

マイクロ起振器を用いた振動実験による鋼トラス橋の損傷同定

Damage identification of steel truss bridge by vibration testing using micro shaker

古川愛子*, 大塚久哲**, 梅林福太郎***

Aiko Furukawa, Hisanori Otsuka and Fukutaro Umebayashi

*修(工) 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)

***修(工) (株)オリエンタルコンサルタンツ (150-0036 東京都渋谷区南平台町 16-28 グラスシティ渋谷)

In this study, damage to the steel truss bridge was identified by vibration testing using a micro shaker. Damage was modeled as a reduction in stiffness and created by reducing the section area of diagonal members of the bridge. These reductions in stiffness accompany changes in vibration characteristics such as Fourier amplitudes. The damage identification technique using Fourier amplitudes already developed by authors was applied to the vibration data and the validity was confirmed. The grouping method worked effectively to identify damaged members.

Key Words: micro shaker, damage identification, steel truss bridge, grouping method

キーワード: マイクロ起振器, 損傷同定, 鋼トラス橋, グルーピング法

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震では, 構造物の崩壊などの致命的な被害が数多く生じた. 我が国の土木構造物は, 高度経済成長期の建設ラッシュで造られたものが多く, 近い将来これらの構造物が供用年数を越えることになる. 全ての構造物を建て替えることは我が国の経済状況を考慮に入れると無理なことであり, 建て替える構造物は必要最小限に抑え, 補修・補強により維持管理を行っていくことが望まれる.

このような背景から, 維持管理に必要な損傷箇所及び損傷レベルの検出手法について, これまでも多くの研究がなされている. 中でも, 振動特性の変化を利用した損傷検出手法は, 構造物全体の損傷を評価できる手法として注目されている. 構造物の損傷を剛性の低下および減衰の増加とみなし, 結果として振動特性に変化が見られるという事実に基づくものである.

損傷検出に用いられる振動データは, 微動から抽出可能で加振を必要としない, 固有振動数^{1,2)}, モードシェープ^{3,4)}, モードシェープ曲率⁵⁾, モーダルひずみエネルギー⁶⁾等のモーダルデータと, 強制加振による周波数応答関数(FRF)⁷⁾などが代表的である.

人工加振を必要としない損傷同定手法としては, 微動から, 前述したモードデータを抽出し, これらの変化から損傷を同定する手法が代表的である. また, 建築構造物を質点モデルで表現し, 入力を床振動のみと仮定し, 床振動と各層での応答を同時に計測することより, 層ごとの剛性・減衰を直接同定する手法もある⁸⁾. 前者のモードデータを利用した手法は, 入力がホワイトであるという仮定をすれば, 各点の応答が自由振動応答とみなせることや, ある時刻における応答と, 他の時刻における外力とが無相関であ

るという仮定をすれば, 応答の相互相関関数が自由振動応答と相似形をなすことを利用するものである. 後者の方法は, 構造物に入る外力を床振動のみと仮定し, 入出力情報を利用するものである. すなわち, ホワイト性や無相関性や外力を仮定するものであり, これらの仮定に基づく誤差がある.

これに対し, 筆者らは, 携帯可能な超小型の起振器の利用を想定し, 起振振動数でのフーリエ振幅(起振力で除したものが周波数応答関数)の変化から損傷箇所および損傷レベルを検出する手法の開発を行ってきた^{9,10,11)}. 筆者らの提案手法は, 加振源を必要とするものの, 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, 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である. 逆問題では, データが多いほど高い精度が期待できるので, 豊富なデータを扱うことができるというのは本手法の有利な点である.

また, 元来起振器とは本体の重量が何トンもする大型な機械であるため, 起振実験は莫大な労力と時間を要したが, 本研究では手の平サイズのマイクロ起振器を用いるため, 非常に簡易で低コストである. しかし, 小型さゆえ, 加振力が弱く, 応答レベルも非常に小さいものになると想定される. 構造物は絶えず常時微動の影響下にあるため, 計測された応答には微動等の起振力以外の揺れもノイズとして含まれている. 数値解析による検証では, 数%程度の数値ノイズがあっても損傷同定が可能であることを検証済であるが, 実際の構造物にマイクロ起振器を適用して手法を検証してはいない. 筆者らの手法に限らず, 既往の同定手法は数値解析や実験室での模型実験を通して有用性を検証したものばかりで, 実構造物に適用された例は非常に少ない. モデル化誤差や

計測ノイズ、外乱など、非常に過酷な状況下での実験により手法を検証することは非常に意義深いことであると考えられる。

この度、筆者らは、実橋梁（鋼トラス橋）の撤去工事に伴い、提案手法を適用する機会を得た。現存の状態を健全モデルとし、部材に傷を与えた損傷モデルを作成し、健全モデルと損傷モデルを対象にして、マイクロ起振器を用いた振動実験を行った。

本研究は、マイクロ起振器を実構造物の振動実験に初めて適用し、実構造物の損傷同定に初めて適用したものである。まず初めに、損傷の増加とともに振動特性がどのように変化するかを調べ、マイクロ起振器の微小な加振力によって実構造物が振動するのか、損傷に伴う応答の変化を検出できるのかどうかを調べた。次に、提案済の損傷同定手法を、振動実験データに適用することにより、マイクロ起振器を用いて鋼トラス橋の部材損傷を同定できるかどうかの検証を行った。グルーピング法を組み合わせることにより、損傷部材を検出することが出来た。

2. 損傷同定手法

2.1 損傷のモデル化

損傷前の全体質量 M 、減衰 C 、剛性 K マトリクスは各要素の要素質量、減衰、剛性マトリクスの総和として次式により表される。

$$M = \sum_{e=1}^n M^e, \quad C = \sum_{e=1}^n C^e, \quad K = \sum_{e=1}^n K^e \quad (1)$$

ここで、 n は要素の総数を、 M^e, C^e, K^e ($e=1, \dots, n$)は e 番要素の損傷前の要素質量、減衰、剛性マトリクスである。

本研究では、損傷によって各要素の要素質量、減衰、剛性マトリクスが一律に $\delta m_e, \delta c_e, \delta k_e$ だけ変化するとする。要素マトリクスの変分 $\delta M, \delta C, \delta K$ は

$$\delta M^e = \delta m_e M^e, \quad \delta C^e = \delta c_e C^e, \quad \delta K^e = \delta k_e K^e \quad (2)$$

となる。これにより、損傷後の全体マトリクスは、

$$M + \delta M = \sum_{e=1}^n (1 + \delta m_e) M^e \quad (3)$$

$$C + \delta C = \sum_{e=1}^n (1 + \delta c_e) C^e \quad (4)$$

$$K + \delta K = \sum_{e=1}^n (1 + \delta k_e) K^e \quad (5)$$

となる。 $\delta M, \delta C, \delta K$ は全体マトリクスの変分である。

本論文では、剛性の変化率 δk_e が負となる要素が損傷している要素であり、その低下の割合が損傷の程度を表すと考える。

2.2 損傷同定方程式の誘導

(1) 損傷前の構造物の起振応答

非比例減衰系の構造物を起振振動数 ω の調和外力で起振した場合の運動方程式は次式である。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = fe^{i\omega t} \quad (6)$$

ここで、 $x(t), f(t)$ はそれぞれ変位、外力ベクトルである。変位応答は次式の通りである。

$$x(t) = H(\omega) fe^{i\omega t} \quad (7)$$

ここで、 $H(\omega)$ は次式で表される損傷前の伝達関数である。

$$H(\omega) = [-\omega^2 M + i\omega C + K]^{-1} \quad (8)$$

(2) 損傷後の構造物の起振応答

損傷後の構造物を起振振動数 ω の調和外力で起振した場合の運動方程式は以下の通りである。

$$(M + \delta M)(\ddot{x}(t) + \delta \ddot{x}(t)) + (C + \delta C)(\dot{x}(t) + \delta \dot{x}(t)) + (K + \delta K)(x(t) + \delta x(t)) = fe^{i\omega t} \quad (9)$$

式(9)を展開して式(6)、(7)を代入し、さらに2次の微小項を無視すると、変位の増分 $\delta x(t)$ に関する次の方程式となる。

$$M\delta \ddot{x}(t) + C\delta \dot{x}(t) + K\delta x(t) = (\omega^2 \delta MH(\omega) - i\omega \delta CH(\omega) - \delta KH(\omega)) fe^{i\omega t} \quad (10)$$

よって、応答の増分 $\delta x(t)$ について解くと、

$$\delta x(t) = \{\omega^2 H(\omega) \delta MH(\omega) - i\omega H(\omega) \delta CH(\omega) - H(\omega) \delta KH(\omega)\} fe^{i\omega t} \quad (11)$$

式(7)に示した損傷前の変位 $x(t)$ に、上式(11)で求めた損傷による変位増分 $\delta x(t)$ を加えることにより、損傷後の構造物の起振応答 $x'(t)$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned} x'(t) &= (H(\omega) + \omega^2 H(\omega) \delta MH(\omega) \\ &\quad - i\omega H(\omega) \delta CH(\omega) - H(\omega) \delta KH(\omega)) fe^{i\omega t} \\ &= (H(\omega) + \sum_{e=1}^n P^e \delta m_e + \sum_{e=1}^n Q^e \delta c_e + \sum_{e=1}^n R^e \delta k_e) fe^{i\omega t} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $[P^e(\omega)], [Q^e(\omega)], [R^e(\omega)]$ は次式の通りである。

$$P^e = \omega^2 H(\omega) M^e H(\omega) \quad (13)$$

$$Q^e = -i\omega H(\omega) C^e H(\omega) \quad (14)$$

$$R^e = -H(\omega) K^e H(\omega) \quad (15)$$

以下、起振力として $f \cos \omega t$ を与えた場合について誘導する。この場合、応答は式(9)の実数部を採用すればよいので、応答のフーリエ振幅 $X'(\omega)$ は次式となる。

$$X'(\omega) = (H(\omega) + \sum_{e=1}^n P^e \delta m_e + \sum_{e=1}^n Q^e \delta c_e + \sum_{e=1}^n R^e \delta k_e) f \quad (16)$$

(3) 連立1次方程式の誘導

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を、入力である調和外力の振幅で除したものを周波数応答関数(FRF)と定義する。計測点をノード i 、起振点をノード j 、起振振動数を ω としたとき、FRFは次式のように表される。

$$a(i, j, \omega) = -\omega^2 (H_{ij}(\omega) + \sum_{e=1}^n P_{ij}^e \delta m_e + \sum_{e=1}^n Q_{ij}^e \delta c_e + \sum_{e=1}^n R_{ij}^e \delta k_e) \quad (17)$$

式(17)において、FRFである $a(i, j, \omega)$ は、実際の構造物の周波数応答関数であり、計測により得られる値であり、計測点 i 、起振点 j 、および起振振動数 ω の関数である。一方、 $H_{ij}(\omega), P_{ij}^e(\omega), Q_{ij}^e(\omega), R_{ij}^e(\omega)$ は損傷前のモデルから得られる既知の値である。

式(17)を整理し、左辺に未知の項、右辺に既知の項を移項すると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} &-\omega^2 \sum_{e=1}^n P_{ij}^e \delta m_e - \omega^2 \sum_{e=1}^n Q_{ij}^e \delta c_e - \omega^2 \sum_{e=1}^n R_{ij}^e \delta k_e \\ &= a(i, j, \omega) + \omega^2 H_{ij}(\omega) \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)は、計測点 i 、起振点 j 、起振振動数 ω の組み合わせ毎に成り立つ方程式である。 i, j, ω の組み合わせを様々に変え、 m 種類の計測を行うと、上の関係式が m 個得られることになる。式(18)の左辺の係数行列と右辺の値は複素数であるので、実数部と虚数部に分けることにより、次式のような $2m$ 次の同次連立方程式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} S & T & U \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta m \\ \delta c \\ \delta k \end{Bmatrix} = \{da\} \quad (19)$$

S, T, U はそれぞれ、式(18)における $-\omega^2 P_{ij}^e, -\omega^2 Q_{ij}^e, -\omega^2 R_{ij}^e$ に相当する。 $\delta m, \delta c, \delta k$ はそれぞれ各要素の質量マトリクスの増分から構成される n 次の未知のベクトルである。

このように、 m 個の異なる起振データが得られれば、 $3n$ 個の未知数に対する $2m$ 個の方程式が得られることになる。式(19)を解くことによって得られた質量、減衰、剛性の増分を式(3)(4)(5)に代入することにより、損傷後の構造物の応答に一致する解析モデルへとアップデーティングすることができる。この内、剛性の変化率 δk_e が負となる要素が損傷している要素であり、低下割合が損傷の程度を表すと考えることができる。

2.3 グループピング法

グループピング法とは、全要素を複数のグループに分け、同一のグループに属する要素は同じ損傷率を有すると仮定することにより、パラメータの数を減らすことと、段階的に損傷の可能性のないと判断された要素を解析の対象から排除することにより、効率的に解を求める手法である。そのアルゴリズムは以下の通りである。

ステップ1 : n 個の要素全てを損傷の可能性があると仮定する。

ステップ2 : 要素を m 個のグループに分ける。

ステップ3 : 同じグループ g に属する要素は全て同じ損傷率(δc_g と δk_g)を持つと仮定し、損傷同定式を再構築する。

ステップ4 : 損傷同定方程式を解き、 δc_g と δk_g がともに予め設定したしきい値よりも小さければ、グループ g に属する要素を、損傷の可能性がないとして損傷同定の候補から外す。候補から外すグループがなければ計算を打切る。

ステップ5 : 損傷の候補として残った全てのグループに属する全ての要素を集めて、再度複数のグループに分ける。ステップ3に戻る。

1回目のグループ分けと、2回目以降のグループ分けは独立している。グループ分けに際しては、候補に残った要素のうち、近接した要素同士を同じグループに分けるようにした。

3. 実験の概要

3.1 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。

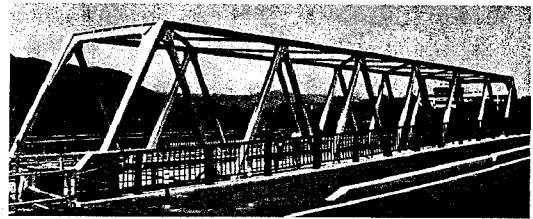


写真-1 車帰橋

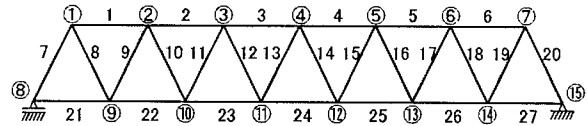


図-1 側面図

3.2 実験内容

マイクロ起振器を用いて起振実験を行った。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安全性を考慮して共振振動数を避け、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。

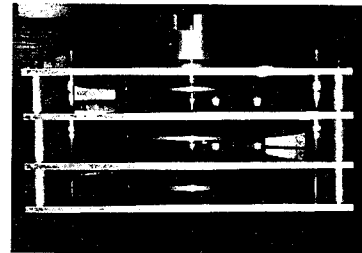


写真-2 マイクロ起振器

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

3.3 計測器の配置

マイクロ起振器を用いてトラス橋を橋軸・鉛直方向にそれぞれ加振し、加速度計で橋軸・鉛直方向の振動を計測した。

加速度計は計8台とその台数に制限があったため、図-2に示す2つの配置に対し計測を行った。節点4と11はどの配置においても計測している。数値解析による検討から、起振点を2箇所を設定する場合、2点を離れた方が情報量の多いデータが得られること、起振器から遠い節点では十分な大きさの振動が得られない可能性のあることなどを考慮に入れた中で、様々な損傷パターンに対して比較的精度よい結果が期待できる配置として図-2を採用した。図-2において○で囲まれた節点には加速度計を、□で囲まれた節点には起振器を設置した。

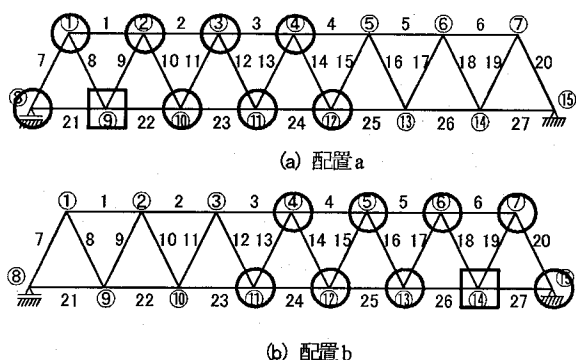


図-2 加速度計と起振器の設置位置

3.4 損傷モデル

本研究では、損傷はトラスの斜材(H型钢)である要素8, 15に与えた。斜材の断面と損傷の入れ方を図-3に示す。断面欠損はH型钢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。本実験では、部材に損傷を入れる前のモデルにおいて、起振器の設置方向を誤るという手違いがあり、鉛直方向起振実験のデータを計測することが出来なかったため、最も損傷レベルの少ないモデルを健全モデルとみなして同定を行うこととする。健全モデル、各損傷モデルは以下の通りである。

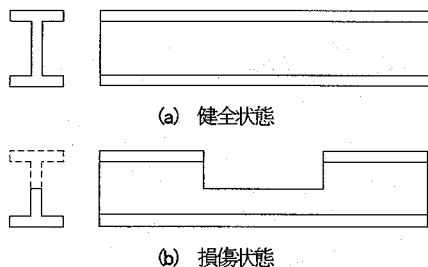


図-3 斜材の断面と損傷の入れ方

(1)健全モデル

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。

(2)損傷モデル1

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。

(3)損傷モデル2

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。

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(20), (21)から算出した。

$$\text{要素8} : \text{剛性低下率} = 1 - \frac{1/(1 + \Delta l/l)}{1/(1 + 10(\text{cm})/l)} \quad (20)$$

$$\text{要素15} : \text{剛性低下率} = 1 - 1/(1 + \Delta l/l) \quad (21)$$

ここで、 Δl は損傷長さ(cm)、 l は部材長さ(cm)である。

式(20), (21)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。要素8と15の算定式が異なるのは、要素8が健全モデルにおいて既に10cmの損傷が入っているため、補正を行っているためである。

表-2 損傷部材の剛性低下率

	要素8	要素15
損傷モデル1	0.203	0.120
損傷モデル2	0.280	0.290

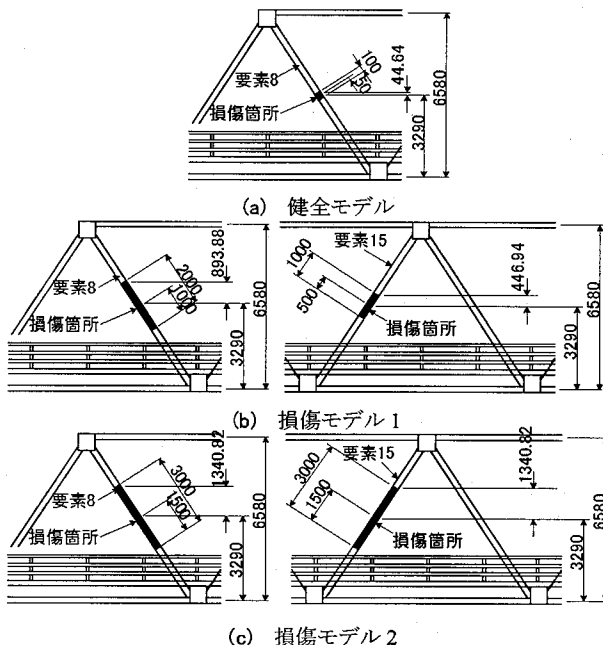


図-4 損傷モデル

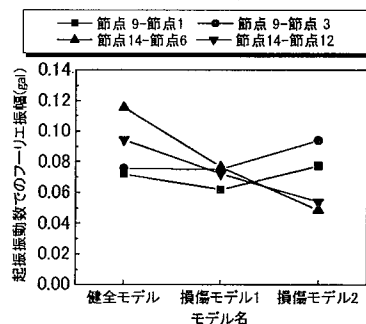
3.5 実験結果

まず、a)橋軸方向に起振したときの橋軸方向の応答、b)橋軸方向に起振したときの鉛直方向の応答、c)鉛直方向に起振したときの橋軸方向の応答、d)鉛直方向に起振したときの鉛直方向の応答、の4通りの応答を比較する。

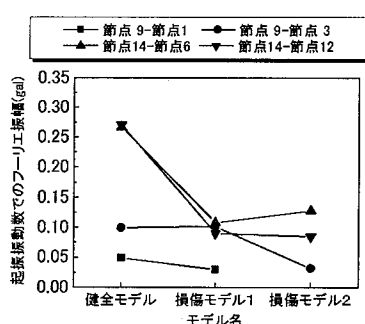
図-5に、損傷に伴うa)~d)の応答の変化の例を示す。凡例は、“起振節点—計測節点”となっている。ここで、計測された応答には、マイクロ起振器による揺れと、風荷重や交通荷重など、微動による応答も含まれている。起振器による応答が、微動による応答に埋もれてしまうようでは、マイクロ起振器で得られた応答の信頼性は低いことになる。また、微動レベルは実験の度に異なるので、損傷に伴う起振応答の変化量が、微動レベルの違いによる応答差に埋もれてしまうようでは、損傷を検出することはできない。鉛直方向起振時の応答(図-5c,d))は橋軸方向起振時の応答(図-5a,b))より1オーダーも大きい。微動による振動レベルは、橋軸方向起振時の応答(図-5a,b))より小さいので、鉛直方向起振時の応答は、微動データより十分に大きく、マイクロ起振器の微小な加振力ではあるが十分に揺れていると考えられる。

図-5のa)~d)を比較すると、応答レベルが最も大きいのは、d)鉛直方向に起振したときの鉛直方向の応答であり、損傷に伴う応答差が大きいのもd)、損傷に伴う応答の変化が明瞭に現れているのもd)である。よって、図-5d)のデータは、損傷同定の入力データとして利用できそうであると考えられる。

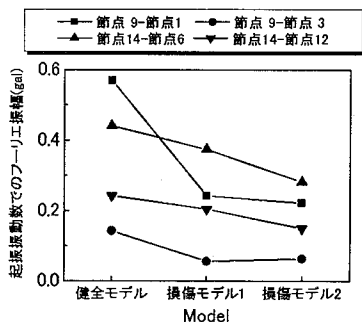
以上により本研究では、損傷同定に用いるデータに、起振器に



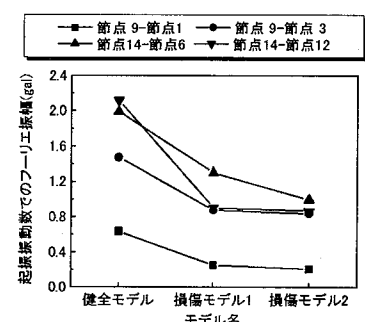
(a) 橋軸方向起振時一橋軸方向計測



(b) 橋軸方向起振時一鉛直方向計測

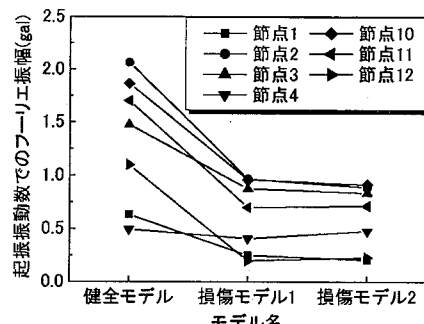


(c) 鉛直方向起振時一橋軸方向計測

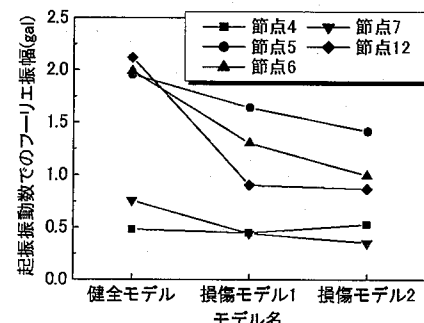


(d) 鉛直方向起振時一鉛直方向計測

図-5 損傷に伴う起振振動数でのフーリエ振幅の変化の比較



a) 配置 a



b) 配置 b

図-6 損傷に伴う起振振動数でのフーリエ振幅の変化 (鉛直起振時での鉛直方向の応答)

よる鉛直方向起振時の鉛直方向のフーリエ振幅を選んだ。図-6に損傷に伴って起振振動数でのフーリエ振幅(鉛直起振時での鉛直方向の応答)が変化する過程を示す。

図-6 から、損傷度が大きくなるに従い、フーリエ振幅は減少していることが分かる。図-6 の(a)と(b)では、健全モデルと損傷モデル1間の応答値の減少度合いが異なっており、(a)の方が(b)よりも大きく減少している。これは、配置aでは損傷要素8に近い節点9で起振しているのに対して、配置bでは、損傷要素から離れた節点14で起振しているためであり、データが持つ損傷に対する感度に差があるものと考えられる。

4. 損傷同定

本節では、図-6に示す健全モデルのフーリエ振幅を用いて解析モデルのアップデーティングを行い、損傷モデル12のフーリエ振幅を用いて要素8と15の損傷を同定できるかどうかを検証する。

4.1 解析モデルのアップデーティング

損傷同定を行うためには、健全モデルを表現する解析モデルの構築が必要である。上弦材、斜材、下弦材を軸力部材としてモデル化し、床版や2次部材の剛性は考慮せず、重量のみ考慮した。本研究では、設計図から作成した解析モデルの起振振動数でのフーリエ振幅が実験から得られた起振振動数でのフーリエ振幅に近づく様、2章で述べた同定手法を用いて解析モデルのアップデーティングを行った。このとき、減衰定数は非常に小さかったため解析モデルは非減衰系と仮定し、各要素の質量と剛性を変え、アップデーティングを行った。アップデーティングに用いる健全モデルでの計測データを表-3に示す。配置bの節点11、13はデータが得られなかった為、アップデーティングには用いていない。

図-7に健全モデル、設計図から作成した解析モデル、アップデーティング後の解析モデルの起振振動数でのフーリエ振幅をそれぞれ示す。図-7では、横軸に計測した節点の番号(中央付近の縦線から左は配置a、右は配置b)、縦軸が起振振動数でのフーリエ振幅を表している。図-7から明らかなように、アップデーティング後には全体的に解析モデルの応答に近づいていることが分かる。現段階では、図-7に示した値が最も近い値であり、後述する損傷同定はこのモデルを用いている。

表-3 アップデーティングに用いる計測データ(gal)

配置a		配置b	
節点1	0.635	節点4	0.481
節点2	2.063	節点5	1.954
節点3	1.475	節点6	1.988
節点4	0.496	節点7	0.756
節点10	1.865	節点11	-
節点11	1.703	節点12	2.116
節点12	1.100	節点13	-

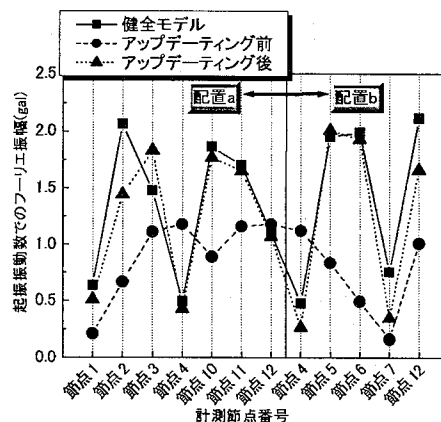


図-7 解析モデルのアップデーティング

4.2 損傷モデル1の損傷同定結果

損傷モデル1について提案手法を用いて損傷同定を行った。同定に用いた実験データを表-4に示す。ここで、配置bの節点4と13では、データを得ることができなかった。

表-4 損傷モデル1の起振振動数でのフーリエ振幅(gal)

配置a		配置b	
節点1	0.249	節点4	-
節点2	0.968	節点5	1.638
節点3	0.875	節点6	1.299
節点4	0.409	節点7	0.443
節点10	0.958	節点11	0.301
節点11	0.702	節点12	0.902
節点12	0.197	節点13	-

(1) グルーピング法を用いない場合

全ての要素を独立であるとして、グルーピング法を用いずに損傷箇所を検出した。ここでは、閾値を0.0とし、同定された剛性変化率が0.0より大きい(要素剛性が増加した要素)を損傷の可能性がないとみなして、損傷同定の候補から外した。候補から外す要素がなくなったところで計算を打ち切った。結果を表-5に示す。

表-5 損傷モデル1の同定プロセス(グルーピング法を用いない場合)

1回目	1~27要素全て(27要素)が損傷の可能性があると仮定
2回目	1, 2, 3, 5, 8, 9, 15, 17, 18, 22, 23, 24, 25, 26要素(14要素)が損傷の可能性があると仮定
3回目	1, 8, 15, 18, 23, 25要素(6要素)が損傷の可能性があると仮定
4回目	1, 8, 15要素(3要素)が損傷の可能性があると仮定

表-5は、損傷箇所を絞り込むために計4回の同定を行ったことを意味している。1回目の同定は27要素全部を損傷の可能性があるとみなして、27個の要素に対して同定を行った。その結果、2回目の欄に示している要素以外は剛性が増加している結果が得られたことから、それらの要素は損傷の可能性がないとして、損傷候補から除去した。同様にして、2回目の同定で損傷の可能性のある14要素に対して損傷箇所の検出を試みたところ、3回目の欄に示す要素以外は剛性が増加している結果が得られたことから、それらの要素も損傷候補から除去した。3回目の損傷箇所検出により、4回目の欄に示す3要素(要素1,8,15)にまで絞り込むことが出来た。ここで、要素8と要素15は実際に損傷している要素である。要素1は無損傷であるが、損傷要素である要素8に隣接する要素であるため、損傷していると誤判断されたものと考えられる。

要素1, 8, 15の3要素について、損傷度(剛性変化率)を求めた。その結果を図-8に示す。表-2に示した剛性変化率(要素8:-0.203, 要素15:-0.120)と比較してみると、図-8に示した値は要素8では-0.325, 要素15では0.184と大きめの値が得られた。この原因としては、モデル化誤差や計測ノイズの他に、構造物を軸力部材としてモデル化したが、実際は完全なヒンジ結合でなく曲げモーメントも作用しているため、式(20), (21)による算定値よりも大きい値が得られたと考えられる。

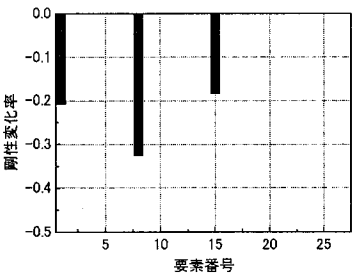


図-8 損傷モデル1の同定結果(グルーピング法を用いない場合)

(2) グルーピング法を用いた損傷同定

次に、グルーピング法を適用した。グルーピング法の最初のグループ数として、4, 8, 12グループとした場合について検討を行った。本研究では、グループの組み合わせは任意であるが、出来るだけ近くの要素を同じグループに属するようにした。グループの組み合わせと損傷箇所検出結果を表-6に示す。

表-6では、塗り潰された枠に示すグループは剛性が低下するという結果が得られたことを表している。表-6から、損傷要素から離れたところに位置する要素を含むグループから順に除去されていっていることが分かる。表-6(a), (b), (c)においてどのグループ分けにおいても、2回目ではほぼ損傷要素の近くに位置する要素にまで絞れていることが分かる。いずれのケースも、最終的には要素8, 15に絞り込めている。グルーピング法を用いずに損傷箇所を検出した場合と比較すると、最終的に2つの要素に絞れていることから、グルーピング法を用いることの有用性があることが分かった。

表-6 損傷モデル1の同定プロセス(グルーピング法を用いる場合)

(a) 最初のグループ数が4個の場合					
	1回目	2回目	3回目	4回目	
グループ1	1,2,7,8,9,10,21,22	1,7,8,21	1,8	1	
グループ2	3,11,12,13,14,23,24	2,9,10,22	7,21	4	
グループ3	4,5,15,16,17,25	4,15,16,25	4,15	8	
グループ4	6,18,19,20,26,27	5,17,18,26	16,25	15	
グループ5	-	6,19,20,27	-	-	

(b) 最初のグループ数が8個の場合					
	1回目	2回目	3回目	4回目	
グループ1	1,7,8,21	7,8	7	8	
グループ2	9,10,22	1,9	8	15	
グループ3	2,11,23	21,22	15	22	
グループ4	3,12,13	2,11	21	-	
グループ5	4,14,24	10,23	22	-	
グループ6	5,15,16,25	5,16	25	-	
グループ7	6,17,18,26	15,25	-	-	
グループ8	19,20,27	-	-	-	

(c) 最初のグループ数が12個の場合					
	1回目	2回目	3回目	4回目	
グループ1	7,8,21	7,21	2	2	
グループ2	1,9	8	3	8	
グループ3	10,22	2,3	5	15	
グループ4	2,11,23	11,12	8	-	
グループ5	3,12	23	15	-	
グループ6	13,24	5,15	16	-	
グループ7	4,14	16,25	25	-	
グループ8	15,25	17,26	-	-	
グループ9	5,16	-	-	-	
グループ10	17,26	-	-	-	
グループ11	6,18	-	-	-	
グループ12	19,20,27	-	-	-	

ここで、グルーピング法によるグループ数4の結果(表-6(a))では、試行回数4回目実施時に損傷候補に残っていた要素は1,4,8,15であるが、4回目の試行で損傷要素8,15だけに絞り込めている。一方、グルーピング法を用いない方法(表-5)では、試行回数4回目実施時に損傷候補に残っていた要素は1,8,15であり、グルーピング法を用いる場合と比べて要素4が候補にないだけの違いであるのに、4回目の試行でこれ以上絞り込むことができていない。グルーピング法では無損傷要素1だけでなく無損傷要素4も候補に残っていたため、同時に1,4を除外することが出来ており、損傷要素を絞り込む仮定において、グループ化することで未知数を減らすことのメリットが表れていると考えられる。

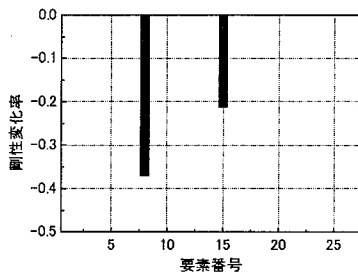


図-9 損傷モデル1の同定結果(グルーピング法を用いる場合)

4.3 損傷モデル2の損傷同定結果

損傷モデル2について、同定に用いた実験データを表-7に示す。

表-7 損傷モデル2の起振振動数でのフーリエ振幅(gal)

配置a		配置b	
節点1	0.207	節点4	-
節点2	0.889	節点5	1.412
節点3	0.838	節点6	0.995
節点4	0.478	節点7	0.352
節点10	0.916	節点11	0.237
節点11	0.715	節点12	0.867
節点12	0.227	節点13	-

(1) グルーピング法を用いない場合

全ての要素を独立であるとして、グルーピング法を用いずに損傷箇所を検出した。その結果を表-8に示す。

損傷モデル2では、4回計算を行うことにより、最終的には3要素にまで損傷箇所を絞り込んでいる。2回の計算により、損傷箇所を5つの要素にまで絞り込めており、少ない計算時間である程度まで損傷箇所を検出することができている。最終的に、要素8,15,24の3要素が損傷要素として検出された。無損傷である要素24は、損傷箇所である要素15に隣接する要素であるため、損傷要素と誤判断されたものと考えられる。

表-8 損傷モデル2の同定プロセス(グルーピング法を用いない場合)

1回目	1~27要素全て(27要素)が損傷の可能性があると仮定
2回目	1, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 19, 23, 24, 25要素(13要素)が損傷の可能性があると仮定
3回目	8, 12, 14, 15, 24要素(5要素)が損傷の可能性があると仮定
4回目	8, 12, 15, 24要素(4要素)が損傷の可能性があると仮定
5回目	8, 15, 24要素(3要素)が損傷の可能性があると仮定

要素8, 15, 24の3要素について、損傷度(剛性変化率)を求めた。その結果を図-10に示す。表-2に示した剛性変化率(要素8:-0.280, 要素15:-0.290)と比較してみると、図-10に示した値は要素8では-0.438と大きめの値が得られたのに対して、要素15では-0.249と小さめの値が得られている。この理由としては、要素8の過大評価については、完全な軸力部材でなく曲げモーメントも作用しているのを、軸力部材であるとモデル化したために、式(20), (21)から算定した剛性変化率よりも大きい値が得られたことが原因と考えられ、また要素15の過小評価については、モデル化誤差や計測ノイズなどが原因であると考えられる。

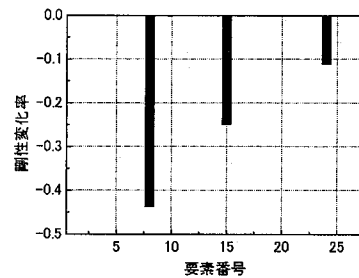


図-10 損傷モデル2の同定結果(グルーピング法を用いない場合)

(2) グルーピング法を用いた損傷同定

グルーピング法の最初のグループ数を4, 8, 12グループとした場合について述べる。グループの組み合わせと損傷箇所検出結果を表-9に示す。表-9では、塗り潰された枠に示すグループは剛性が低下していたことを表している。図-9(a)では、4回目の試行においてグループ数が7個になっているのは、損傷同定方程式の

表-9 損傷モデル2の同定プロセス(グルーピング法を用いた場合)

(a) グループ数が4個の場合

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
グループ1	1,2,7,8,9,10,21,22	1,2,7,8,9,10,21,22	1,7,8,21	1	1
グループ2	3,11,12,13,14,23,24	4,5,15,16,17,25	2,9,10,22	4	8
グループ3	4,6,15,16,17,25	6,18,19,20,26,27	4,15,25	7	15
グループ4	8,18,19,20,26,27	-	5,16,17	8	21
グループ5	-	-	-	15	-
グループ6	-	-	-	21	-
グループ7	-	-	-	25	-

(b) グループ数が8個の場合

	1回目	2回目	3回目	4回目
グループ1	7,8,21	7,8	7	7
グループ2	1,9,10,22	1,2	8	8
グループ3	2,11,23	9,21	10	15
グループ4	3,12,13,24	10,22	15	-
グループ5	4,14,15	11,23	22	-
グループ6	5,16,25	4,14	25	-
グループ7	6,17,18,26	15,25	-	-
グループ8	19,20,27	5,16	-	-

(c) グループ数が12個の場合

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
グループ1	7,8,21	7,8,21	7,8,21	7	7
グループ2	1,9	2,11,23	3,12	8	8
グループ3	10,22	3,12	15,25	15	15
グループ4	2,11,23	15,25	5,16	21	-
グループ5	3,12	5,16	-	25	-
グループ6	13,24	17,26	-	-	-
グループ7	4,14	-	-	-	-
グループ8	15,25	-	-	-	-
グループ9	5,16	-	-	-	-
グループ10	17,26	-	-	-	-
グループ11	6,18	-	-	-	-
グループ12	19,20,27	-	-	-	-

解が発散するケースでは解が得られるグルーピングが得られるまでグルーピングをやり直したためである。

どのグルーピング化においても、最終的には、損傷箇所を要素 8、15 の 2 要素に絞り込むことが出来た。表-9 から、損傷要素から離れたところに位置する要素を含むグループから順に除去されていっていることが分かる。グルーピング法を用いない場合の結果との比較より、グルーピング法の有用性が確認された。

図-11 に同定された損傷度(剛性変化率)を示す。要素 8、15 の剛性変化率は-0.444、-0.252 という値が得られた。これは表-2 に示した剛性変化率(要素 8:-0.290、要素 15:-0.290)と比較すると要素 8 では大きめの値が、要素 15 では小さめの値が得られた。この原因としては、前述した理由が考えられる。

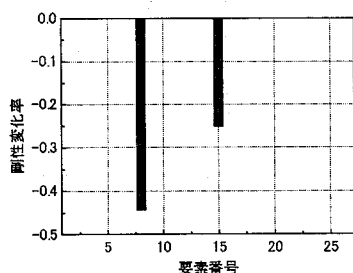


図-11 損傷モデル2の同定結果(グルーピング法を用いた場合)

5. 結論

本研究では、熊本県阿蘇郡に架かる旧車帰橋(鋼トラス橋)の撤去工事に際して、部材に傷を与えた損傷モデルを作成し、マイクロ起振器を用いた振動実験を行った。得られた振動データに筆者らによって提案済の損傷同定手法を適用し、損傷部材の特定および損傷レベルの推定が可能であるかどうかを検証した。その結果を以下に示す。

- ・ マイクロ起振器の微小な起振力で実構造物を起振したが、鉛直方向起振時の鉛直方向の応答は、外乱よりも大きい応答が得られ、さらに損傷に伴い応答が変化する様子を明瞭に得ることができた。本研究では 7.5Hz を起振振動数として利用したが、より大きな回転数で起振すれば、より大きな起振力が得られ、さらに高い振動数領域では小さい損傷に対する感度も上がるため、より大きな構造物の小さな損傷が検出できる可能性があると考えられる。
- ・ グルーピング法を用いない損傷同定では、両損傷モデルともに、実際に損傷している 2 要素を含む 3 要素を損傷要素として検出した。損傷要素と誤判断された無損傷要素は、損傷要素に隣接しているため、損傷候補から外すことが出来ず、誤判断されたものと考えられる。
- ・ グルーピング法を採用することにより、両損傷モデルともに、損傷箇所を実際に損傷した 2 要素に絞り込むことができ、グルーピング法の有用性を確認できた。

本研究では任意にグルーピングを行ったが、今後精度良い同定結果が得られるグルーピングの方法等について検討することが必要であると考えられる。

また本研究は、マイクロ起振器を実構造物の振動実験

に初めて適用し、マイクロ起振器を損傷同定に初めて適用したものである。マイクロ起振器のモーターの性能上、あまり大きな回転数で起振できなかったため、損傷モデルとしては大きな切欠けを作成した。しかし一般に、高い振動数における周波数応答関数ほど、小さい損傷に対する感度が高くなるため、より高い振動数で起振すれば、より小さな損傷の検出可能であると考えられる。今後、マイクロ起振器の性能を高め、より高い振動数領域のデータを集めることで、さらにスタッピングなどによりノイズ対処することにより、小さな損傷の検出も可能となり、簡便な損傷検出手法になると考えられる。

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、九州大学山崎智彦技官には実験の実施に関して種々のご協力を頂きました。京都大学の清野純史助教授にはマイクロ起振器を提供して頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hassiotis S, Jeong GD.: Identification of stiffness reduction using natural frequencies. Journal of Engineering Mechanics, ASCE 121: 1106-1113. 1995.
- 2) 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, pp.701-712, 1999.
- 3) Xia Y, Hao H, Brownjohn JMW, Xia P.: Damage identification of structures with uncertain frequency and mode shape data. Earthquake Engineering and Structure Dynamics 31: 1053-1066. 2002.
- 4) 阿部雅人、藤野陽三、長山智則、池田憲二：常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例、土木学会論文集、No.689/I-57, pp.261-274, 2001.10.
- 5) Ricles JM, Kosmatka JB.: Damage detection from changes in curvature mode shapes. AIAA Journal 30: 2310-2316. 1992.
- 6) Peterson ST, McLean DL, Symans MD, Pollock DG, Cofer WF, Emerson RN, Gridley KJ.: Application of dynamic system identification to timber beams. I. Journal of Structural Engineering 127: 418-425. 2001.
- 7) Wang Z, Lin RM, Lim MK.: Structural damage detection using measured FRF data. Computer methods in applied mechanics and engineering 147: 187-197. 1997.
- 8) 中村充、安井謙：微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価、日本建築学会構造系論文集、No.517, pp.61-68, 1999年
- 9) Furukawa A., Kiyono J.: Structural damage identification based on harmonic excitation force. Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vol. 1, pp.535-542, A.A. BALKEMA PUBLISHERS, November, 2003.
- 10) 古川愛子、大塚久哲、清野純史：ブートストラップ仮説検定を用いた統計的損傷同定手法について。応用力学論文集、Vol.7, pp.1187-1194, 2004 年
- 11) 古川愛子、清野純史、大塚久哲：質量変化が損傷同定手法の精度に与える影響と初期値に依存する同定結果に対する集団学習の適用。構造工学論文集、Vol.51A, pp.537-548, 2005

(2006 年 4 月 13 日 受付)