カオス応答アトラクタのリカレンスプロットに基づく 構造物の損傷位置同定*

野村 泰稔^{*1}, 森本 大貴^{*2}, 日下 貴之^{*1}, 古田 均^{*3}

Structural Damage Localization Based on Recurrence Plots of Chaotic Response Attractor

Yasutoshi NOMURA^{*1}, Daiki MORIMOTO, Takayuki KUSAKA and Hitoshi FURUTA

^{*1} Ritsumeikan Univ. Dept. of Mechanical Engineering
1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu, 525-8577 Japan

The field of vibration-based structural health monitoring involves extracting a feature which robustly quantifies damage-induced changes of the structural dynamics. Generally, the change of structural characteristics due to damage is analyzed by observing frequencies, mode shapes, damping, etc. However, the change of those modal features due to damage is minor, so that detecting the location of damage is difficult. Recently, an attractor-based monitoring system has been proposed. The recent study using chaotic excitation has demonstrated that the change of the attractor caused by damage is more sensitive than that of the most commonly used frequency and mode shape of the structure, in which the recurrence plot was applied successfully to the damage detection. However, damage localization has not been discussed sufficiently. An attempt in this study was made to develop a damage localization method using chaotic excitation and recurrence quantification analysis. It was demonstrated through experiment results that the proposed system makes it possible to detect damage locations.

Key Words : Recurrence Plots, Chaos, Structural Damage Localization, Attractor

1. 緒 言

わが国では、1960 年頃から 1970 年代の高度経済成長期において橋梁や道路等に代表される社会基盤施設の整備が大量に行われてきた⁽¹⁾。現在、これら既設の構造物の強度不足や劣化が問題視され、その維持管理をいかに適切に行うかが重要な課題となってきた^{(2),(3)}。社会基盤施設の維持管理を行う上で最も重要となるのが健全性の評価であり、現在までに破壊・非破壊検査等の定期点検ベースの方法や健全性をリアルタイムに監視する技術（構造ヘルスマモニタリング）に関する研究が実施されている。長期的な視野で、ライフサイクルコスト最小化を目指す社会基盤施設の維持管理計画を策定するためには、高度な技術を要する破壊・非破壊検査を実施する前に、診断対象の全体構造の健全性を把握し、更なる詳細調査が必要な損傷箇所を的確に特定することが重要である。このような背景から、振動応答計測に基づく構造ヘルスマモニタリング手法が提案されている^{(4),(5),(6),(7)}。これらは計測自体の簡便さ、振動応答は構造物の性能に直接関係していることから、高度な破壊・非破壊検査による詳細調査の事前調査として有効だと考えられる。損傷に起因する構造特性の変化は、一般的に周波数特性、モード形状、減衰特性などを観察することで把握されるが、固有振動数の変化は損傷に対する感度が低く、損傷箇所の特定はそれほど容易ではない。また損傷前後のモード特性の相関を調査する Modal Assurance Criteria (MAC)⁽⁷⁾および Coordinate Modal Assurance Criteria (COMAC)解析は全次モード特性を参照する段階で損傷に対する感度が劣化してしまう。また、これらの先駆的な研究として、構造物の応答から損傷の指標となる層剛性を逆解析により直

* 原稿受付 2013 年 4 月 29 日

^{*1} 正員、立命館大学理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1）

^{*2} 立命館大学大学院

^{*3} 関西大学総合情報学部（〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1）

E-mail: y-nomura@fc.ritsumei.ac.jp

接同定する方法が提案されている^{(8),(9),(10)}。ただし、状態空間モデルを規定し、逆解析により構造物の物理パラメータを推定する際、その推定精度は利用する逆解析手法やノイズレベルに大きく依存することが明らかにされている⁽⁹⁾。これら以外にも、自己回帰モデルを用いた方法^{(11),(12)}、ニューラルネットワーク⁽¹³⁾を用いた方法、Wavelet解析^{(14),(15),(16)}を用いたもの等数多くの方法が提案されている。

一方、近年新たな構造ヘルスマonitoring手法として、カオス応答アトラクタの定量評価に基づく方法が開発されている^{(17),(18),(19)}。これらは構造物にカオス信号を入力し、その応答アトラクタのもつ特徴量を損傷前後で比較することで、損傷発生を検出するものであり、文献⁽¹⁸⁾では診断対象の損傷に起因するカオス特徴量の変化はモード形状や固有振動数の変化と比較して大きいことが明らかにされている。ただし、これらの論文^{(17),(18),(19)}では損傷発生の検知に有効であることが示されているものの、全体構造から損傷位置を同定することに関しては十分に議論されていない。また、佐藤らは3次元フレームモデルを診断対象として、損傷前後で得られる応答のアトラクタを交差させてリカレンスプロットおよびその特徴量である%recurrence(以下、%RECと記す)を評価することで、損傷を有する要素を特定することに成功し、さらにはノイズに対して高いロバスト性を有することを数値実験により明らかにしている⁽²⁰⁾。ただし、損傷位置によってはその位置の検出に失敗するケースも存在し、損傷位置を同定するための特徴量の取り扱いや解析対象となる応答の選定等について十分に議論されているとは言い難い。筆者らも数値実験を通じて、損傷前後の応答アトラクタの評価法として、交差予測誤差を計算し、層レベルでの剛性低下領域の損傷位置の同定に成功した⁽²¹⁾。ただし、模型実験により応答に複数のモードが励起した場合、その応答から再構成されるアトラクタをそのまま評価しても、損傷位置同定に失敗することを確認した。

本研究では、カオス応答の低次モード成分に着目し、アトラクタの評価として Recurrence Quantification Analysis の内、リカレンスプロットを適用し、数値実験及び模型実験を通じて損傷位置同定を試みる。リカレンスプロットの評価指標である%REC は計算時の閾値の設定により変化することから、本研究では複数の閾値を設定し、%REC を標準化することを考える。また、既往研究⁽²⁰⁾では、各計測点で算出された%REC を損傷前後で比較することで損傷位置が評価されるが、損傷前後で応答の波形構造や振幅レベルが大きく変化する場合、損傷位置の同定は困難となる。そこで本研究では、各計測点で得られる%REC を損傷前後で比較するのではなく、健全時および診断時において計測されるデータに対して個別に標準化された%REC を評価することを考え、各状況下で、計測点間の%REC の減少・増加などの相対関係を評価し、その相対関係が損傷前後で異なることに着目する。

以下では、リカレンスプロットの説明とリカレンスプロットを用いた損傷位置同定アルゴリズムについて説明し、実証試験において、構造物に一箇所および二箇所の損傷を与え、層レベルの損傷の位置を同定できるかどうか検討し提案手法の有効性を確認する。

2. Recurrence Quantification Analysis

リカレンスプロット⁽²²⁾とはアトラクタ上の各点間の相関関係を視覚化するものであり、様々な分野で利用されている。同次元の2つのシステムから得られた時系列 x と y を比較する場合、埋め込み次元 m 、遅れ時間 τ を決定して各時系列から埋め込みベクトルを以下のように構成し、ディスタンスマトリクス D_{ij} を式(2)のように定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(n) &= (x(n), x(n+\tau), \dots, x(n+(m-1)\tau)) \\ \mathbf{y}(n) &= (y(n), y(n+\tau), \dots, y(n+(m-1)\tau)) \end{aligned} \quad (1)$$

$$D_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|\mathbf{x}(i) - \mathbf{y}(j)\|) \quad (i, j = 1, 2, \dots, N \quad \text{or} \quad i = 1, 2, \dots, N, j = i + 1) \quad (2)$$

ここで、 Θ はヘビサイド関数であり、 ε はアトラクタ軌道の接近の閾値となる半径である。 $D_{ij}=1$ となる点をリカレンスポイントと呼び、リカレンスプロットはリカレンスポイントを全ての i と j の組み合わせについてプロットすることで獲得される。リカレンスプロットを描くことで、2つのアトラクタ軌道の幾何学的な関係が視覚的に得られる。リカレンスプロットはアトラクタをどう比較するかによって、2種類に分けられ、式(2)内で同

じアトラクタを比較する場合 ($\mathbf{x} = \mathbf{y}$) を Auto Recurrence Plots(ARP)と定義され, 異なるアトラクタを比較する場合 ($\mathbf{x} \neq \mathbf{y}$), つまり異なるアトラクタを交差する場合のリカレンスプロットは Cross Recurrence Plots と定義される.

図 1 にガウシアンノイズおよび代表的なカオス信号の一つであるローレンツ方程式の第一変数の Auto Recurrence Plots の例を示す. 図 1 から明らかなように, ガウシアンノイズのリカレンスプロットは連続して対角線方向にリカレンスポイントが発生していない. これは, 時系列上に類似する軌道がないことを意味している. リカレンスプロットにおいて, ある点がプロットされることの意味は, その点に対応する時系列の軌道が類似していることを意味している. また対角線方向に連続してリカレンスポイントが現れることの意味は, 連続して時系列の軌道が似ていることを示している.

一方, ローレンツ方程式の場合, 決定論に従う低次元カオスであることから, リカレンスポイントが対角線方向に連続して発生していることが分かる. これらのリカレンスプロットの結果を定量化する手法として, Percent Recurrence (%REC)⁽²³⁾が最も一般的に使用される. 具体的には, ディスタンスマトリクス D_{ij} が得られたとき, %REC は式(3)で計算される. ただし, この場合, $D_{ij}=D_{ji}$ となり冗長性が高いため, 式(4)を用いて%REC が計算される場合もある.

$$\%REC = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N D_{i,j}}{N^2} \quad (3)$$

$$\%REC = \frac{2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N D_{i,j}}{N(N-1)} \quad (4)$$

%REC は幾何学的には 2 つのアトラクタ軌道が接近する頻度を表し, 2 つの時系列間に類似パターンが発生する頻度を意味する.

Table 1 Procedure of damage localization

Step 1	Input Chaotic signal to Structure and Observe relative story acceleration
Step 2	Extraction of the first mode vibration at all measurement points
Step 3	Reconstruction of Attractor
Step 4	<p>Observation of Baseline data</p> <p>(a) Calculation of %recurrence (%REC) using Threshold value ε_{own} and ε_{ith}</p> <p>ε_{own}: 10% of standard deviation of wavelet coefficients at the own sensor.</p> <p>ε_{ith}: 10% of standard deviation of wavelet coefficients at the sensor i</p> <p>$\%REC_{own}(s)$, $\%REC_{1st}(s)$, $\%REC_{ith}(s)$, are observed. (i, s: sensor number)</p> <p>(b) Normalization of %REC</p> <p>$NREC_{1st}(s) = \%REC_{own}(s) / \%REC_{1st}(s)$</p> <p>$NREC_{2nd}(s) = \%REC_{own}(s) / \%REC_{2nd}(s)$</p> <p>$NREC_{ith}(s) = \%REC_{own}(s) / \%REC_{ith}(s) \dots$</p>
Step 5	Input Chaotic signal used in Step 1 to the damaged structure and Steps 2–4 are performed.
Step 6	<p>Calculation of Damage Index $DI(s)$</p> $= \max \left[\frac{NREC_{1st}^{damage}(s)}{NREC_{1st}^{Intact}(s)}, \dots, \frac{NREC_{ith}^{damage}(s)}{NREC_{ith}^{Intact}(s)} \right]$ <p>$DI(s) = 1.0$: Intact</p> <p>$DI(s) \neq 1.0$: Damage</p>

(a) Gaussian noise

(b) Lorenz system

Fig.1 Recurrence plots

3. リカレンスプロットを用いた異常診断法

リカレンスプロットを用いた損傷位置同定法の計算手順について表 1 にまとめる．まず，Step 1 において，構造物にカオス信号を入力し，各計測点で層間加速度応答を取得する．ここで，層間加速度応答とは，センサ間の相対加速度応答のことを意味し，塔上構造物を対象とする場合，上位のセンサの測定値と下位のセンサの測定値の差のデータが層間加速度応答となり，本研究ではそれを上位のセンサの測定値としている．構造物にカオス信号を入力すると，複数の振動モードが励起され，応答から再構成されるアトラクタを評価することで，損傷発生を感度良く検知することが可能である．ただし，後述する実証試験の数値実験において明らかにするが，これまでの筆者らの事前検討により，複数のモードが励起する加速度応答の再構成アトラクタをそのまま評価すると損傷の位置同定に失敗する場合があることを確認した．このことは複数のモードが損傷により変化するものの，モードの節の付近に損傷がある場合，その領域では損傷前後で応答の変化が小さいことが理由として考えられ，結果として損傷位置を特定できなかった．このようなことから，本研究では，複雑に変化する全モードの振動成分を含む応答を評価することを避け，節の存在しない振動応答の 1 次モード成分のみを評価することとした．損傷の規模および位置によっては，1 次モードの振動数，振幅レベルの変化は小さく，損傷がより高次モードに影響を与える場合も当然考えられるが，損傷の影響により，1 次モードに対してもその応答の波形構造に変化が現れることから，本研究では応答そのものを評価するのではなく，1 次モードの振動成分のアトラクタに着目した．なお，1 次モード成分の抽出に関してはローパスフィルタや実験モード解析などにより可能である．ただし，ローパスフィルタを用いる場合は帯域設定に任意性が残り，実験モード解析を用いる場合，各モードのインパルス応答を算出することが可能であるものの，それを算出する過程で必要となる減衰定数の初期値や重み行列の設定等により，各インパルス応答が変化することが考えられる．このようなことから，本研究では，Step 2 において，連続ウェーブレット変換を用いて，1 次モード振動の波形構造を保持しているウェーブレット係数を算出し，それを評価する．具体的には，計測された応答から FFT などにより 1 次モードの振動数を取得し，その値とマザーウェーブレットの中心周波数が一致する際の Wavelet 係数の内，実部の値を 1 次モード相当の振動成分（以下，1 次モード振動と呼ぶ）と見なし，評価対象の時系列とした．Step 3 において，1 次モード振動からアトラクタを再構成する．そして，Step 4 では複数の %REC を計算し，標準化した NREC を Baseline データとして獲得する．%REC の結果はディスタンスマトリックス D_{ij} を計算する際の閾値 ε に依存する．また，損傷規模により，波形構造や振幅レベルが健全時と比較して顕著に変化することから，健全時の応答から得られる閾値を用いて，解析対象のアトラクタを交差することで評価される Cross Recurrence Plots から %REC を計算し損傷位置を推定すると，必ずしも良い結果を与えるとは限らない．既往研究⁽²⁰⁾では，診断時（損傷時）の応答を健全時の応答の標準偏差を用いて基準化し，アトラクタを交差させて %REC を評価し損傷の位置を同定しているが，損傷位置の特定に失敗するケースが存在する．このようなことから，本研究では，診断時に得られるアトラクタを評価する際に健全時の情報を使用することなく，健全時および損傷診断時，それぞれの 1 次モード振動から複数の閾値を設定し，Auto Recurrence Plots から %REC を計算し，それらを標準化した NREC を計算する．閾値は，各 %REC を基準化するため，全ての計測点から 1 次モード振動の標準偏差を計算し，その 10% の値とした．そして，それぞれの閾値を用いて，%REC を計算する．例えば，表 1 に示される %REC_{own}(s) は，第 s 番目のセンサで獲得されるアトラクタに対して計算される %REC である．この際，閾値は自分自身のセンサ（第 s 番目のセンサ）で獲得された 1 次モード振動の標準偏差の 10% の値である．つまり，%REC_{own}(s) とは，閾値を決定する際に用いられる 1 次モード振動からアトラクタが再構成され，そのアトラクタに対して計算される値である．また，%REC_{1st}(s) は，同様に第 s 番目のセンサで獲得されるアトラクタに対して計算される %REC であるが，この際，第 1 番目のセンサで獲得された 1 次モード振動の標準偏差から計算された ε_{1st} が閾値として使用される．他の %REC_{ih}(s) も同様の手順で，第 i 番目のセンサで獲得された 1 次モード振動の標準偏差から決定された閾値 ε_{ih} を用いて，第 s 番目のセンサで獲得されたアトラクタに対して計算される．以上の手順により，同一のアトラクタに対して，複数の閾値を用いて，複数の %REC が計算される．次に，これらの計算された各 %REC を用いて比を求め，標準化された NREC を計算し，Baseline データとして NREC_{ith}^{intact}(s) が獲得される．そして損傷診断時において，Step 1 から Step 4 が行われ，NREC_{ith}^{damage}(s) を獲得する．最後に，Step 5 において損傷前後で NREC の比を求め，その最大値を損傷指標 (Damage Index: DI) として，各計測点での DI 値から損傷位置を特定する．本研究では，健全時のデータおよび診断時にお

いて計測されるデータを個々に評価することで、各状況で得られた NREC の減少・増加傾向などの相対関係の評価し、その相対関係が損傷前後で異なることに着目したものである。損傷前後での NREC の相対関係の変化が DI 値として現れ、損傷を有する層が特定されたと考えた。DI(s)=1 の場合、第 s 番目のセンサの近傍領域は健全であると判断し、DI(s)≠1 の場合、第 s 番目のセンサの近傍領域は何らかの損傷を有していると判断される。

4. 実証試験

本研究では、対象構造物として図 2(a)に示す頭頂部に起振機を有するアルミ合金製 4 層フレーム構造物を用いて、表 2 に示す損傷シナリオについて実証試験を行った。模型実験に先立ち、本研究では図 2(a)に示したフレーム構造物の寸法と表 3 に示す構造諸元の下、モデル化を行い、動的解析を通じて提案手法の有用性を考察した。数値実験では、複数のモードが励起した層間加速度応答から前処理せずアトラクタを再構成し、提案手法の手順により DI 値を評価した場合の結果を明らかにし、1 次モード振動のアトラクタを評価することの有効性を示す。次に、1 次モード振動のアトラクタを評価対象として、健全時の情報から閾値を決定し、損傷前後で得られるアトラクタを交差させて、損傷位置を同定する方法と提案手法を比較する。なお、損傷は図 2(b)に示すセンサ S6 の右下の×印で示された柱の幅を変更させたものを考え、S1 から S8 を応答の計測点とし、これらを挟む 2 つの計算上の節点の応答の平均値を計測データとした。例えば、S1 の応答には、図中両隣の節点■の応答の平均値が与えられる。またその際、各節点で得られた応答加速度の標準偏差に対して 10%の大きさのガウシアンノイズをそれぞれに付加し、計測ノイズの発生を考慮した。入力カオス信号としては数値実験及び模型実験ともに、式(5)に示す 3 変数常微分方程式であるローレンツ方程式⁽²⁴⁾を用いることとし、図 3(a)に示される第 1 変数である z_1 の振動波形を起振機を通じて構造物に入力し、各層に 2 つ配置した加速度センサにより応答を計測した。なお数値実験では、頭頂部の 4 つの節点に起振機の質量を負荷するとともに、カオス波形を地盤からの相対加速度として入力した。

(a) Experimental model and exciter
Fig.2 Structural model

(b) Numerical model

Table 2 Damage scenario for laboratory experiments

Scenario 1	Remove column C1
Scenario 2	Remove column C2
Scenario 3	Remove column C3
Scenario 4	Remove column C4
Scenario 5	Replace column C1 with a column having the width of 30mm
Scenario 6	Replace column C2 with a column having the width of 30mm
Scenario 7	Remove column C1 and column C3
Scenario 8	Replace column C1 and column C3 with columns having the width of 30mm

Table 3 Structural property

Column size (height,width,thickness)	235×40×1.5 (mm)
Slab	300×200×12 (mm)
Young's modulus E	70GPa
Density ρ	2800kg/m ³
Poisson's ratio	0.28
Damping ratio for the 1st and 2nd mode	0.01

$$\begin{aligned}\eta^{-1} \frac{dz_1}{dt} &= -16(z_1 - z_2) \\ \eta^{-1} \frac{dz_2}{dt} &= 40z_1 - z_2 - z_1z_3 \\ \eta^{-1} \frac{dz_3}{dt} &= z_1z_2 - 4z_3,\end{aligned}\tag{5}$$

ここで、 η は入力信号の速度を変えるパラメータであり、 η を変えることで、カオス信号のリアプノフ指数と周波数帯域を調整することができる。本研究ではすべての実験で $\eta = 1.0$ とした。また、サンプリング間隔を 0.01s とし、45 秒間応答を計測した。なお、アトラクタを再構成する際の遅れ時間 $\tau = 1$ 、埋め込み次元 $m = 3$ とし、DI 値を求める際に移動窓法（窓幅：1000 データ、移動ステップ：175、解析結果：25 個の平均値）を用いて、解析結果の信頼性の向上を図った。また、1 次モード振動を抽出する際のマザーウェーブレットとして、本研究ではすべての実験でメイエのウェーブレットを使用した。

4・1 数値実験

数値実験では、損傷として図 2(b) に示す 3 層の 1 つの柱部材の幅を健全時 40mm のものから 30mm および 35mm のものに取り換えた 2 つの状況（それぞれ Scenario A, B とする）について検討する。例えば、幅 35mm のものに取り換えた場合、部材諸元から計算すると層剛性の低下率は 3.125% であり、固有値解析により計算される振動数の変化で最も大きいのは加振方向に対するせん断 4 次モードとなった。ただしそれらの振動数の変化は健全時 10.404Hz に対し、損傷時 10.335Hz であり、変化率はおよそ 0.66% と極めて小さいことが確認された。図 4 に健全時のセンサ S1 で計測された応答加速度とその FFT 結果を示している。これらの結果から明らかなように、減衰を与えたことにより 4 次モードは明確に確認できず、振動数の違いから損傷位置を同定することは容易ではないことが分かる。なお、せん断 1 次モードの振動数の変化率は 0.36% となる。また、図 5 に S1 で計測される層間加速度応答から 1 次モード相当の Wavelet 係数を抽出した結果とその FFT 結果を示す。FFT 結果から明らかなように得られた Wavelet 係数は 1 次モード相当の振動波形を表していると考えられる。

図 6 は 3 層の 1 つの柱部材（センサ S6 の右下）を幅 30mm のものに取り換えた状況 (Scenario A) に対し、層間加速度応答から前処理せずアトラクタを再構成し、提案手法の手順により DI 値を評価した場合の結果 (図 6(a)) お

(b) Fourier spectra of input signal

Fig.3 chaotic excitation

(b) Fourier spectra of original signal

Fig.4 Response in time and freq. domain

(b) Fourier spectra of wavelet coef.

Fig.5 Wavelet coefficients

よび損傷前後の1次モード振動のアトラクタを交差させ、健全時の1次モード振動から閾値を決定した場合の結果(図6(b))を示している。これらの図の縦軸はDI値であり、横軸はセンサ番号である。

層間加速度応答そのものからアトラクタを再構成し、提案手法のDI値を評価する方法では、図6(a)から明らかなように損傷位置に最も近いセンサS6のDI値が最も大きな値を示しているものの、他の健全な層(第1層、第4層)の応答を計測するセンサS1、S2、S7、S8も概ね1.10を示し、健全時と比較して10%ほど変化しており、健全であるのか損傷を有するのか判断は困難である。これは前記したように、複数のモードが励起した場合、すべての計測データが健全時と比較して複雑に変化することが理由として考えられる。そして、1次モード振動のアトラクタを評価対象として、健全時の情報から閾値を決定し、アトラクタを交差させて評価する方法では、図6(b)から明らかなように、損傷位置に最も近いセンサS6のDI値が最も小さい値を示しているものの、他の健全な層の応答を計測するセンサについても1.0より小さな値を示し、どの領域が損傷しているのか健全であるのか判断することは容易ではない。

図7に、対象構造物が診断時において健全である状況およびScenario A、Scenario Bに対して、提案手法を適用した結果を示す。対象構造物が診断時に健全である状況では、図7(a)に示されるように、DI値は多少のばらつきは認められるものの、すべての計測点で概ね1.0を示していることが分かる。このことはBaselineデータに対して変化がなく、対象の構造特性に変化がないことを意味している。一方、図7(b)に示すScenario Aに関しては、損傷を有する第3層の応答を計測する2つのセンサの内、S6のDI値が最も大きい値を示し、Baselineデータに対して概ね16%上昇していることが分かる。また、他の健全な層に配置されているセンサについては、多少のばらつきは認められるものの概ね1.0を示しており、損傷の影響を受けることなく、損傷前後で変化していないと考えることができる。これらのことから、第3層に何らかの異常があることが予測される。この損傷パターンはセンサS6の右下の柱の幅を10mm細くした状況であるが、S5についても、他の健全な層の応答を計測するセンサで得られるDI値よりわずかに大きい値を示している。これは損傷の影響がS5にも表れたことが理由として考えられる。図7(c)に示す第3層の1つの柱部材を幅35mmのものに取り換えた状況(Scenario B)に関しては、第3層の応答を計測する2つのセンサの内、S6が最も大きい値を示し、Baselineデータに対して概ね7%上昇することが確認できる。一方、他の健全な層に配置されているセンサについては、多少のばらつきは認められるものの概ね1.0を示しており、損傷の影響を大きく受けることなく、損傷前後で変化していないことが示唆される。これらのことから、第3層に何らかの異常が存在することを予測できる。また、柱幅を5mmおよび10mm細くした場合を比べると、5mm細くした場合の方が、S6のDI値は小さいことから、損傷の規模と損傷が存在す

(a) DI calculated from original response (b) DI calculated from cross %REC

Fig.6 Damage Index by previous studies for scenario A

Fig.7 Damage Index by the proposed system

る近傍のセンサで得られる DI 値に相関があることが予測される。以上の結果から、1 次モード振動に着目し、健全時のデータおよび診断時において得られた NREC の減少・増加傾向などの相対関係を評価することが損傷位置同定に有効であることが分かる。なお、提案手法において、損傷を有する層の応答を計測するセンサでの DI 値が Baseline データに対して上昇する ($DI > 1.0$) 理由は模型実験の結果を通じて明らかにする。

4・2 模型実験

損傷シナリオについては表 2 に示した 8 ケースについて検討する。ここで、柱部材を一本除去する場合の層剛性の低下は 25%であり、柱部材の幅が 10mm 細い場合、部材諸元から計算すると層剛性の低下率は 6.25%となる。例えば、第 1 層の柱を幅 10mm 細いものに取り換えた場合、振動応答から計算される卓越振動数の変化は最も大きいのは 2 次モードとなった。ただしそれらの変化は健全時 4.712Hz に対し、損傷時 4.663Hz であり、その変化の比率はおよそ 2%と大きくはなく、振動数の変化から損傷位置を同定することは容易ではない。また、柱を計 2 本除去した場合は、かなり大規模な損傷であり、現実的な設定ではないと思われるが、このような条件下でも提案手法で定める DI 値が有効に機能するか確認することとした。なお、参考として、診断時に対象構造物が健全である状況での結果を図 8 に示す。前述の数値計算での結果と同様、多少のばらつきは認められるものの、すべての計測点での DI 値が概ね 1.0 を示し、構造特性は Baseline データ取得時と変化がないことを示している。

4・2・1 損傷が 1 つ存在する場合

図 9 に損傷シナリオ 1(第 1 層の柱、図 2(a)中 C1 を除去)の結果を示す。第 1 層の応答を計測する S1, S2 が最も大きく、Baseline データ(健全時データ)に対して概ね 100%上昇していることが分かる。一方、他の健全な層に配置されているセンサでは多少のばらつきは認められるものの概ね 1.0 を示しており、損傷の影響を受けることなく、損傷前後で変化していないことが分かる。これらのことから、第 1 層に何らかの異常があることが予測される。この損傷シナリオ 1 はセンサ S2 の右下の柱を除去した状況であるが、S1 と S2 の DI 値にほとんど違いが見られなかった。これは損傷の規模が大きく、2 つのセンサで計測される応答にほぼ違いが見られなかったことが理由として考えられる。また、本研究では各層に 2 つの加速度計を配置しているが、層レベルで損傷位置を同定する場合、センサは各層一つで十分であることを付記しておく。

図 10 に損傷シナリオ 2(第 2 層の柱、図 2(a)中 C2 を除去)の結果を示す。DI 値を確認すると、S3, S4 の DI 値が全体の中で最も大きく、Baseline データに対して約 100%上昇していることが分かる。一方、他の健全な層の応答を計測するセンサでは多少のばらつきは認められるものの、概ね 1.0 を示している。これらの層の構造特性は Baseline データ取得時と変化がないことを意味している。以上のことから、第 2 層に何らかの異常があると判断できる。図 11 および図 12 に示される損傷シナリオ 3, 4 についても同様の結果が得られ、損傷位置を DI 値の大きさから判断できることが分かる。

次に、第 1 層の柱、図 2(a)中の柱 C1 の幅を 10mm 細くしたものに取り換えた状況である損傷シナリオ 5 の結果を図 13 に示す。第 1 層のセンサ S1, S2 の DI 値が全体の中で最も大きく、Baseline データに対して概ね 20%ほど上昇していることが分かる。一方、他の健全な層から得られる DI 値は、多少のばらつきが認められるものの、おおむね一定値 1.0 を示しており、損傷前後で変化しないことが分かる。

第 2 層の柱、図 2(a)中の柱 C2 の幅を 10mm 細くしたものに取り換えた状況である損傷シナリオ 6 の結果を図 14 に示す。第 2 層のセンサ S3, S4 の DI 値が全体の中で最も大きく、Baseline データに対して概ね 20%ほど上昇していることが分かる。一方、他の健全な層から得られる DI 値は、多少のばらつきが認められるものの、おおむね一定値 1.0 を示しており、損傷前後で構造特性に変化しないことが分かる。以上のことから、本研究で提案する %REC から計算される Damage Index を評価することで、層剛性の低下レベルが 6%程度であれば、十分にその位置を特定することが可能であることが分かる。

4・2・2 損傷が 2 つ存在する場合

図 15 に損傷シナリオ 7(第 1 層の柱 C1 と第 3 層の柱 C3 を除去)の結果を示す。DI 値を確認すると、第 1 層の応答を計測する S1, S2 および第 3 層の応答を計測する S5, S6 の DI 値が全体の中で大きく、Baseline データに対して約 80%から 100%上昇していることが分かる。一方、他の健全な層の応答を計測する S3, S4, S7, S8 センサで

Fig.8 Results for intact case

Fig.9 Results for scenario 1

Fig.10 Results for scenario 2

Fig.11 Results for scenario 3

Fig.12 Results for scenario 4

Fig.13 Results for scenario 5

Fig.14 Results for scenario 6

Fig.15 Results for scenario 7

Fig.16 Results for scenario 8

は多少のばらつきは認められるものの、概ね 1.0 を示している。このことは、健全な層の応答は第 1 層および第 3 層に発生した損傷の影響を受けず、損傷前後で構造特性に変化がないことを意味している。

次に、損傷シナリオ 8 (第 1 層の柱 C1 と第 3 層の柱 C3 をそれぞれ、幅を 10mm 細くした柱に取り換えた状況) の結果を図 16 に示す。1 層のセンサ S1, S2 および 3 層のセンサ S5, S6 の DI 値が全体の中で大きく、Baseline データに対して、概ね 15% から 25% ほど上昇していることが分かる。一方、他の健全な層から得られる DI 値は、多少のばらつきが認められるものの、おおむね一定値 1.0 を示しており、損傷前後で構造特性に変化がないことを意味している。また、柱要素の幅を 10mm 細くした場合、層剛性の低下は 6.25% であり、各層の柱を一本除去した場合に比べて損傷の規模は小さい。損傷規模が小さくなるに従って、DI 値も小さくなる傾向が、数値実験結果と同様に示された。

4・2・3 損傷位置同定のメカニズム

提案手法を適用することで、損傷を有する層での DI 値が 1.0 より大きく、健全な層での DI 値は概ね 1.0 を示すことが数値実験および模型実験を通じて確認された。本項では、損傷シナリオ 1 の結果を例として、損傷を有する層の応答を計測するセンサでの DI 値が Baseline データに対して上昇する ($DI > 1.0$) 理由を考察する。提案手法では、DI 値は損傷前後の応答から計算される $NREC_{th}(s) (= \%REC_{own}(s) / \%REC_{th}(s))$ の比と定義される。評価対

象のデータを計測したセンサと閾値 ε_{th} を決定する際のデータを計測したセンサが一致する場合 ($s = i$ の場合), 同じ計測データの標準偏差から閾値 ε_{own} と ε_{th} が決定され, それらは同値であることから, $NREC_{th}(s) = 1$ となる. 一方, $s \neq i$ である場合, 評価対象のセンサ s のデータに対して, 異なる 2 つの閾値を用いて, リカレンスポイントがカウントされるため, 結局, $NREC \neq 1$ となる.

図 17 に $NREC_{ith}^{damage}(s) / NREC_{ith}^{intact}(s)$ の結果を示し, その中から, 図 18 に示される $NREC_{6th}(= \%REC_{own} / \%REC_{6th})$ を例として説明する. なお, 図 17 において, 各センサでの最大値が DI 値となる. $NREC_{6th}$ は健全時および損傷診断時のどちらもセンサ S6 の計測データの標準偏差から決定された閾値 ε_{6th} を用いて $\%REC_{6th}(s)$ を計算し, 各計測点のデータの標準偏差から決定された ε_{own} を用いて算出された $\%REC_{own}(s)$ を標準化した結果である. 健全時および損傷時のどちらも S6 の $NREC_{6th}$ が 1.0 を示している. そしてそれ以外の計測点では $NREC_{6th} \neq 1.0$ となり, 損傷前後で比較すると, 損傷を与えた第 1 層の応答を計測するセンサ S1, S2 の $NREC_{6th}$ が健全時のそれと比較して, 上昇していることが分かる. センサ S1 の $NREC_{6th}$ が健全時に対し, 上昇した理由は wavelet 係数の標準偏差から明らかである. 図 19 にその標準偏差を示す. 損傷時では S1 で得られた Wavelet 係数の標準偏差が S6 のそれよりかなり大きな値を示している. これらの標準偏差から決定される閾値の大小関係は $\varepsilon_{own} \geq \varepsilon_{6th}$ (ε_{own} は S1 で得られた標準偏差 $\times 0.1$, ε_{6th} は S6 で得られた標準偏差 $\times 0.1$) であり, 損傷時の S1 の Wavelet 係数に対して $NREC_{6th}(= \%REC_{own} / \%REC_{6th})$ を計算すると, 閾値が大きくなるにつれて, 式(2)のリカレンスポイントが増加することから, $NREC > 1.0$ となることが明らかである. S1 の Wavelet 係数に対して計算される実際の Auto Recurrence Plots の結果の違いを図 20 に示す. 図 20(a) はディスタンスマトリックス D_{ij} を計算する際の閾値を ε_{own} とした場合(case

Fig.17 Ratio of NREC for scenario 1

Fig.18 $NREC_{6th}$ for scenario 1

Fig.19 Standard deviation (scenario 1)

(a) case 1

(b) case 2

Fig.20 Difference of Recurrence plots

Fig.21 Comparison of DI vs. STD

Fig.22 Standard deviation (scenario 2)

1)の結果を示し、図 20(b)は閾値を ε_{6th} とした場合(case 2)の結果を示す。これらの図から明らかなように、大きい閾値 ε_{own} を用いた case 1 の方が、case 2 より明らかにリカレンスポイントの密度が高いことが分かる。一方、健全時では、Wavelet 係数の標準偏差は S1 から S8 にかけて減少傾向を示している。S6 での Wavelet 係数の標準偏差から決定される閾値 ε_{6th} を用いて各センサで計算される $\%REC_{own}$ を標準化すると、閾値の大小関係から明らかなように、第 3 層の S6 では 1.0 となり、第 3 層より下位に位置する第 1 層、第 2 層のセンサ S1 から S4 では、 $NREC > 1.0$ となり第 3 層より上層では $NREC < 1.0$ となることが分かる。つまり第 1 層から上位層に向かって、 $NREC$ は緩やかに減少していく様子が認められる。本研究で提案する $NREC$ は $\%REC$ の比であり、 $\%REC$ の値は閾値に依存する。そして、閾値は Wavelet 係数の標準偏差から決定され、各センサの標準偏差の増減の相対関係が損傷前後で異なることから、結果としてそれらの変化は $NREC$ に現れることとなる。

以上を踏まえ、損傷を有する層の DI 値が Baseline データに対して上昇する ($DI > 1.0$) 理由は Wavelet 係数の標準偏差から推測できる。本研究では、塔上構造物の層間加速度の 1 次モードの振動成分を評価している。図 19 から明らかなように、Wavelet 係数の標準偏差を損傷前後で比較すると、損傷を有する第 1 層のみが Baseline (健全時) に対して大きい。このことは、1 次モードは節が存在せず、損傷を有する第 1 層の剛性の低下に起因して、その層の応答が増加したことが理由として考えられる。また、他の層の Wavelet 係数の標準偏差は損傷前後で変化がない理由は、上位の層と下位の層の応答の差 (相対加速度) を上位の層の層間応答として評価していることから、第 1 層の損傷が上位の層の応答へ影響を与えなかったと考えられる。以上のことから、損傷を有する層は 1 次モードを評価する限り、剛性低下に伴いその応答が増加し、結果として $NREC$ の相対関係が Baseline データ取得時および診断時において変化し、 $NREC$ の比である DI 値が損傷を有する層で 1.0 より大きくなると考えられる。また、この損傷シナリオ 1 の場合は、結果として、損傷前後で計算される Wavelet 係数の標準偏差の比からも損傷位置を同定可能であるが、損傷に対する感度が異なる。図 21 に損傷前後で計算される Wavelet 係数の標準偏差の比と DI 値を示す。図から明らかなように、提案手法により $NREC$ の相対関係を損傷前後で比較する方が損傷に対して感度が高いことが確認できる。そして、この損傷前後の Wavelet 係数の標準偏差の比からは、必ずしも損傷位置を同定できるとは限らないことに注意を要する。図 22 に損傷シナリオ 2 で計算される Wavelet 係数の標準偏差を健全時のものと合わせて示す。損傷時の結果では、損傷を与えた第 2 層で計測される Wavelet 係数の標準偏差が他の層と比較して大きな値を示しているものの、健全時の Wavelet 係数の標準偏差と比較して各計測点での値が全体的に小さい傾向を示し、単純にそれらの比を計算するだけでは損傷位置は同定困難であることが分かる。損傷シナリオ 2 での Wavelet 係数の標準偏差が全体的に健全時のものより小さい傾向を示した理由は卓越する振動モードが別のモードに変化したことが考えられる。

以上のことから、健全時のデータおよび診断時において計測されるデータを用いて、各状況下で計算される $NREC$ の減少・増加傾向を相対的に評価し、これらの比の最大値で表される DI 値から、損傷を有する層のみが抽出可能となることが確認され、提案手法の有効性が実証された。

5. 結 言

本研究では、カオス応答の 1 次モード成分に着目し、アトラクタの評価として Recurrence Quantification Analysis の内、リカレンスプロットを適用し、損傷位置同定を試みた。リカレンスプロットの評価指標である $\%REC$ は計算時の閾値の設定により変化することから、本研究では複数の閾値を設定し $\%REC$ を標準化することを考え、健全時および診断時の各状況下において算出される計測点間の $\%REC$ の減少・増加などの相対関係を評価した。数値実験・模型実験を通じて、損傷位置を同定することに成功し、提案手法の有効性が確認された。以下に本研究で得られた知見を整理するとともに、今後の課題を追記する。

- ・ 数値実験を通じて、複数のモードが励起する層間加速度応答から前処理せずアトラクタを再構成し、それを評価すると、損傷を有する層の特定に失敗することが確認された。また、アトラクタをリカレンスプロットにより評価する際、健全時の情報により閾値を決定し、損傷前後のアトラクタを交差して評価すると、損傷位置の同定が困難となることが確認された。

- ・ 層間加速度の Wavelet 係数で表現される 1 次モード相当の振動成分を評価の対象とし、それらのアトラクタのリカレンスプロットから %REC を計算した結果、損傷位置同定が正確に行えた。
- ・ %REC を計算する際の閾値 ε を、各センサで計算されるそれぞれの Wavelet 係数の標準偏差から設定し、%REC を標準化した複数の NREC を Baseline データとする。この Baseline データと診断時に得られた NREC との比の最大値を選択して評価に用いることで、損傷を有する層を特定できた。

今後の取り組むべき課題として、損傷程度と Damage Index の関係を定量的に把握することが重要であると考えられる。提案手法では層剛性の低下率に対して、感度良く損傷を有する層を特定することに成功したが、損傷程度は不明である。今後は提案手法により損傷の可能性のある領域を特定した後に、診断対象への入出力データを用いて、粒子フィルタ等のデータ同化技術により層剛性など損傷程度を同定することを試み、使用性・安全性に影響を与える損傷かどうかを判断するシステムの開発を目指す予定である。また、本研究では、診断対象として、塔状の線形 4 層フレーム構造物を使用した。今後は橋梁モデルなどの梁部材へ適用することなど、さらに複雑なモデルを使用した数値実験や模型実験等を実施し、提案手法の有用性を明らかにすることが重要であると考えられる。また、新たな取り組みとして、入力カオス信号と診断対象の応答を同時に評価し、Baseline データを必要としない Baseline-Free 型の損傷診断法の開発を目指す予定である。

文 献

- (1) 魚本健人, 加藤潔, 広野進, コンクリート構造物の非破壊検査 (1990), 森北出版。
- (2) 宮本文穂, 河村圭, 中村秀明, “Bridge Management System(BMS)を利用した既設橋梁の最適維持管理計画の策定”, 土木学会論文集, No.588/VI-38 (1998), pp.191-208.
- (3) 中村秀明, 白倉篤志, 宮本文穂, “階層構造モデルを用いた構造物維持管理支援システムの実用化”, 土木学会論文集, No.777/VI-65 (2004), pp.125-138.
- (4) Doebling, S.W., Farrar, C.R. and Prime, M.B., “A summary review of vibration-based identification methods”, *The Shock and Vibration Digest*, Vol.30, No.2 (1998), pp.91-105.
- (5) Farrar, C.R., Duffey, T.A., Doebling, S.W. and Nix, D.A., “A statistical pattern recognition paradigm for vibration-based structural health monitoring”, in: *Structural Health Monitoring 2000*, (1999), pp.764-773.
- (6) Verboven, P., Parloo, E., Guillaume, P. and Van, O.M., “Autonomous structural health monitoring: part I, modal parameter estimation and tracking”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.16, Issue 4 (2002), pp.637-657.
- (7) Bohle, K. and Fritzen, C.P., “Results obtained by minimizing natural frequency and mac-value error of a plate model”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, Issue 1 (2003), pp.55-64.
- (8) 中村充, 竹脇出, 安井譲, 上谷宏二, “限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定”, 日本建築学会構造系論文集, No.528 (2000), pp.75-82.
- (9) Mita, A., “Distributed health monitoring system for a tall building”, *Proceedings of 2nd International Workshop on Structural Control* (1996), pp.333-340.
- (10) 吉元怜毅, 三田彰, 森田高市, “振動モードとセンサ特性を考慮した構造物の並列処理型損傷同定”, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.48B (2002), pp.487-492.
- (11) Sohn, H., Farrar, C.R., Hunter, N.F. and Worden, K., “Structural health monitoring using statistical pattern recognition techniques”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 123 (2001), pp.706-711.
- (12) Bodeux, J.B. and Golival, J.C., “Modal identification and damage detection using the data-driven stochastic subspace and arma methods”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, Issue 1 (2003), pp.83-89.
- (13) Worden, K., Manson, G. and Allman, D., “Experimental validation of a structural health monitoring methodology: part I, novelty detection on a laboratory structure”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 259, Issue 2 (2003), pp.323-343.
- (14) Okafor, A.C. and Dutta, A., “Structural damage detection in beams by wavelet transforms”, *Smart Materials and Structures*, Vol.9, No.6 (2000), pp.906-917.

- (15) Hou, Z., Noori, M. and Amand, R.St., “Wavelet-based approach for structural damage detection”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, Issue 7 (2000), pp.677-683.
 - (16) Kim, H. and Melhem, H., “Damage detection of structures by wavelet analysis”, *Engineering Structures*, Vol.26 (2004), pp.347-362.
 - (17) Nichols, J.M., Todd, M.D., Seaver, M. and Virgin, L.N., “Use of chaotic excitation and attractor property analysis in structural health monitoring”, *Physical Review E*, Vol. 67 (2003), pp.016209 1-8.
 - (18) Nichols, J.M., Trickey, S.T., Todd, M.D. and Virgin L.N., “Structural Health Monitoring through Chaotic Interrogation”, *Meccanica*, Vol.38 (2003), pp.239-250.
 - (19) Nichols, J.M., Virgin, L.N., Todd, M.D. and Nichols, J.D., “On the use of attractor dimension as a feature in structural health monitoring”, *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 17, Issue 6 (2003), pp.1305-1320.
 - (20) 佐藤忠信, 田中庸平, “構造物のカオス応答アトラクタを用いた損傷検出法の開発”, 土木学会論文集 A, Vol. 62, No.4 (2006), pp.915-924.
 - (21) 野村泰稔, 古田均, 川谷充郎, 広兼道幸, 中津功一朗, “カオス信号入力と交差予測誤差率による構造物の応答評価に基づく損傷診断法の開発”, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1 (2009), pp.30-41.
 - (22) Eckmann, J.P., Kamphorst, D., and Ruelle D., “ Recurrence plots of dynamic systems”, *Europhysics Letter*, Vol. 4 (1987), pp.973-977.
 - (23) Webber Jr., C.L. and Zbilut, J.P., “Dynamical assessment of Physiological systems and states using recurrence plot strategies”, *Journal of Applied Physiology*, Vol.76 (1994), pp.965-973.
 - (24) Lorenz, E.N., “Deterministic Nonperiodic Flow”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 20 (1963), pp.130-141.
-