ch5、ch16 に近いと主桁 G2 と横桁の接合部なので、損傷位置に近い加速度計 ch の損傷指数が大きいことがわかる。また横桁に設置した ch13-ch16 では ch16 の損傷指数が大きいことがわかる。横桁と主桁の接合部に損傷を入れているので損傷の同定ができています。D2 の場合 D1 の結果と同様主桁 G2 に設置した ch3-9 の内 ch4-7 の損傷指数が大きく、横構に設置した ch13-ch16 の内 ch14、ch16 の損傷指数が大きい。ch14、ch16 は損傷を与えた、主桁 G2 と横桁接合部に近くに設置しており損傷の同定はできている。主

桁 G2 に設置している ch3-9 に注目し D1 と D2 を比べると、D1 では ch4、ch6 の損傷指数が大きかったが、D2 では ch5 の損傷指数が大きいことがわかる。D2 は D1 よりも大きな損傷を主桁 G2 と横桁の接合部に与えており、接合部に近い加速度計 ch は ch5 である。損傷の程度が大きくなったことにより ch5 の損傷指数が大きくなったと考えられる。実験橋梁 A での実験では損傷の位置、程度の同定ができている。

3.2. 実験橋梁 B(図 8)

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 8 に示した。



図 8 実験橋梁 B 全景(A-2 側から)

3.2.1. 加速度計、加振機設置位置

加速度計は上下のフランジと腹板に水平方向に設置した。上下フランジに設置した加速度計は合計 14 個で ch(1、3、5、10、12、14、16)を上フランジに設置し、ch(2、6、9、11、13、15)を下フランジに設置した。腹板に設置した加速度計は合計 2 つで ch(7、8)を設置した。加振器は一個使用しており ch11 と ch13 の間の腹板に設置している。

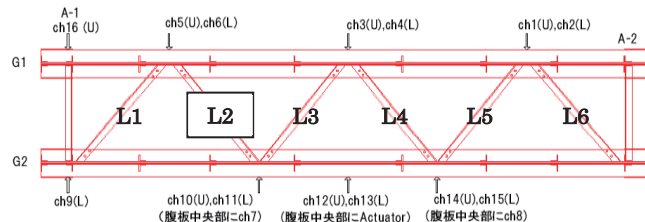


図 9 平面図(実験橋梁 B)

3.2.2. 損傷

実験橋梁の横構 L2、L4 は図 10 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(L2)のボルトを弛緩し、鉄板を取り除くことにより行った。弛緩の段階は 2 段階で行い、1 段階目を D1 と 2 段階目を D2 とした。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。本実験では初期荷重は 49[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。



図 10 横構(健全状態)



図 11 D1



図 12 D2

3.2.3. 実験結果

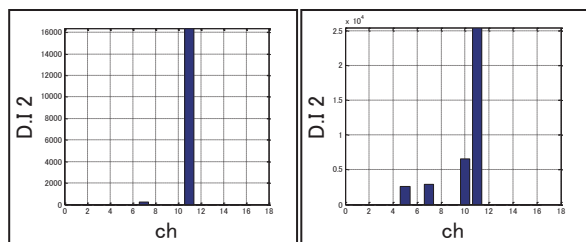


図 13 損傷指数
(左 : D1、右 : D2)

解析周波数を 1-650[Hz]にし損傷指数を算出した結果を図 13 に示した。D1 の場合では ch11 の損傷指数が大きい、グラフから ch11 周辺に損傷があると評価できる。D2 の場合では ch(5、7、10、11)の損傷指数が大きい、グラフから ch(5、7、10、11) 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 は ch(5、7、10、11)なので正確に損傷位置を評価できている。また、D1 と D2 を比較すると D1 の結果では ch11 の損傷指数のみ値が大きくなっているが、D2 では ch(5、7、10、11)の損傷指数が大きくなっており損傷指数の値が大きい ch が増えている。D1 より D2 の方が損傷の程度が大きいことから損傷指数の値が大きくなる ch 数が増えたと考えられる。

4. まとめ

今回の実験結果から実橋梁の損傷の進行や検出に本手法が有効であると検証できた。積層圧電アクチュエータを用いて鋼桁橋を加振し得られた加速度応答を用いての損傷評価は、実験橋梁 A のような大きな橋梁や実験橋梁 B のような小さい橋梁の損傷位置の評価に有効であることが検証できた。

本研究は J S T の戦略的国際科学技術協力推進事業、日本—アメリカ研究交流、研究課題「鉄道廃線の橋梁群を活用した構造健全度診断技術開発のための実験環境の共同利用」(H 2 0 —H 2 3) (研究代表者：大島俊之) の一部として実施されたものである。支援に感謝いたします。

参考文献

- 1) Toshiyuki Oshima, Shuichi Mikami, Yasunouri Miyamori, Tomoyuki Yamazaki, Sheriff Beskhyroun: Damage identification of civil infrastructure with array sensing under local excitation, SHMII-4, Zurich, Switzerland, 2009
- 2) Sherif Beskhyroun, Toshiyuki Oshima, Shuichi Mikami: Wavelet-based technique for structural

damage detection, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 17, pp.473-494, 2009.