

## 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

Numerical analysis of small defect detection of beam by using local excitation method

宮森保紀\*, 大島俊之\*\*, 三上修一\*\*\*, 山崎智之\*\*\*\*, 高橋徹\*\*\*\*\*

Yasunori Miyamori, Toshiyuki Oshima, Shuichi Mikami, Tomoyuki Yamazaki, Toru Takahashi

\* 博士(工), 北見工業大学工学部准教授, 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

\*\* 工博, 北見工業大学工学部特任教授 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

\*\*\* 博士(工), 北見工業大学工学部教授, 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

\*\*\*\* 博士(工), 北見工業大学工学部助教, 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

\*\*\*\*\* 北見工業大学大学院博士前期課程, 社会環境工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

By using piezoelectric actuator bridge can be accelerated locally to detect the effect of small damage like fatigue crack as a response change of vibration. Transfer function (TF) of the vibration response can give us the indication of existence of damage before and after the damage. Detail analysis of TF before and after damage can inform us location and size (area) of damage. This paper shows the result of numerical analysis of damage detection on beam member by using local force excitation method.

*Key Words: small defect detection, local excitation method, numerical simulation, transfer function (TF)*

キーワード: 微小欠陥検出, 局部加振法, 数値シミュレーション, 伝達関数

### 1. はじめに

構造物の老朽化とその維持管理が大きな課題となる中で、振動計測を用いて実施する構造同定法による実構造物の健全度モニタリングに関する研究が広く行われてきた<sup>1)</sup>。振動計測による損傷評価の多くの研究や実測においては、損傷の影響が主として構造物の剛性低下等につながるもので、構造物のモード特性等を詳細に解析評価するものである<sup>2)6)</sup>。その結果このようなモード特性の変化の計測によって、構造物の健全状態や残存寿命などが的確に評価できるのであれば手法としては有効となるものである。しかしながらこのような一般的なモード特性の解析では、比較的大きな損傷は評価できるものの、疲労亀裂や局部的な腐食など、局所的な微小欠陥の検出は難しい課題がある<sup>7)11)</sup>。また、構造物の卓越振動数や減衰定数など構造全体のモード特性の変化の解析から損傷の詳細な位置や大きさを検出することには困難が伴う。

このような背景から、本論文では圧電アクチュエータによる構造物の局部振動加振と、その構造物の振動応答を加速度計のアレー配置によって計測し、構造物の微小な損傷を評価する手法を取り扱う。著者らのこれまでの研究<sup>12)16)</sup>から、圧電アクチュエータによる局部加振法に

よって実橋梁の微小欠陥が精度よく検出できることが確かめられている。しかしながら、本手法を実用化して有効な診断手法として確立するためには今後検討して明確にしなければならない課題も多い。たとえば本手法で用いる局部加振の方法によれば、加振点近傍において入力された振動エネルギーは構造周辺に伝播・分散する。このような振動伝播の状況や、微小欠陥がどのように振動伝播に影響を与えているかを明らかにすることが必要である。さらに、本手法ではこれまで加振周波数帯を経験的に決定していたが、汎用性のある損傷検出手法とするためには一般的な方法論を構築する必要がある。そのためには加振周波数帯によって構造系の振動特性がどのように変化するかをより解析的に把握する必要がある。これまでパワースペクトルを用いてきた手法を伝達関数の観点から整理すれば、構造系の振動特性の変化そのものを検討することができる。しかし、このような検討を実構造物の高次モードについて行うことは、非常に複雑な解析を必要としていることから、本論文においては解析対象を単純なモデルとして実験内容を検討することとした。すなわち、本論文の目的は、本手法の理論的背景を実際の計測に則して簡単な数値モデルで表現し、数値シミュレーションによって局部加振法の実験内容を検討し

ようにするものである。

## 2. 局部加振法の数値シミュレーション

### 2.1 局部加振法の概要

局部加振法による振動計測においては実構造物に多数の振動計測センサーをアレー配置するとともに、構造の起振は圧電アクチュエータを用いて構造物の一部を局部的に表面加振する。圧電アクチュエータは固定装置によって構造表面に必要な押し付け力によって押し付けられている。その際圧電アクチュエータによる入力エネルギーは実構造物の重量に比較して小さいので構造物の詳細構造を考慮して、できるだけ効果的に大きな加振入力振幅を得られるようにする。すなわち、例えば鋼構造部材の断面が板構造であれば面外方向の加振が有効である。

またコンクリート構造の橋梁の場合であっても、加振方法を工夫することによって計測可能な加振入力振幅が得られる<sup>16)</sup>。通常この種の振動計測においては、振動入力はハンマーなどの打撃による方法の場合が多いが、ハンマーによる打撃入力の場合は、入力波形に打撃方法や構造表面の状態によるばらつきが生じる難点がある。この点、本手法の圧電アクチュエータによる入力によれば安定した振動入力が可能である。また、実際の実験における解析においては、ノイズや計測のばらつきの影響および温度変化の影響が含まれるので、これらに対する配慮は必要であり、複数回の計測による平均化や、後述する統計的な処理などを用いる。

### 2.2 多質点系梁モデルによる局部加振法の定式化

連続体である構造物を多質点系の振動モデルに換算する場合には多くの注意が必要であるが<sup>1)</sup>、特に本研究で対象とする構造物の局部的な微小欠陥の検出を対象とする場合には、できるだけ実情に則したモデル化が必要である。特に断面構造が変断面になっているような場合にはそれに対応したモデル化が必要となる。

第1章で述べたように、本論文では簡単なモデル化による検討を対象としているので、図-1に示すような多質点系の梁構造を対象として計算を進める。梁構造は両端固定で、各質点は連結する梁要素によって結合されているが、構造全体のモデル化の際には梁要素の両端のたわみ角を消去して、未知数は鉛直変位のみで表現する。

梁全体の多質点系の振動モデルによる定式化において、剛性マトリックス[K]と同形式の減衰マトリックス[C]を導入して通常モデル化により以下のように表現される。

$$[M]\{X''\} + [C]\{X'\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} \cdots (1)$$

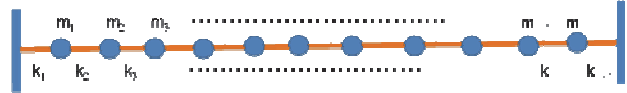


図-1 多質点系梁モデル

ただし、

$$[M] = \text{Diag}(m_i) \text{ (対角マトリックス) } i = 1, 2, \dots, n$$

[C]

$$= \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \dots & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & \\ \vdots & & \ddots & & & \\ & & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & & & -c_n & c_n + c_{n+1} \end{bmatrix}$$

[K]

$$= \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \\ \vdots & & \ddots & & & \\ & & & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ & & & & -k_n & k_n + k_{n+1} \end{bmatrix}$$

$$\{F(t)\} = [G] \cdot \{f(t)\}$$

ここで{X}, {X'}, {X''}はそれぞれ各質点の鉛直変位、速度、および加速度を表しており、[G]は加振点の位置を指定する[0, 1]行列、{f(t)}は入力波形を表している。

式(1)を Newmark-β法を用いて時刻歴の応答解析を実施する。各時間ステップ s 毎の質点の加速度と速度の応答を平均加速度法を用いて次のように仮定して計算することができる。

$$\{X''\}_{s+1} = a_0(\{X\}_{s+1} - \{X\}_s) - a_1\{X'\}_s - a_2\{X''\}_s \cdots (2)$$

$$\{X'\}_{s+1} = \{X'\}_s + a_3\{X''\}_s + a_4\{X''\}_{s+1} \cdots (3)$$

ただし

$$a_0 = \frac{1}{\beta \cdot \Delta t^2}, a_1 = a_0 \cdot \Delta t, a_2 = \frac{1}{2\beta} - 1$$

$$a_3 = (1 - \alpha)\Delta t, a_4 = \alpha\Delta t, \alpha = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}$$

また、初期条件として次の条件を用いる。

$$\{X'\}_0 = \{X\}_0 = 0, \{X''\}_0 = \{F(0)\}/[M] \cdots (4)$$

### 2.3 多質点系梁モデルによる計算結果

図-1の計算モデルを対象として、局部加振法による振動計測シミュレーションの計算結果を以下に述べる。

(1) 計算条件

総質点数：n=21

梁の支持条件：両端固定

梁の各質点質量： $m_i=10.8\text{ kg}$ （等分布）

梁要素の剛性係数： $k_i=100,000\text{ (N/m)}$ （等剛性）

梁要素の減衰係数： $c_i=100.0$ または $500.0\text{ (N}\cdot\text{sec/m)}$   
（剛性係数の0.1%または0.5%）

計算に用いた数値は実際の実験対象橋梁を想定して決定しており、支間長は6m程度である。

加振条件： $i=11$ の支間中央の質点を鉛直方向に加振する。

加振波形は実際に実験計測システムの入力に用いる加振波形をモデル化する。すなわち式(5)と図-2に示すように指定した時間に連続的に $f_{m,\max}$ （最大50Hz）まで周波数が増加する Sweep 波形とする。ただし $A$ は振幅(N)で $A=100\text{ (N)}$ 。より実際に近い数値シミュレーションを実施する際にはアクチュエータの質量を考慮したモデル化が必要である。しかし本論文では質量1.5kg程度の小型アクチュエータを用いることを想定しており、その影響は無視できるほど小さい。なお、本論文は数値解析による検討とし、入出力信号におけるノイズの影響は取り扱わないこととする。

$$f(t) = A[1 + \sin(2\pi f_m t)] \quad (m = 1, 2, \dots, m_{\max}) \cdots (5)$$

このような低周波から高周波にかけて連続的に周波数が増加する Sweep 波形加振の場合、構造物（この場合は梁全体）が加振される状況は、加振点近傍からの入射波形が曲げ波の伝播速度にしたがって支点方向に向かって伝播するとともに、支点に到達した際は、支点における支持条件を反映して反射し、加振点に再び到達して振動モードが完成することとなる。また、各質点の振動応答振幅は振動系の減衰の強さに応じて、加振周波数が固有振動数に近づくにつれて大きくなるとともに、固有振動数から離れた場合においてもある程度の振動振幅を発生することとなる。

したがって、振動系に損傷が発生し、その影響を検出する解析においては、次章で詳述するように、計測された振動波形の卓越振動数を含むすべての周波数帯において欠陥の影響が含まれるので、そのすべての影響を解析対象とすることができる。

また、通常、微小欠陥の影響は振動モードの波長が短い高次の周波数帯により大きく表れるので、解析では主として高次の周波数帯に着目して解析することとなる。

## (2) 振動応答波形

支間中央の質点 $i=11$ の鉛直変位と鉛直加速度の応答結果を図-3から図-6に示している。これらの結果から、振動初期においてある程度振動応答が見られるものの、12(sec)前後において大きな振幅となっている。この時刻帯は加振周波数が振動系全体の1次固有振動数（2Hz前後）を経過する時間帯である。また振動系の減衰が大きい図-5や図-6の場合には1次固有振動数帯を経過すると振動応答振幅は急激に減少するので加振周

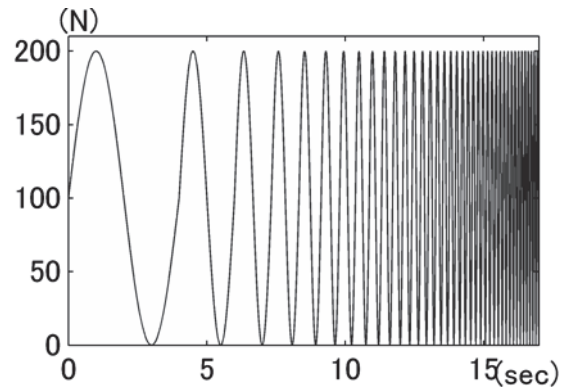


図-2 加振 Sweep 波形

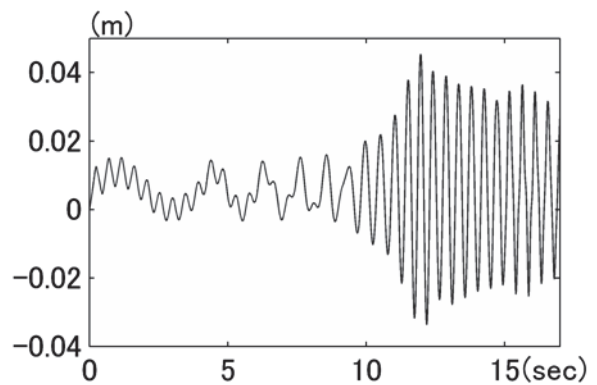


図-3 振動変位応答結果（減衰0.1%）

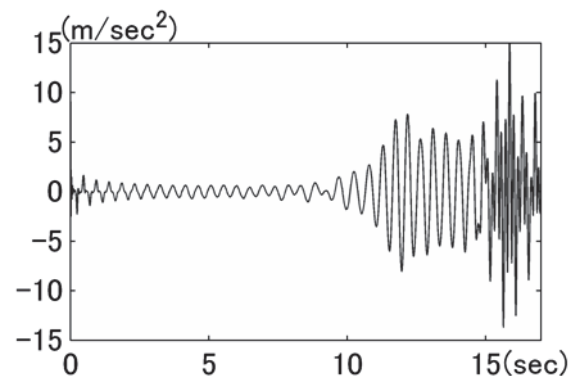


図-4 振動加速度応答（減衰0.1%）

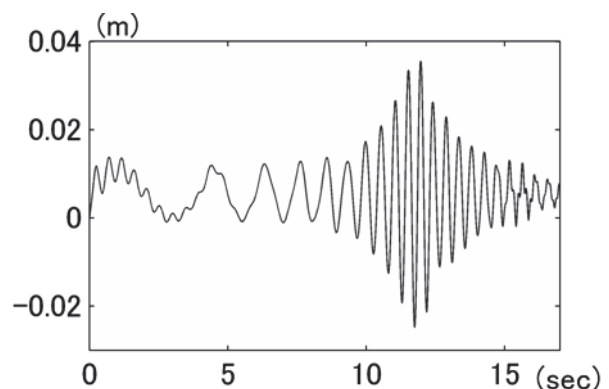


図-5 振動変位応答（減衰0.5%）

波数帯が次の固有振動数帯に近づくまで応答振幅は小さくなる傾向となる。図-7には図-4の加速度波形のフーリエスペクトルの大きさを示している。

以上のように減衰を有する多質点で構成される振動系を、連続的に周波数が増加する Sweep 入力波形によって加振した場合、振動系の固有振動数に近づくにつれて振動振幅が大きくなるとともに、固有振動数から外れる場合においてもある程度の振動振幅で応答する。したがって実際の Sweep 加振入力による振動応答を詳細に解析して実施する構造診断においては、対象周波数範囲を大きく取って解析することとなる。また、前述したように、局所的な微小欠陥の影響は周波数の高い領域において大きく表れるので、加振入力時に指定する Sweep 波の開始と最終の周波数帯は想定される欠陥の規模に応じて適切に設定することとなる。すなわち、想定される疲労亀裂やボルトの抜け落ち、局所的な劣化などの微小な損傷を検出するためには、それらの損傷を局所的な数値解析モデル化などによって、影響する周波数帯をある程度は事前に特定することが可能である。しかし、損傷によって影響を受けるモードは、個々の構造物のモード特性によって異なるため、本手法では加振周波数帯を限定せず、サンプリング周波数を考慮しつつ広く設定している。

次章ではこのような振動解析の内容を踏まえて、振動応答の周波数領域における解析に着目して、局所的な欠陥の影響を検出する内容について説明する。

### 3. 周波数領域における損傷評価の解析

前述したように局部加振法による微小欠陥の検出解析においては、微小欠陥の大きさに応じて解析対象の周波数帯を適切に選択して解析する。本論文ではこのような局部加振法の解析内容を解析手順に則して数値シミュレーションにより検討することを目的としている。したがって本章では前述した式(1)から出発して、解析対象を周波数領域に変換し、伝達関数の詳細解析から、微小欠陥の検出に至る解析内容を説明する。

#### 3.1 解析の定式化

式(1)を状態空間表示にするため、各質点の鉛直変位と速度を以下のように変形する<sup>1)</sup>。すなわち、 $\{Z_1\} = \{X\}$ ,  $\{Z_2\} = \{X'\}$ とおき、

$$\{Z\} = \begin{Bmatrix} \{Z_1\} \\ \{Z_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{X\} \\ \{X'\} \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (6)$$

$$\begin{aligned} \{Z_1'\} &= \{Z_2\} \\ \{Z_2'\} &= \{X''\} \\ &= -[M]^{-1}[K]\{X\} - [M]^{-1}[C]\{X'\} + [M]^{-1}[G]f(t) \\ &\dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

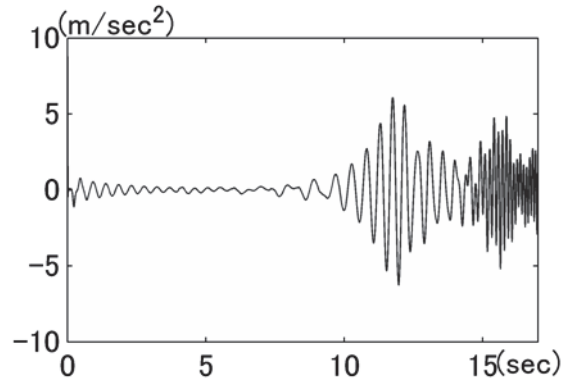


図-6 振動加速度応答 (減衰 0.5%)

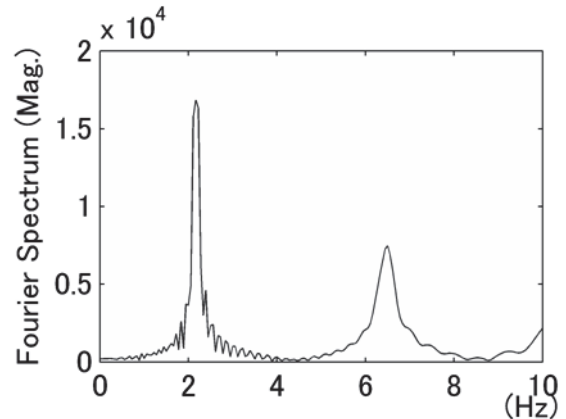


図-7 加速度波形のフーリエスペクトル

$$\begin{aligned} \{Z'\} &= \begin{Bmatrix} \{Z_1'\} \\ \{Z_2'\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{X'\} \\ \{X''\} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0_{nn} & I_{nn} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}G \end{bmatrix} f(t) \\ &\dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

ただし、 $[0_{nn}]$ は $n \times n$ のゼロ行列、 $[I_{nn}]$ は $n \times n$ の単位行列である。

また、式(1)を参照して、各質点の鉛直加速度  $\{X''\}$  を観測量とすると

$$[M]\{X''\} = -[C]\{X'\} - [K]\{X\} + \{F(t)\} \dots \dots (9)$$

したがって出力方程式として

$$\begin{aligned} \{Y\} &= \{X''\} = -[M]^{-1}[K]\{X\} - [M]^{-1}[C]\{X'\} \\ &= [-[M]^{-1}[K] \quad -[M]^{-1}[C]]\{Z\} + [M]^{-1}\{F(t)\} \\ &\dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

以上より、式(8)と式(10)を Laplace 変換すると

$$\begin{aligned} p\{Z(p)\} &= [A]\{Z(p)\} + [B]\{U(p)\} \\ \{Y(p)\} &= [E]\{Z(p)\} + [D]\{U(p)\} \end{aligned}$$

ただし  $p$  は媒介変数、 $\{U(p)\}$  は外力の変換項である。

$$[A] = \begin{bmatrix} 0_{nm} & I_{nn} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}G \end{bmatrix}$$

$$[E] = [-[M]^{-1}[K] \quad -[M]^{-1}[C]], [D] = [M]^{-1}[C]$$

したがって各質点位置の観測加速度の伝達関数として次式が得られる。加振点の位置は[G]において指定する。

$$\{R(p)\} = \frac{\{Y(p)\}}{\{U(p)\}} = [E](p[I] - [A])^{-1}[B] + [D]$$

. . . . . (11)

### 3.2 損傷評価の解析

媒介変数  $p$  を  $p = 2\pi f$  と変換し、振動系のより要素の一部に損傷を発生させた（剛性係数を低下させた）場合の系に対する伝達関数を  $R^*(f)$  とする。また、各質点の番号は図-1にしたがって添え字  $i$  によって表示する。また、損傷前後の伝達関数の振幅の差を次式のように表示する。

$$D_i(f) = \frac{||R_i(f)| - |R_i^*(f)||}{1 + |R_i(f)|} \quad \dots (12)$$

すなわち、式(12)は損傷前後の各質点  $i$  における観測加速度の伝達関数の振幅をそれぞれ  $|R_i(f)|, |R_i^*(f)|$  として、それらの差の絶対値を、損傷前の振幅  $|R_i(f)|$  の絶対値に 1 を加えた値で正規化したものである。1 を加えた理由は実験を行った場合にノイズの影響などで  $|R_i(f)|$  の値がゼロの場合でも計算可能とするためである。この  $D_i(f)$  は観測位置と周波数の関数であり、以後の損傷検出解析において損傷の有無の指標となる値である。局部加振法による実構造物の損傷評価の解析においては、構造の形式や詳細構造および損傷の有無によって振動エネルギーの伝播状況や振動応答状況が様々に変化する。したがって  $D_i(f)$  の変化をいかに精度よく検出するかが診断手法の機能効果を決定することとなる。

実際の解析では周波数  $f$  をサンプリング周波数によって等間隔にデジタル化して  $D_i(f)$  を計算する。したがって  $D_i(f)$  は行列表示すると次のようになる。

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_2(f_1) & \dots & D_n(f_1) \\ D_1(f_2) & D_2(f_2) & & D_n(f_2) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ D_1(f_m) & D_2(f_m) & \dots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \dots (13)$$

次に[D]の要素を、周波数軸方向である列方向（縦方向）に合計すると

$$SM = \left\{ \sum_f D_1(f) \quad \sum_f D_2(f) \quad \dots \quad \sum_f D_n(f) \right\} \cdot (14)$$

式(14)は計測点ごとに、損傷前後の伝達関数の差を全周波数に関して合計（積分）したものであり、これを本研究では **Total Change** と呼んでいる。この指標によって損傷の影響を受ける計測点の広がり把握できる。

次に、損傷位置をさらに明確に特定するため、式(15)のように式(13)の各行（横列）内の最大値で各要素を割る操作を行う。式(15)では、第1行( $f_1$ )は第3質点、第2行( $f_2$ )は第2質点、第  $m$  行( $f_m$ )は第5質点で伝達関数の差が最大になった場合の例を示す。

$$[H] = \begin{bmatrix} H_1(f_1) = \frac{D_1(f_1)}{D_3(f_1)} & H_1(f_1) = \frac{D_2(f_1)}{D_3(f_1)} & \dots & H_1(f_1) = \frac{D_n(f_1)}{D_3(f_1)} \\ H_1(f_2) = \frac{D_1(f_2)}{D_2(f_2)} & H_2(f_2) = \frac{D_2(f_2)}{D_2(f_2)} & & H_2(f_2) = \frac{D_n(f_2)}{D_2(f_2)} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ H_1(f_m) = \frac{D_1(f_m)}{D_5(f_m)} & H_2(f_m) = \frac{D_2(f_m)}{D_5(f_m)} & \dots & H_n(f_m) = \frac{D_n(f_m)}{D_5(f_m)} \end{bmatrix}$$

. . . . . (15)

この操作は各周波数ごとの  $D_i(f)$  の最大値のばらつきを平均化するものである。また式(14)と同様に式(15)の各要素を列方向に合計すると式(16)が得られる。

$$SH = \left\{ \sum_f H_1(f) \quad \sum_f H_2(f) \quad \dots \quad \sum_f H_n(f) \right\} \cdot (16)$$

この式(16)の各要素は損傷の指標として損傷の影響を強く受ける計測点を特定できることから本研究では **Damage Detection** と呼んでいる。

またさらに、実構造物の損傷解析の際には経験上様々な影響が損傷位置の特定の精度を低下させる。したがって各計測点ごとの影響を表す式(14)と式(16)の値に次の統計処理をすることによって、損傷位置の特定をさらに顕著なものとする事ができる。

$$SMDb = \left\{ \sum_f D_1(f) - b\sigma \quad \sum_f D_2(f) - b\sigma \quad \dots \quad \sum_f D_n(f) - b\sigma \right\}$$

. . . . . (17)

$$SHDb = \left\{ \sum_f H_1(f) - b\lambda \quad \sum_f H_2(f) - b\lambda \quad \dots \quad \sum_f H_n(f) - b\lambda \right\}$$

. . . . . (18)

ただし

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (SM(i) - \overline{SM})^2 / (n - 1)}$$

$$\overline{SM} = \sum_{i=1}^n SM(i) / n$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SH(i) - \overline{SH})^2}{(n-1)}}$$

$$\overline{SH} = \frac{\sum_{i=1}^n SH(i)}{n}$$

$$b = 2$$

以上より、標準偏差の処理をする前後の式(14)と(16)、および式(17)と式(18)とを用いて、各要素をそれぞれ掛け合わせる処理を式(19)と式(20)のように実施する。

$$DI0 = \begin{Bmatrix} SM(1) \times SH(1) \\ SM(2) \times SH(2) \\ \vdots \\ SM(n) \times SH(n) \end{Bmatrix}^T \dots \dots \dots (19)$$

$$DI2 = \begin{Bmatrix} SMDb(1) \times SHDb(1) \\ SMDb(2) \times SHDb(2) \\ \vdots \\ SMDb(n) \times SHDb(n) \end{Bmatrix}^T \dots \dots \dots (20)$$

この処理をして求めた式(19)および式(20)による各計測点ごとの損傷位置に関する指標 DI0 および DI2 は損傷位置を顕著に特定する際に有効である。本研究ではこの指標を **Damage Indicator (DI0, DI2)** と呼んでいる。ここで式(20)を求める際式(17)、式(18)において  $b=2$  としているが、これは著者らのこれまでの実験解析の経験から、標準偏差の2倍までを実験の解析において考慮すればかなり損傷位置を特定できることが確かめられているので、本論文においても比較のために用いることとする<sup>17)</sup>。

### 3.3 損傷評価の解析結果

2章の数値解析で用いた図-1の21質点系の梁モデルに微小欠陥を発生させて、3.1と3.2で述べた手法に沿って検出精度を検討する。用いた減衰係数は剛性係数の0.1%であり、その他の数値は2章と同様である。欠陥は梁要素1(支点近傍)と要素6(支間1/4近傍)において剛性係数を10%減少させて発生させる。欠陥位置の設定に関して、支点近傍は一般の橋梁構造物でも劣化の影響が生じやすい位置を想定しており、支間1/4近傍は支点と加振位置の中間に位置する任意の場所の例として設定した。損傷検出のための加振点の位置は、以下の解析ケースで説明するように、1点で固定した場合と全質点で加振した解析結果を平均する場合について比較する。実際の計測においては、計測センサーは想定される損傷位置や振動応答の敏感な位置にアレー配置する。加振の際の加振点位置や加振方向もそれぞれの状況を判断して、複数の加振点を選択する。解析対象周波数範囲は500Hzまでを考慮した。

解析ケース

- ① Case 1 : 損傷要素6 (剛性係数10%低下)

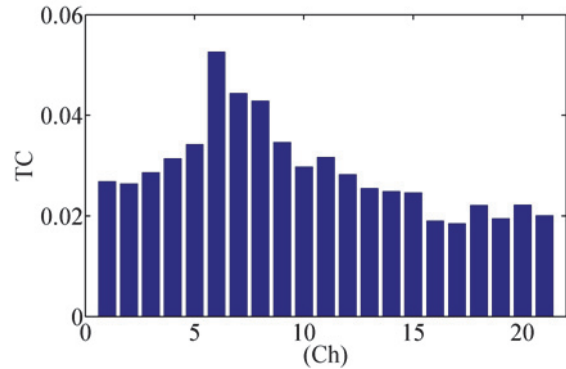


図-8 Total Change (Case 1)

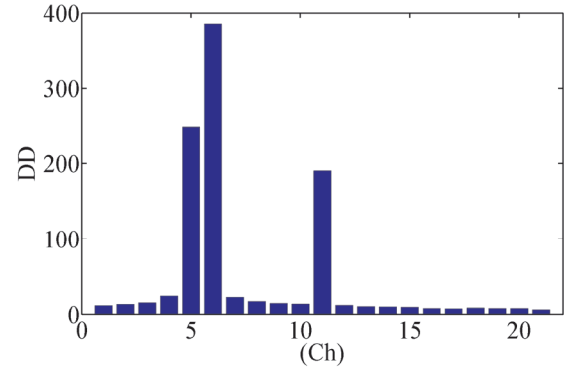


図-9 Damage Detection (Case 1)

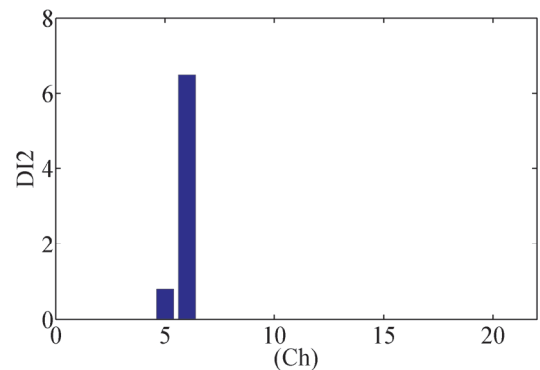


図-10 Damage Indicator 2 (Case 1)

固定加振点11 (支間中央)

- ② Case 2 : 損傷要素1 (剛性係数10%低下)

加振点は質点1から質点21まで連続して移動加振計測したとみなして、移動位置ごとに計算した損傷指数を21加振点で平均化する場合 (以後全点加振平均法という)

- ③ Case 3 : 損傷要素6 (剛性係数10%低下)

加振点はCase 2と同様、質点1から質点21まで連続して移動加振計測し、移動位置ごとに計測した損傷指数を21加振点で平均化する場合 (全点加振平均法)

図-8から図-10にはCase 1の場合の結果を示している。横軸は21個の計測点である。図-8は式(14)の **Total Change (TC)**、図-9は式(16)の **Damage Detection (DD)**、および図-10は式(20)の **Damage Indicator (DI2)** をそれぞれ示している。図-11から図-13にはCase 2の損傷要素1の場合の全点加振平均法の結果をそれぞれ

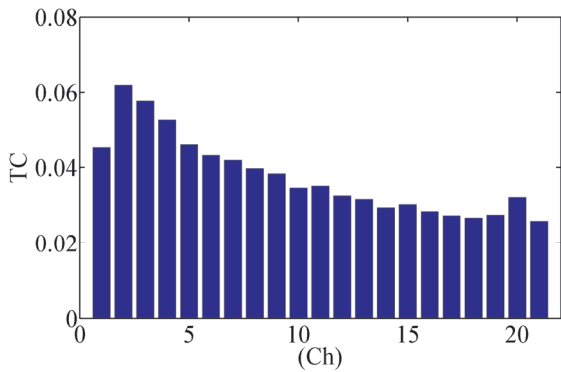


図-11 Total Change (Case 2)

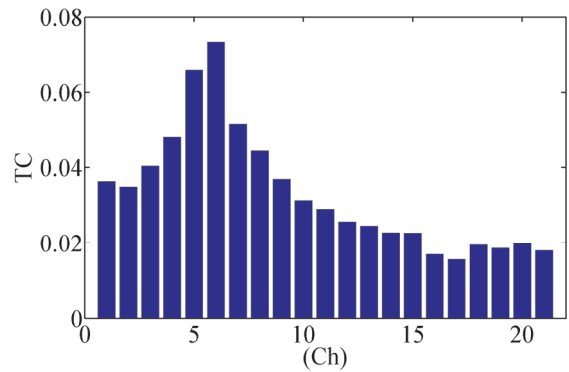


図-14 Total Change (Case 3)

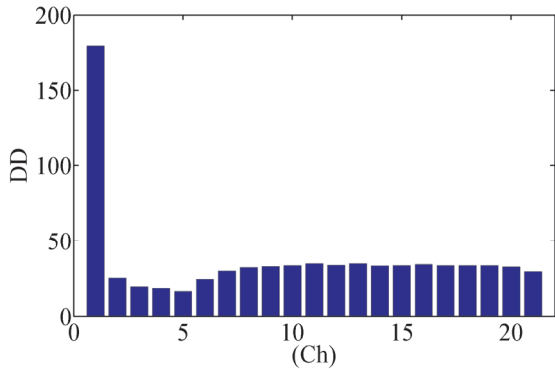


図-12 Damage Detection (Case 2)

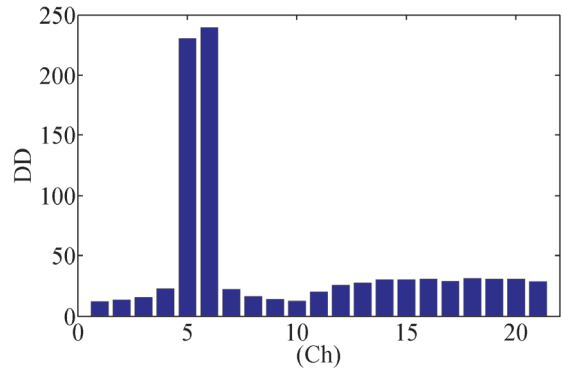


図-15 Damage Detection (Case 3)

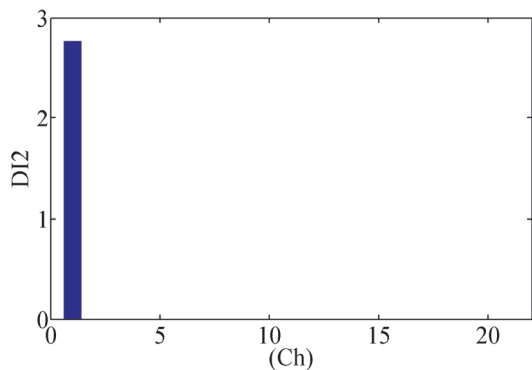


図-13 Damage Indicator 2 (Case 2)

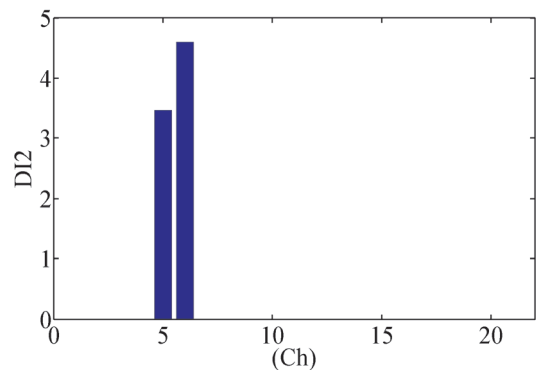


図-16 Damage Indicator 2 (Case 3)

れ示している。また、図-14 から図-16 には Case 3 の損傷要素 6 の場合の全点加振平均法の結果をそれぞれ示している。図-8 から図-10 における Case 1 の結果は支間中央(質点 11)の 1 点加振による方法によって、指標 DI2 によれば損傷位置が特定できることを示している。また DD の値には加振点位置への影響がみられる。

図-11 から図-13 の Case 2 の場合は全点加振平均の効果もあり、DD, DI2 によって、支点近傍の欠陥でも検出できることを示している。さらに、図-14 から図-16 の Case 3 の場合は損傷部材 6 を挟む観測点 5 と 6 の位置において損傷が特定できている。

実際の構造物に対する計測においては Case 2 や Case 3 のように多くの加振点を加振することは事実上難しい。したがって、できるだけ多くの加振点を適切に選定して加振し、それらの結果を総合的に平均化することによって損傷特定精度を上げることができる。

次に、図-17 から図-20 には損傷位置が 1 と 6 の場合に損傷程度を 10% から 5% および 20% と変化させた場合について、式(19)と式(20)を用いて DI0 と DI2 による検出結果の比較をしている。図には質点 1 から質点 11 までの結果を表示している。図中の 5%、10%、20% の値は全点加振平均の値を示している。また図-19 と図-20 には 10%(単点加振)として前述した Case 1 の場合と同じく質点 11 のみを加振して求めた結果を比較のために示している。図-17 と図-18 の損傷位置 1 (支点近傍の損傷) の場合の単点加振(質点 11 加振)の結果は加振点近傍の応答が優勢となり、損傷位置を精度よく検出できない結果となったので、全点加振平均法の結果のみを示している。また、これらの結果から、損傷規模が小さくなった場合においてもある程度精度よく欠陥を検出できるとともに、損傷規模が大きくなるにつれて DI0 または DI2 値が大きくなるので損傷位置および損傷の大き

さがある程度定量的に評価できることとなる。

#### 4. まとめ

本論文は、局部加振法による実構造物の損傷評価解析法を対象として、簡単な梁モデルによる損傷検出の数値シミュレーションを実施して評価手法の検証を実施したものである。本研究で対象としている局部加振法による構造診断法は、構造物の微小欠陥の位置や大きさを精度よく評価する方法の一つとして、構造体の表面に設置した圧電アクチュエータに連続的に周波数が増加する Sweep 波信号を与え、安定的に加振できる方法を用いて構造体を広域かつ高次までの周波数帯によって起振して計測する点が特徴である。したがって、まず構造体にこのような加振エネルギーがどのように入力され、構造体に振動が発生するかを明確に理解することが重要である。本論文の第2章で述べた簡易モデルによる数値シミュレーションはこのような問題を理解する上でその一助となるものである。

また、局部加振法による構造診断によって、高次周波数領域を含む広帯域の周波数応答関数（伝達関数）を詳細に解析して、構造物の局部的かつ微小な欠陥を検出できることから、著者らが実構造物の診断に対して用いている解析アルゴリズムを、第2章で述べた簡易モデルに対して適用した結果を第3章において述べた。

本論文の内容から実構造物に対する局部加振法による損傷検出の実際の詳しい内容までを関連付けて説明することはできないが、ある程度実情に則した理解が得られたものと考えられる。

以下に、本論文から得られた結果をまとめて述べる。

- 1) 局部加振法により実構造物を Sweep 波により局部加振するとともに、振動応答を計測して損傷を検出する解析手法を、簡単な多質点系梁モデルによりモデル化した。また局部加振法による振動応答の内容を把握するため Newmark- $\beta$ 法により数値シミュレーションを実施し、振動応答の状況を明らかにすることができた。
- 2) 局部加振法により広範囲の周波数帯に渡る振動応答を計測解析して、損傷の影響を特定する本研究のプロセスをモデル化するため、簡易モデルに対する伝達関数を用いて周波数領域における解析を実施した。その結果、アレー配置の計測センサーにより微小欠陥を検出する際に、微小欠陥のサイズの影響を受けやすい高次の周波数帯に着目して解析することによって良好な結果が得られた。
- 3) 局部加振法による振動応答を広範囲の周波数領域で解析することにより、局部的な欠陥を精度よく検出できる状況を数値的に示すことができた。また加振点を複数設けて平均化する解析手法によって解析精

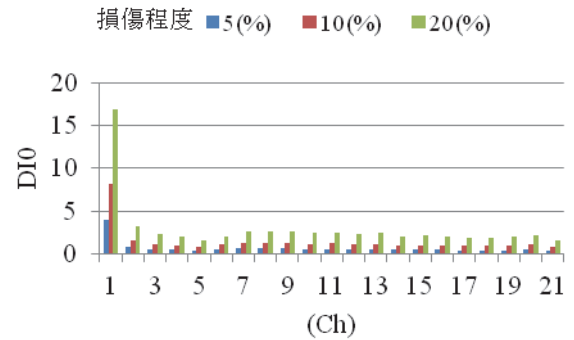


図-17 損傷の大きさの影響（損傷位置 1, DI0）

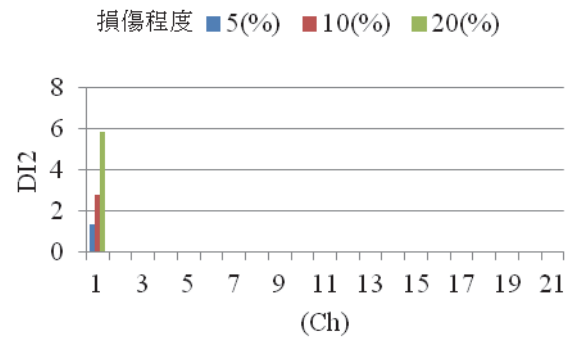


図-18 損傷の大きさの影響（損傷位置 1, DI2）

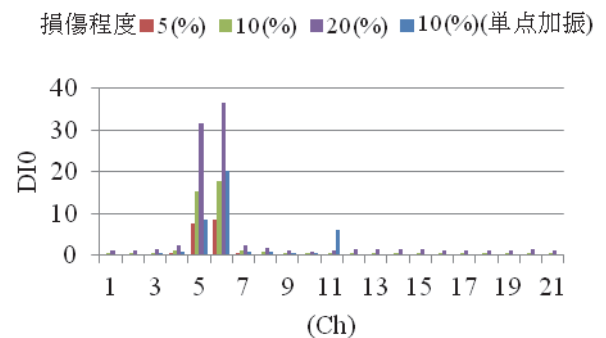


図-19 損傷の大きさの影響（損傷位置 6, DI0）

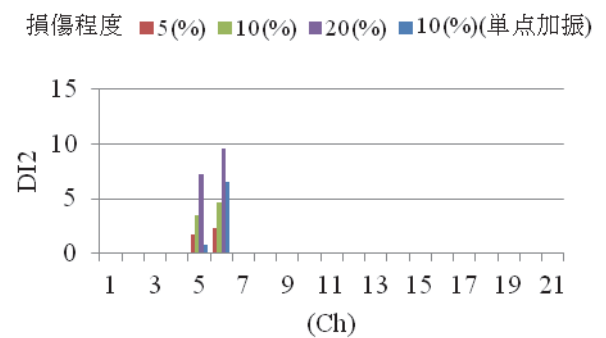


図-20 損傷の大きさの影響（損傷位置 6, DI2）

度を向上させることができることを示した。

以上述べたように、本論文の結果はかなり精度よく解析評価できる結果となっているが、著者らのこれまでの実構造物に対する微小損傷検出の経験から、本論文で述べたいくつかの損傷に対する指標がケースバイケースで有効である。したがって、実際には損傷検出の実情に応じてそれらを使い分けることが重要である。



## 5. 今後の課題

本論文の説明で述べたように、Sweep 波による局部加振の入力においては入力振動エネルギーが構造体を伝播する過程で部材の詳細構造に応じて波動エネルギーとなって周辺に伝播するとともに、波動が到達したそれぞれの部材の境界においてはその境界条件を反映して反射した後、入力点や周辺に分散・回帰することとなる。また実構造物は大きな連続体であるとともに、補剛部材によって局部的に補強された複雑な構造であり、入射波動エネルギーの伝播状況は単純ではない。

しかし、構造部材の支持状態や詳細構造に変化がなく、欠陥のみによって構造状態が変化すると想定できる場合には本手法により微小な損傷であっても検出が可能である。したがって今後の課題としては、本手法をできるだけ実情に則した数値解析を実施して局部加振法の内容を詳細に把握する必要がある。

## 謝辞

本研究は科学技術振興機構(JST)の戦略的国際科学技術協力推進事業の支援（代表者：大島俊之、平成19年度～平成22年度）を受けて実施したものである。ここに記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 土木学会編：橋梁振動モニタリングのガイドライン、構造工学シリーズ 10、土木学会、2010。
- 2) Doebling S. W., C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics, A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS, 1996.
- 3) Farrar C. R. et al. : Dynamic Characterization and Damage Detection in the I-40 Bridge Over the Rio Grande, A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report, LA-12767-MS, 1994.
- 4) Farrar C. R. and D. A. Jauregui : Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Model Data from the I-40 Bridge, Los Alamos National Laboratory Report, LA-12979-MS, 1996.
- 5) Sampaio R. P. C., Maia N. M. M. and Silva J. M. M.: Damage detection using the frequency-response-function curvature method, Journal of Sound and Vibration, 226(5), pp.1029-1042, 1999.
- 6) Peeters B., Maeck J. and De Roeck G.: Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects, Smart Materials and Structures, 10, pp.518-527, 2001.
- 7) Xue S. T. , N. Fujitani, Z.B. Wei and H.S. Tang, : Comparison of variations of natural frequencies for wooden structural models with and without damages part 2, shaking table based results, Proceedings of the international conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, China, pp.1101-1104, 2006.
- 8) Yang J. C. S. , J. Chen and N. G. Dagalakis, :Damage detection in offshore structures by the random decrement technique, Journal of Energy Resources Technology, American Society of Mechanical Engineers 106, pp.38-42, 1984 .
- 9) Flesch R. G. and K. Kernichler, : Bridge inspection by dynamic tests and calculations dynamic investigations of Lavent bridge, workshop on Structural Safety Evaluation Based on System Identification Approaches (H. G. Natke and J. T. P. Yao, editors), pp.433-459, Lambrecht/ Pfalz, Germany: Vieweg & Sons , 1988.
- 10) Masri S. F. , R. K. Miller, A. F. Saud and T. K. Caughey, : Identification of nonlinear vibrating structures, Journal of Applied Mechanics 54, pp.923-929: Part I-formulation, 1987 .
- 11) Natke H. G. and J. T. P. Yao,: System identification methods for fault detection and diagnosis, International Conference on Structural Safety and Reliability, American Society of Civil Engineers, New York, pp.1387-1393 , 1990.
- 12) 山崎智之、大島俊之、大西功基、三上修一：局部振動による鋼材接合部の損傷評価に関する研究、応用力学論文集、, Vol.5, pp.837-846, 2002.
- 13) Beskhyroun S., Oshima T., Mikami S., Yamazaki T.,: Damage detection and localization on structural connections using vibration based damage identification methods, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol.6, pp. 1055-1064, 2003.
- 14) Beskhyroun S., Mikami S., Oshima T. and Yamazaki T.: Modified damage identification algorithm based on vibration measurements, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol.7, pp.97-107. 2004.
- 15) Kumar, Rathish P., Oshima, T., Yamazaki T., Mikami S., Miyamori Y.: Detection and Localization of Small Damages in a Real Bridge by Local Excitation using Piezoelectric Actuators, Jouranal of Civil Structural Health Monitoring, Vol. 2, No. 2, pp.97-108, 2012.
- 16) Mikami, S., Beskhyroun, S., Yamazaki, T., Oshima, T.: Damage detection in concrete structures using tunable piezoelectric actuators, Journal of Applied Mechanics, Vol. 10, pp.77-88, 2007.
- 17) Beskhyroun, S., Oshima, T., Mikami, S., Tsubota, Y.: Structural damage identification based on changes in power spectral density, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vo.8, pp.73-84, 2005.

(2012年9月28日受付)