

ニューラルネットワークによる橋梁の健全度診断に関する基礎的研究

橋梁工学分野 池田 祥宜

Abstract

わが国では高度経済成長に伴い、橋梁の数が大幅に増加した。今後、老朽化する橋梁数が加速度的に増加してゆくとされており、効率のよい点検を行っていく必要がある。しかし、現状の橋梁の点検は、専門家の目視によって行われるのが一般的であり、評価は客観性に欠ける。そのための一手法として、橋梁の振動特性変化を利用した損傷評価法が注目されつつある。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する。そしてこれらの結果を用いてニューラルネットワークを使用し、健全時と損傷時の関係構造をあきらかにすることで分類を行い、簡易なモニタリング方法について提案を行う。

1. 研究背景・目的

わが国では、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、橋梁の数が大幅に増加した。そのため、橋梁の多くが老朽化している。さらに、社会環境の変化は橋梁の健全性が損なわれる原因となり橋梁の点検が必要とされているが、それらすべてを詳細に点検することは困難である。そのため膨大な数の橋梁を効率よく点検する方法が必要とされている。

現状の橋梁の点検は、専門家の目視によって行われるのが一般的であり、目視点検に基づく診断は、高度な専門知識や豊富な経験を要し、条件により目視できない場合があり、評価は客観性に欠ける。今後、増加する劣化橋梁を合理的に維持管理するには橋梁の損傷をモニタリングなどによる客観的に評価する手法を確立し、耐久性診断のための基準を設け、点検すべき構造物に優先順位をつけ、重点的な目視点検による詳細な検査を行い、効率よく点検することが必要である。そのための一手法として、橋梁の振動特性変化を利用した損傷評価法が注目されつつある。

そこで本研究では、実在する鋼アーチ橋を対象に、静的試験と車輪走行試験の応答を計測し、応答のデータと解析結果を比較することにより、妥当なFEM解析モデルを作成する。作成した解析モデルを対象に損傷を模擬して起振機を想定した強制外力による動的解析を行い、健全時と損傷時の応答の比較を行う。また、解析結果をFFT解析することで卓越する周波数やパワースペクトルの損傷による影響を把握する。

次に、健全時と損傷時で変化が認められた結果を用いてニューラルネットワーク(Neural Network)を使用し、自己組織化特徴マップ(以下SOM:Self-Organizing feature

Map)で健全時と損傷時のパターン間に関係構造を明らかにすることで損傷の分類を行い、簡易なモニタリング方法について提案を行う。

2. 実橋計測と応答解析

2.1 対象橋梁

対象橋梁は桜橋で、上部工形式は3径間連続逆ランガーアーチ橋で建設後47年が経過しており、防災事業による道路の付け替えによって、平成21年度から供用停止している。橋梁の一般図を図-1に示す。

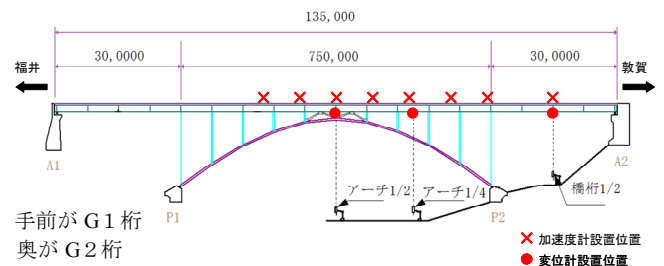


図-1 橋梁一般図

2.2 実計測試験概要

静的荷重試験方法は、積載重量を調整し全重量を200kNとした大型トラックを試験車輦として計測した。試験時は橋梁上を無荷重状態にして初期計測を行った後、試験車輦を荷重位置に停止させ計測を行った。この方法で3回繰り返し計測を行い、結果は平均値とした。

荷重ケースはs1~7を行い、s1~3では試験車輦を2台使用し、G1桁側またはG2桁側に後ろ向きで向き合うように直列に並べて荷重位置が2台間の中央になるようにした。また2台直列をG1桁側に荷重したものをa、G2側に荷重したものをbとしケース名のあとに記入する。荷重位置はアーチ1/2(s1a, b), 1/4(s2a, b), 鋼桁1/2(s3a, b)とする。s4~7では試験車輦を4台使用して荷重する。

載荷方法は G1 桁側，G2 桁側の両方に 2 台直列させて載荷し計測する．載荷位置はアーチ 1/2(s4c)，1/4(s5c)，鋼桁 1/2(s6c)，P2 上(s7c)とした．計測方法はピアノ線を主桁から下に吊り下げ、地面からの不動柱に設置した変位計(CDP-25)に接続し、錘にて張力を加え、変位計によりデータを収集した．計測位置はアーチ 1/2，1/4 地点，鋼桁 1/2 地点とする．計測位置を図-1 に示す．

車輛走行試験では，重量 200kN に調整した試験車輛を 1 台使用し，走行車線は中央を，走行方向は敦賀方面から福井方面を走行させ，走行速度は 10km/h(d1~3)，30km/h(d4~6)，45km/h(d7~9)として各速度で 3 回ずつ計測を行った．また助走区間を設け橋梁進入時には目的の走行速度に達している状態とする．変位計測は静的載荷試験のときと同じ箇所，同じ方法で計測を行い，加速度計による計測は鉛直方向と橋軸直角方向を計測し，計測箇所は図-1 に示す．図-1 の敦賀側から point1~point8 とする．ただし point2 については橋軸直角方向のみ計測した．サンプリング周波数は 1000Hz とする．加速度計はマグネットスタンドに加速度計を貼り付け地覆にそのまま置いて計測を行った．計測は車輛が橋梁を通過し終わったあとも橋梁の自由振動の計測を行っている．

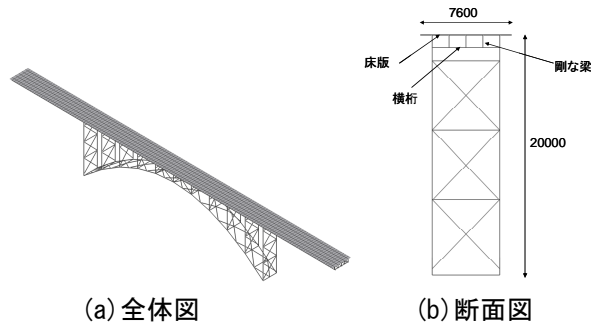
次に，加速度の計測結果をもとに FFT(高速フーリエ変換)解析を行い，パワースペクトルの卓越する周波数の抽出を行った．FFT 解析では車輛が通過したあとの橋梁が自由振動している部分を使用する．FFT 解析の条件としてサンプリング周波数は 100Hz，窓関数は Hanning を使い，フレーム長は 2048 とした．パワースペクトルが卓越している振動数を橋梁の固有振動数と同定する．

2.3 解析手法

2.3.1 対象橋梁モデル

計測結果より得られた結果と比較することで解析モデルの妥当性を検証する．まず静的載荷試験結果と比較するために解析モデルに車輛を想定した集中荷重を与え，剛性について検討する．次に車輛走行試験結果より変位と加速度，さらに FFT 解析による固有振動数について，車輛走行解析を行うことで比較し解析モデルの妥当性について検証する．

図-2 に解析モデルの概要とその要素分割の状況を示す．節点総数は約 1760 点とし，床版は 4 節点シェル要素，主桁，アーチ部，鉛直材，横構および対傾構は梁要素でモデル化している．梁は約 1300 要素およびシェルは約 860 要素とした．また，主桁と床版は，剛部材により図心のずれを考慮して剛結した．質量は各節点に分配している．解析で用いた構造特性の材料特性を表-1 に示す．桁部分の支承はゴム支承なのでバネを，アーチ部分は両端とも固定支承としてモデル化した¹⁾．ゴム支承のバネ定数は鉛直方向を剛とし橋軸，橋軸直角方向は 4218N/mm とした．



(a) 全体図

(b) 断面図

図-2 解析モデル

表-1 解析に用いた材料定数

材料名	ヤング係数	ポアソン比
	(N/mm ²)	
鋼材	2.0×10^5	0.3
コンクリート	2.8×10^4	0.167

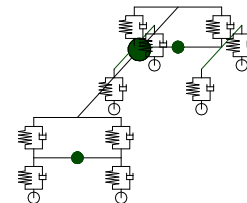


図-3 車輛モデル

2.3.2 車輛モデル

本研究では車両モデルは図-3 に示す前輪 1 軸および後輪 2 軸の 8 自由度系 3 次元車両モデルを用いた．

走行速度は 10，30，45km/h で解析を行う．本研究では既往の研究²⁾と同じ諸元を用いて車両モデルを作成し，車輛の重量は実計測で使用した 200kN とする．

2.3.3 路面凹凸性状

本研究で使用した路面凹凸は ISO(国際標準化機構)に基づいて作成したものを用いた．使用した路面凹凸を図-4 に示す．橋梁のモデルは 0m から始まり，それより 20m 手前の区間は車輛モデルを振動させた状態で橋梁上に侵入させるための助走区間である．

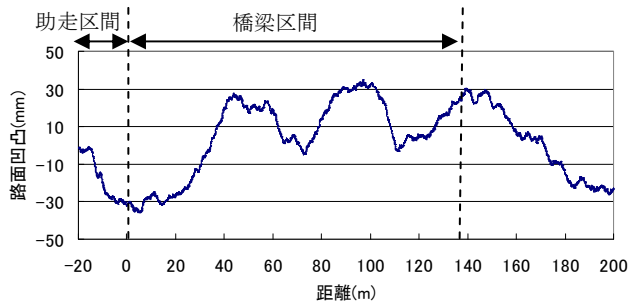


図-4 路面凹凸プロファイル

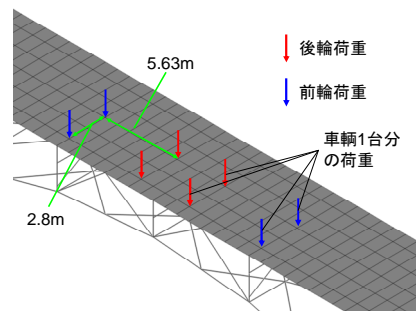


図-5 車輛を模擬した集中荷重

2.3.4 静的解析

実計測結果のうち比較対象としたのが s1a，s2a，s4c である．静的解析では車輛を載せた状態を再現するため

各タイヤの位置に近い節点に計測で使用した車輛の重量を基に集中荷重を与える。詳細を図-5 に示す。荷重は前輪の片側を 3tf、後輪 2 軸の中央の片側を 6.5tf とし、1 台 20tf の荷重とを与える。

2.3.5 車輛走行解析

車輛走行解析は現場計測で行った計測方法と同じ条件で解析を行う。8 自由度系 3 次元車輛モデルを使用し、走行速度は 10, 30, 45km/h とする。走行位置は車輛中央が床版中央を走行させた。現場計測を行った位置の変位、加速度についてまとめる。

次に解析結果から得られた加速度を FFT 解析し、パワースペクトルが卓越する周波数についてまとめる。FFT 解析の条件はサンプリング周波数を 100Hz、窓関数は Hanning を用い、フレーム長は 1024 とした。橋軸直角方向は加速度が小さいために FFT 解析がうまくできなかったため鉛直方向のみ FFT 解析を行った。

2.4 実計測結果と解析結果の比較

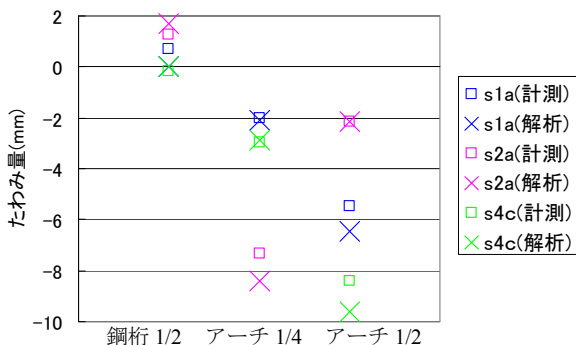
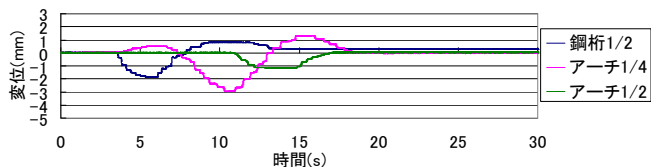
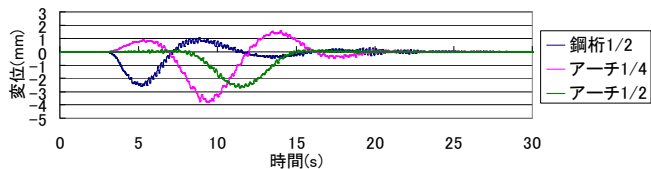


図-6 静的載荷時の G1 桁のたわみ量



(a) 実計測結果



(b) 解析結果

図-7 車輛走行時 (30km/h) のたわみ量

計測と解析について静的載荷時の s1a, s2a, s4c の G1 桁のたわみの比較を図-6 に示す。車輛走行時 (30km/h) のたわみの時刻歴応答を図-7 に示す。静的載荷時はたわみ量が大きくなっているところで解析と計測の誤差が大きくなっている。特にアーチ 1/2 では s1a で約 18%, s4a で約 15% の誤差となっている。そのため解析モデルのほうが橋梁全体の剛性が小さくなっていると考えられる。

車輛走行時でも最大・最小たわみ量を比べると解析モデルのほうが大きくなっている。ただし計測のほうでは動的な応答をうまく計測できておらず実際よりも計測値のほうが小さい値となっている可能性があると考えられる。

固有振動数の計測、解析結果の比較を表-2 に示す。比較について次数は卓越方向などから考慮して決定した。固有振動数は、まず解析において固有値解析結果と車両走行解析結果を FFT 解析した結果はほぼ同じ値を確認した。また計測結果と解析結果を比較すると 1 次で約 14% と一番大きな誤差となった。全体的に 10% 前後の誤差であり妥当な解析モデルであると考えられる。

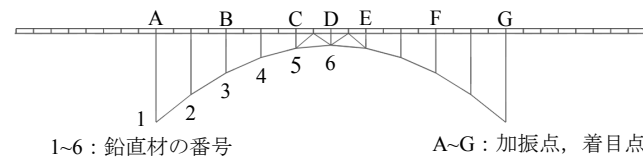
表-2 固有振動数の計測と解析の比較

	固有振動数(Hz)									
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次
FFT解析(計測)	1.27	2.14	2.34	-	3.03	3.42	4.1	4.39	4.88	-
固有値解析	1.48	2.09	2.24	3.08	3.45	3.70	4.58	5.01	5.28	5.50
FFT解析(鉛直)	-	-	2.24	-	3.48	3.71	4.59	5.07	-	-
計測と解析の誤差(%)	14.1	-2.4	-4.5	-	12.1	7.6	10.6	12.5	7.6	-

3. 起振機を想定した強制外力変位による動的解析

3.1 解析手法

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動的解析を行う。解析モデルに損傷を模擬し、健全時と比較することでどのように応答が変化するかを確認する。各計測点の変位を FFT 解析し、卓越したパワースペクトル値に着目する。



1~6: 鉛直材の番号 A~G: 加振点, 着目点
図-8 起振, 着目位置と鉛直材についての側面図

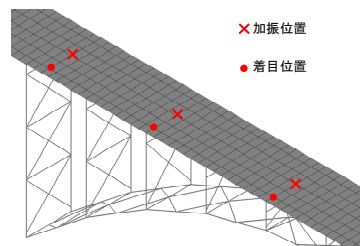


図-9 床版上での加振位置と着目位置の関係

加振位置、着目点位置は図-8, 9 に示す。加振位置は 4 箇所(A~D 点)、着目点は支間中央を軸として左右対象な構造であり左右で応答の違いを確認するため 7 箇所(A~G)とした。1~6 は鉛直材の番号である。加振の方法は床版である板要素の橋軸方向における中央の節点に強制外力を与える。強制外力は sin 波とし、時間刻みは 0.01 秒で 20 秒間の解析を行う。振動周期は橋梁の対象とする固有モードの固有振動数とする。対象とする固有モードは図-10 に示す 1 次, 6 次, 10 次モードとした。これは鉛直材部分を損傷模擬するので、損傷に影響のあると考えられるものを選択した。そのため固有振動数が一番小さい 1 次, 鉛直方向のモードでより鉛直材に影響

がある6次，橋軸直角方向2次モードである10次を対象とした．加振方向は固有モードにあわせ，橋軸直角方向と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て最大で 100kN，振幅は 200kN とした．

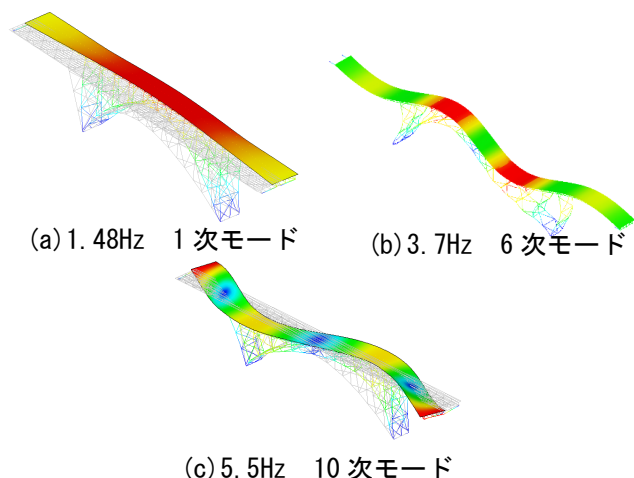


図-10 対象とした固有モード

次に応答の変化が認められた条件の固有振動数について損傷度 25%，75%，また固有振動数 $\pm 0.05\text{Hz}$ における強制外力での動的解析も行い，損傷度，振動数の違いについて検討する．強制外力による動的解析のフローを図-11 に示す．

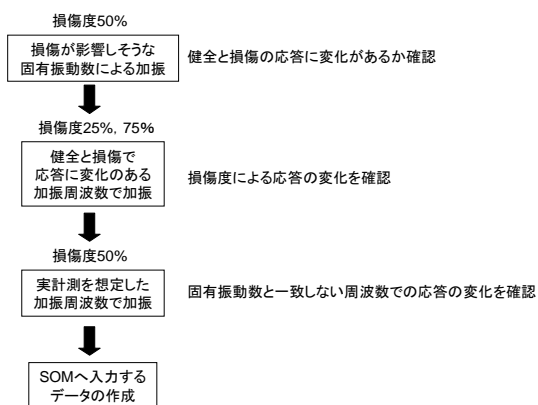


図-11 解析フローチャート

3.2 損傷模擬

桜橋の実際の点検を参考に損傷模擬する位置を決定した．定期点検において様々な損傷が発見されており，損傷箇所は補剛桁，アーチ材，鉛直材，対傾構等のガセットプレート付近での亀裂や腐食が見つかった．その中で鉛直材は写真-1 のように鉛直材の下端部の近くで腐食や亀裂が見つかった．またアーチ橋では鉛直材，補剛桁，支承回りなどの腐食が一般的とされている．これを参考に本研究の解析では鉛直材の下端部を損傷模擬する．損傷箇所は鉛直材の下端部の 200~300mm の梁要素を対象とし，損傷方法は断面のすべての板厚を減少させて損傷を模擬する．損傷度はまず板厚減少量が 50%の解析を行い，変化が認められた損傷パターンについては 25%，75%についても解析を行う．

解析モデルの健全時と損傷時の固有値解析結果を比

較すると，固有振動数は鉛直材 1 が損傷したときだけ僅かではあるが，1 次と 2 次で 0.01Hz の変化が見られた．それ以外には全く影響が見られず固有振動数の変化で損傷を発見するのは難しいと思われる．

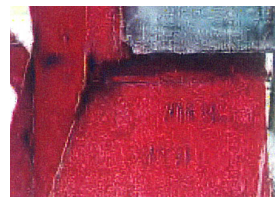


写真-1 桜橋の過去の損傷事例(腐食)

3.3 解析結果

3.3.1 損傷位置による応答の変化

解析結果から着目点の変位を抽出する．解析結果から得られた変位を FFT 解析し，卓越振動数におけるパワースペクトルの値を抽出する．このときの FFT 解析の条件としてサンプリング周波数を 100Hz とし，窓関数は Hanning を用い，フレーム長は 1024 とした．FFT 解析に使用したデータは強制加振をはじめてから定常波になっていると思われる約 10 秒から 20 秒の 1024 点のデータを用いる．

FFT 解析結果から，健全時と損傷時における動的応答の違いについての検討を行う．方法は，振動させた周波数に近い卓越周波数のパワースペクトル値に着目する．この値が健全時と損傷時で変化しているかどうかを確認するため，損傷時の応答を健全時の応答で割ることによって変化を把握する．

1.48Hz と 5.5Hz で加振した結果は，一部変化が見られたが損傷していてもほとんど応答に変化は見られなかった．

3.7Hz で加振した結果は，損傷により特に橋軸直角方向の応答に変化が見られた．健全時に比べると大きいもので約 22 倍，小さいもので約 0.1 倍に変化している．1.48Hz と 5.5Hz では全く応答の変化が無かった鉛直材 3 と 5 の損傷についても変化が認められた．また橋軸方向の応答の比較については D 点を加振した時のみ変化が認められた．

以上から加振周波数を 3.7Hz としたときの橋軸方向と特に橋軸直角方向に着目することで損傷の判断を行うこととする．

3.3.2 損傷度における応答の変化

3.3.1 の結果から，3.7Hz で鉛直方向に加振させたときのパターンについて調べ，橋軸直角方向の応答についてまとめる次に損傷箇所だけでなく損傷度の判断もできるのかを検証するため，板厚の減少が 25%と 75%のときに 3.7Hz で加振する解析をさらに行う．

損傷度が 25%になると鉛直材 3 と 5 が損傷するとほとんど変化がなく，鉛直材 1 と 6 が損傷すると，損傷度 50%のときよりも変化が小さいことを確認した．

損傷度が75%になると鉛直材1と6が損傷すると50%のときより変化が大きくなっていることが確認でき、鉛直材3と5が損傷すると変化が大きくなっているため損傷の判断ができる可能性があると考えられる。

3.3.3 実計測を想定した加振周波数での応答の変化

ここでは実計測で固有振動数と一致した周波数での加振は難しいと考え、固有振動数±0.05Hz(3.65Hz, 3.75Hz)で加振した時の応答の変化を確認した。

固有振動数で加振したときと±0.05Hzで加振したときの結果を比較するとパワースペクトルの値は全体的に小さいけれど、健全時と損傷時を比較したときの大きさについては同じような変化をしている。一部で大きく変化していたが、固有振動数に近い振動数であれば損傷による応答は一定の変化があると考えられる。

4. ニューラルネットワークを利用した健全度診断

4.1 ニューラルネットワークの概要

ニューラルネットワークは理論が必ずしも必要ではなく良質な入力データと答えのペアが多数あればニューラルネットワークシステムを構築することができる。

ニューラルネットワークは与えられた既知の情報を整理し、記憶し、これを「学習(learning)」と呼び、完成したプログラムを用いて問題を解くステップを「認識(recognition)」と呼ぶ。ニューラルネットワークはニューロンの結合の仕方によって大きく二つに分けることができる。表-3にニューラルネットワークの分類を示す。

表-3 ニューラルネットワークの分類

		学習の方法	
		教師付学習	教師無学習
階層型		BP法	
非階層型	相互結合型		ホップフィールド ボルツマンマシ
	競合学習型	LVQ,CPN (拡張SOM)	SOM 拡張SOM

本研究で使用するのは競合学習型教師無学習ネットワークであるSOMである。SOMの最大の特徴はパターン間の関係構造を明らかにできることである。SOMで学習が終わった後には類似したデータが寄り集まったマップが得られる。そして、パターン同士の類似性は競合層に形成されたマップ上の近さの關係に写され、学習が終了した後、マップを観察することによりパターン間の關係やパターングループを理解できる。このためSOMはパターン分類やパターン認識の分野で特に優れていると考えられている。

4.2 SOMへの入力データ

ここでは本研究で対象としているアーチ橋の鉛直材の損傷時の動的解析データを用いて、健全度の評価を行うためのマップをSOMで作成する。

SOMへ入力するデータは起振機を想定した強制外力による動的解析で得られた応答を使用する。健全時と損傷時の応答の変化について調べた結果、3.7Hzで鉛直方向に加振した場合の橋軸直角方向において変化が認め

られた。このときに得られたデータを利用してSOMに使用するデータを作成する。解析パターンとして3.7Hzで加振点をA~D、計測点はA~G点として健全時と損傷時の応答の結果を利用する。入力したデータの一例を表-3に示す。データ名は%が損傷度、損の後ろが鉛直材の損傷位置である。またデータ項目についてはA-BならA点を加振し、B点に着目した結果である。

表-3 SOMへの入力データ例

データ名	健全時と損傷時の比較値(損傷/健全)						
	A-A	A-B	A-C	A-D	A-E	A-F	A-G
健全	1	1	1	1	1	1	1
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

3.7Hz±0.05Hzで加振したデータについては、3.7Hzで学習した結果に認識データとして入力し、実際の計測時において固有振動数を把握しておらず、完全に一致していなくてもSOMによるグループ分け、損傷の区別ができるかどうか確認するために利用する。

4.3 SOMによるマップ化

固有振動数である3.7Hzで加振させた結果を学習させることでマップを作成し、3.7±0.05Hzで加振させた結果を認識させマップのどのニューロンに配置されるかを確信する。

本研究では実計測における橋梁の健全度診断を考慮しているため、損傷の判断をより少ない計測点、加振点で簡単に行うことができれば実橋梁においても適用できると考えられる。そこで計測点、加振点のデータに関しての検証を行う。計測点はA~G点、加振点はA~D点のデータがあり、損傷を判断に必要なデータについて考える。支間中央を対称とした計測点のデータが似ているため二重で情報を与えている可能性があるため、A~DとA~G点のデータを使用したSOMを行った結果、A~D点だけのデータを用いても損傷の分類はできると確認した。またA~D点の各1点ずつのデータでSOMを行い、各計測点の損傷の影響を考える。結果は各点により区別のできる損傷が異なるので、この4点はすべて使用することとする。

次に加振点についての検証を行う。加振点はA~Dの4点であり、それぞれの点で加振した結果だけを用いてSOMを行った。その結果、A、D点を加振したデータが損傷の区別が明確にできていることを確認した。

以上より、本研究の損傷の判断にはA、D点を加振したときのA~D点の計測点を使用してSOMでマップを作成することとする。

4.4 実計測データの使用方法

実計測結果を用いてどのように健全度診断を行うのかについて検討する。実際に使用するには健全時(建設時)と健全状態を調べたいときに計測した応答を比較したデータを用いる。次に、計測結果を利用してSOMで学習、または認識を行うのかについて検討する。また、

加振周波数を±0.05Hz にしたときの応答を学習または認識させた場合、どちらも同じ場所にマップされていることは確認している。これを検討するために例として解析で支点沈下を模擬し、その結果を仮の実験結果であるとして SOM を行う。このときのデータ名を「実験結果(仮)」として作成しておいたマップに認識、学習させたものを比較すると、認識を行ったものでは健全の位置に、学習を行ったものでは独立したグループに区別された。学習した結果を図-12 に示す。よって学習を行うことで現在の健全度を判断することができると考えられる。

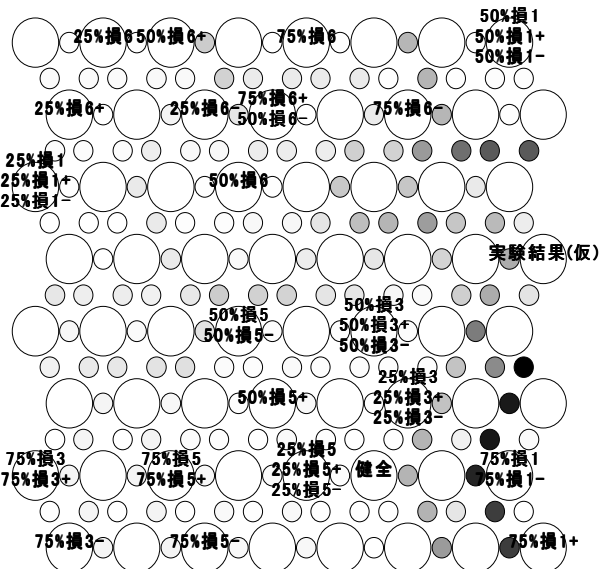


図-12 実験結果(仮)を SOM で学習させたマップ

4.5 健全度診断手法について

健全度診断マップ作成フローを図-13 に、健全度診断手法についてのフロー図を図-14 に示す。

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。次に評価したい損傷を決定し、損傷を模擬する。そして健全時、損傷時の応答の変化を比較し、SOM 入力データを作成する。最後に SOM で損傷の区別に必要なデータを選別することでマップを作成することができる。

実際の橋梁で健全度診断する方法は健全時と現在の計測結果を比較して SOM 入力データを作成し、解析で得られたデータと一緒に学習させることで健全度を診断することができる。

5. 結論および今後の課題

本研究では動的応答を再現できる解析モデルを作成し、健全時と損傷時の動的応答を比較したデータを用いて SOM を行い、健全度診断を行えるマップを作成した。最後にニューラルネットワークを用いた健全度評価の方法についての提案を行った。

1)静的、車両走行解析結果と実計測結果との比較を行い妥当な解析モデルを作成した。解析結果は計測結果よりも剛性が小さい結果となった。

2)強制外力による動的解析では損傷模擬した箇所に影響しそうなモードに対し、その固有振動数で加振したときの健全時と損傷時のパワースペクトルの変化を比較した。その結果 3.7Hz で加振したときの橋軸直角方向のパワースペクトルで変化があることを確認した。

3)損傷を区別するために必要であると思われるデータを選別し、SOM を行い本研究での健全度診断を行うのに最適なマップを作成した。

4)加振による振動の健全時と損傷時の応答の比較を用いて SOM を行い、その結果を利用した橋梁の健全度診断手法を提案した。

今後の課題は、解析では対象橋梁の応答をより正確に再現した解析モデルを作成することである。また SOM を利用した健全度診断においては本研究で対象としなかった損傷、または損傷が複数ある場合、パワースペクトルの変化で損傷を判断できるのかを確かめることと実計測において適用できるのかが今後の課題である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2002.3
- 2) 北垣啓：走行車両の振動応答を利用した橋梁の健全度評価に関する基礎的研究，大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻，2009.2

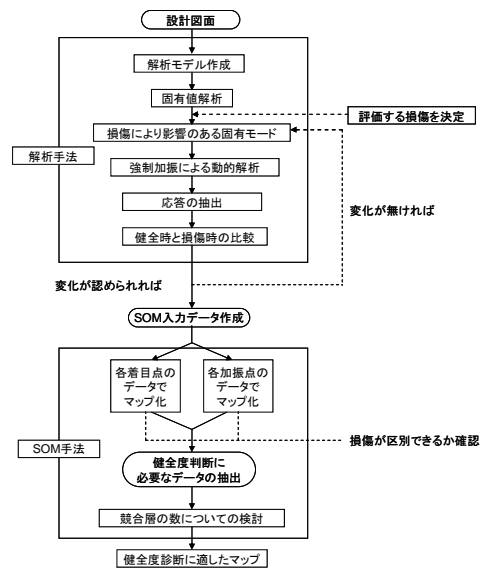


図-13 健全度診断マップ作成フロー

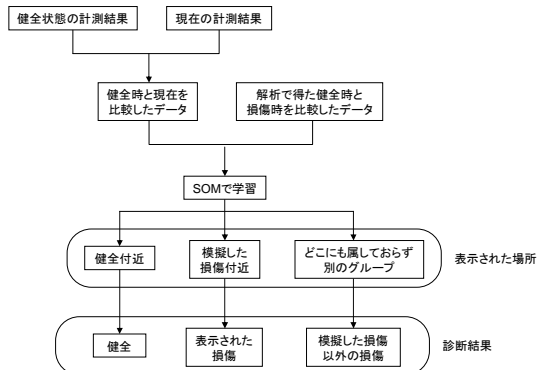


図-14 健全度診断フロー

討議等

◆討議 [内田 敬 教授]

SOM を用いるときの学習パラメータは具体的にどのようなになっているか、オーバーランニングになっていないか。

◆回答：初期学習率は 0.3，初期近傍領域は競合層の約 1/3 とし，学習回数は 3000 回としました。学習回数は学習回数を変動させて SOM を行い，ニューロンに対して重みベクトルの更新が十分小さくなったことを確認し，またオーバーランニングにならないように決定しました。

◆討議 [内田 敬 教授]

今回の結果が他の橋梁にも応用できるかどうか。

◆回答：橋梁形式と固有モードが一緒であれば本研究で想定した損傷は発見できると考えられます。また，橋梁形式や損傷が違っても本研究で示したフローに沿うことで SOM を利用し損傷を区別することができると考えられます。

◆討議 [内田 敬 教授]

適切な学習程度とは何か，十分に学習していないと損傷を区別できていないのではないか。

◆回答：繰り返し学習を行い，徐々に学習回数を増やしていくことで損傷ケースが似ているもの同士のマップで表示された関係が変わらなくなったところを適切な学習程度としています。

◆討議 [角掛 久雄 講師]

加振周波数が固有振動数からどれだけ離れていると損傷の区別がわからなくなるのか。

◆回答：解析では加振周波数が固有振動数から 0.15Hz 離れているときでも健全時と損傷時で応答の変化を確認しました。また，加振周波数が固有振動数から離れると他の固有振動数に近くなり対象の固有モードが出なくなり損傷の発見は難しくなると考えています。

◆討議 [角掛 久雄 講師]

加振周波数が固有振動数からずれているときの卓越周波数の誤差はどうなっているか。

◆回答：卓越周波数は加振振動数の影響が大きいことを確認しています。また卓越周波数が変わりパワースペク

トル値も小さくなってしまいますが，データとして使用しているのは健全時と損傷時を比較した値であるので本手法には影響はないと考えています。

◆討議 [木内 龍彦 講師]

計測と解析の固有値の比較において 1 次モードで 14% の違いがあるのはなぜか。

◆回答：実橋では補強されている部分があり，そのモデル化に問題があると考えています。

◆討議 [谷口 与史也 教授]

構造物の対称性は信じていいのか。

◆回答：本研究で対象とした橋については支間中央で加振したときに左右の応答が近い値を示している所以对称性があると考えています。これは本研究の場合であり，対象が変化した場合はそのたびに検証する必要があると考えます。