

自己組織化特徴マップによるアーチ系橋梁構造物の健全度診断手法に関する研究

STUDY ON STRUCTURAL SOUNDNESS EVALUATION METHOD OF AN EXISTING ARCH BRIDGE BY USING SELF-ORGANIZING FEATURE MAP

橋梁工学分野 森若浩司

わが国では、老朽化する橋梁が急激に増加してゆくとされており、今後、橋梁の維持管理を適切に行うためには、詳細点検を行う橋梁の部材を判断するスクリーニング技術が必要となる。本研究では、有限要素解析による応答シミュレーション技術、橋梁の応答性状を把握する計測技術、そして限られた学習データから判定を行う SOM を組み合わせた事前健全度判定技術を検討している。研究結果より、学習データで検討した損傷部位であれば、損傷位置、損傷程度の判断ができる可能性がある。

Decrepit bridges are increasing rapidly in our country. So, the existing bridges need screening technology of evaluating bridge members for maintenance management. In this study, the structural soundness evaluation method is entertained by using responsive simulation technology of FEM analysis, measure technology of responsive condition, and Self-Organizing feature Map (SOM) of using narrow Learning Data. From the result, this proposed evaluation method has the potential to determine the damage member and condition by SOM of using narrow Learning Data.

1. はじめに

わが国は、1960年代からの高度経済成長に伴い社会資本の整備が急速に進められ、橋梁数も大幅に増加している。そのため、社会基盤構造物の道路橋（橋長 2m 以上）は、今後 20 年で建設 50 年以上を経過する割合が約 65% になるといわれている。これより、橋梁の点検が必要となるが、全てを詳細点検することは困難である。今後、膨大な数の橋梁の点検を効率よく実施していく方法が求められるが、橋梁の詳細点検は、専門家の目視によって行われるのが一般的であり、この点検は高度な専門知識や豊富な経験を要する。これに加え、対象箇所や時間帯によって物理的に点検が困難な箇所もあり、短期間で効率的に実施するには現実的にかなり困難な状況にある¹⁾。

今後、さらに増加する劣化橋梁を合理的に維持管理するためには、モニタリング手法を用いて評価し、健全性診断の定量的な基準を設け、点検すべき構造物に優先順位をつけることが重要となる。そのための一手法として、橋梁の振動特性の変化を利用した損傷度評価法が注目されている。しかし、振動特性の変化は非常に微小であることから、損傷以外の要因の影響を排除できる振動特性推定手法を検討する必要がある。

そこで本研究では、橋梁の応答性状を再現できる解析モデルの構築を試み、構築した解析モデルに損傷を模擬し、起振機による強制加振を想定した強制外力による動的解析を行うことで健全時と損傷時の応答の違いを把握

し、これらの結果を使用して SOM による簡易なモニタリング方法について検討する。その後、解析により検討した簡易モニタリング手法が、実計測データに含まれる不確定誤差、および解析モデルのモデル化誤差を考慮した応答データを使用した場合、健全度診断が適用できるのか検証を行う。以上の結果から、実橋梁への適用を考慮した健全度評価手法について提案する。

2. 解析による SOM を用いた健全度診断手法の検討

2.1 解析モデル

解析モデルは、静的載荷および車輛走行試験が行われた、上路式逆ランガー桁橋を対象としている。解析には弾塑性有限変位解析プログラム EPASS/USSP を用いた。図-1 に解析モデルの概要と要素分割数を示す。床版は 4 節点シェル要素、主桁、アーチ弦材、鉛直材、横構および対傾構は梁要素でモデル化した。要素の内訳は梁要素が約 1,300 要素、シェル要素は約 860 要素であり、節点総数は約 1,760 点である。

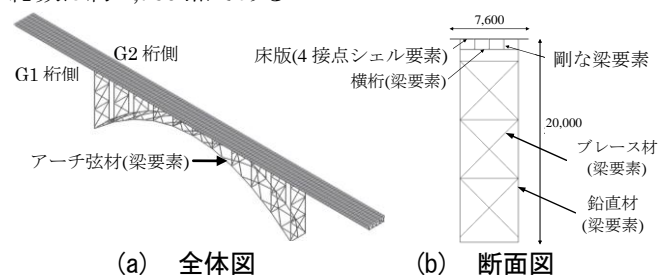


図-1 解析モデル(単位: mm)

この解析モデルは、実計測を参考に、静的载荷および車輛走行解析を行っており、その解析結果と実計測結果を比較することで妥当性を検討した。それより、本研究の健全度診断に用いる健全時と損傷時の振動特性の変化を検討することは有効であると判断している。

2.2 入力データの作成

橋梁の振動特性を把握するために起振機を想定した強制外力による振動解析を行う。ここでは、模擬損傷を与えた損傷モデルと、健全モデルによる応答を比較し、損傷の有無が振動特性にどんな影響を与えるかを検討する。

加振点と計測点を図-2に示す。加振点は幅員中央の4箇所(A_L~D_L点)、計測点はG1桁側の地覆の7箇所(A_M~G_M)とした。加振点にはL(Load)を、計測点にはM(Measure)の添字を使用している。図-2に示す1~6は、模擬損傷を与えるG1桁側の鉛直材の番号である。模擬損傷は腐食による板厚減少を想定し、板厚減少は25%、50%、75%に設定している。また加振点・計測点と鉛直材は同一鉛直断面に位置している。加振は、床版中央の節点に対して強制外力を与える。強制外力はsin波とし、時刻刻みは0.01秒で20秒間の解析を行う。加振周期数は対象橋梁の固有振動数とする。これは固有振動数に対応する次数のモード変形が大きく励起されると考えたためである。対象とする固有振動数は、損傷により影響があると考えられる固有モードを選択し、健全時と損傷時の振動特性の変化を比較した結果、図-3に示す橋軸鉛直方向の6次モードとした。加振方向は対応する固有モードを考慮し、鉛直方向に加振する。入力sin波の加振力は起振機を想定した100kN(最大値)とした。解析から得られた応答変位データから、定常波と判断した応答箇所をFFT解析し、卓越振動数の変位応答パワースペクトル値を算出する。その健全時に対する損傷時のパワースペクトルのピーク値の比(以下、応答スペクトル比)に着目した。図-4に鉛直材1が50%損傷した場合の応答スペクトル比を示す。図-4より、橋軸鉛直方向の固有振動数で強制加振させることで、損傷による応答スペクトル比に変化が確認できた。

以上から、SOMに用いる入力データには、健全時および損傷時に、固有振動数で加振させて抽出した応答データから得られる応答スペクトル比を用いる。

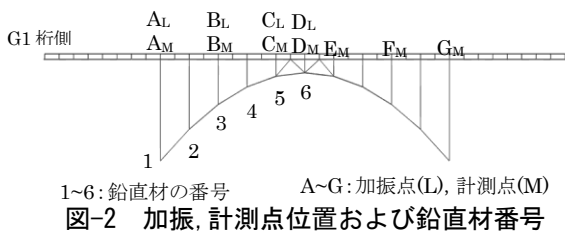


図-3 固有振動数(6次モード: 3.7Hz)

SOMへの入力データは、データ項目である健全時を基準とした損傷時の応答スペクトル比を並べたものである。データ項目とは、ある加振点を加振した際のある計測点での応答スペクトル比を示す。また、同じ加振周波数の加振点のデータ集合をデータセットとする。一例として、A_L加振時(3.7Hz)、計測点A_M~G_Mのデータセットを表-1に点線で示す。

データ名の最初の「数字%」は損傷度を、その後の「損+数字」の数字は鉛直材の損傷位置を表している。実際には表-1に示したデータセット以外に、B_L、C_LおよびD_L点において加振した場合のデータセットも使用している。

2.3 学習マップの作成

本研究で用いる自己組織化特徴マップは、パターン間の関係構造をマップとして表したものである²⁾。そのマップには、類似したデータが寄り集まって示されており、これを観察することにより、パターン間の関係やグループ分類が可能となる。図-5に、表-1に示すようなデータセットを用いてSOMにより作成したマップを示す。このマップを学習マップといい、実橋への適用を行うために、より少ない加振点、測定点の組合せで損傷判断を行う。そこで、あらかじめ損傷分類ができるデータの選択を行っている。ここではA_L, D_L加振(計測点A_M~D_M)のデータを用いている。また、マップサイズはデータ数、および健全度評価の効率化を考慮し、8×8のマップとした。

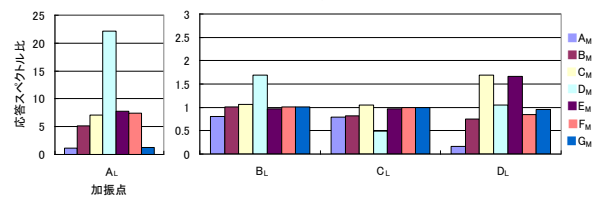


図-4 鉛直材1損傷の応答スペクトル比の比較

表-1 SOMへの学習入力データ例(A_L点加振時)

データ名	データ項目						
	A _L -A _M	A _L -B _M	A _L -C _M	A _L -D _M	A _L -E _M	A _L -F _M	A _L -G _M
健全	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
25%損1	1.06	2.35	2.57	8.15	2.86	2.32	0.94
50%損1	1.17	5.10	7.10	22.12	7.81	7.37	1.23
75%損1	1.47	12.84	20.38	61.75	21.86	22.07	2.56
25%損3	1.00	1.00	1.00	0.97	0.99	1.03	1.00
50%損3	1.00	1.01	1.00	0.92	0.96	1.08	1.00
75%損3	1.00	1.02	0.99	0.76	0.86	1.25	1.00
25%損5	1.00	1.02	0.97	1.03	1.01	0.99	1.00
50%損5	1.00	1.04	0.91	1.10	1.03	0.97	0.99
75%損5	1.00	1.12	0.75	1.35	1.09	0.92	0.98
25%損6	1.05	2.28	2.17	6.85	2.39	1.84	0.96
50%損6	1.05	2.47	2.15	6.76	2.20	1.90	0.87
75%損6	1.05	2.99	2.29	6.53	1.72	2.58	0.65

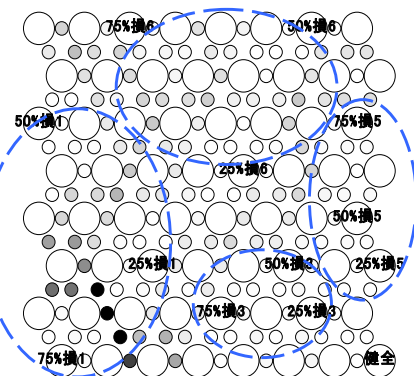


図-5 A_L, D_L加振(計測点A_M~D_M)によるSOM結果

2.4 一箇所の損傷による健全度診断

ここでは、実橋の損傷を想定し、①目標加振周波数の変動を考慮し、 $3.7\pm 0.05\text{Hz}$ で加振させた場合、②想定外の腐食度が発生した場合、③学習外の鉛直材が損傷した場合における応答スペクトル比を作成し、前節の学習マップ(図-5)を用いて健全度評価手法の検討を行う。

図-6には、 3.75Hz で加振させた場合、図-7には鉛直材1が40%損傷した場合、図-8には鉛直材2が50%損傷した場合を認識させた結果を示す。

図-6では、認識データと同様の損傷位置、損傷程度のニューロン付近に近似して示されていることが確認できている。これは、 3.65Hz の加振時に関しても、ほとんどが同じように示されている。また図-7では、同じ鉛直材1の25%、50%の間に分類されている。これは学習範囲内の損傷程度であったが、範囲外の損傷であっても認識が可能であることが確認できている。次に図-8より、学習していない鉛直材に関しては、鉛直材3と同じ位置に示されており、損傷位置の確認ができなかった。よって、学習外の損傷では、損傷位置の検知が難しいと思われるため、あらかじめ想定しておくことが必要と考えられる。

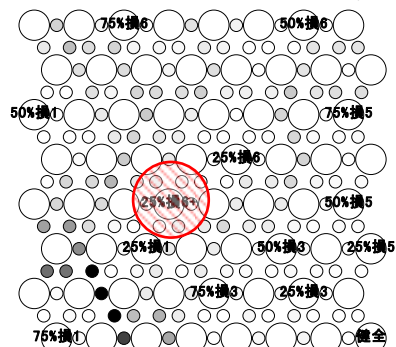


図-6 25%損6+ (3.75Hz 加振) を認識させた SOM 結果

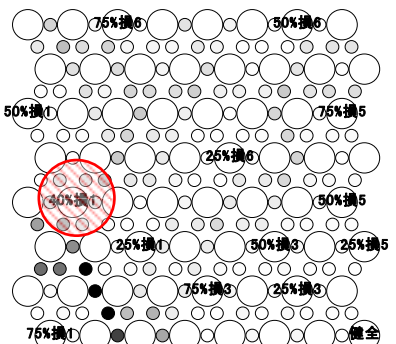


図-7 40%損1 を認識させた SOM 結果

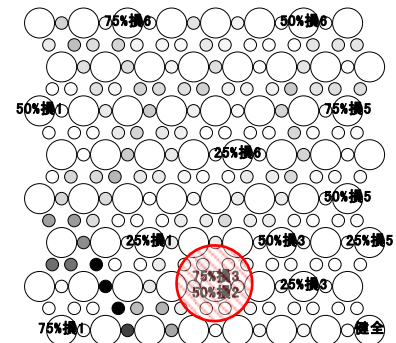
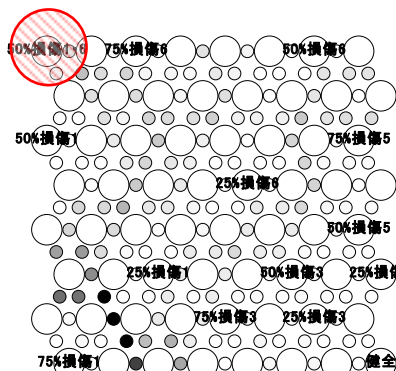


図-8 50%損2 を認識させた SOM 結果

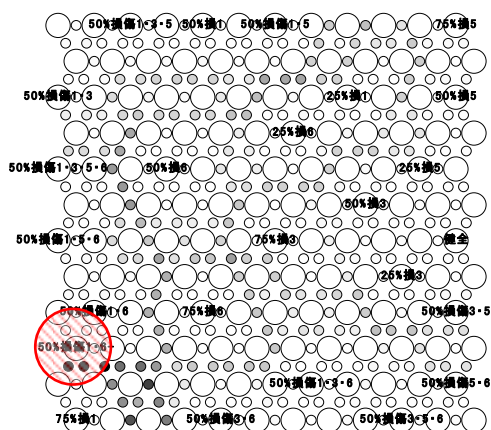
2.5 複数箇所の損傷による健全度診断

今までは、一箇所の損傷における健全度診断を行ってきたが、実橋に発生する損傷は複数有しているのが実態である。そこで、今回損傷を模擬する対象とした鉛直材50%を基本とし1, 3, 5, 6の内、二つ以上の同時損傷を取り扱っている。また、複数損傷の健全度評価を行うために、一箇所損傷の学習マップ(図-5)と、複数箇所の損傷も想定した学習マップの2通りで検討する。ちなみに、複数損傷も想定した学習マップのマップサイズは、データ数が多いため、 12×12 としている。鉛直材1・6が損傷した場合に関して、図-5の学習マップでの結果を、複数損傷も想定した学習マップでの結果を図-9に示す。

まず、図-9(a)は、構造物に影響が大きい部材に近似して示される傾向があり、この学習マップを使用した場合では、鉛直材1が損傷していると診断されており、このマップでは、鉛直材6の損傷が認識できなかった。図-9(b)では、複数損傷も想定して学習マップでは、損傷している鉛直材1・6の損傷位置を認識できている。この傾向は、2箇所までの損傷で確認できている。3箇所以上の損傷に関しては、全ての損傷箇所を確認することは難しいが、2箇所までなら検知できる可能性があることを確認できた。ただし、複数損傷も想定した学習マップは、対象橋梁のような部材数が多い橋梁形式では全ての損傷組み合わせを想定することは困難であると考えられる。そこで、以後の複数損傷の健全度評価では、図-5の一箇所損傷による学習マップをもとに検討することとする。



(a) 一箇所損傷のみの学習マップ



(b) 複数損傷も想定した学習マップ

図-9 鉛直材1・6(損傷50%)を認識させた SOM 結果

3. 実測値を用いた健全度診断手法の検証

3.1 橋梁模型

ここでは、前章で検討した入力データの作成、および SOM による健全度診断手法が、実計測に含まれる不確定誤差、また、解析モデルのモデル化誤差を含む応答データを用いても、健全度評価が可能であるか検証する必要がある。そこで、同じアーチ形式で橋長 5,000mm、幅 567mm、高さ 853mm の橋梁模型を作成する。図-10 にアーチ系橋梁模型を示す。

支承部に関しては可動側にはボールローラを取り付け、固定側には動かないように設置している。模擬損傷を与える部材は吊材とし、下端部付近の範囲 15mm の板幅を減少させた部材と取り替えて、損傷を模擬している。

3.2 実計測試験

橋梁模型の計測試験では、静的載荷試験、自由振動試験および、強制加振試験を行った。

静的載荷試験では、載荷全重量を 196N(20kg)とし、9.8N(2kg)の錘を 10 個載荷させ、健全時の変位を変位計 (CDP-5MT, 25) で計測、また吊材を取り除いた損傷の変位も計測し、損傷による変化量を確認する。載荷点、計測点および、損傷部位を図-11 に示す。載荷点は横桁中央とし、計測点は載荷点と同断面上の補剛桁で計測する。

自由振動試験は、ハンマーで横桁中央に衝撃を与え、減衰振動を加速度計により計測する。計測点は、図-11 に示す G1 桁側の同じ点を計測し、衝撃を与える横桁はアーチ 1/2 とアーチ 1/4 の 2 箇所とする。計測におけるサンプリング周波数は、500Hz とした。

強制加振試験は、小型起振機を用いて、横桁中央部に接触させて振動させ、健全時および吊材を 50% 板幅減少させた時の定常波形を確認する。図-12 に計測点、加振点および、損傷を与える吊部材を示す振動周波数は橋軸鉛直の 2 次モード：33.5Hz、加速度 $0.5m/sec^2$ とし、サンプリング周波数 500Hz で 10 秒間計測した。計測方向、加える方向は橋軸鉛直方向である。

3.3 解析モデル

作成した解析モデルの概要と要素分割の状況を図-13 に示す。解析モデルは、全ての部材を梁要素で作成した。それぞれの分割状況は、補剛桁・アーチリブを 160 分割、横桁を 10 分割、吊材は 20~80 分割としている。総節点数は約 800 点、総要素数は約 1,400 要素である。質量については、各節点に均等に分配している。

3.4 応答解析と実計測結果の比較

橋梁模型計測結果と比較し、どの程度一致しているのかを確認するために、静的載荷、固有振動解析、および強制加振解析を行い、実計測結果と比較する。計測点、載荷および加振点は、図-11、12 と同じ位置にある節点としている。

静的解析における変位の比較を図-14 に示す。比較結

果は、載荷点に関して約 10% 程度、非載荷点で最大 50% 程度の誤差が確認された。非載荷点に関しては解析で変位が 0.1mm 以下のため、計測では正確に変位がとれておらず、大きな誤差が発生したものと考えられる。次に、図-14 の吊材 4 損傷の解析と解析を確認すると、特に大きい変化がみられたアーチ 1/2 の計測点において一致している。

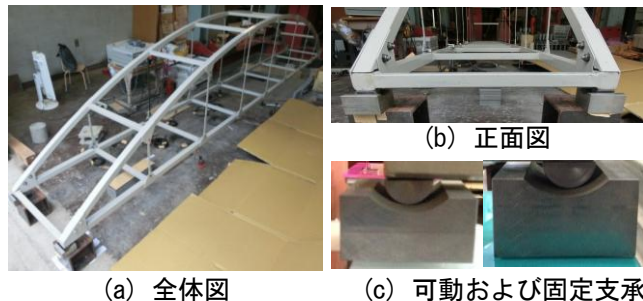


図-10 橋梁模型

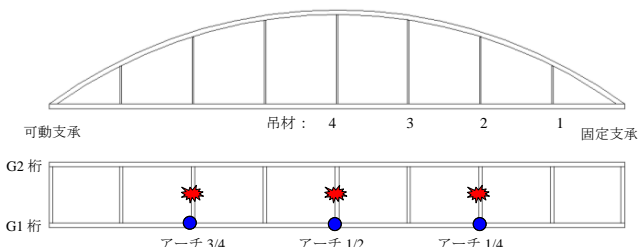


図-11 計測点および加振点 (●: 計測点, ★: 載荷点)

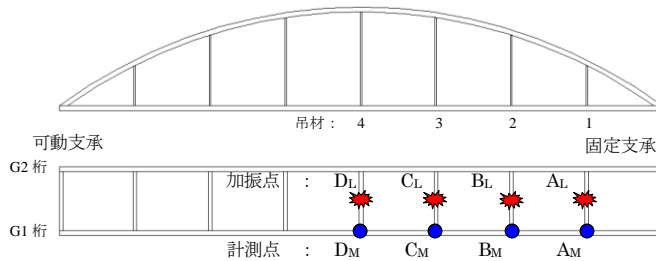


図-12 計測点および加振点 (●: 計測点, ★: 載荷点)

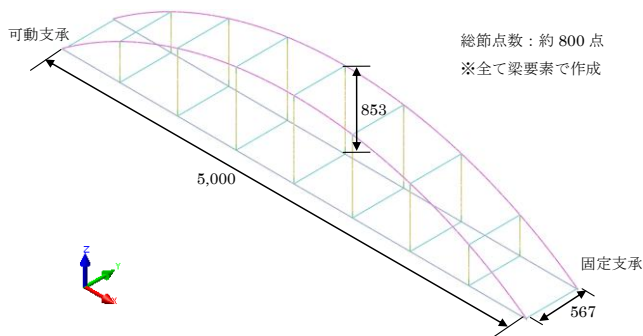


図-13 解析モデル (単位: mm)

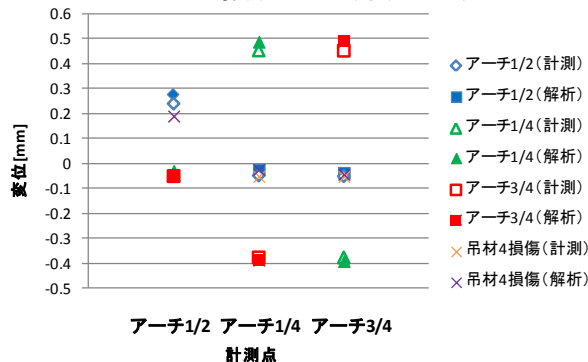


図-14 静的載荷時の変位量の比較

固有値解析と自由振動試験の応答データのFFT解析より得られた固有振動数の比較を表-2に示す。これより、鉛直方向の1次、2次モードの固有振動数が約1%の誤差でおさまっている。また、自由振動波形を用いて、固有モード形状の確認も行っている。

強制加振解析との比較は図-15に示す。ここでは、一例として、 A_L 加振時の健全時および、損傷時(吊材1の板幅50%減少)場合の計測点 A_M の応答加速度波形を対象としている。図-15より、健全時および損傷時の応答加速度波形は波形形状、および応答加速度の最大値は一致していると考えられる。

以上の結果から、静的载荷の非载荷点に大きな誤差は確認されたが、SOMに用いる計測データの作成に関わっている固有振動数、および応答加速度波形は一致していると考えられ、この解析モデルは、解析により検討した健全度診断手法に有効であると判断した。

3.5 SOMによる健全度診断手法の検証

ここから、解析で検討した健全度診断手法が実計測データを使用しても損傷位置、損傷程度の検知が可能であるか検証する。まず、解析モデルから健全時および損傷時の応答スペクトル比を算出し、入力データを作成する。模擬損傷は図-12に示す吊材1~4、損傷程度は板幅を25、50、75%減少した場合と、吊材を取り除いた4パターンとする。また、入力波形、加振点および計測点は強制加振試験と同じ条件で行う。作成した入力データを用い、前章の学習マップと同じく、アーチ中央位置、支点部付近の加振点 A_L, D_L の計測点 $A_M \sim D_M$ のデータを用いた。また、データ数が多いため、マップサイズは 10×10 としている。

次に、橋梁模型から解析と同じ条件で強制加振を行い、計測点から得られた応答加速度を用いて入力データを作成する。ただ、その計測データには加振力の違いや、計測誤差が含まれており、このままでは損傷検知が困難であると考えたため、加振点ごとで無次元化を行い、入力データの補正を行った。表-3に無次元化を行った入力データを示す。橋梁模型から得られたデータ名は「損傷程度+損傷位置」を示し、解析データと見分けをつけるため、データ名の後に「±」を付けている。

表-2 固有振動数 (橋軸鉛直モード)

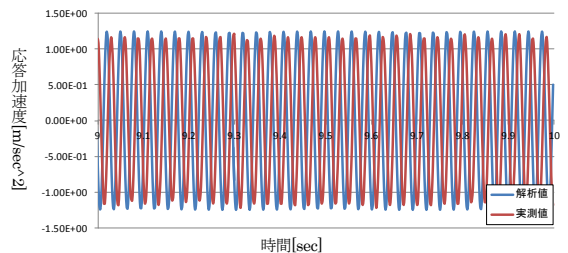
モード次数	固有振動数[Hz]		誤差 [%]
	解析	試験	
1次モード	17.157	17.001	0.91
2次モード	33.334	33.698	-1.09

誤差[%] = (解析-試験)/解析

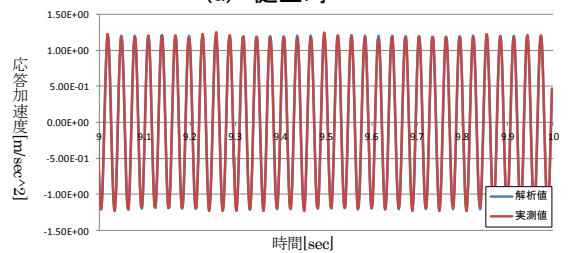
表-3 入力データ (無次元化)

データ名	データ項目							
	A_L-A_M	A_L-B_M	A_L-C_M	A_L-D_M	D_L-A_M	D_L-B_M	D_L-C_M	D_L-D_M
25%損1±	0.997	1.000	0.987	0.988	0.985	1.000	0.968	0.972
50%損1±	1.000	0.968	0.988	0.993	0.996	1.000	0.969	0.973
75%損1±	1.000	0.989	0.958	0.976	0.999	1.000	0.960	0.964
100%損1±	0.991	0.876	0.951	1.000	0.963	1.000	0.988	0.989
25%損2±	0.978	1.000	0.947	0.961	0.978	1.000	0.963	0.968
50%損2±	0.929	1.000	0.965	0.931	0.966	1.000	0.931	0.937
75%損2±	0.816	0.912	1.000	0.883	0.925	1.000	0.832	0.847
100%損2±	0.688	0.680	1.000	0.820	1.000	0.941	0.883	0.885
25%損3±	0.978	0.942	1.000	0.991	0.967	0.976	1.000	0.999
50%損3±	0.972	1.000	0.983	0.976	0.988	1.000	0.982	0.986
75%損3±	0.866	0.950	1.000	0.925	0.935	1.000	0.892	0.911
100%損3±	0.736	1.000	0.938	0.792	0.845	1.000	0.773	0.794
25%損4±	1.000	0.995	0.999	1.000	0.994	1.000	0.992	0.993
50%損4±	0.999	0.994	0.998	1.000	0.991	1.000	0.985	0.986
75%損4±	0.985	0.980	1.000	0.994	0.996	1.000	0.990	0.995
100%損4±	0.827	0.595	1.000	0.915	0.944	0.905	0.984	1.000

次に、表-3の入力データを解析により作成した学習マップに入力して、損傷位置、損傷程度の認識が可能であるか検証した。図-16に75%板幅減少した吊材1の損傷を認識した時の結果を示す。図-16より、損傷位置・損傷程度の損傷検知ができていていることが確認できた。図-17に吊材1が75%損傷した時の解析、計測および無次元化を行った入力データの比較を示しており、橋梁模型から得られたデータを無次元化することにより、応答スペクトル比の大きさでなく、損傷による計測位置ごとの変化(以下、振動特性)が顕著にとらえることができ、損傷位置が検知できたものと考えられる。この傾向は、吊材4の損傷以外でみられ、少なくとも損傷位置であれば検知が可能であると考えられる。



(a) 健全時



(b) 損傷時

図-15 振動波形の比較

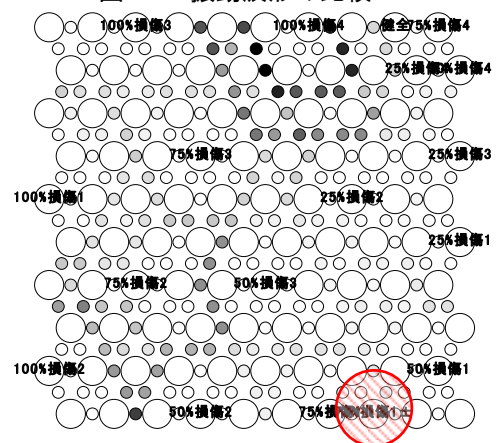


図-16 SOM結果

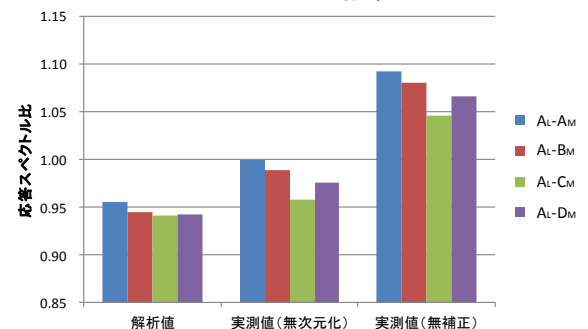


図-17 入力データの比較(吊材1の板幅75%減少)

4. 健全度診断手法の提案

実橋梁への適用を踏まえた SOM を用いた健全度診断手法のフローを図-18 に示す。

学習マップ作成法については、まず設計図面から解析モデルを作成する必要がある。その後、固有値解析を行い、対象となる損傷部材が特に変形している固有モードでの固有振動数を対象に強制加振を行う。この解析モデルは、静的載荷結果に関しては、載荷点で 10%、非載荷点で最大 50%の誤差は見られたが、固有振動数が約 1%、応答加速度データは、振動波形と健全時と損傷時の変化の傾向が一致していれば、本健全度診断手法に関して有用性があると考えられる。次に実橋梁を想定した損傷を検討して、健全時、損傷時の応答加速度データの FFT 解析による応答スペクトル比から、SOM の入力データを作成する。作成した入力データを SOM で損傷の区別に必要なデータ、および、想定する損傷部材の数を考慮してマップサイズを選別し、学習マップを作成する。

その後、実橋梁で、解析と同じように強制加振させて、計測データから入力データ(応答スペクトル比)を作成する。ただ、実計測データには、強制外力を与える起振機が一定の外力を与えることは困難であり、実計測による入力データと解析による入力データの応答スペクトル比の値の大きさに違いがあり、その違いにより、損傷位置、損傷程度を誤認識する可能性がある。そこで、加振位置ごとに無次元化を行うことで、損傷位置、損傷程度の振動特性を顕著に捉えられるようにする。解析より作成した学習マップに、無次元化した入力データを認識させることで、損傷位置、損傷程度を検知する。その後、その損傷があると認識した部材を対象にした詳細点検を行う。

5. 結論および今後の課題

本研究では、解析により SOM を用いた健全度診断について検討した。その後、不確定誤差を含む実計測データを用いた場合でも、検討手法の適用可能性を検証した。

最後に、健全度診断評価の手法について提案した。

- 1) 強制外力による振動解析では、模擬損傷箇所の振動特性の変化が大きいと考えられる、面外方向に変形するモードでの固有振動数で加振した解析を行い、損傷の有無による応答スペクトル比の変化を比較した。その結果、特に対象とする損傷部材が変形している固有モードに対応した加振を行った場合、応答スペクトル比に顕著な変化があることを確認した。
- 2) 解析から検討した健全度診断手法より、実橋梁の損傷を想定して、加振周波数を変更した場合、想定外の損傷および複数箇所の損傷している場合に対する、損傷検知の可能性を確認した。
- 3) 橋梁模型の不確定な誤差を含む実計測データから作成した応答スペクトル比を、加振位置ごとに無次元す

ることで、振動特性が顕著捉えられ、損傷位置、損傷程度の健全度評価ができることを確認した。

- 4) 橋梁を対象とした解析モデルは、応答スペクトル比の作成に関係する固有振動数および、強制加振における応答加速度データが一致していれば、SOM を用いた健全度診断に関して、有用性があると考えられる。
- 5) 以上の結果を踏まえて、実橋梁への適用に向けた健全度診断手法の提案を行った。

今後は、より正確に損傷箇所の検知を行うため、損傷部材ごとに顕著な変化がみられるパラメータ、および対象以外の部材損傷の健全度診断について検討する必要がある。また、橋梁模型を用いて複数箇所の損傷の提案した健全評価の検証を行うことが今後の課題である。

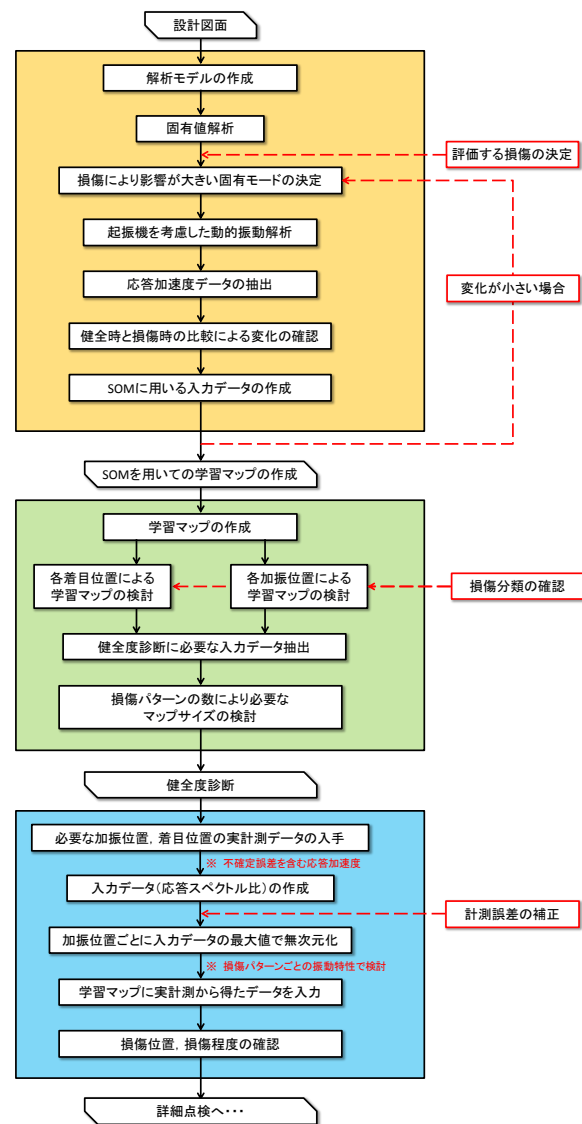


図-18 健全度診断フロー

参考文献

- 1) 池田祥宜, 山口隆司, 北原武嗣, 杉浦邦征, 森若浩司: 自己組織化特徴マップ (SOM) を用いたアーチ系橋梁の健全度診断に関する基礎的研究, 鋼構造論文集, 2013.9.
- 2) 有限会社シー・エー・イー, ニューラルネットアシスタント操作説明書, 2002.10.1.

GÅ

G1

G2

JIP

IHI

01ÿ 5 Ç Õ À M 5

4

SOM

01ÿ

GÅ

2.4 (-8

01ÿ O... C ,7• 1n Œ

GÅ

20× 20

SOM

01ÿ £ • 7o - M 5

SOM

SOM

GÅ

01ÿ Ç § ;&½ ø M 5

SOM

2

PC

GÅ

2

1

01ÿ 5 Ç Õ À M 5

3.7Hz

GÅ

01ÿ Ç § ;&½ ø M 5

SOM