

独立成分分析を用いた起振応答の抽出法と損傷同定問題への適用

Development of response extraction technique using ICA and its application to structural damage identification

古川愛子*, 清野純史**, 大塚久哲***

Aiko Furukawa, Junji Kiyono and Hisanori Otsuka

*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)

**博(工) 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)

***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)

When we conduct forced vibration using a small shaker to identify structural damage, the responses have the possibility to contain measurement noise due to ambient vibrations. To surmount this, the independent component analysis (ICA) was applied to extract the excitation responses from contaminated measurements. ICA is an algorithm recently used for blind source separation. It separates signals only using the statistical independence of original signals. We assume that a structure is excited by independent input forces: harmonic excitation and ambient vibrations, and tried to extract the harmonic excitation responses. We proposed its application as preprocess of damage identification to improve the identification accuracy. Though numerical simulation, we confirmed that the technique worked efficiently to obtain identification results of high accuracy.

Key Words: ICA, response extraction, harmonic excitation, ambient vibration, damage identification

1. はじめに

大地震に備えて一刻も早い耐震補修・補強の実施が叫ばれている現在、構造物の損傷の評価や、さらには使用限界までを含めた健全度を判定する技術が求められている。このような背景の下、構造物の損傷検出に関する研究は過去数多く行われており、アプローチ方法も多種多様にわたっている。

目視は最も古くから行われている損傷検出手法であるが、外装や外壁に覆われて目で見ることのできない箇所については、外装を取り除かなくてはならず、経済的にも時間的にも非常に高コストである¹⁾。非破壊検査は構造物を破壊せず間接的にそれらの性質・状態・内部構造および内部欠陥等を調べる検査手法であるが²⁾、局所的な損傷の検出には適しているものの、構造物全体の損傷を捉えることはできない。一方、構造物全体の損傷を捉えることのできる手法としては、振動特性の変化を利用する手法がある。これは、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り、土木工学に限らず機械工学や航空工学等の幅広い分野で開発され適用されてきた手法である^{3),4),5),6)}。

損傷検出に用いられる振動データのうちよく利用されるものが固有振動数とモードシェープである。固有振動数⁵⁾は比較的容易かつ正確に計測することができるが、空間的な構造特性を捉えることには適しておらず、また

損傷の有無にあまり敏感でない。モードシェープ⁶⁾は空間的な特性を捉えることができるが、計測が困難で、かつモード・エクспанションに起因する誤差の影響が大きい。完全なモードシェープを得るには高精度な計測器を高密度に配置しなければならない。一方、強制加振によって求まる周波数応答関数(FRF)⁷⁾は、計測波形を直接利用する為、大きな誤差の生じる処理が必要でないこと、および現実的な周波数範囲における情報を用いることができること等の点で優れている。しかし、大型の起振器を用いた加振実験は、非常に高コストで多くの時間と労力を要する。

筆者ら⁷⁾は、広く一般に用いられる簡易な損傷同定手法の開発を目指して、持ち運びの容易な小型の起振器の利用を想定し、周波数応答関数を用いた構造物の損傷検出法に関する研究を行っている。この手法は、起振器を用いて構造物を調和外力で起振し、計測された応答の周波数応答関数と、損傷前の解析モデルから得られる周波数応答関数とを比較することにより、損傷部材の特定と損傷の程度を評価する手法であり、数値解析を通して手法の有用性は検証済みである。また本手法は実験の簡便性と、出力データだけでなく入力特性も明確であること、そして起振箇所・計測箇所・起振振動数の組み合わせを様々に変えることにより豊富なデータの蓄積が可能となることなど、数多くのメリットを有している。

しかしながら、計測が簡易である一方、小型起振器による微小な入力を想定しているため、加振力は弱く、応答のレベルも非常に小さいものになる。構造物は絶えず交通振動や風荷重等の微動

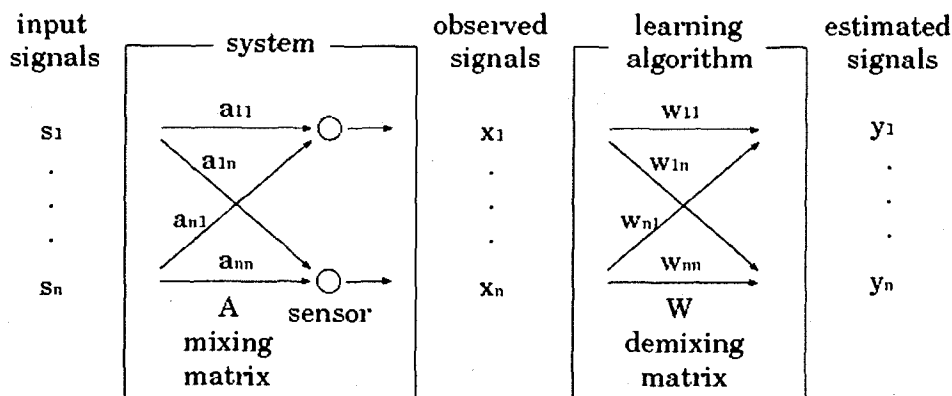


図-1 ブラインド音源分離の概要¹³⁾

の影響を受けているため、起振実験により計測された応答には、微動による応答も含まれている。逆解析においては一般に、同定値は計測データのわずかな誤差に敏感に反応する傾向がある。また提案している損傷同定手法が損傷前後の応答の変化に基づく以上、微動による応答が損傷による応答の変化より大きいならば、小さい損傷がノイズに埋もれて検出できなかったり、健全な部材に損傷が検出されたり、手法がうまく機能しない可能性も生ずる。データ処理により微動や計測ノイズの含まれない、純粋に起振器だけによる応答を抽出することができれば、より高精度な同定結果が期待できる。それを実現する手法として、本研究では独立成分分析を採用し、構造物の応答に及ぼす起振振動と微動の影響が統計的に独立であるという仮定のみを用いて、全体応答から起振器による応答を抽出する手法を提案する。本研究では、主に建築構造物を対象とし、起振力以外の外力として床振動を想定する。そして、起振外力と床振動を独立成分とみなし、これらが同時に作用して計測された応答から、起振器のみによる応答を抽出することを想定している。

独立成分分析⁹⁾とは、最近注目されている新しいデータ解析手法であり、複数の信号源から発生した信号が混合している時、それらが互いに独立であるという条件のみを用いて各々の信号を機械的に分離する手法のことである。信号の独立性のみを仮定し、それ以外の情報は未知とされることが特徴である。現在はその計算手法の開発に関する研究のみならず、一種のカクテルパーティー効果をモデル化するブラインド音源分離への応用⁹⁾、信号処理・画像処理における加法的な雑音の除去¹⁰⁾、通信分野における混線信号の分離¹¹⁾、生体信号の解析、また脳波のfMRI画像の解析¹²⁾など、幅広い応用がなされている。

独立成分分析は本来線形混合された信号の分離手法である。これに対し、構造物の応答は入力とシステムの応答関数の畳み込みであるため、直接独立成分分析の手法を適用することはできない。本研究では、入力と応答の短時間フーリエ変換が、振動数毎に着目すれば線形混合の関係にあることを利用する。調和起振による応答を抽出する場合は、起振振動数に着目すればよいことになる。

本研究では、可搬型小型起振器による簡易な計測を利用した損傷同定手法に、前処理としての独立成分分析による波形処理を融合することにより、ヘルスマonitoringのための精度良い同定手法を構築することを目的としている。

2. 独立成分分析の概念

2.1 ブラインド音源分離

我々は、パーティー会場など複数の人々の話し声が行き交い、バックミュージックが同時に流れる場に身を置いてもそれらの音を聞き分けることができる。このような人間の情報処理のメカニズムを工学的な手法によって実現しようとする試みはブラインド音源分離(blind source separation)と呼ばれ¹³⁾、古くから多くの研究が行われてきた。独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)は信号の統計的な独立性のみを仮定し、それ以外は未知という条件だけを用いて信号を分離する手法であり、ブラインド音源分離を実現してある特定の信号を抽出する問題として様々な分野に応用がなされている。

2.2 独立成分分析の定式化

ある部屋で n 人が同時に話をしている状況を想定する。 j 番目の人の発する音声信号の時系列を $s_j(t)$ とし、これらは互いに統計的に独立であり平均が0と仮定する。源信号を以下のようにベクトル表現する。

$$s(t) = (s_1(t), \dots, s_n(t))^T \quad (1)$$

この部屋の中に m 個のマイクを設置して会話を録音する。 j 番目のマイクより記録された音声信号の時系列を $x_j(t)$ とすると、観測信号のベクトルは以下のように表される。

$$x(t) = (x_1(t), \dots, x_m(t))^T \quad (2)$$

各マイクには n 人の声が混ざり合ったものが記録されるが、声は壁などで反響することなく時間遅れは生じないと仮定すると、源信号と観測信号は次式のような線形変換により関連付けされる。

$$x(t) = As(t) \quad x_i(t) = \sum_{j=1}^n A_{ij}s_j(t) \quad (3)$$

A は声の混ざり方を表す $n \times m$ 行列であり、混合行列と呼ばれる。混合行列 A も源信号 $s(t)$ も共に未知であるときに、観測信号 $x(t)$ と源信号の独立性だけから源信号 $s(t)$ を推定することが独立成分分析に基づいたブラインド音源分離である。観測信号 $x(t)$ は式(3)のように分解行列 W によって独立な成分に分解されるとする。

$$y(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))^T \quad (4)$$

$$y(t) = Wx(t) \quad y_i(t) = \sum_{j=1}^n W_{ij} x_j(t) \quad (5)$$

独立成分分析の問題はこの分解行列 W を求める問題と考えられる。分解行列 W は必ずしも混合行列 A の逆行列である必要はなく、分解された信号 $y(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))^T$ のスケールと順番には不定性が残る。

2.3 独立性の定義

独立成分分析は原信号の独立性のみから混合行列を推定する問題であるので、信号の独立性を判定する基準が必要となる。独立性の定義は同時分布の密度関数が周辺分布の密度関数の積で表されることとする⁹⁾。

$$r(s) = r_1(s_1) \cdots r_n(s_n) \quad (6)$$

ここで、 $r(s)$ は原信号 s の同時確率密度関数であり、 $r_i(s_i)$ は原信号 s_i の確率密度関数である。信号は時間の添字を省略してある。入力信号 s は分解行列 $W = (w_1, \dots, w_n)^T = A^{-1}$ の線形変換であるとする。

$$s = Wx \quad (7)$$

x の密度関数を $p(x; W, r)$ とすると、 x が $[x, x+dx]$ の範囲にある確率 $p(x; W, r)dx$ と s が $[s, s+ds]$ の範囲にある確率 $r(s)ds$ とが等しいという仮定より、

$$p(x; W, r)dx = r(s)ds \quad (8)$$

となる。ここで、 dx や ds は x や s の空間の微小な体積要素とする。線形変換であるため、 $|W|$ を W の行列式として、式(7)から

$$ds = |W| dx \quad (9)$$

が得られるので、 x の密度関数 $p(x; W, r)$ は、

$$p(x; W, r) = |W| r(Wx) \quad (10)$$

と求まる。ここで、行列式は正の値と仮定する。

従って、観測データ系列 $x(1), \dots, x(T)$ に対する対数尤度関数は、

$$L(W) = \sum_{t=1}^T \log |W| r(Wx(t)) = T \log |W| + \sum_{t=1}^T \log r(Wx(t)) \quad (11)$$

となる。最尤推定量は尤度関数を最小にする W であるから、

$$\frac{dL(W)}{dW} = T \frac{d \log |W|}{dW} + \sum_{t=1}^T \frac{d \log r(Wx(t))}{dW} = 0 \quad (12)$$

を満たす解となる。ここで、式(12)の中央の辺の第1項は、

$$|W| = \sum_{i=1}^n W_{ij} \hat{w}_{ij} \quad (13)$$

より

$$\frac{d \log |W|}{dW} = \left(\frac{d \log |W|}{dW_{ij}} \right) = \frac{1}{|W|} \hat{w}_{ij} = (W^{-1})^T \quad (14)$$

となる。ここで、 W_{ij} は行列 W の第 i 行第 j 列の成分であり、 $\hat{w}_{ij}$ は W_{ij} の余因子である。また第2項は、

$$\frac{d \log r(Wx(t))}{dW} = \frac{d \log r(Wx(t))}{d(Wx(t))} \frac{d(Wx(t))}{dW} = -f(Wx(t)) x^T(t) \quad (15)$$

となる。ここで $f(\cdot)$ はスコア関数と呼ばれ、次式のように y_i の確率密度関数の対数を y_i で微分したベクトル関数である。 $f(y)$ の求め方については2.4の後半で述べる。

$$f(y) = (\phi_1(y_1), \dots, \phi_n(y_n))^T \quad \phi_i(y_i) = \frac{d \log r_i(y_i)}{dy_i} \quad (16)$$

よって式(12)は、次のように変換される。

$$\frac{dL(W)}{dW} = T(W^{-1})^T - \sum_{t=1}^T f(Wx(t)) x(t)^T = \sum_{t=1}^T \{I - f(y(t)) y(t)^T\} (W^{-1})^T \quad (17)$$

ここで、 $y(t)$ は独立成分の推定値で、式(5)に示すように $y(t) = Wx(t)$ である。分解行列 W は式(17)を用いて求めることとなる。

2.4 オンライン学習システム

分解行列 W の解法としては、観測データ $x(1), \dots, x(T)$ が得られたときに、

$$\sum_{t=1}^T \{I - f(y(t)) y(t)^T\} = 0 \quad (18)$$

という方程式を解くことにより推定量を構成するバッチアルゴリズムも提案されているが、本研究ではオンライン学習により求めるとする。更新式は次式のような。

$$W(t+1) = W(t) + \Delta W(t) \quad (19)$$

このとき、分解行列 W の増分 $\Delta W(t)$ は式(17)より、

$$\Delta W(t) = \eta(t) \{I - f(y(t)) y(t)^T\} (W(t)^{-1})^T \quad (20)$$

が考えられる。ここで $W(t)$ は時刻 t における推定量、 $\eta(t)$ は学習係数である。甘利ら¹⁴⁾は、行列の空間不変計量を考慮して $W(t)^T W(t)$ を右から掛けたものを用いた自然勾配法に基づく次式のようなオンラインアルゴリズムを提案している。

$$\Delta W(t) = \eta(t) \{I - f(y(t)) y(t)^T\} W(t) \quad (21)$$

問題となるのは関数 $\phi(y)$ の近似法であるが、実際問題では原信号 y_i もその確率密度関数 $r_i(y_i)$ も共に未知であるので、当然スコア関数 $\phi(y)$ の値も未知となる。仮に実際のスコア関数 $\phi(y)$ と異なる関数を採用しても、適当な関数を巧く選べばオンライン学習システムは収束して分解行列 W に到達できることが知られている。本研究では、代表的なスコア関数としてよく用いられている⁹⁾

$$\phi_i(y_i) = y_i^3 \quad (22)$$

をスコア関数として採用した。

2.5 アルゴリズムの統計的解釈

式(21)の統計的な意味は、分解行列 $W(t)$ により分解された $y(t)$ が完全に独立な成分 $s_i(t)$ となったときに $\{I - f(y(t)) y(t)^T\}$ が0になり、 $\Delta W(t)$ も0となり収束に至ることである。 $\{I - f(y(t)) y(t)^T\}$ は n 次の正方行列であり、 $y(t)$ が完全に独立な成分に分解されたとき、その非対角成分は以下のように0に収束する。

$$E[\phi(y_i) y_j(t)] = E[\phi(s_i) s_j(t)] = E[\phi(s_i)] E[s_j(t)] = 0 \quad (23)$$

先に述べたように、独立成分分析は信号の独立性という仮定のみに基づいた手法であるので、分離された信号にはスケールと順番の不定性が残る。そこで次式のようなスケールに関する制約を設ける。

$$E[\phi(s_i) s_i(t)] = 1 \quad (24)$$

すると対角成分についても、

$$E[1 - \phi(y_i) y_i(t)] = 1 - E[\phi(s_i) s_i(t)] = 0 \quad (25)$$

となり、独立な信号に分離された時点で収束に達することがわかる。しかし、上の制約では分解された全ての信号のスケールは0

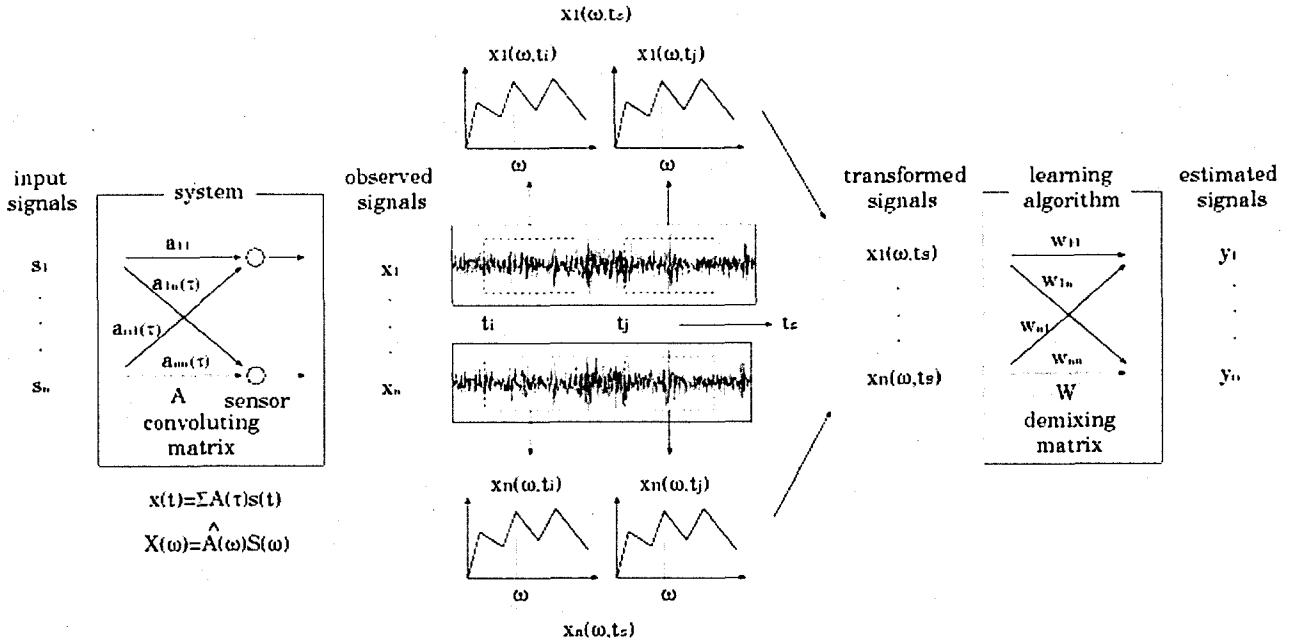


図-2 独立成分分析を用いた構造物の応答分離手法の概要

でない値となり、源信号が小さくなったり0になったりする期間でもアルゴリズムは上記の制約から信号のスケールを無理に拡大するので、数値的な不安定が生じる。よって、本研究では甘利ら¹⁴⁾の方法に従い、

$$\Delta W(t) = \eta(t) \{ \text{diag}(f(y(t))y(t)^T) - f(y(t))y(t)^T \} W(t) \quad (26)$$

によるオンライン学習を採用することとする。この更新式であれば観測信号の数に比べて源信号の数が少ない場合であっても理論上問題はなく、観測信号を独立成分の線形和として分離したときに、他の独立成分に比べて観測信号に占める割合の小さいものをノイズとみなせば良いことになる。具体的に述べると、式(21)を用いた場合は、式(24)のように独立成分のスケールに関する制約があるため、0である期間を持つ独立成分には不適であるが、式(21)の代わりに式(26)を用いれば、0である期間を持つ独立成分であっても問題がないということである。

3. 独立成分分析を用いた起振応答の抽出法

3.1 構造物の入力と応答の関係

本研究では小型起振器による微小な入力を想定しているので、構造物の規模が大きくなる程、微動応答が相対的に大きくなり無視できないものとなってくる。そこで、起振器と微動の影響が統計的に独立であると仮定し、独立成分分析によって全体の応答から起振応答の抽出を試みた。ここでは、外力を源信号 $s(t)$ 、加速度応答を観測信号 $x(t)$ とみなす。運動方程式は、

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = [f^1, \dots, f^n]s(t) \quad (27)$$

と表される。ここで f^i は i 番目の外力 $s_i(t)$ が作用する自由度を表すベクトルである。例えば $s_j(t)$ が起振力の場合、ベクトル f^j は起振器の

設置箇所に相当する成分だけが1となりそれ以外は0となるベクトルである。 $s_j(t)$ が床振動による微動の場合は

$$f^j = -Mu_j \quad (28)$$

であり、 u_j は微動 $s_j(t)$ の作用する方向に相当する成分だけが1となりそれ以外は0となるベクトルである。式(27)より、応答 $x(t)$ と外力 $s(t)$ の関係を時間領域で表現すると、次式のような行列 $A(t)$ による畳み込み積分によって関係付けられる。

$$x(t) = \int A(\tau)s(t-\tau)d\tau \quad (29)$$

上式を周波数領域で表現すると次式ようになる。

$$X(\omega) = \hat{A}(\omega)S(\omega) \quad (30)$$

ここで、 $X(\omega), S(\omega)$ はそれぞれ $x(t), s(t)$ のフーリエ振幅である。 $\hat{A}(\omega)$ は式(29)における $A(t)$ のフーリエ変換であり、次式のように表される。

$$\hat{A}(\omega) = \left[M - i\frac{C}{\omega} - \frac{K}{\omega^2} \right]^{-1} [f^1, \dots, f^n] \quad (31)$$

前節で示したカクテルパーティー効果の例では混合行列は時間軸に一定な行列であった。しかし、構造物の入力と応答の関係は時間軸に混合された畳み込み(式(29))であり、周波数領域で表現すると式(30)のように時間の項が消えてしまう。

3.2 独立成分分析への定式化

構造物への入力と応答の関係は畳み込みであるので、前節で述べた線形混合の独立成分分析の手法を直接適用することはできない。この項では、短時間フーリエ変換、すなわちフーリエ振幅を求める際の積分範囲を時間軸上で移動させることにより、畳み込み積分を線形混合の問題に置換し、信号を分離する手法について述べる。

式(29)で示した加速度応答 $x(t)$ および入力 $s(t)$ のフーリエ振幅 $X(\omega)$, $S(\omega)$ は次式で表される。

$$X(\omega) = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \exp(-i\omega t) dt \quad (32)$$

$$S(\omega) = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \exp(-i\omega t) dt \quad (33)$$

ここで、 T は計測時間を表す。本研究では、式(32),(33)のように全時間領域 $[0, T]$ に対してフーリエ振幅を求めるのではなく、

$$\hat{x}(\omega, t_s) = \frac{2}{t_w} \int_{t_s}^{t_s+t_w} x(t) \cdot \exp(-i\omega(t-t_s)) dt \quad (34)$$

$$\hat{s}(\omega, t_s) = \frac{2}{t_w} \int_{t_s}^{t_s+t_w} s(t) \cdot \exp(-i\omega(t-t_s)) dt \quad (35)$$

のように、時刻 t_s から継続時間 t_w の範囲 $[t_s, t_s+t_w]$ に対して求めるものとする。開始時刻 t_s を変えることで、式(35),(36)においては ω の関数で時間不変であったフーリエ振幅 $X(\omega)$, $S(\omega)$ が、 ω および開始時刻 t_s の関数 $\hat{x}(\omega, t_s)$, $\hat{s}(\omega, t_s)$ となる。これはスペクトログラムと呼ばれる¹⁹⁾。

入力と応答の関係(式(30))は、 $\hat{x}(\omega, t_s)$ と $\hat{s}(\omega, t_s)$ の総時間ステップを小さくしすぎない程度に t_w が十分に大きければ、式(32),(33),(34),(35)より近似的に、

$$\hat{x}(\omega, t_s) \cong \hat{A}(\omega) \hat{s}(\omega, t_s) \quad (36)$$

と表される。 ω を一定とみなすと $\hat{A}(\omega)$ は一定値、 $\hat{x}(\omega, t_s)$, $\hat{s}(\omega, t_s)$ は積分の開始時刻 t_s のみの関数となり、上式は畳み込み無しの線形混合とみなせる。

起振振動数における応答のフーリエ振幅を抽出する場合は、 ω を起振振動数とすればよいことになる。

3.3 起振応答抽出のフロー

応答から起振応答を抽出する手順は以下の通りである。

(1) 加速度応答 $x(t)$ の計測

構造物の複数の地点に計測器を設置し、同時に加速度応答 $x(t)$ を計測する。ここでは、独立成分の数を上回る数の計測を行わなければならない。例えば、建築構造物を想定し、独立な入力として起振力と起振方向の微動の計2成分を想定し、他の影響は無視できるとする場合、独立成分は起振力と床振動の2成分となるため、最低2地点において加速度応答を計測すればよい。

(2) 加速度応答 $x(t)$ からスペクトログラム $\hat{x}(\omega, t_s)$ の算出

観測された加速度応答 $x(t)$ から、積分区間 $[t_s, t_s+t_w]$ 毎に、起振振動数 ω におけるフーリエ振幅を算出し、積分開始時刻 t_s の関数 $\hat{x}(\omega, t_s)$ とする。積分開始時刻 t_s の範囲は、 $0 \leq t_s \leq T-t_w$ となる。

(3) スペクトログラム $\hat{x}(\omega, t_s)$ に対して独立成分分析を適用

加速度応答 $x(t)$ と入力 $s(t)$ のスペクトログラム $\hat{x}(\omega, t_s)$, $\hat{s}(\omega, t_s)$ は、 ω を起振振動数に固定すると、式(36)のようなブライント音源分離の問題とみなせる。スペクトログラムを前節で述べたオンライン学習に適用し、分解行列 W と独立成分 $y(t_s)$ を得る。

$$y(t_s) = W \hat{x}(\omega, t_s) \quad (40)$$

(4) 得られた独立成分 $y(t_s)$ のうち起振力による成分 $y_i(t_s)$ を選択

独立成分分析により信号の分離が成功し、 $\hat{x}(\omega, t_s)$ が起振力と起振力以外の独立な成分に分解された場合、 $y_i(t_s)$ と $\hat{s}(\omega, t_s)$ はスケールと順番だけが異なる。得られた独立成分 $y_i(t_s)$ のうち、どの成分が起振器によるものであるかは自明である。なぜなら、式(35)において

$$s_j(t) = \cos \omega t \quad (38)$$

とすると、

$$\hat{s}(\omega, t_s) = \frac{2}{t_w} \int_{t_s}^{t_s+t_w} \cos \omega t \cdot \exp(-i\omega(t-t_s)) dt = \cos \omega t_s + i \sin \omega t_s \quad (39)$$

$$(0 \leq t_s, 0 \leq t_w \leq T-t_s)$$

となる為、分離された波形のうち起振振動数と等しい振動数を持つ調和成分が起振成分となるからである。

(5) $\hat{x}(\omega, t_s)$ に占める起振応答成分の算出

分解行列 W の逆行列 W^{-1} および独立成分 $y_i(t_s)$ を用いて、 $\hat{x}(\omega, t_s)$ の第 i 成分は次式のように表される。

$$\hat{x}_i(\omega, t_s) = \sum_{j=1}^n W_{ij}^{-1} y_j(t_s) \quad (40)$$

ここで、 n は外力の数である。分離された波形の形状から、第 i 成分が起振成分と分かれば、 $\hat{x}(\omega, t_s)$ の第 i 成分のうち起振による応答部分 $\hat{x}_{i,j}(\omega, t_s)$ は次式のように表せる。

$$\hat{x}_{i,j}(\omega, t_s) = W_{ij}^{-1} y_j(t_s) \quad (41)$$

ここで、スペクトログラムの第 i 成分 $\hat{x}_i(\omega, t_s)$ のうち、起振器による応答部分を $\hat{x}_{i,j}(\omega, t_s)$ と定義している。

(6) 起振応答のフーリエ振幅の算出

積分時間間隔 t_w を十分に長くすると、次式の仮定が成り立つ。

$$X(\omega) \cong \hat{x}(\omega, 0) \quad (42)$$

上式成立の根拠は、左辺は積分区間 $[0, T]$ における $x(t)$ のフーリエ振幅であり、右辺は積分区間 $[0, t_w]$ における $x(t)$ のフーリエ振幅であるので、 t_w を十分に長くすることで両辺を等しいとみなせるためである。よって、フーリエ振幅の第 i 成分に占める起振応答 $X_{i,j}(\omega)$ は次式のようになる。

$$X_{i,j}(\omega) = x_{i,j}(\omega, 0) \quad (43)$$

ここで、フーリエ振幅の第 i 成分 $X_i(\omega)$ のうち、起振器による応答部分を $X_{i,j}(\omega)$ と定義している。

4. 数値解析による検証

4.1 2層フレームモデル

理論の検証のために、2層フレームモデルを対象として数値解析を行った。概念図を図-3に示す。高さ6m(各層高さ3m)、幅5mである。節点数は6、要素数は6であり、節点・要素番号も併せて図-3に示す。起振点を節点3とする。柱の材質はヤング率 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、質量が $7.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の鋼であり、断面積、断面2次モ

ーメントはそれぞれ、 $4.04 \times 10^2 \text{ m}^2$, $2.86 \times 10^4 \text{ m}^4$ である。奥行き方向に柱は2本あるとし、2本の柱を1つの要素でモデル化している。基礎はヤング率 $2.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、単位体積重量 2.6 t/m^3 、厚さ 30 cm 、奥行き 4 m のコンクリートスラブとし、微動は地表面加速度として入力する。本研究では梁要素を用いて解析を行った。減衰マトリックスは、1次および2次モードに対する減衰定数を共に2%とするレーリー減衰によって決定した。

本研究では、構造物が起振器による調和外力と床振動の2つの外力を受ける状況を想定し、これら2つの外力の統計的独立性だけを仮定し、起振応答の抽出を試みる。源信号に相当する外力が2種類であるので、観測信号に相当する加速度応答は2種類あればよく、ここでは節点2と節点6の2計測点での加速度応答を用いる。

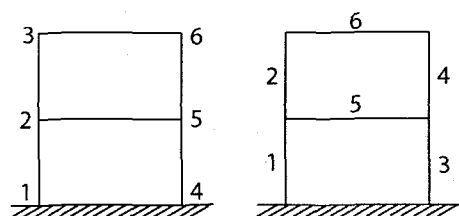


図-3 2層フレームモデル

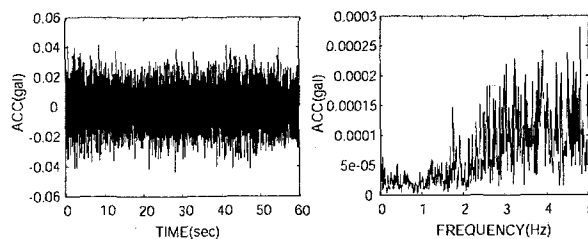
4.2 解析条件

まず、構造系の応答計算を行い、観測信号（加速度応答）を作成する。ここでは、提案手法の有用性を証明するとともに、起振応答に対する微動の応答がどの程度までなら提案手法によって起振応答が抽出できるかを検証することを目的とする。

本研究では、偏心荷重を取り付けた円盤をモーターで回転させて遠心力を発生させることにより加振するタイプの起振器を想定した。起振力として、 0.987 N , 0.395 N の2種類を想定した。これらはそれぞれ、偏心荷重が 500 g および 200 g で、偏心距離 10 cm の起振器を 1 Hz の振動数で起振したときに発生する起振力に相当する。これらをそれぞれ解析ケース1,2と呼ぶこととする（表-1）。起振外力は 1 Hz の余弦波とした。起振振動数として 1 Hz を選んだ理由は、構造物との共振を避けるため、1次モードの固有振動数より小さい値として採用した。床振動の入力としては、実際に計測した加速度時刻歴を用いた。図-4に加速度波形およびフーリエスペクトルを示す。入力波形の時間間隔は 0.005 秒 であり、数値解析も計算時間間隔を 0.005 秒 とした。計測時間は $T=60 \text{ sec}$ 、式(34),(35)における積分区間 $[t_s, t_s + t_w]$ の幅は十分に大きな値として $t_w=50 \text{ sec}$ とした。これより、積分区間の開始時刻 t_s の範囲は $0 \leq t_s \leq 10$ となり、独立成分分析で用いる波形 $\hat{x}(\omega, t_s)$ の継続時間は 10 sec となる。

表-1 解析ケース

ケース	偏心荷重	偏心距離	起振力(起振振動数 1Hz)
1	500g	5cm	0.987N
2	200g	5cm	0.395N



(a)加速度波形 (b)フーリエスペクトル
図-4 床の加速度

4.3 解析結果

それぞれの解析ケースに対する、起振器による応答と微動による応答とが重ね合わさった全体応答を図-5,9の(a)に示す。また、起振器だけによる加速度応答を図-5,9の(b)に示す。入力が余弦波であるため、波形の前半部分に固有モードの減衰自由振動波形が現れている。

次に、これらのケースに対して独立成分分析を適用し応答の分離を試みる。図-6,10の(a)と(b)はそれぞれ、図-5,9(a)に示した2つの加速度波形 $x(t)$ を式(34)に代入することにより得られたスペクトログラムの実数部および虚数部である。虚数部では、全体応答のスペクトログラムは起振力だけによるスペクトログラムにほぼ一致している。一方、実数部においては微動の存在による応答が見て取れる。表-2に起振応答および全体応答のフーリエ振幅の値を記す。特に、ケース2の節点6のフーリエ振幅の虚数部の誤差は約21.7%と非常に大きな値を示している。起振器を用いた強制加振実験では、微動の存在はノイズとみなされる。損傷前後の僅かな振動特性の変化から構造物の損傷状態を推定する損傷同定問題において、このようなノイズの影響は致命的である。

次に、図-6,10に示された全体応答のスペクトログラムを基に独立成分分析によって分離された、起振応答のスペクトログラムの実数部と虚数部を、図-7,11(a)(b)に示す。抽出された実数部の波形は真の波形と非常に良い精度で一致していることがわかる。虚数部に関しては、正弦波の山の部分にノイズが見られるが、全体的にはよい一致を示している。独立成分分析により抽出された起振器によるフーリエ振幅の $t_s=0$ の値を求め、式(42)に代入することにより得られたフーリエ振幅を表-2に示す。全体応答と比較して誤差がかなり小さくなっており、独立成分分析の効果が現れている。ケース1の節点6の虚数部、ケース2の節点2の実数部、節点6の虚数部の値など、微動の影響の非常に大きい場合でも、本手法により誤差が約10分の1以下になっていることがわかる。

図-8,12(a)(b)に、抽出された微動による応答のスペクトログラムを、真値を図-8(c)(d)示す。実数部においては非常に高精度で一致しているが、虚数部は振幅が非常に小さく、真の波形とかなりずれている。この差は、起振応答のスペクトログラムに関しては先程述べた図-7,11(b)に示されたノイズに起因する。起振応答のスペクトログラムに対して微動のスペクトログラムが1オーダー程小さいので微動では誤差が大きく感じられるが、起振応答に対する誤差としては小さいものである。

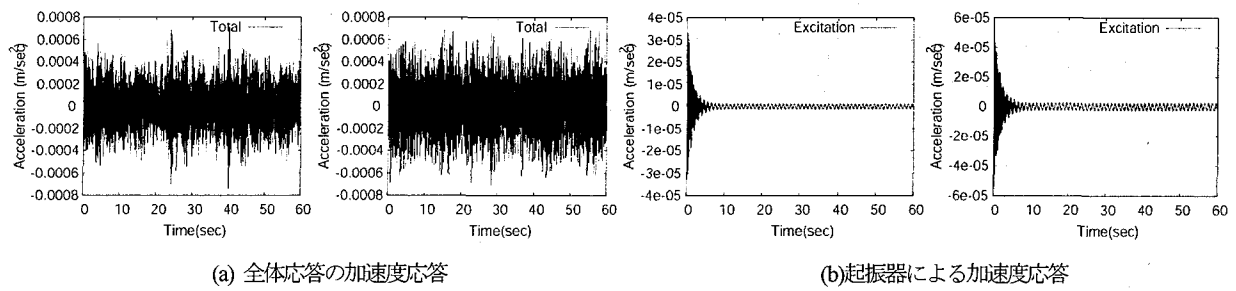


図-5 ケース1の加速度応答 (左: 節点2, 右: 節点6)

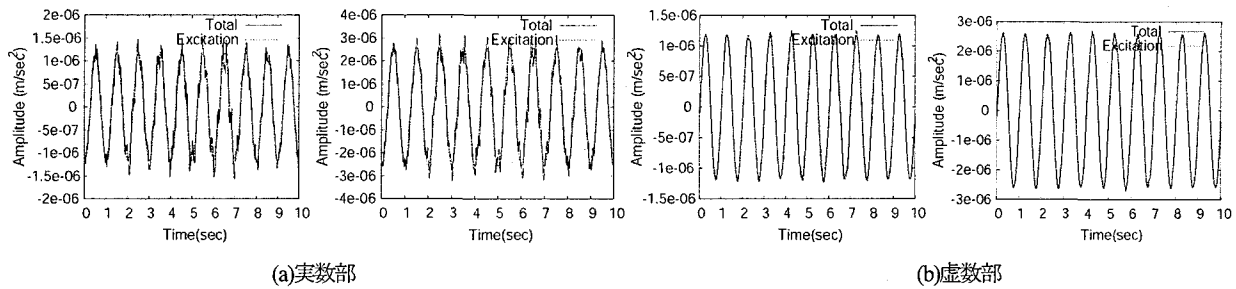


図-6 ケース1のスペクトログラム (左: 節点2, 右: 節点6)

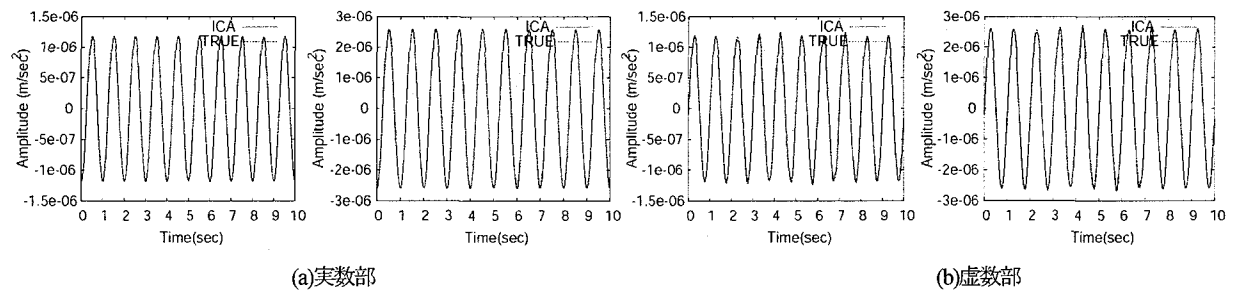


図-7 抽出されたケース1の起振応答のスペクトログラムと真値の比較 (左: 節点2, 右: 節点6)

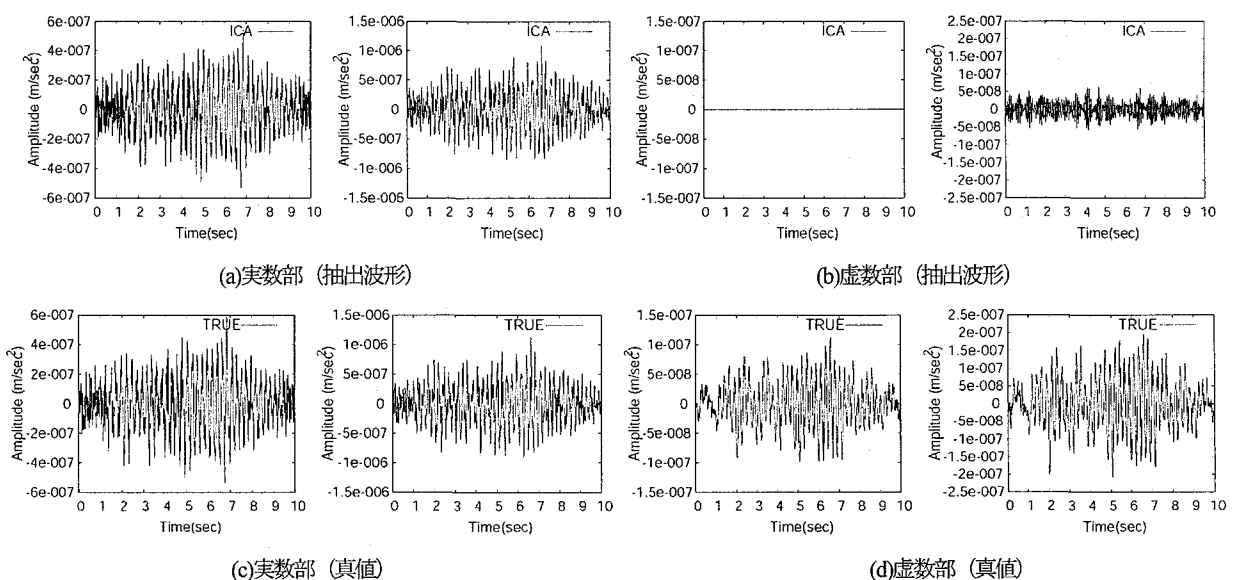


図-8 抽出されたケース1の微動応答のスペクトログラムと真値の比較 (左: 節点2, 右: 節点6)

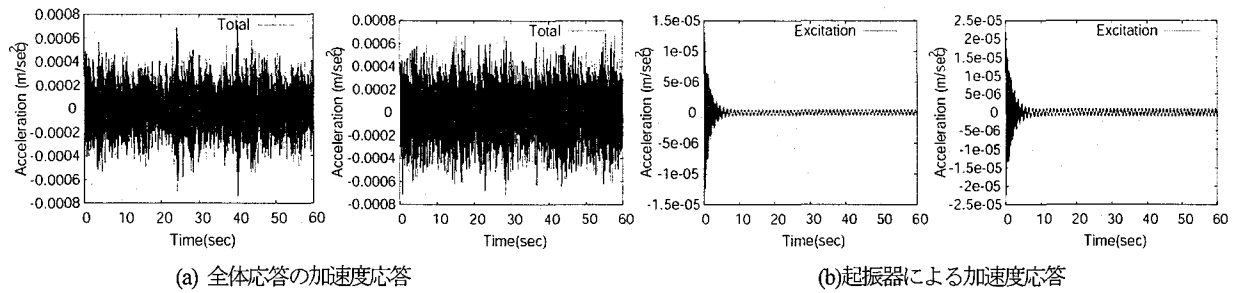


図-9 ケース2の加速度応答 (左: 節点2, 右: 節点6)

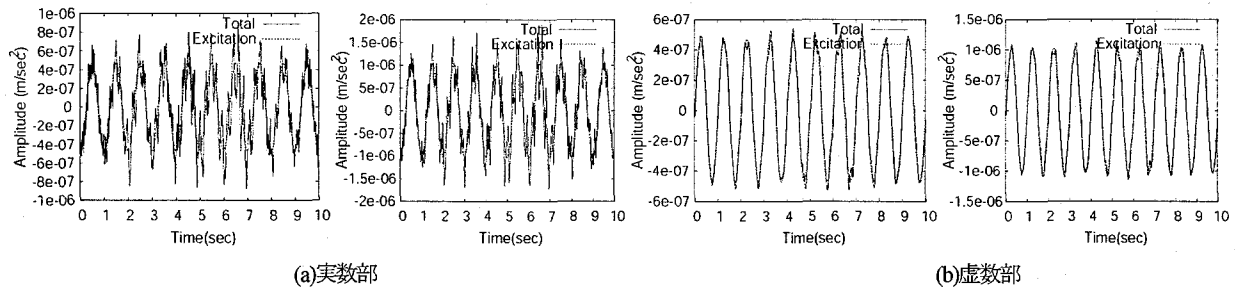


図-10 ケース2のスペクトログラム (左: 節点2, 右: 節点6)

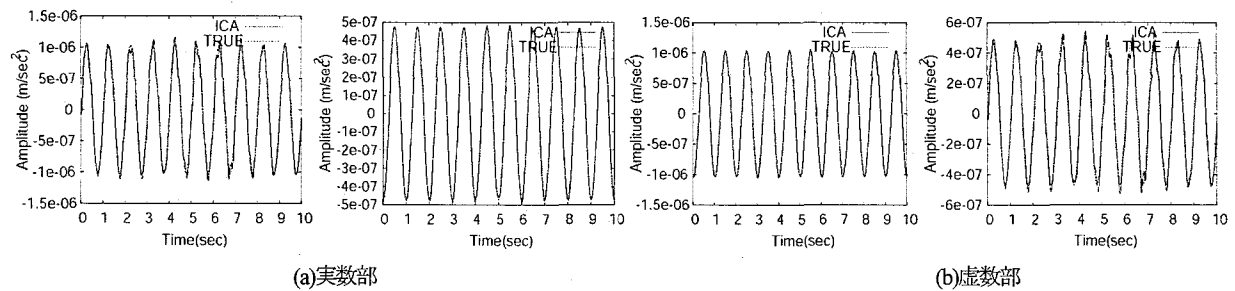


図-11 抽出されたケース2の起振応答のスペクトログラムと真値の比較 (左: 節点2, 右: 節点6)

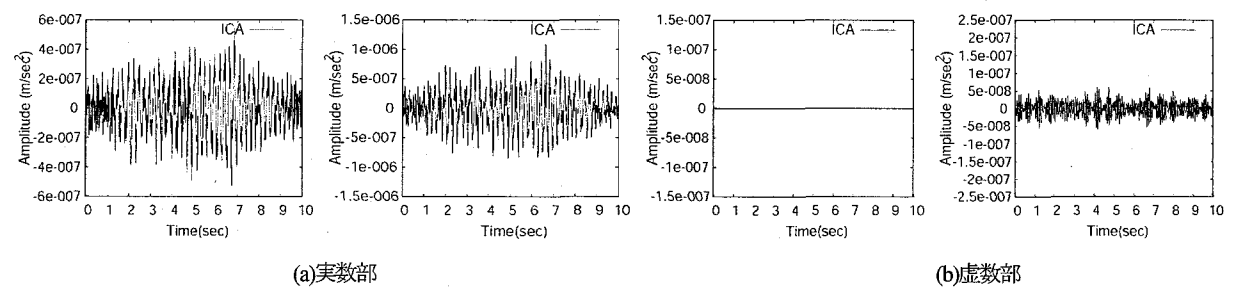


図-12 抽出されたケース2の微動応答のスペクトログラム (左: 節点2, 右: 節点6)

表-2 フーリエ係数の比較(m/sec²)

			真の応答	全体応答(誤差(%))	抽出された応答(誤差(%))
ケース1	節点2	実数部	-1.1747×10^{-6}	-1.1206×10^{-6} (4.61)	-1.1815×10^{-6} (0.58)
		虚数部	-9.4073×10^{-8}	-9.3015×10^{-8} (1.12)	-9.3015×10^{-8} (1.03)
	節点6	実数部	-2.5715×10^{-6}	-2.5474×10^{-6} (0.94)	-2.5480×10^{-6} (0.48)
		虚数部	-2.0346×10^{-7}	-1.8659×10^{-7} (8.29)	-0.20174×10^{-7} (0.85)
ケース2	節点2	実数部	-4.6990×10^{-7}	-4.1618×10^{-7} (11.4)	-4.7667×10^{-7} (1.44)
		虚数部	-3.7629×10^{-8}	-3.6571×10^{-8} (2.81)	-3.6571×10^{-8} (2.81)
	節点6	実数部	-1.0286×10^{-6}	-1.0054×10^{-6} (2.26)	-1.0410×10^{-6} (1.21)
		虚数部	-8.1382×10^{-8}	-6.4521×10^{-8} (20.7)	-7.9600×10^{-8} (2.19)

5. 損傷同定への適用

本研究では、起振器を用いて構造物を加振するにあたって遭遇する加振力の弱さという問題を解決するために、加振力を大きくするのではなく、データ処理手法によって外乱に埋もれた起振応答を抽出しようというアプローチを取った。逆解析において、データに含まれるノイズは同定精度を悪化させるが、特に、損傷前後のわずかな応答の変化から構造物の損傷を同定する場合、このような大きなノイズは致命的である。ここでは、2章で提案した独立成分分析を用いた前処理によって得られた起振応答を用いて損傷同定を行う。

前章で用いたものと同じ2層ラーメンを対象とし、床振動の存在下で微小な起振力で構造物を加振した場合の損傷同定の数値シミュレーション結果を示す。

5.1 起振器の利用を想定した損傷同定手法

まず初めに、起振器による調和外力の入力を想定した損傷同定手法⁷⁾について述べる。

(1) 損傷前の構造物の応答

減衰系の構造物の損傷同定方程式を誘導する。損傷前の運動方程式は以下の通りである。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \cos \omega t \quad (44)$$

ここで、 M , C , K はそれぞれ損傷前の質量、減衰、剛性マトリクスであり、 x , f はそれぞれ変位および外力ベクトルである。外力は起振振動数 ω の調和外力と仮定する。

変位応答のフーリエ振幅 $X(\omega)$ は次式の通りである。

$$X(\omega) = H(\omega) f \quad H(\omega) = [-\omega^2 M + i\omega C + K]^{-1} \quad (45)$$

ここに、 $H(\omega)$ は伝達関数である。

(2) 損傷のモデル化

本研究では、剛性が低下した要素および減衰が増加した要素を損傷箇所とみなし、その減少および増加割合を損傷の指標として用いる。また、構造物の質量は損傷前後で不変とする。

構造物全体系の剛性・減衰マトリクスは、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。

$$K = \sum_{e=1}^n K^e \quad C = \sum_{e=1}^n C^e \quad (46)$$

ここで、 n は梁要素の総数であり、 K^e , C^e はそれぞれ e 番目の梁要素の剛性・減衰マトリクスである。損傷により e 番目の梁要素の剛性マトリクスが一律に δK_e (無次元) の割合で減少し、減衰マトリクスが一律に δC_e (無次元) の割合で増加したとすると、 e 番目の梁要素の剛性マトリクスの減少分 δK^e および減衰マトリクスの増分 δC^e は、

$$\delta K^e = \delta k_e K^e \quad \delta C^e = \delta c_e C^e \quad (47)$$

と表される。よって、全体剛性マトリクスおよび全体

減衰マトリクスの変分は次式となる。

$$\delta K = \sum_{e=1}^n \delta k_e K^e \quad \delta C = \sum_{e=1}^n \delta c_e C^e \quad (48)$$

δk_e および δc_e が同定の対象となるパラメータである。

(3) 損傷後の構造物の応答

損傷により剛性マトリクスが δK 低下、減衰マトリクスが δC 増加し、その結果変位が δx 増加すると、損傷後の運動方程式は次式のようになる。

$$M(\ddot{x} + \delta \ddot{x}) + (C + \delta C)(\dot{x} + \delta \dot{x}) + (K - \delta K)(x + \delta x) = f \cos \omega t \quad (49)$$

式(44),(48)を式(49)に代入し、さらに2次以上の微小項を無視して整理すると、変位の増分 δx に関する方程式となる。

$$M\delta \ddot{x} + C\delta \dot{x} + K\delta x = \sum_{e=1}^n \delta k_e K^e x - \sum_{e=1}^n \delta c_e C^e \dot{x} \quad (50)$$

式(45)を式(49)に代入すると、変位増分のフーリエ振幅 $dX(\omega)$ が得られる。

$$dX(\omega) = \sum_{e=1}^n \delta k_e H(\omega) K^e H(\omega) f - i\omega \sum_{e=1}^n \delta c_e H(\omega) C^e H(\omega) f \quad (51)$$

式(45)に示した損傷前の変位 $X(\omega)$ に、上式で求められた損傷による変位増分 $dX(\omega)$ を加えることにより、損傷後の応答 $X'(\omega)$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned} X'(\omega) &= X(\omega) + dX(\omega) \\ &= H(\omega) f + \sum_{e=1}^n \delta k_e H(\omega) K^e H(\omega) f - i\omega \sum_{e=1}^n \delta c_e H(\omega) C^e H(\omega) f \end{aligned} \quad (52)$$

(4) 損傷同定方程式の構築

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の実数部 $a_R(i, j, \omega)$ および虚数部 $a_I(i, j, \omega)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} a(i, j, \omega) &= -\omega^2 H_{ij}(\omega) \\ &= -\omega^2 \sum_{e=1}^n \delta k_e [H(\omega) K^e H(\omega)]_{ij} + i\omega^3 \sum_{e=1}^n \delta c_e [H(\omega) C^e H(\omega)]_{ij} \end{aligned} \quad (53)$$

上式において、 $a(i, j, \omega)$ は、計測点 i 、起振点 j 、および起振振動数 ω の関数である。

$H_{ij}(\omega)$ は損傷前の構造物のパラメータ M , C , K および起振振動数 ω から求まる既知の値である。 $a(i, j, \omega)$ は損傷後の周波数応答関数であり、計測により得られる。

一方、 $[H(\omega) K^e H(\omega)]_{ij}$, $[H(\omega) C^e H(\omega)]_{ij}$ は M , C , K , ω 、および未知のパラメータ δc_e , δk_e から決まる値である。

式(52)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。

$$\begin{aligned} -\omega^2 \sum_{e=1}^n \delta k_e [H(\omega) K^e H(\omega)]_{ij} + i\omega^3 \sum_{e=1}^n \delta c_e [H(\omega) C^e H(\omega)]_{ij} \\ = a(i, j, \omega) + \omega^2 H_{ij}(\omega) \end{aligned} \quad (54)$$

上式は、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。よって、 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、式(54)

が m 個でき、実数部と虚数部に分けることで、未知数 $2n$ 個に対する $2m$ 個の連立方程式が成立する。

$$A\{\delta k_1, \dots, \delta k_n, \delta c_1, \dots, \delta c_n\}^T = b \quad (55)$$

本研究では上式を損傷同定方程式と呼ぶこととする。

式(55)は高次の微小項を無視するという仮定の上に成り立っているため、収束計算が必要となる。具体的には、式(55)を解いて得られた各要素の剛性低下率、減衰増加率 $\{\delta k_1, \dots, \delta k_n, \delta c_1, \dots, \delta c_n\}^T$ を元に M, C, K を更新し、式(55)の係数行列 A および b を更新する。解が収束した時点で計算を終了する。

損傷同定手法は、以下の2つのデータを必要とする。

1. 損傷前の構造物の構造パラメータ (M, C, K)
2. 損傷後の構造物から求めた FRF ($a(i, j, \omega)$)

損傷同定方程式を解いた後、同定結果から損傷の可能性がないと判断された要素を損傷同定の候補から排除し、候補に残った要素だけを対象として損傷同定方程式を再構築し、再度損傷同定方程式を解くといった繰り返すにより、段階的に損傷要素を絞り込んでいくこととする。本研究では、損傷の有無の判断において、同定された剛性低下率と減衰増加率が共に閾値0.002を下回ればその要素は損傷していないと判断した¹⁶⁾。

5.2 2層フレーム構造物を対象とした損傷同定

2層フレームの損傷モデルとして、図-13に示す剛性低下率と減衰増加率を有する損傷モデル1と、図-14に示す剛性低下率と減衰増加率を有する損傷モデル2を想定した。横軸は要素番号、縦軸は各要素の剛性低下率および減衰の増加率を表す無次元量である。損傷モデル1では、要素2の剛性が10%の減少し、減衰が10%増加しており、損傷モデル2では要素2の剛性が5%減少し、減衰が5%増加することを表している。

ここでは、損傷後の2層フレームに対して前章と同じ起振実験を想定し、起振応答の抽出を試みた。計測点は、前章で用いた要素2と要素6の組み合わせの他に、要素3と要素5の組み合わせに対しても同様の作業を行った。6部材に対して、4点における計測値を用いて同定することになる。

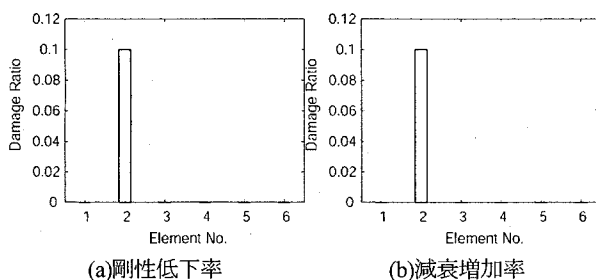


図-13 損傷モデル1

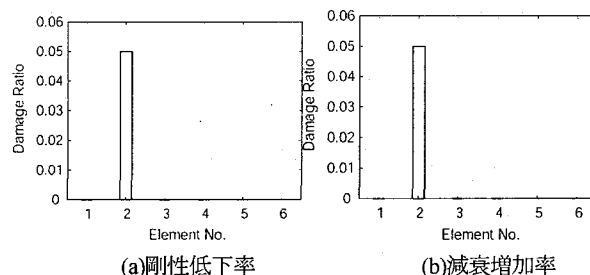


図-14 損傷モデル2

5.3 同定結果

次に、抽出された起振応答の周波数応答関数を用いて、5.1で述べた手法により損傷の同定、すなわち剛性低下率と減衰増加率の推定を試みた。

比較のため、独立成分分析による前処理を行わずに、微動応答の重ね合わされた全体応答を用いて同定を試みたが、いずれのケースも、損傷同定方程式の解が発散してしまい解を得ることができなかった。

(1) ケース1

ケース1における、損傷モデル1,2それぞれの同定結果を図-15, 16に示す。

損傷モデル1（剛性低下率、減衰増加率ともに10%）では、2回目の計算時に損傷要素が要素1と2に絞り込まれている。候補に残った要素1と2を用いて3回の同定を行ったが、無損傷要素1は最後まで候補から消えることはなかった。同定結果は、要素2の剛性低下率が約15%、減衰増加率が約12%となっており、共に過大評価となっている。無損傷要素1においても、約3%の剛性低下率、約4%の減衰増加率となっている。無損傷要素1は損傷要素2と隣接している要素である。

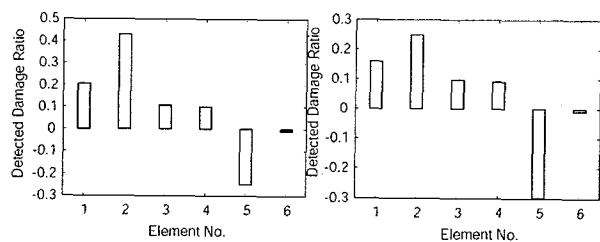
損傷モデル2（剛性低下率、減衰増加率ともに5%）においても、損傷モデル1と同様に、3回目の計算時に無損傷要素1と損傷要素2が候補に残った。要素2の剛性低下率、減衰増加率の同定結果はともに、約8%となり、過大評価となった。

これら要素2の過大評価と無損傷要素1の誤判定の理由としては、同定に用いたデータ数が十分でなかったことと、独立成分分析によって取り除くことのできなかった微動の影響と考えられる。しかしいずれの損傷モデルにおいても、本研究の提案手法である独立成分分析を適用しない場合は、損傷同定が不可能であったのに対し、独立成分分析により微動を除去することにより、実損傷要素2の特定には成功しており、かつ値も正解値と大きく違わないため、本手法の有効性を示している。

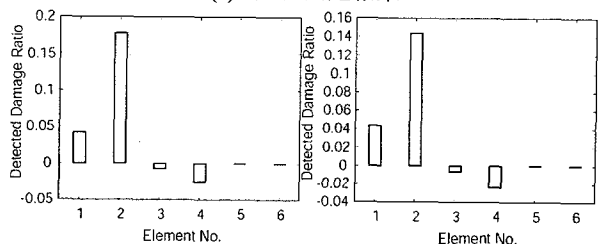
(2) ケース2

起振力がさらに小さいケース2の同定結果を、損傷モデル1, 2それぞれについて図-17, 18に示す。

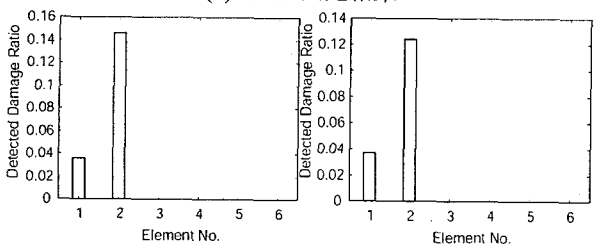
損傷モデル1（剛性低下率、減衰増加率ともに10%）では、3回の計算で最終解が得られるが、実際に損傷している要素2以外に無損傷要素6も損傷の可能性のある候補として残った。この無損傷要素6は損傷要素2と隣接している要素である。剛性低下率、減衰増加率ともに、損傷要素2の同定値はやや過小評価の約6%、無損傷要素6が約2%となっている。



(a)1回目同定結果

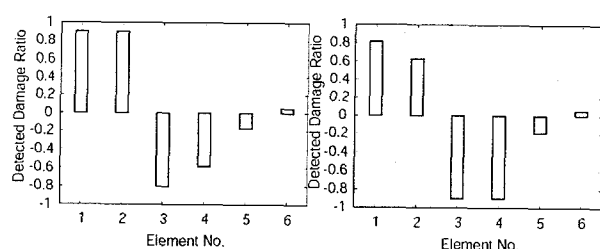


(b)2回目同定結果

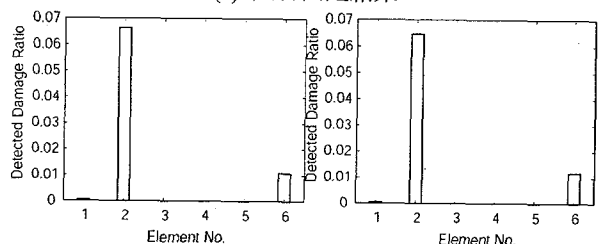


(c)3回目同定結果

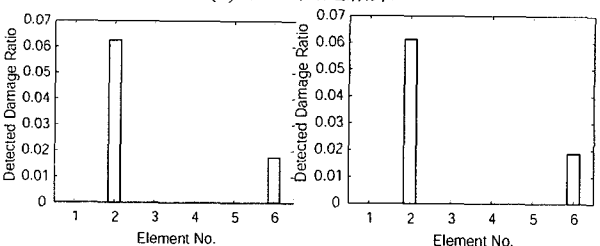
図-15 ケース1・損傷モデル1の同定結果
(左：剛性低下率，右：減衰増加率)



(a)1回目同定結果

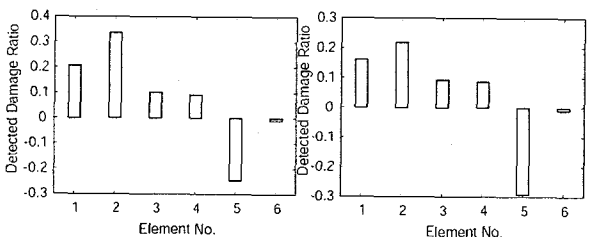


(b)2回目同定結果

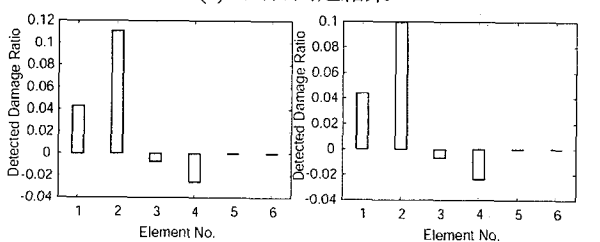


(c)3回目同定結果

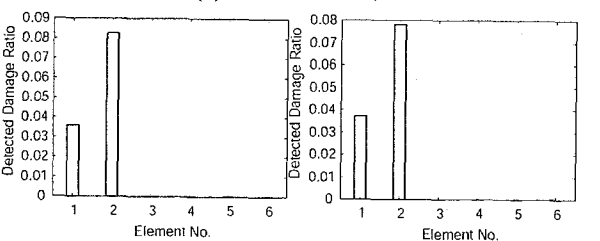
図-17 ケース2・損傷モデル1の同定結果
(左：剛性低下率，右：減衰増加率)



(a)1回目同定結果

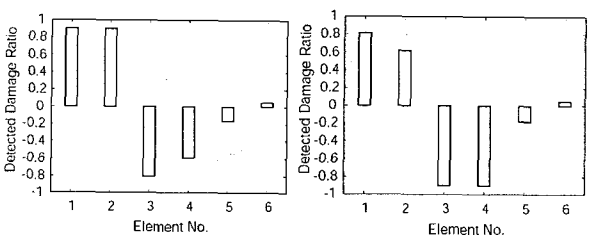


(b)2回目同定結果

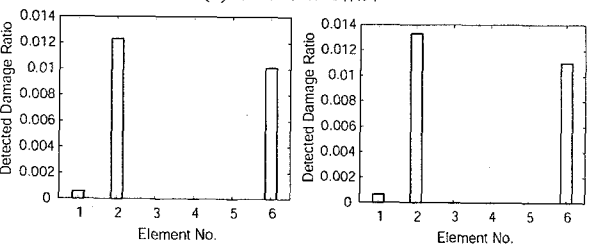


(c)3回目同定結果

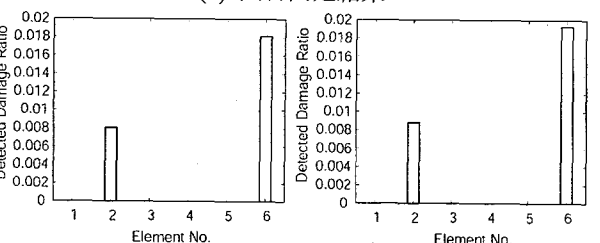
図-16 ケース1・損傷モデル2の同定結果
(左：剛性低下率，右：減衰増加率)



(a)1回目同定結果



(b)2回目同定結果



(c)3回目同定結果

図-18 ケース2・損傷モデル2の同定結果
(左：剛性低下率，右：減衰増加率)

損傷モデル2（剛性低下率，減衰増加率ともに5%）では，損傷モデル1と同様に3回の計算で最終解が得られるが，実際に損傷している要素2以外に無損傷要素6も損傷候補に残っており，損傷要素2の剛性低下率・減衰増加率が約0.8%と大きく過小評価であるのに対し，要素6の同定結果は，剛性低下率・減衰増加率ともに，要素2よりも2倍以上大きい値となっている。これにより，起振力が小さく微動の影響が相対的に大きく，損傷レベル（剛性低下率・減衰増加率）が小さい本ケースでは，同定が難しいことが分かる。

以上により，本研究では，4通りの損傷同定問題を解いたが，起振力が非常に小さく，損傷レベルが小さい1つのケースでは精度良い同定が出来なかったが，それ以外の3ケースにおいては良好な精度で剛性低下率・減衰増加率の同定が可能となった。本研究で想定している起振器は，遠心力を利用するものであるため，起振力は回転数の自乗に比例する。よって，回転数を増やすなどして，起振力のレベルを上げれば，本手法が有効に働かなかったケース2，損傷モデル2においても精度が向上すると考えられる，

6. 結論

本研究では，起振力による応答以外に微動の応答を含んだデータから，起振力と微動の統計的独立性のみを仮定して起振応答を抽出する手法を提案した。独立成分分析は，本来線形に混合された信号の分離手法であるのに対し，構造物の応答は入力とシステムの応答関数のコンボリューションである。そこで本研究では，短時間フーリエ変換により時間周波数領域に変換し，周波数を固定とみなすことで応答のスペクトログラムを線形混合の形に帰着させ，起振応答の抽出を試みた。微動として床振動を想定し，2層フレーム構造物のモデルに適用した結果，非常に小さな起振力であっても，本手法を適用することによって真の起振応答にほぼ一致するフーリエ振幅が得られることがわかった。さらに，この応答抽出手法を損傷同定問題に適用した。微動の存在下において非常に微小な起振力で構造物を加振するという不利な状況下にあっても，独立成分分析を援用した前処理によって抽出された起振応答を用いることにより，良好な精度で剛性低下率および減衰増加率を同定できる可能性があることを示した。

ここで提案する独立成分分析による起振応答の抽出と損傷同定の一連の手法を用いれば，コスト・労力ともにかかる大規模な起振器を用いなくとも，小型の起振器によって損傷同定が可能となる。また，交通量が多く微動レベルの大きな状況にあっても同定が可能となるため，実験時間帯を選ばず，交通規制も行わず実験が可能となる。可搬型小型起振器による簡易な計測と豊富なデータを用いた損傷同定手法に，前処理としての独立成分分析による波形処理を融合した本手法は，ヘルスモニタリングの有力な一手段となりうるものと考えられる。

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. and Sakata Y.: Nondestructive evaluation of defects in concrete by quantitative acoustic emission and ultrasonics, *Ultrasonics*, Vol.36, pp.187-195, 1998.
- 3) Hearn G. and Testa G.R.: Modal analysis for damage detection in structures. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.117, pp.3042-3063, 1991.
- 4) Kaouk M. and Zimmerman D.C.: Structural damage assessment using generalized minimum rank perturbation theory. *AIAA Journal*, Vol.32, pp. 836-842, 1994.
- 5) Hassiotis S. and Jeong G.D.: Identification of stiffness reduction using natural frequencies. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.121, pp.1106-1113. 1995.
- 6) Xia, Y., Hao, H., Brownjohn, J.M.W. and Xia, P.: Damage identification of structures with uncertain frequency and mode shape data, *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, Vol.31, pp. 1053-1066, 2002
- 7) 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，構造物の安全性-信頼性 JCOSAR論文集，Vol:5, pp.617-624, 2003
- 8) 甘利俊一，村田昇：独立成分分析-多変量解析の新しい手法-，サイエンス社，2002
- 9) Bell A.J. and Sejnowski T.J.: A information maximization approach to blind separation and blind deconvolution, *Neural Computation*, pp.1129-1159, 1995
- 10) 梅山伸二：独立成分分析を用いたばけ過程不明のばけ画像の復元について，電気情報通信学会論文誌，pp.677-685, 2000
- 11) Madhow U.: Blind adaptive interference suppression for direct-sequence CDMA, *Proceedings of the IDDD*, 86 (10), pp.2049-2069, 1998
- 12) Vigario R., Jousmaki V., Hamalainen M, Hari R. and Iha E.: Independent component analysis for identification of artifacts in magnetoencephalographic recordings, *Advances in Neural Information Processing Systems 10*, Cambridge: MIT Press, pp.229-235, 1998.
- 13) 川鍋一晃，村田昇：独立成分解析のセミパラメトリック推定と情報幾何，第三回情報幾何ワークショップ，1999.
- 14) Amari S.: Natural gradient works efficiently in learning., *Neural Computation*, pp.251-276, 1998
- 15) L.コーエン：時間一周波数解析，朝倉書店，1998.
- 16) Furukawa A. and Kiyono J.: Structural damage identification based on harmonic excitation force, *Proceedings of the first International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, Vol.1, pp.535-542, 2003.

(2006.4.13 受付)