

異なる局部加振方法による橋梁構造の欠陥検出精度の検討

Investigation of defect detection accuracy on bridge structures using two different local excitations

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、現在建設されてから数十年経過しており、何らかの損傷を生じているものが多くなりつつある。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急がれている。本研究では、実鋼構造物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。また、積層圧電アクチュエータによる局部加振法が鋼構造物材の損傷検出に有効であることを検証する。ここでは加振方法の違いについて考察する。

2. 実験概要

2.1. 実験方法

実験橋梁に加速度計と加振器を設置した。設置した加速度計で実験橋梁を局部加振し、設置した加速度計で加速度応答を計測する。実験橋梁には切断による損傷を加えている。損傷を入れていない健全状態と損傷を入れた損傷状態を計測する。

2.2. 実験橋梁

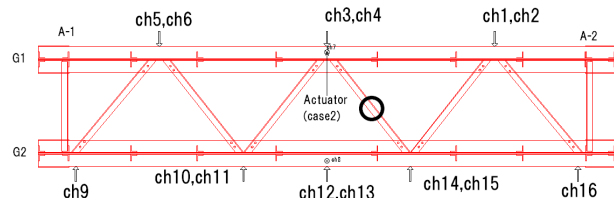
橋梁名:信濃川橋

橋長:6960[mm]

主桁間隔:1130[mm]:



図 1 実験橋梁(A-2 から)



○: 損傷位置

↑: 加速度計・アクチュエータ

図 2 実験橋梁平面図

2.3. 実験条件

実験橋梁の平面図、主桁側面図は図-2 に示す。加速度計は 16 箇所に設置した。加速度計は上下のフランジに水平方向に設置した。ch1、ch3、ch5、ch9、ch10、ch12、ch14、ch16 を上フランジに設置し、ch2、ch6、ch11、ch13、ch15 を下フランジに設置した。

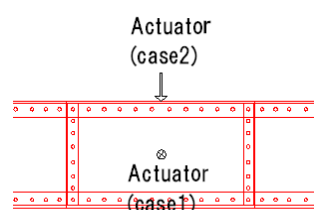


図 3 主桁側面図(中央部)

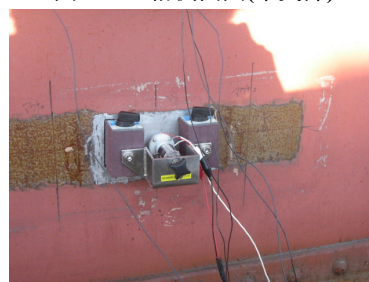


図 4 case1(腹板面外加振)



図 5 case2(ねじり加振)

加振ケースは 2 つ用意した。それぞれの加振ケースを case1、case2 とした。case1 は腹板面外加振を行い加振場所は腹板中央に設置した。case2 はねじり加振を行い加振場所は図-5 に示すとおり上フランジに垂直になるように設置した。

損傷は横構を切断することにより入れ、損傷場所は図に示した。加振は sweep 波による加振を行った。加振周波数は 1-650[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 30[kg]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 6 切断による損傷

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、損傷状態の PSD と損傷を入れてないとき(健全状態)の PSD の変化率を計算する。

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

D_i : パワースペクトル密度の変化率

$G_i(f)$: 健全状態のパワースペクトル密度

$G_i^*(f)$: 損傷状態のパワースペクトル密度

上記の式を設置加速度数(n)と加振周波数(m)ごとに算出し、マトリクス $[D]$ で表す。

$$D = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_1(f_2) & \cdots & D_1(f_m) \\ D_2(f_1) & D_2(f_2) & \cdots & D_2(f_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \cdots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \quad \left. \vphantom{\begin{bmatrix} D_1(f_1) \\ D_2(f_1) \\ \vdots \\ D_n(f_1) \end{bmatrix}} \right\} \text{設置加速度計(ch)}$$

加振周波数のデータ(f)

各周波数で最大のパワースペクトル密度変化(マトリクス $[D]$ それぞれの列の最大値)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出す。計算された結果マトリクス $[C]$ で定式化する。例えばマトリクス $[D]$ で $D_3(f_1)$ の値が最初の列の最大値であるなら、 $C_3(f_1)$ の値は1となり、列の他の値はそれぞれの値から $D_3(f_1)$ の値を割った値となる。2列目は $D_2(f_2)$ 、m列目は $D_5(f_m)$ が最大値をとったものとする以下ようになる。

$$C = \begin{bmatrix} C_1(f_1) = \frac{D_1(f_1)}{D_3(f_1)} & C_1(f_2) = \frac{D_1(f_2)}{D_2(f_2)} & \cdots & C_1(f_m) = \frac{D_1(f_m)}{D_5(f_m)} \\ C_2(f_1) = \frac{D_2(f_1)}{D_3(f_1)} & C_2(f_2) = \frac{D_2(f_2)}{D_2(f_2)} & \cdots & C_2(f_m) = \frac{D_2(f_m)}{D_5(f_m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n(f_1) = \frac{D_n(f_1)}{D_3(f_1)} & C_n(f_2) = \frac{D_n(f_2)}{D_2(f_2)} & \cdots & C_n(f_m) = \frac{D_n(f_m)}{D_5(f_m)} \end{bmatrix} \quad \left. \vphantom{\begin{bmatrix} C_1(f_1) \\ C_2(f_1) \\ \vdots \\ C_n(f_1) \end{bmatrix}} \right\} ch$$

加振周波数のデータ

マトリクス $[D]$ のパワースペクトル密度変化の行の合計を total change とし損傷による影響の大きさを表した、

マトリクス $[C]$ のパワースペクトル密度の変化の割合の行の合計を damage detection とし損傷の影響を表した total change の重みを計算した値を表している。マトリクス $[D]$ の合計値である total change と、マトリクス $[C]$ の合計値である damage detection を掛けることにより損傷位置指数(damage indicator)を算出した。損傷位置指数(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がある可能性が高いことを表している。注目している PSD データは加振周波数の範囲であり、本研究では 1-750[Hz]とした。

3. 実験結果

実験結果を図-7、図-8 に示す。グラフは3つ示した。グラフ(a)は total change のグラフである。グラフの縦軸は T.C(total change)、横軸は加速度計の ch 番号(加速度計の設置場所)を表す。グラフ(b)は damage detection のグラフである。縦軸は damage detection、横軸は加速度計の ch を表す。グラフ(c)は damage indicator のグラフである。グラフの縦軸は D.I 0(damage indicator)を、横軸は加速度計の ch を表す。グラフ(c)の縦軸の値(damage indicator)の値が大きいところに損傷がある可能性が高いと判断する。

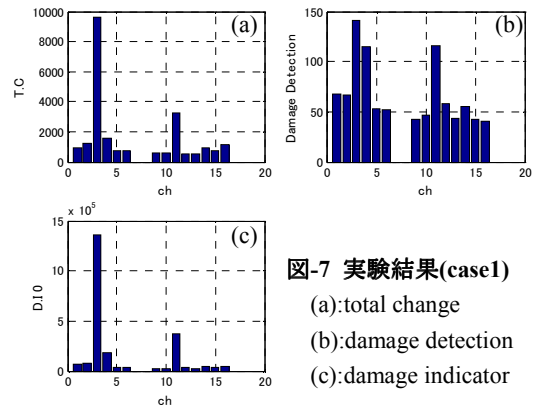


図-7 実験結果(case1)

(a):total change

(b):damage detection

(c):damage indicator

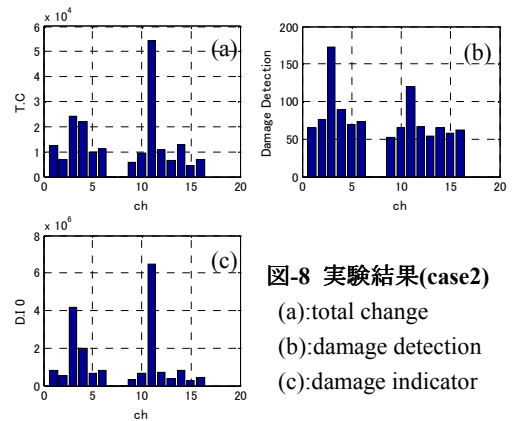


図-8 実験結果(case2)

(a):total change

(b):damage detection

(c):damage indicator

case1 の損傷状態と健全状態を比較したグラフでは ch3 の total change、damage detection、damage indicator の値が大きいことがわかる。実際の損傷位置は ch3 に近いので損傷の同定が出来ているといえる

case2 の損傷状態と健全状態を比較したグラフでも case1 のときと同様 ch3 の damage indicator が大きいことがわかる。実際の損傷位置は ch3 に近いので損傷の同定ができていくことがわかる。しかし、case2 は ch11 の damage detection、damage indicator も大きなことがわか

る。ch3 よりも damage indicator の値が大きくグラフからは ch11 の方が ch3 よりも大きな損傷があると判断できてしまう。

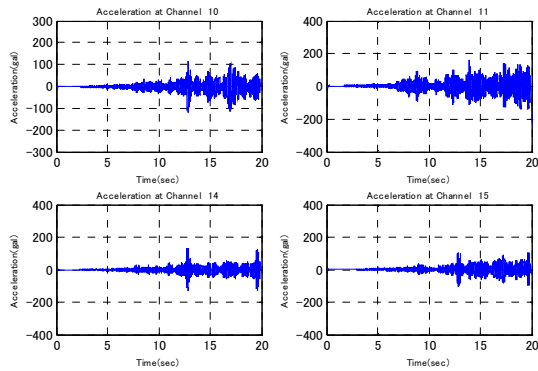


図-9 case1(健全状態)

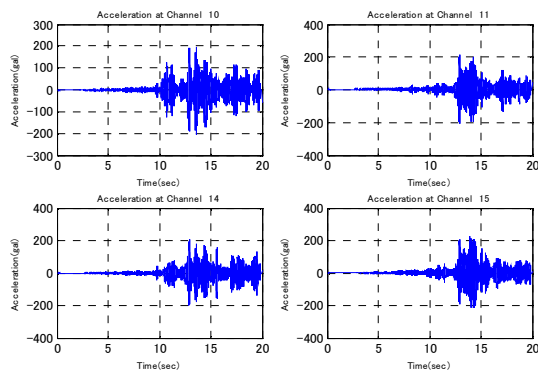


図-10 case1(損傷状態)

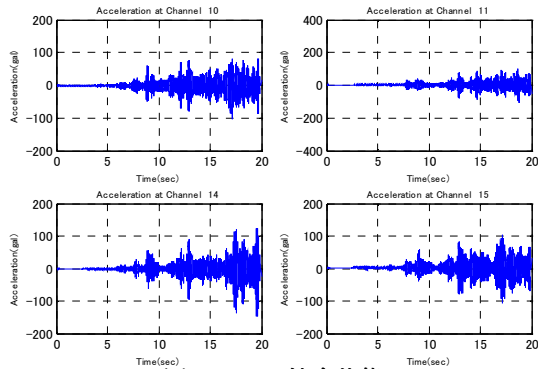


図-11 case2(健全状態)

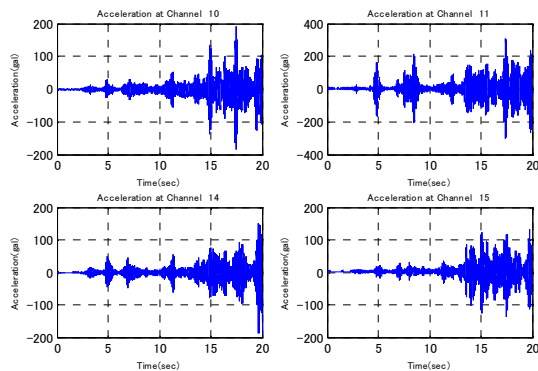


図-12 case2(損傷状態)

実験橋梁の中央から対象に設置してある加速度計に注目し case1 と case2 の加速度波形を図-9、図-10、図-11、図-12 に、PSD について図-13、図-14、図-15、図-16 に示した。

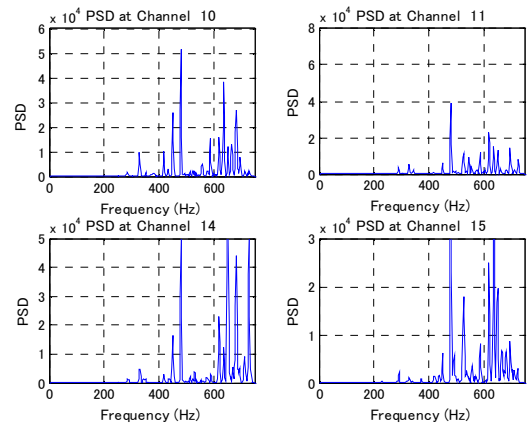


図-13case1 の PSD(健全状態)

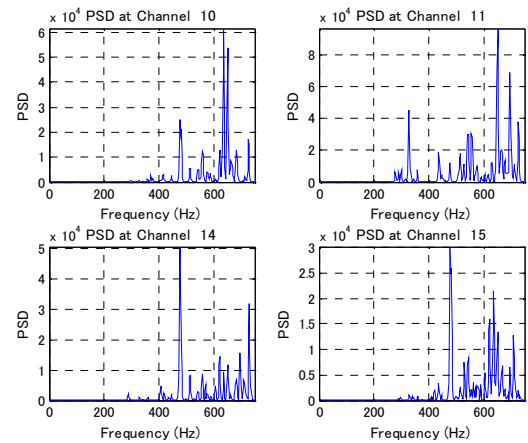


図-14 case1 の PSD(損傷状態)

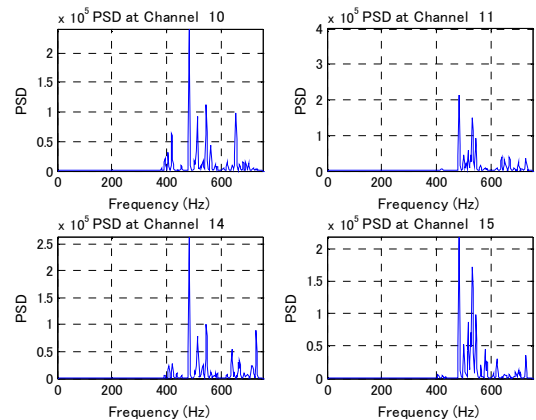


図-15 case2 の PSD(健全状態)

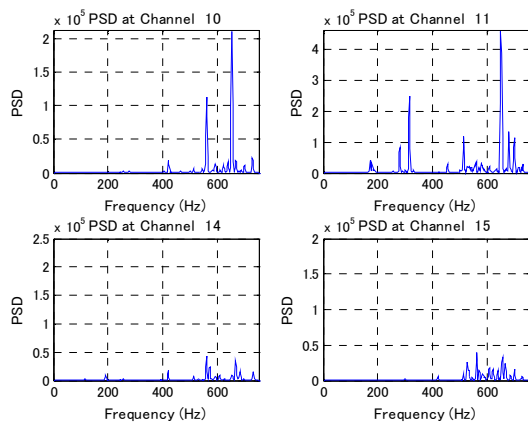


図-16 case2 の PSD(損傷状態)

case1 の結果は健全状態と損傷状態で加速度が増加していることがわかる。増加の傾向はそれぞれの ch 同じぐらいとわかる。ch10、ch14 については 10[sec]に大きな加速度が出ている領域が損傷状態に見られる。

case2 の結果は健全状態と損傷状態で加速度の増加は ch10、ch11 には見られる。ch14、ch15 も加速度の増加は見られるが ch14、ch15 に比べれば小さい。

PSD の結果については case1 では ch10、ch11 で卓越周波数の変化がみられ PSD の値が増加していることがわかる。また ch14、ch15 については卓越周波数の変化が見られず PSD の値も減少していることがわかる。

Case2 では ch10、ch11 では卓越周波数が変化していることがわかる。PSD の値は増加していることがわかる。Ch14、ch15 については卓越周波数の変化は見られないが PSD の減少が見られる。

4. 考察

応答加速度の変化は、損傷位置である damage indicator は健全状態と損傷状態の PSD の変化によって算出している。実験結果では case1 での ch11 の損傷状態と健全状態の PSD の変化は damage indicator の値で見ると小さく、損傷が ch11 周辺にある可能性は低いと評価できたが、case2 での ch11 の損傷状態と健全状態の PSD の変化は damage indicator の値で見ると大きく、損傷が ch11 周辺にある可能性が高いと評価できる。実際には ch11 周辺には損傷がないので case1 である腹板面外加振のほうがより正確に損傷位置を評価できるといえる。

5. まとめ

本実験の結果から損傷が与える影響は損傷位置周辺以外に及ぶといえる。しかし、加振方法によって損傷位置以外への影響は少なくできるということができ、加振方法により正確な位置の評価が可能ということが検討できた。

また、損傷の影響を受け応答加速度の変化は損傷位置周辺に見られているが、本研究で使用している damage indicator では見られていない場合がある。そのため damage indicator の修正が必要であると考えられる。

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.Beskhyroun, 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