

微動・自由振動・起振実験に基づく振動特性のばらつきと検出可能な損傷レベル

Variation of dynamic characteristics and detectable damage level based on ambient vibration, free vibration and vibration test using a small exciter

古川愛子*, 大塚久哲**, 清野純史***, 梅林福太郎****

Aiko Furukawa, Hisanori Otsuka, Junji Kiyono and Fukutaro Umebayashi

*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)

** 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)

***工博 京都大学助教授, 工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

****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)

This paper investigates the variation in dynamic characteristics of a steel truss bridge based on vibration measurements, and detectable damage level using these data. Ambient vibration and free vibration measurements were conducted, together with the forced vibration testing using a small shaker. Firstly, modal data, such as natural frequencies and damping ratios, were obtained from both ambient and free vibration measurements based on the several evaluation methods. Variations in evaluated modal data, due to differences in evaluation methods, experimental methods, and environmental factors, were examined. The detectable damage level based on modal data was then investigated. Secondly, variations in harmonic excitation responses using a small shaker were obtained, and the detectable damage level by use of harmonic excitation responses was investigated. From comparison, it was found that smaller damage can be detected using harmonic excitation than using modal data.

Key Words: variation of dynamic characteristics, ambient vibration, free vibration, small shaker, damage detection

キーワード: 振動特性のばらつき, 微動, 自由振動, 小型起振器, 損傷検出

1. はじめに

固有振動数や減衰定数などの固有振動特性は、構造物の健全度評価や補強効果、さらに振動制御のための構造同定のインプットデータとして用いられることが多い^{1,2)}。固有振動数と減衰定数を推定する手法は過去に多く提案されているが、各手法により推定される結果の差異について検討し、評価手法の特徴を認識した上で推定値を処理することは重要である。また、実験方法としては微動測定、自由振動実験等が行われるが、これら実験方法の違いによる推定値の変動について考慮することも重要である。さらに、特に野外での振動実験においては様々な環境要因が存在するため、計測データには必ず計測ノイズが含まれ、推定方法や実験方法が同じであっても計測の度に推定値は変動するものと予想される。

構造物の損傷前後における固有振動数および減衰定数の変化量から、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^{3,4)}。これら手法の有用性の検証は、数値シミュレーションや室内での模型実験など、環境要因等

を無視した非常に理想的な状況下で行ったものがほとんどである。野外実験を行ったものもあるが、目視等の他の簡易な手法でも同定できるような非常に大きな損傷を仮定したものであり、どの程度の小さい損傷まで検出できるか等の考察を行った研究は見られない。振動特性の変化量から損傷を検出する手法では、推定量のばらつきに埋もれてしまうような小さい損傷は検出することができないことは自明である。

そこで本研究では、熊本県阿蘇郡阿蘇町に架かる車帰橋(鋼製トラス橋)を対象として微動計測と自由振動実験を複数回行い、計測データに対して様々な推定手法を適用して固有振動数と減衰定数を推定し、推定方法・実験方法に対する推定値のばらつきについて検討を行った。得られた推定値の分布より95%信頼区間を算出し、振動実験結果より明らかに損傷したと判断できる固有振動数および減衰定数の範囲について検証した。また、構造物の損傷を各部材の剛性の低下であるとモデル化し、固有振動数の変化から検出することのできる最小の損傷はどの程度であるのかについて検討を行った。

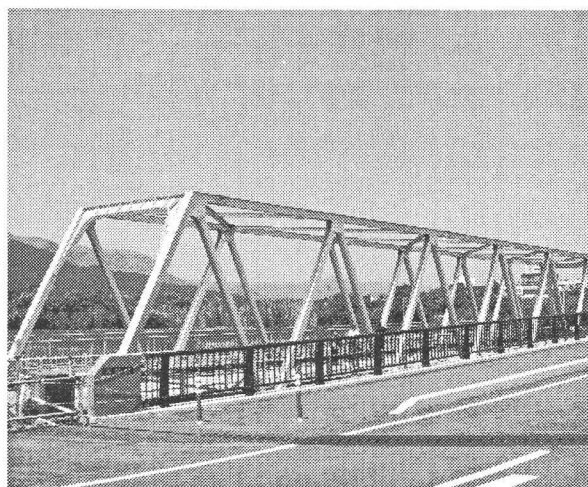


写真-1 車帰橋

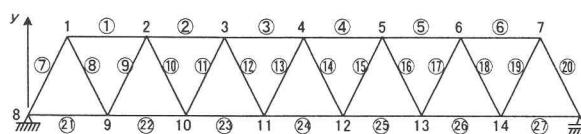


図-1 車帰橋の側面図

近年、固有振動数や減衰定数等の固有振動特性の変化を用いた検出手法に代わって、共振振動数以外での周波数応答関数の変化から損傷を検出する手法が提案されてきている^{5),6),7),8)}。損傷の有無にあまり敏感でない固有振動特性と違って、周波数応答関数は、損傷に対する感度の高い振動数を選択することができること、起振点・計測点を様々に変えることにより局所的な損傷を検出できる等の点で優れている。

筆者らは、携帯可能な小型の起振器による調和外力を利用し、起振振動数での周波数応答関数の変化から損傷を検出する手法を提案している⁹⁾。提案手法は、起振点・起振力・起振振動数等の入力を既知とした上で出力データを扱うことができるというメリットがあり、また起振点・計測点・起振振動数の組み合わせを変えることにより豊富なデータを扱うことが可能となる。小型起振器は多くの電力を必要とせず、また起振器と計測器は最低1個ずつあれば実験が可能であり、非常に簡便かつ経済的な手法である。しかし当然のことながら、計測ノイズの混入による推定量のばらつきに埋もれてしまうような小さい損傷については検出することができない。

そこで本研究では、前述の鋼製トラス橋に対して小型起振器を用いた起振実験も複数回実施し、起振振動数における起振応答のばらつきについても検討を行った。得られた推定値の分布より95%信頼区間を算出し、小型の起振器を用いた起振実験結果より損傷したと判断できる起振応答の範囲について検証した。また、検出することのできる最小の損傷はどの程度であるのかについても検討を行った。

最後に、推定値のばらつきを考慮した上で、固有振動数の変化から検出可能な損傷レベルと、小型起振器による起振応答から検出可能な損傷レベルについて比較を行い、小型起振器を用いることの有用性について検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 対象橋梁の概要

対象とした橋梁は、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であり（昭和38年架設）、橋長47.0m、幅員4.8mの単径間鋼製トラス橋である。図-1 に側面図と、節点番号および要素番号を併せて記す。

2.2 実験項目

上述の車帰橋に対して以下の3通りの振動計測を行った。

- (1)微動計測
- (2)自由振動実験
- (3)小型起振器による起振実験

このうち、(1)と(2)の振動実験は以下の項目を明らかにするために行った。

- (a)推定手法の違いによる固有振動特性のばらつき
- (b)実験方法の違いによる固有振動特性のばらつき
- (c)固有振動特性の信頼性区間
- (d)検出が可能となる損傷レベル

また、(3)の起振実験については、以下の項目を明らかにするために行った。

- (a)起振応答のばらつき
- (b)起振応答の信頼性区間
- (c)検出が可能となる損傷レベル

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。

3. 固有振動特性の推定手法

3.1 微動計測を用いる場合

運動方程式は次式のように表される。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

ここに、 M 、 C 、 K はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクスであり、 $x(t)$ 、 $f(t)$ はそれぞれ変位・外力ベクトルである。

微動計測の場合、外力のホワイト性を仮定すると、応答のフーリエスペクトルの形状は伝達関数と同じ形状を持つことがわかるので、フーリエスペクトルがピークを取る振動数を読み取ることにより固有振動数が得られ、ハーフパワー法やカーブフィッティング法を適用することにより、減衰定数が推定できる。

表-1 推定手法

固有振動数		減衰定数	
A	パワースペクトルがピークを取る振動数を読み取る	E	ハーフパワー法
		F	カーブフィッティング法
B	フーリエスペクトルがピークを取る振動数を読み取る	G	ハーフパワー法
		H	カーブフィッティング法
C	パワースペクトルにバンドパスフィルタをかけてフーリエ逆変換した波形にゼロクロッシング法を適用	I	対数減衰率
D	フーリエスペクトルにバンドパスフィルタをかけてフーリエ逆変換した波形にゼロクロッシング法を適用	J	対数減衰率

また、式(1)の両辺とある点での応答 $x_i(t)$ との相関関数を求めると次式のようになる。

$$MR_{xq}(\tau) + CR_{xq}(\tau) + KR_{xq}(\tau) = R_{fqi}(\tau) \quad (2)$$

ここで、 $R(\tau)$ は相関関数を、 τ は時間のずれを表す。これは次式のように書き換えられる。

$$M\ddot{R}_{xq}(\tau) + C\dot{R}_{xq}(\tau) + KR_{xq}(\tau) = R_{fqi}(\tau) \quad (3)$$

現在の外力と過去の応答の間には相関がないという仮定をすると、上式の右辺は 0 となる。

$$M\ddot{R}_{xq}(\tau) + C\dot{R}_{xq}(\tau) + KR_{xq}(\tau) = 0 \quad (4)$$

これにより、応答の自己相関関数のフーリエ変換であるパワースペクトルの形状は、伝達関数と同じ形状を持つことがわかる。よって、パワースペクトルがピークをとる振動数を読み取るにより固有振動数が得られ、ハーフパワー法やカーブフィッティング法を適用することにより、減衰定数が推定できることになる。

また、式(4)より応答の自己相関関数は自由振動の運動方程式を満たすため、パワースペクトルにバンドパスフィルタをかけて逆フーリエ変換することにより、特定の振動モードの減衰自由振動の波形と同じ形の波形が得られることになる。これにゼロクロッシング法を適用することにより固有振動数が算出でき、対数減衰率により減衰定数を推定することができる。

3.2 自由振動を用いる場合

減衰自由振動の運動方程式は次式の通りである。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = 0 \quad (5)$$

よって、応答のフーリエ変換を求めバンドパスフィルタをかけて逆フーリエ変換することにより、特定の振動モードの減衰自由振動の波形が得られるので、ゼロクロッシング法により固有振動数が算出でき、対数減衰率により減衰

定数が推定できることになる。

自由振動の運動方程式は式(5)のように右辺の外力の項が 0 であるが、実際は微動計測と同様に様々な外力を受けている。そこで、3.1 で述べた微動計測を用いる場合に適用した評価手法をも用いて、固有振動数および減衰定数を評価することとした。

3.3 推定手法

3.1 および 3.2 において、微動計測・自由振動から固有振動数・減衰定数を評価する手法について述べたが、これらをまとめたものを表-1 に示す。表-1 において、減衰定数の推定手法 E, F は、固有振動数の推定手法 A で用いたパワースペクトルに対してハーフパワー法およびカーブフィッティング法を適用することを意味する。同様に、手法 G, H は、手法 B で用いたフーリエスペクトルに対してハーフパワー法およびカーブフィッティング法を適用することを意味する。手法 I, J はそれぞれ、手法 C, D で用いた波形の対数減衰率から減衰定数を決定することを意味する。

カーブフィッティング法を用いる際は、スペクトルに 1 自由度系の伝達関数を最小二乗法によりフィッティングさせることにより推定した。

対数減衰率を用いる際は、バンドパスフィルタによって抽出された各モードの自由振動の波形に対して、1 自由度系の減衰自由振動の関数を最小二乗法によりフィッティングさせることにより推定した。

近年、上記のような古典的なモード同定法に代わり、現代制御理論に基づいた部分空間法などの同定手法^{9), 10)}も利用されるようになってきたが、実用面では古典的手法の方が主流であると考えられることから、既往の研究^{11), 12)}を参考に表-1 に示した代表的な推定手法を採用した。

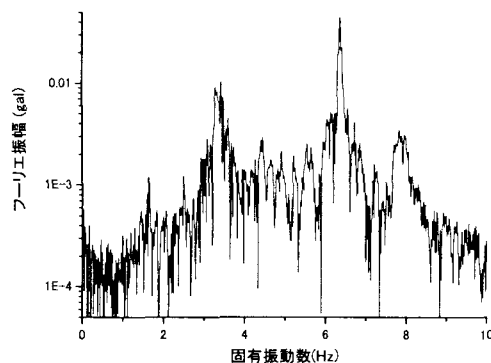
4 固有振動特性の推定値のばらつきに関する検討

4.1 実験概要

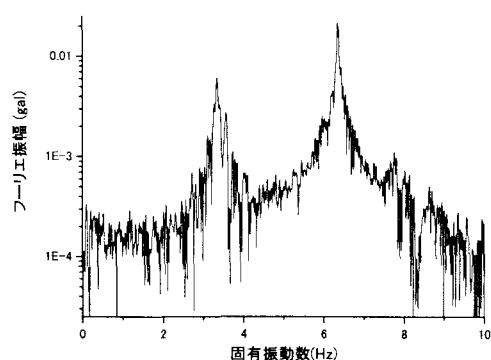
微動・自由振動をそれぞれ 10 計測行った。計測時間は微動計測が 60 秒、自由振動は 30 秒である。

微動の 10 計測は、節点 9 において 2 計測、節点 11 において 4 計測、節点 13 において 4 計測行った。これら節点において同時観測を行い、計測点の違いによる固有振動数と減衰定数の推定値の違いはほとんどなく、毎回の計測におけるノイズによる影響の方が遥かに大きいことを別途確認している。1 次、2 次モードは鉛直方向、3 次モードは橋軸方向に卓越する振動モードである。

自由振動実験は、小型起振器を用いて起振力約 252N で起振振動数約 8Hz で掃引させて定常振動させた上で起振器を停止することによって行った。10



(a)微動応答のフーリエ振幅



(b)自由振動応答のフーリエ振幅

図-2 フーリエ振幅

計測のうち、2 計測は起振点が節点 10 で計測点が節点 9, 2 計測は起振点が節点 9 で計測点が節点 11, 2 計測は起振点が節点 12 で計測点が節点 11, 2 計測は起振点が節点 12 で計測点が節点 10, 残りの 2 計測は起振点が 14 で計測点が 10 である。自由振動においても、計測点の違いによる推定値の違いはほとんどないことを別途確認している。小型の起振器による励起であり振幅レベルも微動と同等かわずかに大きい程度であった。計測データの例として、微動と自由振動のフーリエ振幅を図-2 に示す。これらはともに節点 11 における鉛直方向の応答であり、自由振動の場合は節点 12 において鉛直方向に振動を与えた後、起振器を停止させ、自由振動させたものである。

4.2 推定手法の違いによる固有振動特性のばらつき

図-3 に推定方法の違いによる固有振動数のばらつきを示す。10 個のデータを複数の手法で推定しており、同じデータの結果を線で結んでいる。

固有振動数は、どの推定手法でもほぼ同じ値が推

定されている。周波数領域の推定結果(A,B)と時刻領域の推定結果(C,D)が若干異なるが、10 計測毎のばらつきに比べれば無視できるレベルである。

図-4 に推定方法の違いによる減衰定数のばらつきを示す。固有振動数に比べ、減衰定数の推定値のばらつきは大きい。周波数領域の手法を比較すれば、ハーフパワー法 (E,G) に比べてカーブフィッティング法 (F,H) は大きく値を推定する傾向がある。また、パワースペクトルを用いる手法 E, F よりもフーリエスペクトルを用いる手法 G,H の方が大きく値を評価する傾向が見られる。

各推定手法による 10 計測のばらつきを比較すると、パワースペクトルにハーフパワー法を適用したケース E のばらつきが圧倒的に小さいこと、また対数減衰率による推定手法のばらつきが大きいことがわかる。

4.3 実験方法の違いによる固有振動特性のばらつき

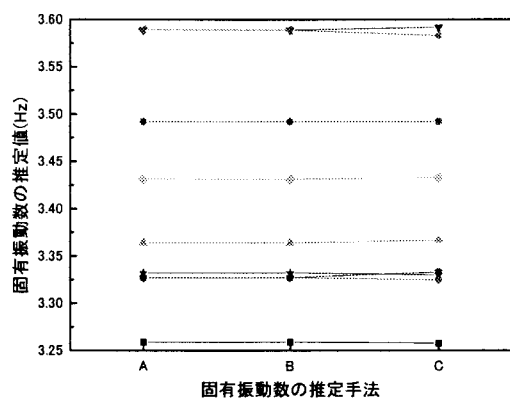
図-3 および図-4 を、実験方法の違いに関して比較する。

推定手法 A により推定した固有振動数の平均値、標準偏差、変動係数を表-2(a)(b)に示す。変動係数とは、平均値に対する標準偏差の比であり、データのばらつき具合を表す指標である。微動による固有振動数の推定値のばらつきは自由振動に比べて大きい。特に微動による 1 次の固有振動数の変動係数は 3.417 と大きい値を示している。自由振動による 1 次の推定値のばらつきは 0.414 と小さい。微動データでは 1 次のピークが明瞭に現れていないのに対し、自由振動では 1 次のピークが明瞭に表れていることがばらつきの差の原因だと思われる。

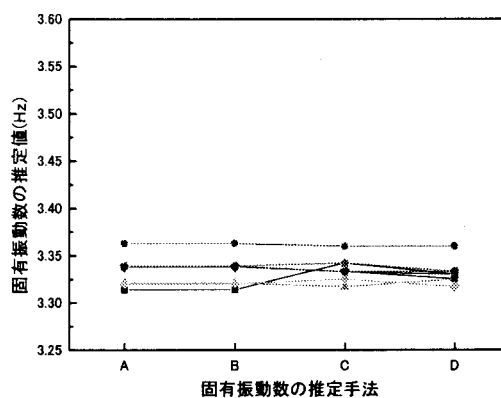
また、微動より減衰自由振動による固有振動数の推定値の方が小さい値を示している。減衰自由振動は微動とほぼ同程度の非常に微小な振幅で振動しているので、微動および減衰自由振動それぞれに基づく固有振動特性の推定値の違いは、応答の振幅の違いによるものではないと考えられる。微動では地盤または風による入力を受けて全体的に振動するのに対し、本研究で行った自由振動実験ではトラスの片面の 1 点だけの振動を励起していることも原因のひとつと考えられる。

推定手法 E により推定した減衰定数の平均値、標準偏差、変動係数を表-2(c)(d)に示す。最もばらつきの小さい推定手法 E であっても固有振動数に比べて減衰の変動係数は大きい。1 次の変動係数は自由振動の方が大きい、2 次、3 次は自由振動の方が小さい。

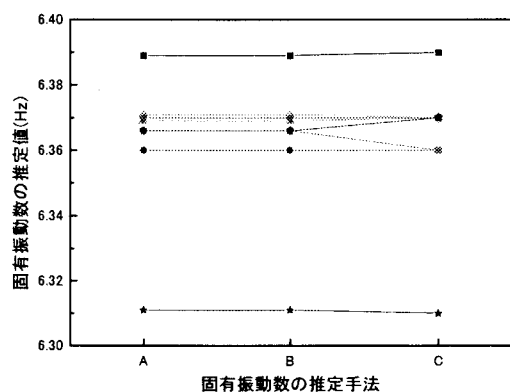
また、微動よりも減衰自由振動から推定される減衰定数の方が大きい値を示す傾向にある。計測点での振幅との相関は見られなかったが、起振器によりトラスの片面の一点だけを起振したことも原因のひとつと考えられる。



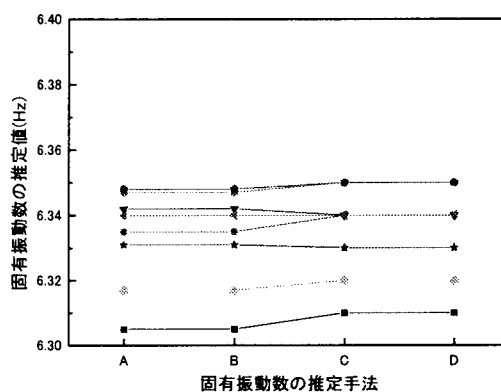
(a)1 次モード (微動)



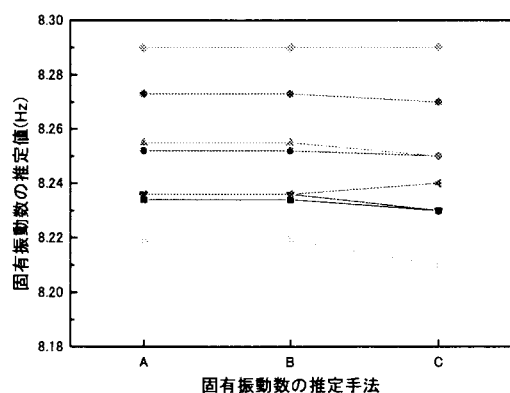
(b)1 次モード (自由振動)



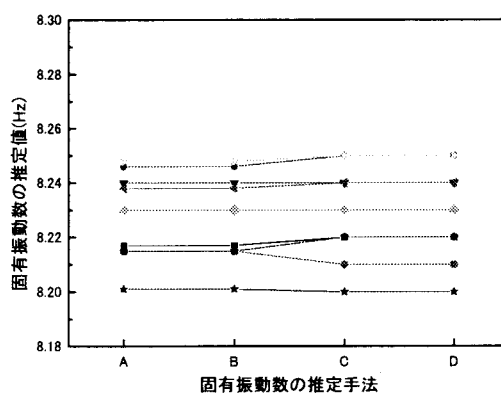
(c)2 次モード (微動)



(d)2 次モード (自由振動)



(e)3 次モード (微動)



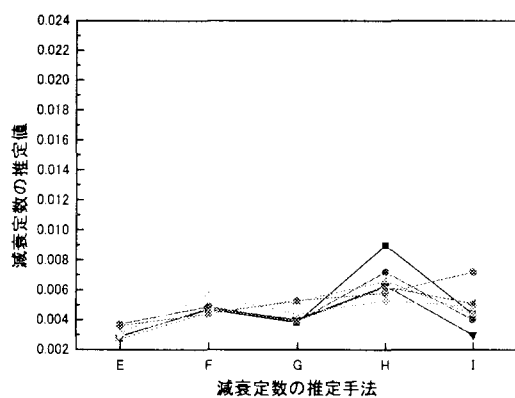
(f)3 次モード (自由振動)

図3 固有振動数の推定値

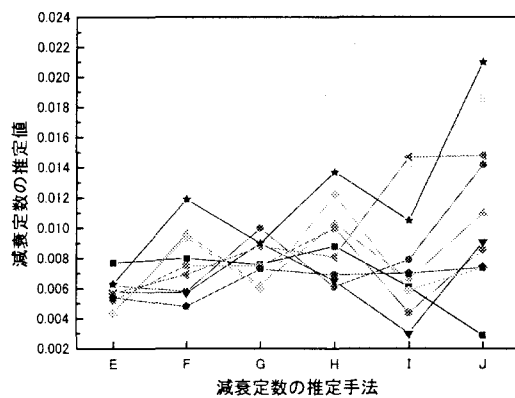
4.4 固有振動特性の信頼区間

推定手法 A および E により推定した固有振動特性の分布が正規分布に従うと仮定した場合の 95% 信頼区間を表-2(a)~(d)に示す. 正規性を仮定し信

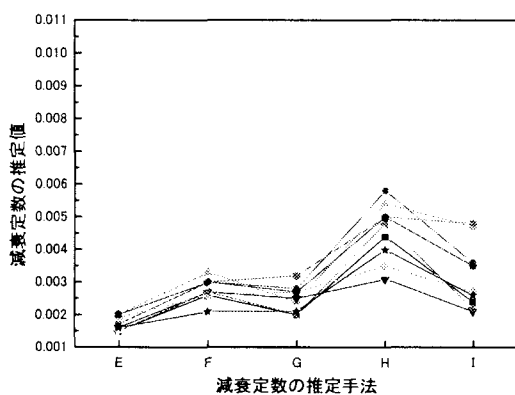
頼区間を議論するには聊かサンプル数が少なく, モンテカルロシミュレーションにより擬似サンプルを生成して信頼区間を評価するといった対応も考えられるが, 本研究ではこれらサンプルから得られた値そのものを絶対的なものとして扱うことを目



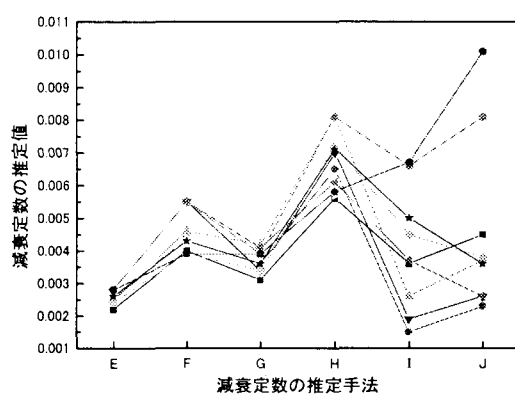
(a)1 次モード (微動)



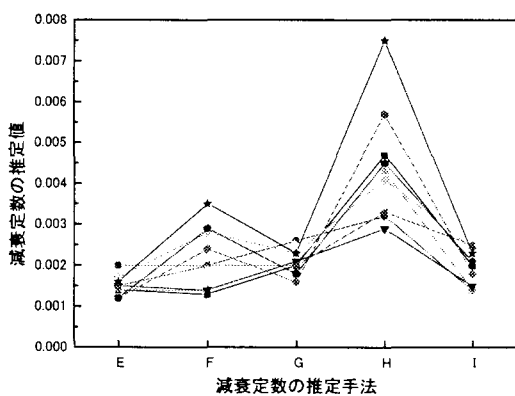
(b)1 次モード (自由振動)



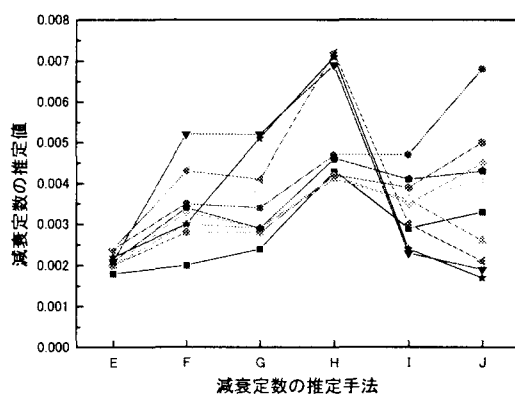
(c)2 次モード (微動)



(d)2 次モード (自由振動)



(e)3 次モード (微動)



(f)3 次モード (自由振動)

図4 減衰定数の推定値

的としているのではなく、あくまで損傷同定に用いる指標として固有振動特性と次章で検討する起振応答との比較を目的としているので、上記手法を採

用した。

橋梁の損傷の有無を調べたい時は、振動計測を行って推定された固有振動特性が、健全時に計測して

表-2 固有振動特性の推定値

(a)固有振動数 (微動)

	平均	標準偏差	変動係数	信頼区間	信頼区間/平均値
1次	3.404	0.116	3.417	3.176 ~ 3.632	0.933 ~ 1.067
2次	6.358	0.026	0.409	6.307 ~ 6.409	0.992 ~ 1.008
3次	8.246	0.022	0.268	8.203 ~ 8.290	0.995 ~ 1.005

(b)固有振動数 (自由振動)

	平均	標準偏差	変動係数	信頼区間	信頼区間/平均値
1次	3.335	0.014	0.414	3.308 ~ 3.362	0.992 ~ 1.008
2次	6.331	0.014	0.225	6.303 ~ 6.359	0.996 ~ 1.004
3次	8.228	0.016	0.188	8.198 ~ 8.258	0.996 ~ 1.004

(c)減衰定数 (微動)

	平均	標準偏差	変動係数	信頼区間	信頼区間/平均値
1次	0.00314	0.00037	11.840	0.00241 ~ 0.00387	0.768 ~ 1.232
2次	0.00173	0.00022	12.795	0.00130 ~ 0.00216	0.749 ~ 1.251
3次	0.00152	0.00024	16.055	0.00104 ~ 0.00200	0.685 ~ 1.315

(d)減衰定数 (自由振動)

	平均	標準偏差	変動係数	信頼区間	信頼区間/平均値
1次	0.00572	0.00097	16.986	0.00382 ~ 0.0076243	0.667 ~ 1.333
2次	0.00260	0.00021	7.903	0.00220 ~ 0.0030027	0.845 ~ 1.155
3次	0.00215	0.00022	10.342	0.00171 ~ 0.0025858	0.797 ~ 1.203

表-3 起振実験の計測条件

	起振点	計測点	起振振動数	起振力
ケース1	節点11 (鉛直)	節点12 (橋軸)	7.47Hz	222N
ケース2	節点11 (鉛直)	節点12 (鉛直)	7.47Hz	222N
ケース3	節点11 (橋軸)	節点12 (橋軸)	7.35Hz	213N
ケース4	節点11 (橋軸)	節点12 (鉛直)	7.35Hz	213N

得られた信頼区間に入らない場合は、振動特性が変化した、すなわち損傷したと判断することとする。

5. 小型起振器による起振応答の推定値のばらつきに関する検討

5.1 起振実験概要

起振応答の推定値のばらつきを検討するため、表-3 に示す4 ケースの起振実験を行った。節点 11 に

において鉛直方向に一定の振動数 7.47Hz で起振したときの節点 12 における橋軸方向の応答を計測したものがケース 1、鉛直方向の応答を計測したものがケース 2 である。節点 11 において橋軸方向に一定の振動数 7.35Hz で起振したときの節点 12 における橋軸方向の応答を計測したものがケース 3、鉛直方向の応答を計測したものがケース 4 である。各ケースとも 10 計測行った。

5.2 起振応答のばらつき

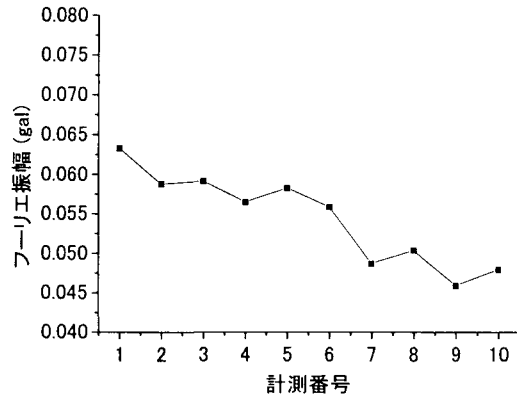
本研究では、起振器を用いて一定の振動数で構造物を加振したときに得られる構造物の加速度応答の、起振振動数におけるフーリエ振幅を、起振応答と呼ぶこととする。

加速度応答をフーリエ変換したところ、ケース 1 ~ 3 については起振振動数においてピークが見られたが、ケース 4 についてはピークが検出できなかった。数値解析では、橋軸方向起振時に鉛直方向にも起振応答が現れるが、今回の計測結果では検出されなかった。図-5 にケース 1~3 の 10 計測における起振応答を表す。横軸に計測の番号、縦軸に起振振動数における加速度応答のフーリエ振幅を表す。また表-4 に、平均値、標準偏差、変動係数、および 95%信頼区間を示す。

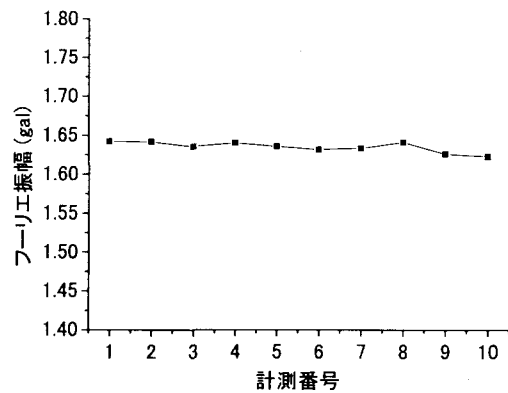
振動しやすい鉛直方向に起振し、鉛直方向の応答

表-4 起振応答の推定値

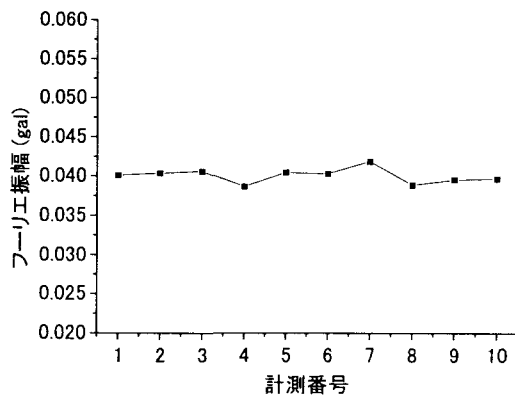
	平均	標準偏差	変動係数	信頼区間	信頼区間/平均値
ケース1	0.0545	0.0058	10.6916	0.0431 ~ 0.0659	0.7904 ~ 1.2096
ケース2	1.6349	0.0068	0.4157	1.6215 ~ 1.6482	0.9919 ~ 1.0081
ケース3	0.0400	0.0009	2.2952	0.0382 ~ 0.0418	0.9550 ~ 1.0450



(a) ケース 1 の応答



(b) ケース 2 の応答



(c) ケース 3 の応答

図-5 起振実験結果

を計測したケース 2 の変動係数が最も小さい。一方、振動しにくい橋軸方向の起振応答の変動係数は鉛直方向よりも大きい。ケース 1 と 3 の比較では、鉛直方向起振・橋軸方向計測のケース 1 の方が振幅は大きい、橋軸方向起振・橋軸方向計測のケース 3 の方が変動係数は小さい。ケース 4 で起振振動数におけるピークが見られなかったように、起振方向と直交する成分は励起されないか、励起されたとしてもばらつきが大きいことがわかる。

5.3 起振応答の信頼区間

4.4 と同様に、起振応答の分布が正規分布に従うと仮定した場合の 95% 信頼区間を表-4 に示す。

橋梁の損傷の有無を調べたい時は、起振実験を行って推定された起振応答が、健全時に計測して得られた信頼区間に入らない場合は、振動特性が変化した、すなわち損傷したと判断することとする。

6 同定可能な損傷レベルに関する検討

前節で明らかにされた固有振動数と起振応答のばらつきの存在下で、推定することのできる損傷はどの程度の大きさであるかを明らかにするために、車帰橋の解析モデルを構築し、数値解析を行った。

6.1 損傷レベル

本研究では、構造物の損傷を剛性の低下とみなす。損傷によって減衰の増加も期待されるが、推定値に非常に大きなばらつきがあることが明らかになったので、ここではばらつきの小さかった固有振動数と直接関係のある剛性の低下率を損傷の指標として用いることとする。

e 番目の要素の損傷は、以下のように要素剛性マトリクス K^e が一律に α_e (無次元) の割合で減少する仮定する。

$$\delta K^e = \alpha_e K^e \quad (6)$$

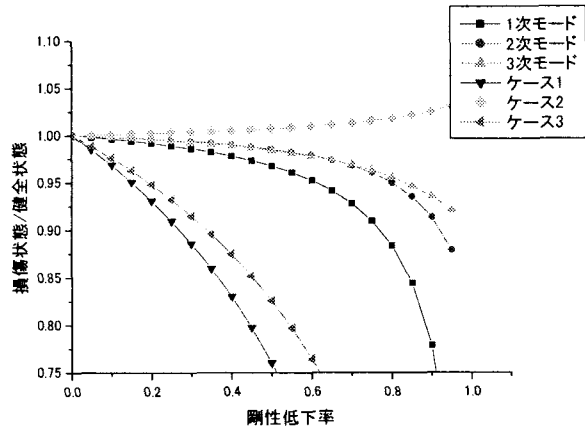
δK^e は e 番要素の剛性マトリクスの減少分を表す。

構造物全体系の質量・剛性マトリクス M, K は、各要素の剛性・減衰マトリクスの集合体として次式のようにモデル化できる。

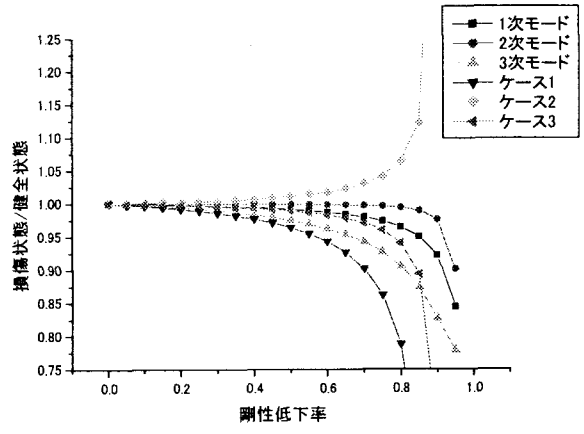
$$M = \sum_{e=1}^n M^e \quad (7)$$

$$K = \sum_{e=1}^n K^e \quad (8)$$

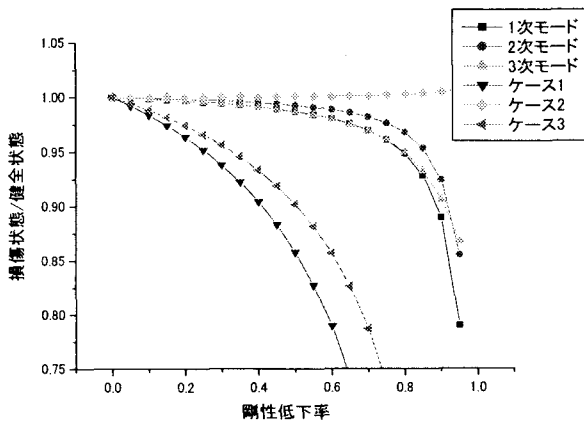
ここで、 n は梁要素の総数である。同様に、 e 番目の要素が一律に α_e の割合で損傷したことによる損傷後の全体剛



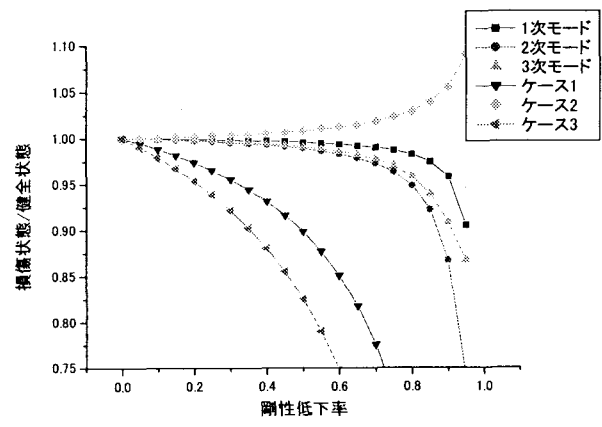
(a)要素3



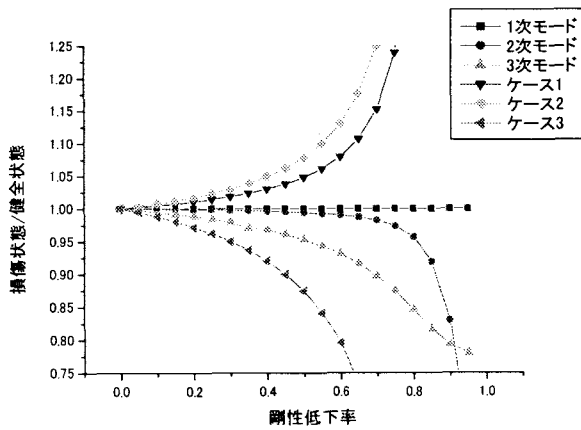
(b)要素7



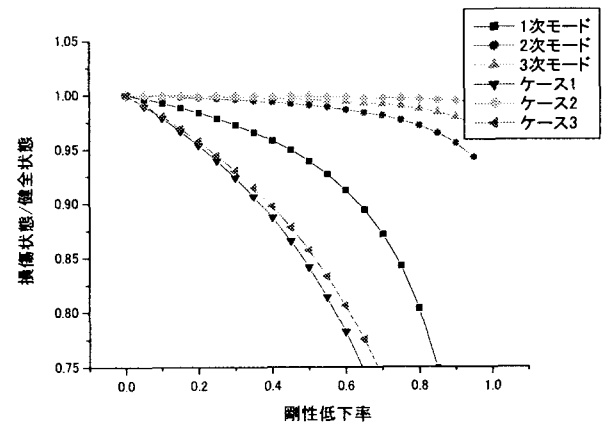
(c)要素9



(d)要素11



(e)要素13



(f)要素24

図-6 各要素の剛性低下率に対する応答値の変化率

性マトリクス $\tilde{K}(\delta_e)$ は次式のようになる。

$$\tilde{K}(\delta_e) = \sum_{e=1}^n (1 - \delta_e) K^e \quad (9)$$

このように、各要素の剛性低下率 δ_e を損傷の指標として用いることとする。

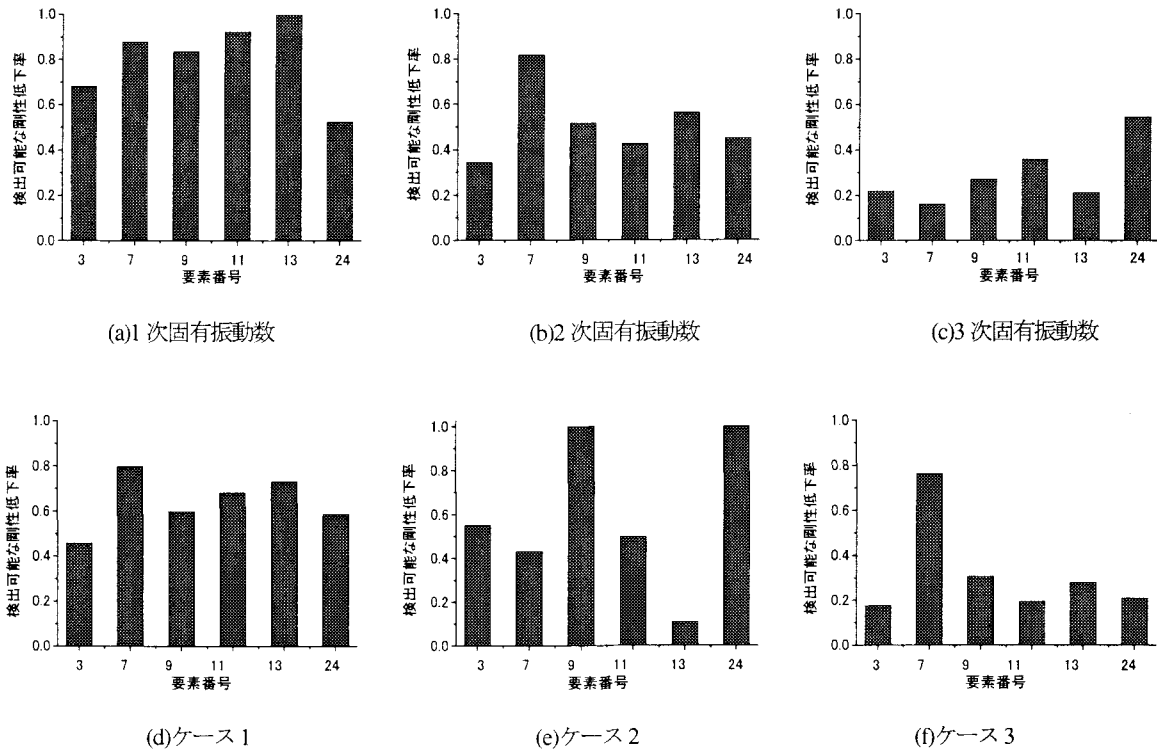


図-7 各振動特性で検出可能な剛性低下率

6.2 解析モデル

設計図をもとに、車帰橋のベースラインモデルを作成した。推定結果から減衰定数は非常に小さい値であることがわかったので、非減衰系と仮定してモデル化を行った。主部材から質量・剛性を作成し、2次部材については剛性を考慮せず、質量を近接の節点に付加した。次に、推定された3次モードまでの固有振動数（微動計測結果に推定手法 A で評価した値の平均値）と起振応答（ケース 1～3 の 3 データの平均値）に一致するようにベースラインモデルをアップデートしたものを解析モデルとした。

6.3 剛性低下率と固有振動数・起振応答の変化率の関係

構造物が損傷を受けると固有振動数は小さくなり、起振応答も変化するものと想定される。よって、固有振動数や起振応答の変化を計測して損傷の有無を判断しようとしたとき、同じ実験手法および同じ推定手法による推定値が 95%信頼区間の中に入らなかった場合は、構造特性が変化した、すなわち損傷を受けたと判断することができる。

1 要素だけが損傷を受けると仮定し、各部材が 5% から 95% まで剛性低下したときの固有振動数の変化率を算出した。

要素 3 の計算結果を図-6(a)に示す。要素 3 は中央近くに位置しているため、2 次、3 次モードよりも 1 次モードの方が剛性低下に対する変化量が多い。起振応答については、水平部材であるため、損傷に対する節点 11 の水平方

向応答の感度が鉛直方向よりも大きいことがわかる。また、起振点と計測点に近い要素であるので、剛性低下に対する起振応答の感度が大きい。

要素 7 の計算結果を図-6(b)に示す。要素 7 は最も左側にある斜材であるので、中央付近にある要素 3 に比べて固有振動数の低下率に対する影響が小さい。起振点・計測点からも遠いので、起振応答に対する影響も小さい。

要素 9 の計算結果を図-6(c)に、要素 11 の結果を図-6(d)に示す。固有振動数の感度は 1～3 次モードともに低いが、起振点・計測点に近づいたため、水平方向の起振応答は剛性低下に対する感度が大きくなっている。

要素 13 の結果を図-6(e)に示す。計測点に接しているため、起振応答の剛性低下に対する感度が非常に大きい。また、固有振動数に関しては、3 次モードが最も影響を受けている。1 次モードについてはほとんど変化がない。

要素 24 の結果を図-6(f)に示す。起振点と計測点に挟まれた要素であるため、水平方向の起振応答は剛性低下と共に大きく変化している。鉛直方向の応答がほとんど変化しないのは、トラスが軸力部材であるため、解析上は節点 12 で揺らしたときの鉛直方向の振動が要素 24 には伝わらないためである。

6.4 同定が可能となる損傷レベル

次に、固有振動数は微動から推定すると仮定し、固有振動数の変化から検出できる損傷の大きさ、および起振実験から検出できる損傷の大きさについて検討を行った。微動による固有振動数と、起振応答の信頼性区間の外に出るよ

うな最小の剛性低下率を図-7に示す。これらはいずれも1部材だけが損傷していると仮定したものである。

1次モードの固有振動数で検出できる剛性低下率を図-7(a)に示す。検出できる最小の損傷は、1次に最も影響を与える中央の水平材である要素24であっても53%程度である。小さな損傷に対する1次の振動数の感度が小さいことと、推定値のばらつきの大きさのためである。

2次モードの結果を図-7(b)に示す。1次モードより小さい損傷を検出できるが、それでも要素3で34%程度である。

3次モードの結果を図-7(c)に示す。高次になるにつれて剛性低下率に対する感度が大きくなっており、要素7で16%の損傷を検出できることになる。

ケース1の結果を図-7(d)に示す。剛性低下に対するケース1の感度は小さくはないが、推定値のばらつきが大きい。ため、検出できる損傷は要素3で46%となっている。

ケース2の結果を図-7(e)に示す。計測・起振点に違い要素13は5%の損傷を検出できる。起振点と計測点の間にある要素24の損傷を検出できないのは、軸力部材であるため、鉛直方向の振動を伝えないためである。

最後に、ケース3の結果を図-7(f)に示す。起振点・計測点に近い要素3は18%の損傷を検出できることになる。

7 結論

本研究では、熊本県阿蘇郡阿蘇町に架かる車帰橋を対象として微動計測と自由振動実験を複数回行い、計測データに対して様々な推定手法を適用して固有振動数と減衰定数を推定し、推定方法・実験方法に対する推定値のばらつきについて検討を行った。固有振動数については推定手法によるばらつきはほとんどないこと、微動から推定される1次の固有振動数のばらつきが大きいことがわかった。一方、減衰定数については推定方法によって推定値が大きく異なること、同じ推定手法・同じ実験手法によって推定される値が大きくばらつくことがわかった。

また、小型起振器を用いた調和外力による起振実験を行い、起振応答のばらつきについても検討を行った。起振方向の応答に比べて、起振直交方向の応答のばらつきが大きいことがわかった。

得られた固有振動特性の推定値と起振応答の分布より95%信頼区間を算出し、振動実験結果より明らかに損傷したと判断できる固有振動数および減衰定数の範囲について検証した。また、構造物の損傷を各部材の剛性の低下であるとモデル化し、各部材の剛性低下が固有振動数・起振応答の変化率に与える影響を求めた。そして、固有振動数の変化から検出することのできる最小の損傷はどの程度であるのかについての検討を行った。

固有振動数の低下を損傷の指標と用いる場合、1次の固有振動数は損傷に鈍感で、かつばらつきが比較的大きいため、より高次の振動数を使う必要があることがわかった。しかし、本実験結果では4次以上の固有振動数については3次元的な振動成分が現れていて、多くのモードが近接し

ており、平面的な振動成分を検出することができなかった。本研究で推定できた3次までの振動数では最も小さい要素7で15%の損傷しか検出することができない。一方、起振応答は起振・計測点付近の要素の損傷に敏感であることがわかった。ケース2, 3のように起振方向の応答を計測する場合は応答のばらつきが小さいため、約5%という小さい損傷を検出できる可能性があることがわかった。起振直交方向の応答は損傷に敏感であるが、推定値のばらつきが大きい。ため起振方向の応答を用いる方が良いことがわかった。

固有振動特性と起振応答のばらつきの比較、そして起振応答の起振方向と起振直交方向のばらつきの比較を行ったが、ここで示した変動係数の大きさは相対的なものであり、ノイズ対策によって精度を上げることが可能である。しかし、ばらつきの相対的な大小関係については同じ傾向を示すものと考えられる。

損傷部材付近の起振応答は損傷に対する感度が大きいので、持ち運びが容易な小型起振器と計測器の設置位置を様々に移動させることによって、全部材の損傷を検出できることと思われる。起振力を大きくしたり、ノイズ対策によって計測の精度を上げることによりばらつきは小さくなり、さらに小さいレベルの損傷検出が可能となるものと思われる。

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。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 源栄正人, 鈴木博之, 佐藤健: 既存建物の耐震改修前後の起振機振動実験に基づく損傷度と補強効果の検討, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, 2002
- 2) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三: 不確実性に起因する振動特性変化の定量化とその有意性検定手法, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.399-414, 2001
- 3) Hearn G, Testa GR. Modal analysis for damage detection in structures. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 117: 3042-3063. 1991.
- 4) Hassiotis S, Jeong GD. Identification of stiffness reduction using natural frequencies. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 121: 1106-1113. 1995.
- 5) Wang Z, Lin RM, Lim MK. Structural damage detection using measured FRF data. *Computer methods in applied mechanics and engineering* 147: 187-197. 1997.
- 6) Thyagarajan SK, Schulz MJ, Pai PF. Detecting structural damage using frequency response functions. *Journal of Sound and Vibration* 210(1): 162-170. 1998.
- 7) Lee U, Shin J. A frequency response function-based

- structural damage identification method. *Computers and Structures* 80: 117-132, 2002.
- 8) Furukawa, A. and Kiyono, J.: Structural damage identification based on harmonic excitation force, *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, Vol.1, pp.535-542, 2003
 - 9) Juang, J.N and Pappa, R.S.: An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *Journal of Guidance, control, and dynamics*, Vol.8 No.5 Sept.-Oct. pp.620-627, 1985.
 - 10) Larimore, W.E.: System identification, reduced order filtering, and modeling via. Canonical variate analysis, *Proceedings of the 1983 American Control Conference*, H.S. Rao and P. Dorato, eds., p445-451, 1983
 - 11) 福和伸夫, 西阪理永, 高橋広人, 中村仁, 飛田潤, 河合良道: 振動実験に基づくスチールハウスの固有振動特性に関する研究, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1599-1604, 1998
 - 12) 森田高市, 神田順: 振幅依存性を考慮した建築物の減衰定数の評価, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1611-1616, 1998
- (2004 年 9 月 17 日 受付)