

構造物の損傷に伴う振動特性の変化に関する 実験的考察

古川愛子¹・大塚久哲²・梅林福太郎³

¹工修 九州大学助手 工学研究院建設デザイン部門（〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1）

E-mail: furukawa@doc.kyushu-u.ac.jp

²工博 九州大学教授 工学研究院建設デザイン部門（〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1）

E-mail: otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp

³九州大学大学院修士課程 工学府建設システム工学専攻（〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1）

E-mail: u-bayashi@doc.kyushu-u.ac.jp

本研究では、鋼製トラス橋を対象として行った微動計測およびマイクロ起振器を用いた起振実験に基づいて、部材の損傷に伴う振動性状の変化についての検討を行った。本論文では、その実験内容を示し、微動計測結果から固有振動数、減衰定数、モードシェープを求め、健全状態と損傷状態での差異を明らかにした。また、マイクロ起振器を用いた起振実験結果から、起振振動数におけるフーリエ振幅を算定した。損傷に対する固有振動数、減衰定数、モードシェープの感度と比較することで、起振振動数におけるフーリエ振幅は損傷に対する感度が高いことを示し、構造物の損傷検出のための入力データとして用いることの有効性を示した。

keywords : structural damage, vibrational characteristic, field experiment, microtremor, micro shaking device, steel truss bridge

1. はじめに

わが国の構造物は年々老朽化が進んでおり、中には早急に何らかの対策を考え、補修・補強などを行わなければならない構造物もある。また、わが国は世界有数の地震多発国であるため、老朽化した構造物は常に危機にさらされていることになる。このような構造物の維持・管理をしていくことによって長寿命化をはかるには、損傷箇所を発見することが必要不可欠である。

損傷が目に見える範囲であるならば、目視は有効な手段といえるが、外装や外壁に覆われて目で見ることができないような損傷箇所においては、外装・外壁を取り除かなければならず、それに膨大なコストと時間がかかってしまう¹⁾。このような損傷箇所に対する対策として、非破壊検査²⁾がある。これは構造物を傷付けたり破壊したりせずに超音波、AE、放射線などの計測に基づき、間接的に内部欠陥などを調べる検査手法であるが、この検査手法でも膨大なコストと時間がかかる上に構造物全体の損傷を把

握することは困難である。

上記の手法に対して、構造物の振動特性の変化を利用する手法では、構造物の剛性の低下および減衰の増加から構造物全体の損傷箇所を把握することができるなどの利点がある。

現在、構造物の損傷前後における振動特性の変化から構造物の損傷を検出するための数々の手法が提案されている。損傷検出に用いられる振動データとしては、固有振動数^{3),4)}、減衰定数^{4),5)}、モードシェープ⁶⁾等の固有振動特性を利用した手法と、周波数応答関数^{7),8)}を利用した手法に大きく分けられる。現状では、数値解析による解析的検討や室内における模型実験による検討が中心であり、実際の構造物に手法を適用し、かつ実用に供されている手法は非常に少ない。また数値解析では便宜上、損傷した部材の剛性を低下させることなどで構造物の損傷をモデル化しているが、実際の損傷とそれに伴う構造物の間の対応関係は必ずしも明確ではない。以上のことから、実際の土木構造物を対象とし、部材に様々なレベルの損傷を与えた損傷モデルに対して振

動計測を行い、損傷に伴う振動特性の変化を把握することは重要である。また、各種振動データが損傷によってどのように変化するかを調べ、振動データの損傷に対する感度を知ることが有効である。

本論文では、熊本県阿蘇郡阿蘇町に架かる旧車帰橋(くるまがえりばし)の撤去工事に際して行った振動実験の内容について報告するとともに、実験で得られたデータを分析し、損傷に伴う振動特性の変化について考察を行う。健全モデルと部材に様々なレベルの損傷を与えた4つの損傷モデルに対して微動計測とマイクロ起振器を用いた起振実験を実施した。微動計測からは、固有振動数、減衰定数、モードシェープの変化についてそれぞれ考察する。また、マイクロ起振器を用いた起振実験からは、起振振動数でのフーリエ振幅の変化について考察をする。さらに損傷に伴う起振振動数でのフーリエ振幅の変化量と損傷に伴う固有振動数や減衰定数およびモードシェープの変化量との比較から、マイクロ起振器を用いることの優位性を示す。

既に損傷している構造物が大地震にて受ける被害は甚大なものと考えられ、このような構造物は大地震が起こる前に補修・補強等を行う必要がある。本研究では、振動特性の変化から構造物の損傷を検出するシステム開発のための実験的検討として、損傷に対する各種振動特性の感度について検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 対象構造物

本研究では、写真-1 に示した熊本県阿蘇郡阿蘇町地内の菊池赤水線に架かる車帰橋を対象構造物とした。(写真-1 において、手前側は新橋、奥側が旧橋であり、本研究で実験の対象としたのは奥側の旧橋である。)この橋梁は昭和38年に架設された橋長47.0m、幅員4.8mの単径間鋼製トラス橋である。

図-1 の側面図に節点番号および要素番号を記す。



写真-1 車帰橋

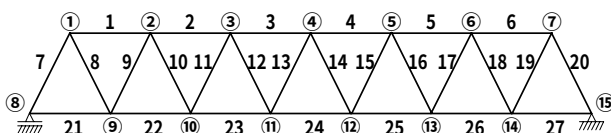


図-1 側面図

2.2 実験内容

上述の車帰橋に対して以下の2通りの振動計測を行った。

(1)微動計測

微動とは、交通振動や風荷重などの自然の外力による、構造物の微小な振動のことで、本実験では5分間計測を行った。

(2)マイクロ起振器による起振実験

マイクロ起振器を用いて橋軸方向起振実験および鉛直方向起振実験を行った。実験に用いた起振器は、市販されている一般的な起振器に比べ起振モーメントが約1/10～1/2000倍となっており構造実験に用いる起振器としては前例のない小型さである。写真-2 にマイクロ起振器を示し、表-1 にマイクロ起振器の仕様について示す。起振振動数は橋梁の共振振動数を避け、7.5Hzとし、5分間計測を行った。

振動計測には、共和電業のASQ-2CAのサーボ型加速度計を用い、橋軸方向と鉛直方向の応答を測定した。サンプリング周波数は200Hzである。



写真-2 マイクロ起振器

表-1 マイクロ起振器の仕様

偏心荷重	偏心距離	偏心モーメント	起振力(7.5Hz起振時)
0.102kgf	0.1m	0.0102kgf・m	221.8N

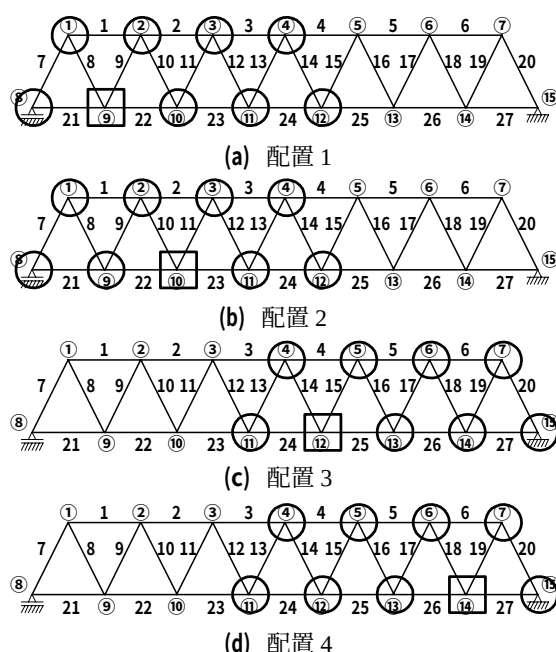


図-2 加速度計と起振器の設置位置

2.3 計測器の配置

本実験では、橋軸方向および鉛直方向に加速度計を設置し、計測は橋梁の片面のみとした。加速度計は計 16 台とその台数に制限があったため、図-2 に示す配置 1 から 4 に対し計測を行った。節点 4 と節点 11 はどの配置においても計測している。

図-2 において○で囲まれた節点には、加速度計を設置し、□で囲まれた節点には起振器を設置した。

2.4 損傷モデル

本研究では、損傷を入れる前の状態を健全モデルとし、損傷はトラスの斜材(H 型鋼)に与えた。斜材の断面と損傷の入れ方を図-3 に示す。損傷モデルは以下に示す 4 パターンを考えた。

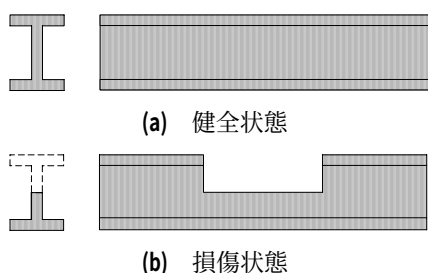


図-3 斜材の断面と損傷の入れ方

(1)損傷モデル A

要素 8 に 50%の断面欠損を部材長さ方向に 10cm 入れたモデル

ここに、断面欠損は H 型鋼のウェブ半分と一方のフランジをガスバーナーで切除した(図-3)。断面欠損部が斜材の長さ方向中央に位置するようにした。

(2)損傷モデル B

要素 8 に 50%の断面欠損を部材長さ方向に 50cm 入れ、要素 15 に切り欠きを入れたモデル

ここに切り欠きは 1.0cm の長さである。

(3)損傷モデル C

要素 8 に 50%の断面欠損を部材長さ方向に 200cm 入れ、要素 15 に 50%の断面欠損を部材長さ方向に 100cm 入れたモデル

(4)損傷モデル D

要素 8 に 50%の断面欠損を部材長さ方向に 300cm 入れ、要素 15 に 50%の断面欠損を部材長さ方向に 300cm 入れたモデル

また、橋軸に対して対象となる両面に同様の損傷を入れた。損傷を与えた部材を図-4 に示す。これらを損傷部材の剛性低下率に換算すると表-2 の通りである。剛性低下率は式(1)から算出した。

$$\text{剛性低下率} = 1 - 1 / (1 + \Delta l / l) \quad (1)$$

ここで、 Δl は損傷長さ、 l は部材長さである。

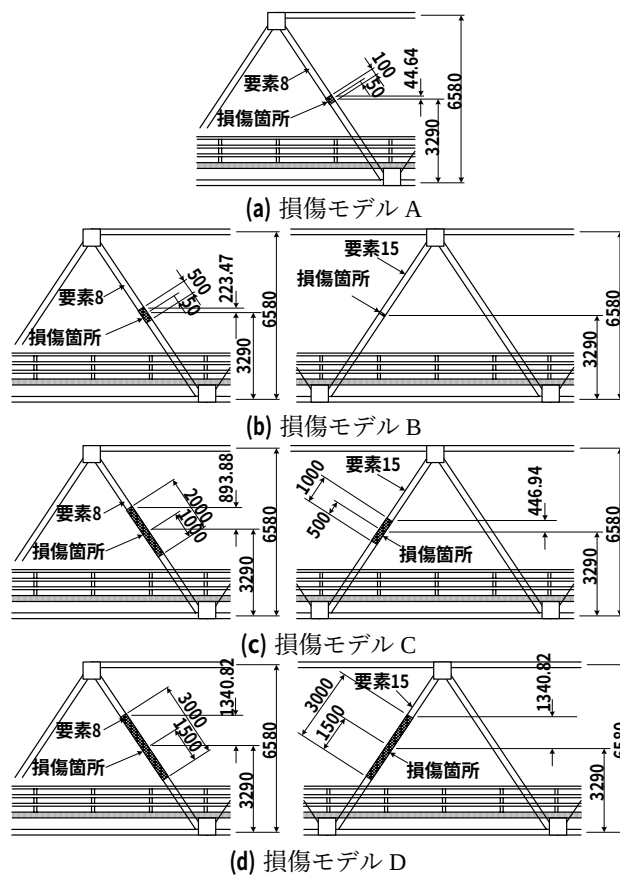


図-4 損傷モデル

表-2 損傷部材の剛性低下率

	要素8	要素15
損傷モデルA	0.013	0.000
損傷モデルB	0.064	0.001
損傷モデルC	0.214	0.120
損傷モデルD	0.290	0.290

式(1)は、損傷部材を 1 つの軸力部材でモデル化した場合に等価となる剛性と、健全部材の剛性ととの比から求めたものである。等価となる剛性は、図-3(b)の断面欠損と両側の健全部分が直列に連なると仮定して算出した。

3. 微動計測

3.1 固有振動数

本研究では、実験で得られたデータからパワース

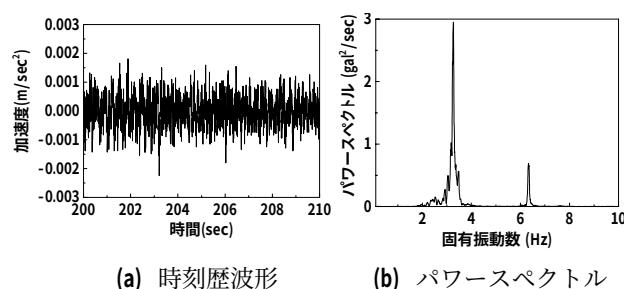


図-5 微動計測データ(健全モデル・節点 12)

ペクトルを算定し、そのピーク点での振動数を固有振動数として算出した。例として健全モデルにおける節点 12 での加速度応答の時刻歴波形とそのパワースペクトルを図-5 に示す。図-5(b)から、1 次モード、2 次モードにおけるピーク点は明確であるが、3 次モード以上のピーク点は明確でないため 2 次モードまでの固有振動数を求めた。また、モデルについては 2.4 で示した健全モデルと 4 つの損傷モデルについてそれぞれ算出した。損傷による固有振動数の変化を図-6 に示す。

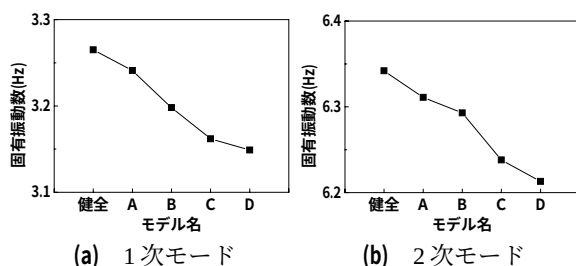


図-6 損傷による固有振動数の変化

図-6 は横軸にモデル名、縦軸に固有振動数を表している。図-6(a)は 1 次モードの固有振動数、図-6(b)は 2 次モードの固有振動数である。図-6(a)から、健全モデルでは 1 次モードの固有振動数が 3.265Hz であったのが損傷を負うごとに減少し、損傷モデル D においては 3.149 Hz になっていることが分かる。図-6(b)からも、健全モデルでは 2 次モードの固有振動数が 6.342 Hz であったのが損傷を負うごとに減少し、損傷モデル D においては 6.213 Hz になっていることが分かる。健全モデルから損傷モデル D の固有振動数の総減少量は、1 次モードでは 0.116 Hz、2 次モードでは 0.129 Hz となり、2 次モードのほうがやや大きい。減少量を健全モデルに対する比で示すと、1 次モードでは 3.55%、2 次モードでは 2.03% となり 1 次モードの方が大きいことが分かる。

3.2 減衰定数

減衰定数はパワースペクトルからハーフパワー法を用いて算出した。固有振動数と同様に 1 次モード、2 次モードの健全モデルから損傷モデル D までの減

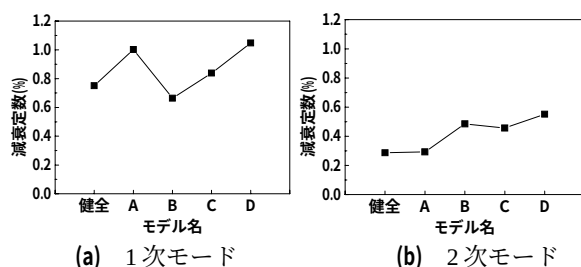


図-7 損傷による減衰定数の変化

衰定数を算出した。注目した節点は節点 12 とした。

図-7 に損傷前後の減衰定数の変化を示す。

図-7 は横軸にモデル名、縦軸に減衰定数を表している。図-7(a)は 1 次モードの減衰定数、図-7(b)は 2 次モードの減衰定数である。前述した固有振動数とは異なり、2 次モードでは損傷を負うごとに減衰定数が大きくなる傾向はつかめるが、1 次モードでは傾向が一定ではなく損傷の程度と減衰の変化量との明確な関係は見出せなかった。

3.3 モードシェープ

次に、損傷に伴うモードシェープの変化を調べた。本実験では計測器に数の制限があったため、配置 1 から配置 4 の 4 回に分けて計測を行った。その中で、節点 4 と 11 のみ全ての配置で計測できたため、モ

表-3 モードシェープ (1次モード)
(節点 11 の値を 1 に基準化)

	健全モデル	損傷モデルA	損傷モデルB	損傷モデルC	損傷モデルD
節点1	0.233	0.211	0.234	0.215	0.384
節点2	0.696	0.729	0.850	1.018	1.216
節点3	0.935	0.970	0.922	0.886	0.995
節点4	0.993	0.918	0.933	0.968	0.996
節点5	1.070	1.032	0.963	1.005	0.990
節点6	0.606	0.619	0.521	0.665	0.629
節点7	0.000	0.205	0.199	0.231	0.267
節点8	0.042	0.313	0.221	0.122	0.000
節点9	0.397	0.420	0.468	0.452	0.454
節点10	0.771	0.787	0.750	0.755	0.916
節点11	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
節点12	1.002	1.003	1.007	0.973	0.981
節点13	0.686	0.742	0.703	0.726	0.684
節点14	0.394	0.392	0.394	0.387	0.384
節点15	0.040	0.040	0.055	0.000	0.000

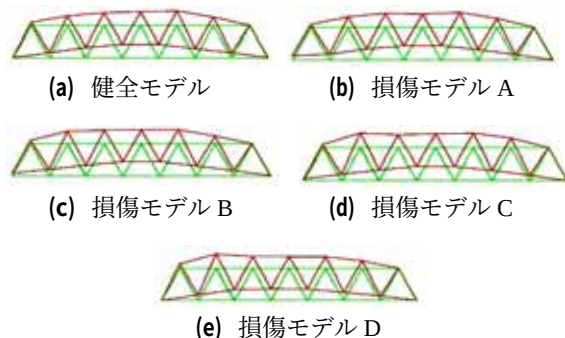


図-8 モードシェープ(1次モード)

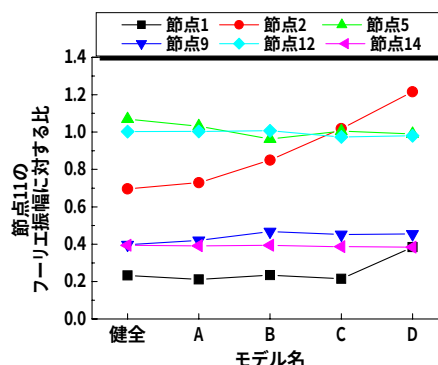


図-9 損傷によるモードシェープの変化

ードシェープを描くときには、各配置の節点 11 の値に合わせ調整を行った。ここでは 1 次モードのモードシェープを表-3 と図-8 に示す。

損傷によるモードシェープの変化について検討するために、節点 11 のフーリエ振幅の値を 1.0 とした場合のその他の節点におけるフーリエ振幅の比を図-9 に示す。図-9 には損傷要素 8 に隣接する節点 1 と 9、損傷要素 15 に隣接する節点 5 と 12 および節点 2、14 を代表して図示している。図-9 から節点 2 においては損傷に伴い、フーリエ振幅が増加しているが、その他の節点ではそのような傾向は見られない。損傷要素 8 に隣接する節点 1、9 におけるモードシェープも、損傷要素 15 に隣接する節点 5、12 におけるモードシェープもほぼ一定であり、損傷に対する感度は固有振動数に比べて低いことが分かる。

4. 起振実験

マイクロ起振器を用いた起振実験結果について述べる。尚、健全モデルにおいては起振実験に不手際

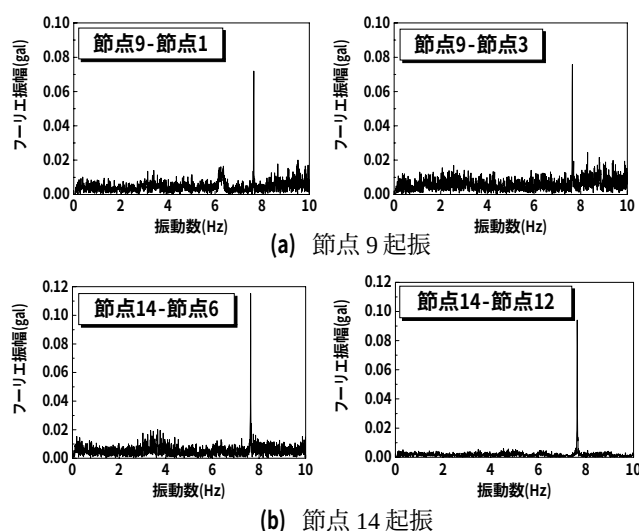


図-10 橋軸方向起振・橋軸方向計測時のフーリエ振幅 (損傷モデル A)

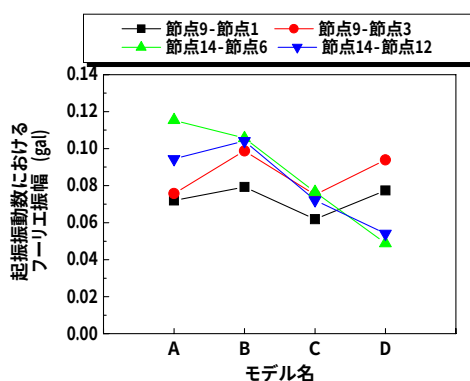


図-11 損傷による橋軸方向起振時の橋軸方向の応答の変化

があったため、起振実験の結果については損傷モデル A~D に関してまとめる。

4.1 起振振動数でのフーリエ振幅

実験で得られた加速度の時刻歴波形からフーリエスペクトルを算定し、起振振動数におけるフーリエ振幅を算出した。本研究では、起振振動数における加速度応答のフーリエ振幅のことを起振応答と呼ぶことにする。節点 9 で起振したときの節点 1 と 3、節点 14 で起振したときの節点 6 と 12 に着目し、橋軸方向起振時の橋軸方向の応答、橋軸方向起振時の鉛直方向の応答、鉛直方向起振時の橋軸方向の応答、鉛直方向起振時の鉛直方向の応答の 4 パターンの結果を以下に示す。以下に示す図中の凡例は[起振節点-計測節点]を示している。

4.2 橋軸方向起振時の橋軸方向の応答について

橋軸方向起振時の橋軸方向加速度応答のフーリエ振幅を損傷モデル A について図-10 に示す。損傷による橋軸方向起振時の橋軸方向の応答の変化を図-

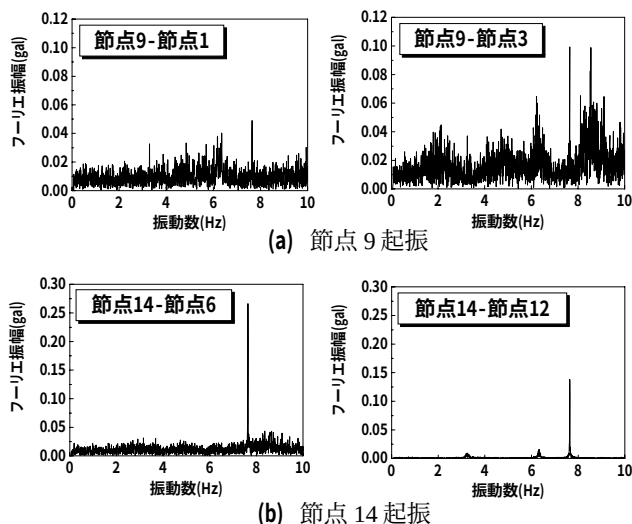


図-12 橋軸方向起振・鉛直方向計測時のフーリエ振幅 (損傷モデル A)

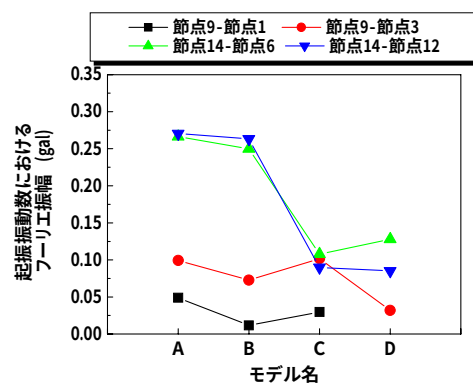


図-13 損傷による橋軸方向起振時の鉛直方向の応答の変化

11 に示す。節点 9 で起振した場合の節点 1 と節点 3 の応答では、損傷程度に対する明確な相関を確認することが出来なかった。節点 14 で起振した場合の節点 6 での応答は損傷モデル A～損傷モデル D の間で起振応答が次第に減少していることが分かる。しかし、損傷部材 15 に近い節点 14 で起振した場合の節点 12 の応答は、要素 15 の損傷レベルが大きくなるモデル B 以降では応答が一様に減少しているが要素 8 の損傷レベルが大きく変化する損傷モデル A～損傷モデル B の間では明確な相関を確認することが出来なかった。これらのことから、橋軸方向起振時の橋軸方向の応答では、起振点や計測箇所によって応答値の変化の様子が異なり、損傷による応答値の明確な相関を把握することは出来ず、橋軸方向起振時の橋軸方向の応答値を損傷検出の入力データとして用いたとしても、良い結果を得ることは困難であると考えられる。

4.3 橋軸方向起振時の鉛直方向の応答について

橋軸方向起振時の鉛直方向加速度応答のフーリエ振幅を損傷モデル A について図-12 に示す。損傷による橋軸方向起振時の鉛直方向の応答の変化を図-13 に示す。図-13 から、節点 14 で起振したときの節点 6 および節点 12 における起振応答が、損傷モデル B から損傷モデル C の間で大きく減少していることが分かる。節点 6 と節点 12 は損傷部材 15 の近傍の節点であり、損傷モデル B では切り欠き程度の損傷であったのが、損傷モデル C では 50% の断面欠損を 100cm 入れていることが原因であると考えられる。これに対して、節点 1 と節点 3 は損傷部材 8 の近くの節点であるのにもかかわらず、起振応答の値に大きな変動が見られない。また、図-13 において、損傷モデル D・節点 1 の結果がプロットされていないのは起振振動数においてピークを示していなかったためである。これらの理由としては、図-12 から分かるように節点 9 で起振した場合の節点 1 と節点 3 の応答では、起振振動数において卓越したピークを示しておらず、橋軸方向への起振の影響が鉛直方向の応答にほとんど現れないためと考えられる。

4.4 鉛直方向起振時の橋軸方向の応答について

鉛直方向起振時の橋軸方向の加速度応答のフーリエ振幅を損傷モデル A について図-14 に示す。損傷による鉛直方向起振時の橋軸方向の応答の変化を図-15 に示す。図-15 から、節点 9 で起振した時の節点 1 における起振応答が損傷モデル A から損傷モデル B の間で大きく変化していることが分かる。こ

れは、損傷モデル A では部材 8 に 50% の断面欠損を 10cm 入れた程度の損傷であったのが、損傷モデル B では 50% の断面欠損を 50cm 入れており、損傷が大きくなったことが原因であると考えられる。また、節点 1 と 3 の応答に関しては、節点 9 にて橋軸方向起振時の鉛直方向の応答では変化していなかったのにもかかわらず(図-13)、鉛直方向起振時の橋軸方向の応答では大きな変化が見られたのは(図-15)、図-14(a)から分かるように起振振動数においてピークを持っており、かつ起振によって大きく振動していることが原因であると考えられる。節点 14 で起振し節点 6 および節点 12 で計測した応答において、橋軸方向起振時の鉛直方向の応答では、損傷モデル B から損傷モデル C の間で大きく起振応答が減少していた(図-13)が、鉛直方向起振時の橋軸方向の応答では減少はしているものの、それほど大きな変動は見られない(図-15)。これは、節点 14 で起振したときの節点 6、節点 12 での橋軸方向の振動が、斜材である要素 15 が損傷することに対してあまり敏感ではないためであると考えられる。

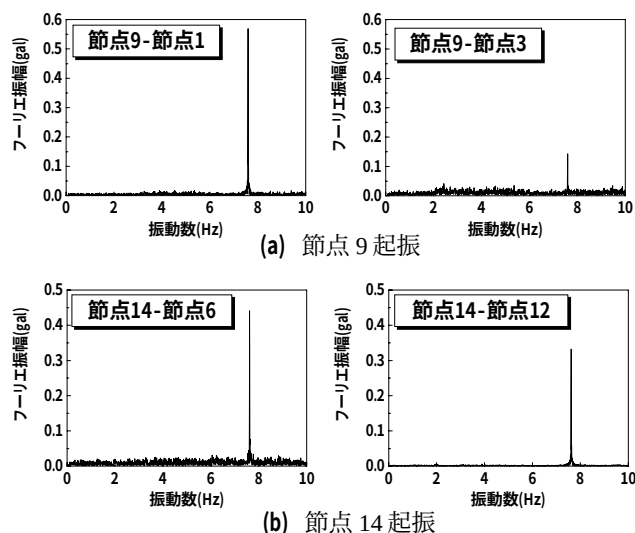


図-14 鉛直方向起振・橋軸方向計測時のフーリエ振幅 (損傷モデル A)

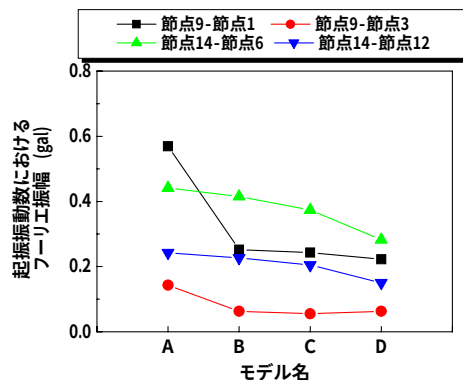


図-15 損傷による鉛直方向起振時の橋軸方向の応答の変化

以上により、鉛直方向起振時の橋軸方向の起振応答は、どの節点においても損傷の増加に伴い減少しており、損傷との相関を確認することが出来た。

4.5 鉛直方向起振時の鉛直方向の応答について

鉛直方向起振時の鉛直方向加速度応答のフーリエ振幅を損傷モデル A について図-16 に示す。損傷による鉛直方向起振時の鉛直方向の応答の変化を図-17 に示す。図-17 から、鉛直方向起振時の鉛直方向の起振応答が最も大きな応答値であることが分かる。特に節点 14 で起振した時の節点 6 と 12 では応答値が大きい。節点 14 で起振した時の節点 12 における応答は、損傷モデル B から損傷モデル C の間で大きく減少している。これは 4.3 で述べたことと同様である。しかしながら、その変動の程度は橋軸方向起振時の鉛直方向と比較してかなり大きい。損傷モデル C から損傷モデル D の間でも起振応答は減少しているものの、その減少量は大きくはない。このことから、損傷に伴い起振応答は減少するが、損傷程

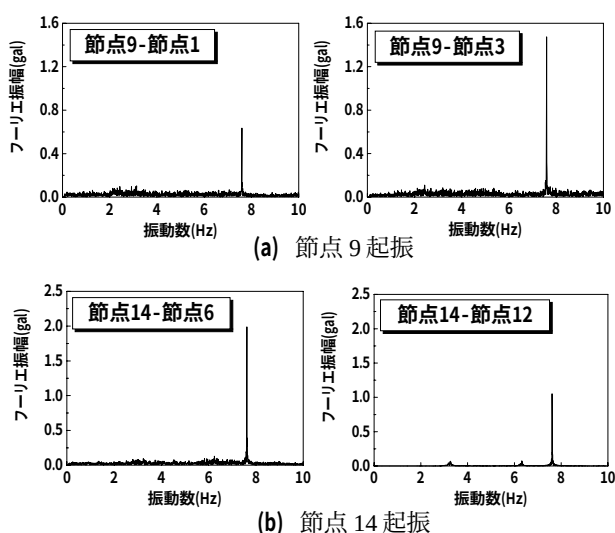


図-16 鉛直方向起振・鉛直方向計測時のフーリエ振幅 (損傷モデル A)

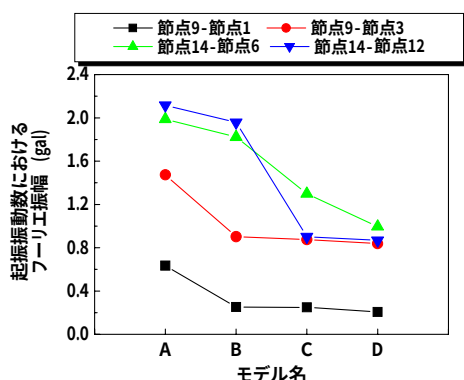


図-17 損傷による鉛直方向起振時の鉛直方向の応答の変化

度に対する減少の割合は必ずしも一様ではないことが分かる。節点 14 で起振し、節点 6 で計測したときの応答は、損傷が大きくなるにつれ減少しており、損傷モデル D に至ってもその減少は続いている。節点 9 で起振し、節点 1、3 で計測した応答は、損傷モデル A から損傷モデル B の間に起振応答に大きな減少が見られる。これは、4.4 で述べたことと同様である。また、両節点とも、損傷モデル B 以降は、起振応答の減少がなだらかになっており、減少はするが大きな変動はしていない。

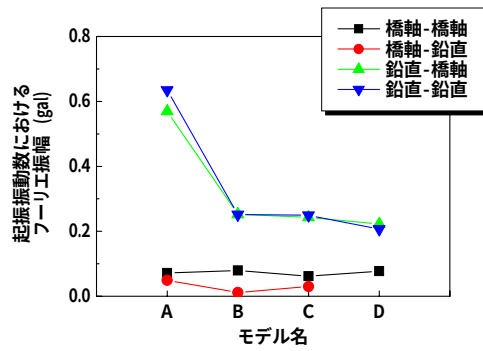
以上により、起振応答は損傷に伴い大きく変化すること、損傷部材に近い節点で計測されたデータほど損傷に対する感度が高いことが分かった。また、損傷による変化は、鉛直方向起振・鉛直方向計測時の起振応答の値の変動において最も明確に現れている。このことから、鉛直方向起振時の鉛直方向の応答を損傷検出のための入力データとして用いることが適していると考えられる。

本論文で示した実験結果では全ての[起振点-計測点]の組み合わせにおいて損傷に伴い起振応答が減少しているが、別途作成した簡易な解析モデルでも損傷と共に減少することを確認済みである。

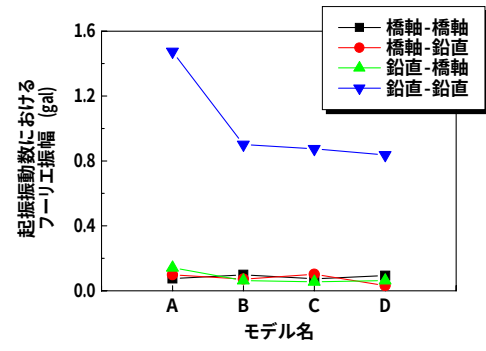
4.6 同一節点の起振方向・計測方向に着目した考察

4.2～4.5 では、同一の[起振方向-計測方向]の組み合わせに対して、損傷とともに起振応答が変化する過程を起振節点と計測点の違いから比較・検討を行った。本節では、同一の[起振点-計測点]の組み合わせに対して、損傷とともに起振応答が変化する過程を起振方向と計測方向の違いから比較・検討を行う。図-18 に結果を示す。図-18 の凡例は[起振点-計測点]を示しており、それぞれ(a) 節点 9 で起振した時に節点 1 で計測した場合、(b) 節点 9 で起振した時に節点 3 で計測した場合、(c) 節点 14 で起振した時に節点 6 で計測した場合、(d) 節点 14 で起振した時に節点 12 で計測した場合である。

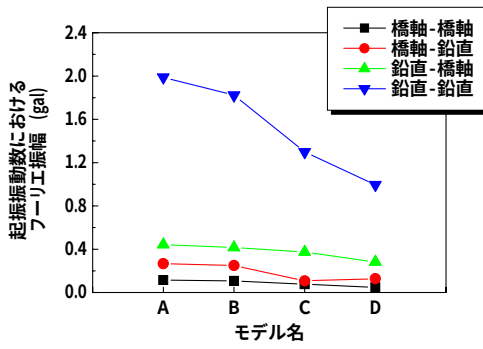
図-18 から(a)～(d)のどの[起振点-計測点]の組み合わせにおいても、鉛直方向に起振した時の鉛直方向の応答が他の方向に起振・計測した時の応答と比較して振幅が大きく、損傷に伴う変化量も大きいことが分かる。このことから、4.5 で述べたように鉛直方向起振時の鉛直方向の応答を損傷検出のための入力データとして用いることが適していると考えられる。その他の[起振方向-計測方向]の組み合わせでは、損傷に伴い、起振応答が変化しているものの、その変化量は小さいことが分かる。



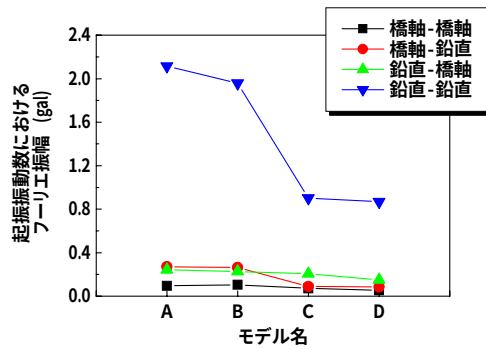
(a) 節点 9 起振-節点 1 計測



(b) 節点 9 起振-節点 3 計測



(c) 節点 14 起振-節点 6 計測



(d) 節点 14 起振-節点 12 計測

図-18 同一節点での損傷による起振応答の変化

5. 振動特性の比較・考察

以上のように、微動計測における固有振動数、減衰定数、モードシェープ、起振実験における起振振動数でのフーリエ振幅(起振応答)をそれぞれ算出し、比較・考察を行った。これらの中で、どの振動特性が損傷検出に用いる入力値として最も有効であるのかを調べるために損傷に対するそれぞれの感度を調べた。図-19 は、固有振動数(1 次、2 次)、減衰定数(1 次、2 次)、モードシェープ(1 次)、起振振動

数でのフーリエ振幅それぞれについて損傷モデル A を 1 とし、その他の損傷モデルは損傷モデル A で除した値を示している。ここで、モードシェープは節点 1 と節点 12 について示し、起振振動数でのフーリエ振幅は節点 9 で鉛直方向に起振したときの節点 1、節点 14 で鉛直方向に起振したときの節点 12 でのそれぞれ鉛直方向の応答値を示している。

図-19 から、固有振動数に着目すると、1 次、2 次ともに損傷によって減少しているが、その変化率は微々たるものである。減衰定数に着目すると、1 次モードと 2 次モードで変化の様子が異なることがわかる。また、モードシェープに着目すると、節点 2 は損傷に伴い増加しているが、損傷の程度に関わらず一定に増加していることが分かる。節点 12 は損傷要素に近いにもかかわらず、モードシェープはほぼ一定で、損傷に関する感度が低いことが分かる。

これらに対して、起振振動数でのフーリエ振幅に着目すると、節点 9 で鉛直方向に起振したときの節点 1、節点 14 で鉛直方向に起振したときの節点 12 での鉛直方向の応答値は両者とも減少し、それぞれ付近の要素の損傷が大きくなる損傷モデル A と損傷モデル B の間、損傷モデル B と損傷モデル C の間でその減少量も大きく現れている。以上のことを踏まえると、損傷した部材の近くで計測した起振応答

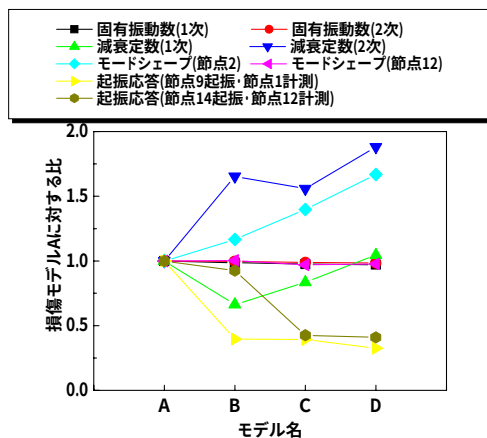


図-19 損傷による固有振動数・減衰定数・モードシェープ・起振応答の変化率の比較

は損傷に対する感度が高く、損傷の有無の判断のみならず損傷箇所を特定するに際しても有効であると考えられる。

6. 結論

本文では、損傷前後の実橋梁を対象として実施した微動計測とマイクロ起振器を用いた起振実験の実験結果を示すとともに、部材の損傷に伴う振動性状の変化についての検討を行った。

微動計測から得られたデータから固有振動数、減衰定数、モードシェープを求め、健全状態と損傷状態での差異を明らかにした。その結果、固有振動数は、損傷を負うごとに減少することが確認された。減衰定数は損傷を負うごとに増減し、ばらつきも大きいことが分かった。1 次のモードシェープは損傷要素の付近の節点で増加しているものもあるが、損傷程度に関わらず一定に増加しており、損傷に対する感度が良いとは言えないことが分かった。

また、マイクロ起振器を用いた起振実験結果から、起振振動数におけるフーリエ振幅(起振応答)を算定し、損傷に対する感度を調べた。損傷部材に近い節点で計測された起振応答ほど損傷に対する感度が高く、鉛直方向起振時の鉛直方向の応答においてそれが顕著であることが分かった。損傷に対する固有振動数、減衰定数、モードシェープの感度と比較すると、起振応答は損傷に対する感度が最も高いことが知られ、構造物の損傷検出のための入力データとして用いることの有効性が示された。

完全な解析モデルを作成するための十分なデータが与えられていないこと、取り壊しの決定した老朽橋梁であり、設計時と構造特性が大きく変わっていると予想されることから、今後損傷モデル A の応答値に一致するような解析モデルを完成させた後、その他の損傷モデルとの比較を行い、逆解析手法によって損傷部材と損傷レベルを推定できるかどうかを

検証する予定である。

謝辞: 熊本県の真辺保仁氏、宮原健氏、田村伸司氏、沼地英二氏、美作憲昭氏、および九州大学山崎智彦技官には実験の実施に関しまして種々のご協力を頂きました。京都大学工学研究科の清野純史助教授には、マイクロ起振器を提供していただくとともに貴重な御助言を頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建築学会近畿支部鉄骨構造部会編：1995 年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書，建築学会近畿支部鉄骨構造部会，1995.
- 2) Ohtsu M., Shigeishi M., Sakata Y. Nondestructive evaluation of defects in concrete by quantitative acoustic emission and ultrasonics. *Ultrasonics*, 36:187-195. 1998.
- 3) Hearn G, Testa GR. Modal analysis for damage detection in structures. *Journal for Structural Engineering*, ASCE117 : 3042-3063. 1991.
- 4) 貝戸清之，阿部雅人，藤野陽三，不確定性を考慮した非比例減衰系の同定と構造物の性能評価への適用，構造工学論文集，Vol.45A : 701-712, 1999.
- 5) Hassiotis S, Jeong GD. Identification of stiffness reduction using natural frequencies. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 121 : 1106-1113. 1995.
- 6) Kaouk M, Zimmerman DC. Structural damage assessment using generalized minimum rank perturbation theory. *AIAA Journal* 32 : 836-842. 1994.
- 7) Wang Z, Lin RM, Lim MK. Strutual damage detection using measured FRF data. *Computer methods in applied mechanics and engineering* 147 : 187-197. 1997.
- 8) 古川愛子，清野純史，小型起振器の利用を想定した構造物の高精度損傷評価システムについて，JCOSAR2003 : 617-624, 2003.

(2005. 3. 15 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON CHANGES IN VIBRATIONAL CHARACTERISTICS DUE TO STRUCTURAL DAMAGE

Aiko FURUKAWA, Hisanori OTSUKA and Fukutaro UMEBAYASHI

This study described the investigation results on change in vibration characteristics of structures due to damage based on ambient vibration and forced vibration testing using a micro shaking device. We firstly estimated changes in natural frequencies, damping ratios and mode shapes between intact and damaged structures from ambient vibration measurements. Secondly, we obtained changes in harmonic excitation responses and investigated their sensitivities to damage. Compared to natural frequencies, damping ratios and mode shapes, harmonic excitation responses have larger sensitivities to damage and have the higher possibility to be used as input data for damage detection.