

## 局部加振移動平均法による小規模鋼橋の微小欠陥検出の検討

Investigation on small defect detection of small steel bridge by using average local moving excitation method

北見工業大学 学正員      ○ 高橋 徹 (Tohru Takahashi)  
 北見工業大学 フェロー      大島俊之 (Toshiyuki Ohshima)  
 北見工業大学 正会員      三上修一 (Shuichi Mikami)  
 北見工業大学 正会員      宮森保紀 (Yasunori Miyamori)  
 北見工業大学 正会員      山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)

### 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、構造物になんらかの損傷が生じている可能性があると考えられる。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、構造物の長寿命化を目指すことが急務となっている<sup>1)</sup>。構造物の長寿命化を行うために、構造物の使用性評価を行う必要がある。今後増加する使用限界を超える構造物の使用性評価をおこなうために、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多点移動局部加振実験をおこない、多点加振の後、振動特性の変化を測定・解析し、それらを平均化して損傷同定精度の向上を検討する<sup>2)-7)</sup>。

### 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。設置した加振器で実験橋梁を局部加振し、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。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）と損傷を加えた状態（損傷状態）の応答加速度をそれぞれ測定する。

#### 2.2 実験橋梁

実験橋梁には平成 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、橋長は 5,950[mm]、主桁間隔は 1,130[mm]となっている。実験橋梁の写真を図-1 に示す。



図-1 実験橋梁(A-2 から)



図-3 損傷箇所



図-4 損傷箇所

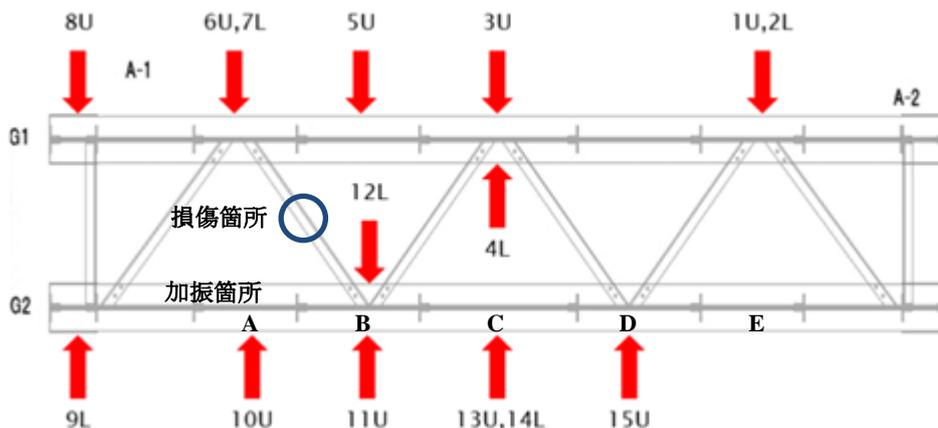


図-2 実験橋梁平面図

2.3 実験条件

実験橋梁の平面図は図-2 に示した。加速度計は総数 15 個設置した（以下の説明では加速度計の番号を ch(1、2、…、15)とする）。加速度計は上下のフランジ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 15 個で ch (1、3、5、5、8、10、11、13、15) を上フランジに設置し、ch(2、4、7、9、12、14)を下フランジに設置した。加振器は積層圧電アクチュエータを 1 個使用しており、主桁 G-2 の腹板中央に水平方向に設置している。設置箇所は 5 箇所であり、A1 側からそれぞれ A、B、C、D、E としている（図-2）。

損傷の様子を図-3、図-4 に示す。損傷は横構 L-2 の中央部を切断し、添接版とボルトによって固定した。損傷程度は健全状態と合わせて 5 段階で設定し、それぞれ D0、D1、D2、D3、D4 とした。呼称と損傷程度を表-1 に示す。本論文では D1 と D2 の結果を示す。

表-1 損傷程度

呼称	程度
D0	健全状態、添接版を全て固定
D1	損傷状態、水平方向の外側のボルトを緩める
D2	損傷状態、水平方向の全てのボルトを緩める
D3	損傷状態、D2 に加えて、垂直方向外側のボルトを緩める
D4	損傷状態、すべてのボルトを緩める

加振は sweep 波による加振を行った。加振周波数は 1-750[Hz]まで一様に变化する 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を 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 10,000[Hz]とした。

2.4 損傷評価方法

実験により得られた、損傷を入れてない状態（健全状態）と横構を切断した状態（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 (PSD) に変換する。得られたチャンネルごとの健全状態と損傷状態の PSD の差を、健全時の PSD の値で除算したものを  $D_i(f)$  とし、式(1)で表す。

$$D_i(f) = \frac{|G_i(f) - G^*_i(f)|}{|G_{i,max}, G^*_{i,max}|_{min}} \dots (1)$$

$D_i(f)$  : PSD の変化率

$G_i(f)$  : 健全状態の PSD

$G^*_i(f)$  : 損傷状態の PSD

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]を行列表示すと次のようになる。また、マトリックス[D]の周波数軸方向に合計したマトリックスを本研究では Total Change(TC) (式(3)) と呼ぶ。

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_2(f_1) & \dots & D_n(f_1) \\ D_1(f_2) & D_2(f_2) & \dots & D_n(f_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_1(f_m) & D_2(f_m) & \dots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \dots (2)$$

$$TC = [\sum D_1(f_i) \quad \sum D_2(f_i) \quad \dots \quad \sum D_n(f_i)] \dots (3)$$

次に、周波数ごとにマトリックス[D]を比べ、PSD の変化率が一番大きい加速度チャンネルを検出する。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したものを  $C_i(f)$  とする。また、 $C_i(f)$  の周波数ごとに合計したマトリックスを本研究では Damage Detection(DD)と呼ぶ。

$$C_i(f) = \frac{D_i(f)}{D(f)_{max}} \dots (4)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1(f_1) & C_2(f_1) & \dots & C_n(f_1) \\ C_1(f_2) & C_2(f_2) & \dots & C_n(f_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_1(f_m) & C_2(f_m) & \dots & C_n(f_m) \end{bmatrix} \dots (5)$$

$$DD = [\sum C_1(f_i) \quad \sum C_2(f_i) \quad \dots \quad \sum C_n(f_i)] \dots (5)$$

マトリックス[D]のチャンネルごとの合計値である Total Change と、マトリックス[C]のチャンネルごとの合計値である Damage Detection を掛けることにより損傷指数 (Damage Indicator) を算出する。損傷指数 (Damage Indicator) 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。損傷評価は損傷指数の大きい場所をより明確にする手法を施した。T.C の標準偏差を  $\delta$ 、D.D の標準偏差を  $\lambda$  と定義する。T.C と  $\delta$  の 2 倍の差を SD2、D.D と  $\lambda$  の 2 倍の差を SC2 と定義する。SD2 と SC2 をかけ合わせるにより D.I2 を算出する。本研究では D.I2 の値により損傷の評価を行った。

損傷評価方法は単点加振法と多点加振平均法の 2 種類用意した。単点加振法では、この D.I2 の値により損傷の評価を行う (式(8))。多点加振平均法では、この加振位置 A から E で算出した D.I2 の値を平均した値により損傷の評価を行う (式(9))。

$$\begin{cases} SD2 = TC_i - 2\delta_i \\ SC2 = DD_i - 2\lambda_i \end{cases} \dots (7)$$

$$SD2 \times SC2 = D.I2 \dots (8)$$

$$D.I2 = \sum_{A \sim E} D.I2 / 5 \dots (9)$$

3 実験結果

本章では解析方法による検討を行ったときの単点加振法と多点加振平均法の D1 と D2 の T.C、D.D、損傷指数をそれぞれ表-5、表-6、表-7、表-8 に示す。検討では、マトリックス[D]・マトリックス[C]を作成する上で解析

に使用する周波数範囲を 200-600[Hz]とした。ここでは、代表して加振点 C 場合の加速度、マトリクス[D]、マトリクス[C]、T.C、D.D、損傷指数の結果を以下に示す。

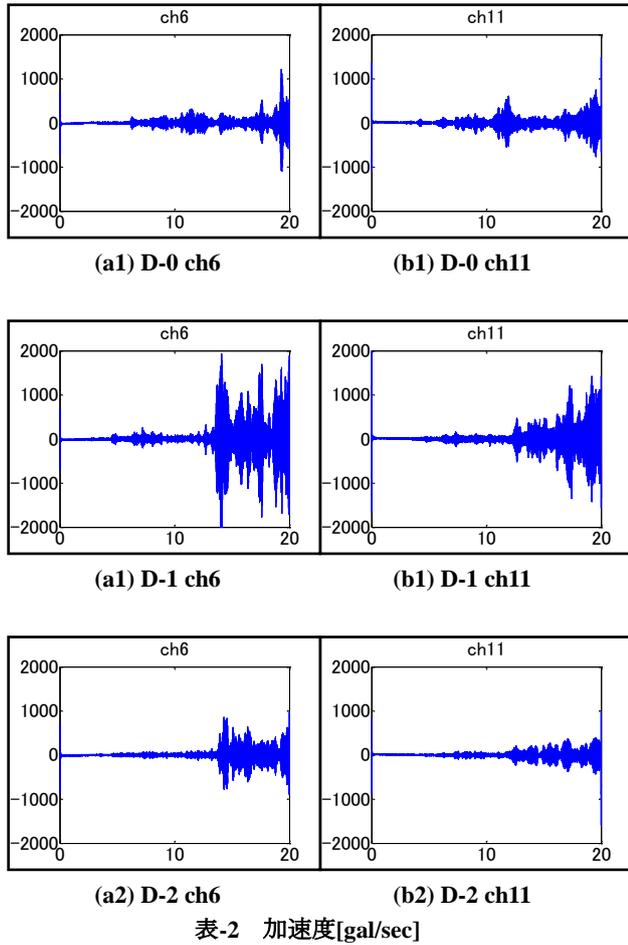
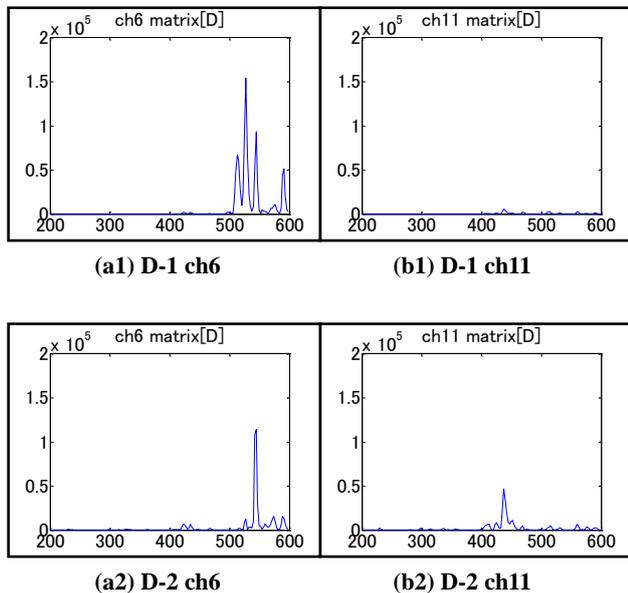
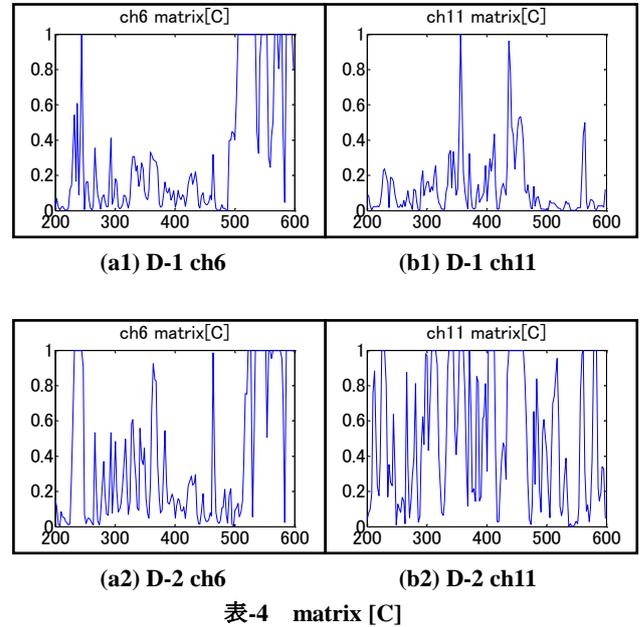


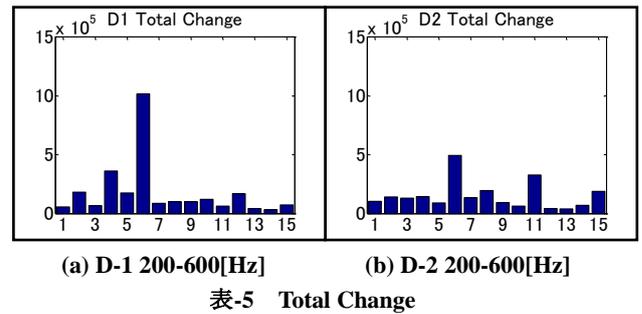
表-2 には加速度波形の主要部分の先頭から 20 sec までのデータを、損傷に最も近い ch6 と ch11 の結果を、損傷以前の D-0 の場合と損傷ケース D-1 と D-2 の場合について示している。これより損傷の変化により加速度応答がどのように変化するかがわかる。



マトリクス[D]では、ch6 のピークが、D-1 と比べて D-2 の方が下がっている (表-2(a1),(a2)) 一方、ch11 のピークが D-1 と比べて D-2 の方が上がっている (表-2(b1),(b2))。これは、損傷の振動への影響が ch6 から ch11 へと広がっているためである。



マトリクス[C]では、ch6 の卓越箇所( $C_i(f) = 1$ )が、D-1 と比べて D-2 の方が少なくなっている (表-3(a1),(a2)) 一方、ch11 の卓越箇所が D-1 と比べて D-2 の方が多くなっている (表-4(b1),(b2))。



T.C は、D-1 (表-5(a)) において ch6 に T.C が強く出現し、ている。D-2 では、ch6、ch11 において、T.C が強く出現した。この ch6、ch11 は損傷箇所周辺である。

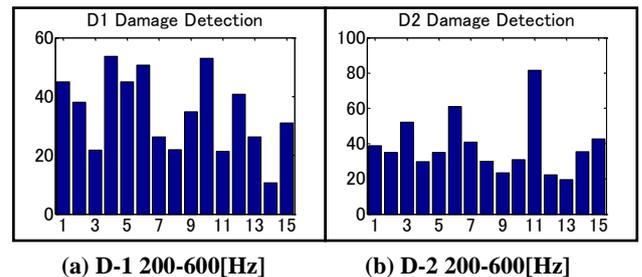


表-6 Damage Indicator

D.D は、D-1 において損傷位置に高く出現しているが、全体的に高く出現している。次に、D-2 (図-6(b)) においては損傷位置周辺 (ch6, ch11) に高く出現している。D-2 は D-1 と比較して、よりはっきりと損傷位置周辺に出現するようになっている。

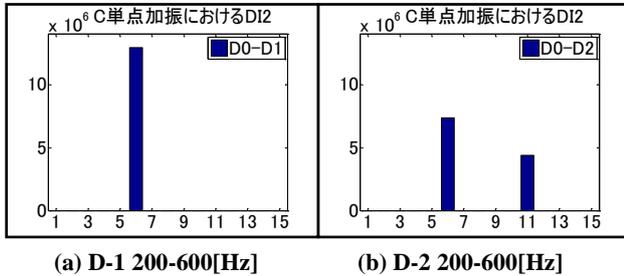


表-7 Damage Indicator (単点加振法)

損傷指数は、D-1 (表-5(a)) において損傷位置周辺 (ch6) に強く出現し、G1 桁 A1 側、L1、L2 結合部付近に損傷があると評価される。同様に、D-2 (図-5(b)) においては損傷位置周辺 (ch6, ch11) に損傷指数が出現し、横構 L-2 に損傷があると評価される。次に、多点加振平均法について示す。表-8 はそれぞれ D-1、D-2 の多点加振平均法による損傷指数の値である。

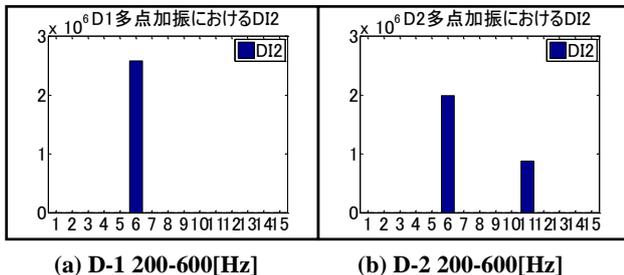


表-8 Damage Indicator (多点加振平均法)

多点加振平均法では、単点加振法において出現していた損傷位置周辺以外の損傷指数が消えている。損傷位置周辺 (ch6, 11) に損傷指数が強く出現し、横構 L-2 に損傷があると明確に評価できる。

#### 4 まとめ

本研究は実際に使用されていた鉄道廃線橋梁を対象に健全状態と横構の添接ボルトを緩めることによる2つの損傷状態に対して検討を行った。

今回の実験の解析により得られた損傷指数から、損傷位置の評価ができた。また、鋼構造部材を圧電アクチュエータによって局部加振し、得られた加速度応答から損傷位置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。

#### 謝辞

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)戦略的国際科学技術橋梁推進事業(研究代表者:大島俊之)の支援を受けて実

施した研究の一部である。

ご支援に深く感謝申し上げます。

#### 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) S.Mikami, S.Beskyroun, Y.Miyamori, T.Ohshima : Application of a vibration-based damage detection algorithm on a benchmark structure、structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Vol.3, CD-ROM(No.55), 2007.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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