

各種振動測定装置によるデータ計測と 鋼製モデルの動特性同定

塩尻 弘雄¹・丸山 収²・田邊 康太³

¹日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

E-mail: shiojiri@civil.cst.nihon-u.ac.jp

²武蔵工業大学准教授 工学部都市工学科 (〒158-8557東京都世田谷玉堤1-28-1)

E-mail: omaruya@sc.musashi-tech.ac.jp

³竹中土木(株) (〒136-8570東京都江東区新砂1-1-1)

構造物の損傷・劣化診断技術は、維持管理計画を策定する際に不可欠である。本研究は、TMD(Tuned Mass Damper)を付加した鋼製3層フレームモデルの自由振動記録を観測データとして、拡張カルマンフィルタアルゴリズムにモデルの動特性を同定するための定式化を行い、同定精度の検証を行っている。また、観測データを自由振動記録としているのは、実構造物においても比較的容易に観測可能であることを意図している。用いた同定理論は既往の研究成果に基づいているが、観測データを取得するための測定装置として、加速度計、レーザー変位計およびデジタルハイスピードカメラを用いている。各種の構造同定理論が整備されているが、本研究の目的は、同定に用いる観測データ取得方法に着目して、測定装置の違いによる精度の検証を実験モデルにより行うことである。

Key Words : structural Identification, health monitoring, Kalman filter, sensor technology

1. はじめに

構造系の応答特性、動特性の同定を行う非破壊検査手法に関する研究は、構造物の保有耐力を照査すること、劣化・損傷モニタリングなどの目的で数多く行われている。これら構造物のモニタリングシステムの研究は、対象のどこで、どの程度の劣化・損傷が生じているのかということ把握することが第一の目的である。

一般に非破壊検査手法は、構造系全体を対象としてグローバルに行う手法と局所的な損傷き裂・ひび割れなどを検知するためのローカルな手法に大別される。前者は、環境振動、風荷重および中小地震を外乱として、構造系の応答データから固有振動数、モード減衰などのモード情報または減衰係数、剛性の劣化を同定するものである。後者は、ローカルに局所的な加振、超音波探査等により、損傷部位の状況を詳細に同定するものである。

上記グローバルおよびローカル同定手法は、観測データに基づいた対象構造の情報更新または不確定性の低減を行うという点では共通の考え方に基いている。そして、観測データの取得方法と情報更新を行う同定理論を

適切に選択することが求められる。これまでに情報更新のための同定理論に関する研究成果が蓄積されているが、一方では実際に観測データを測定するセンサー技術の重要性が認識されてきている。

本研究は、TMDを搭載した鋼製3層フレームモデルのグローバルな構造同定問題において、観測データを計測する装置の違いが同定結果の精度に与える影響について検討したものである。同定手法の精度を検証するために数値シミュレーションにより観測データを作成する場合と異なり、実構造物を対象とする場合には、観測データの取得に際して測定精度とともに簡便性、経済性が要求される。本研究は、観測データを取得するための測定装置として、加速度計、レーザー変位計およびデジタルハイスピードカメラを用いて、加速度応答または変位応答の測定を行った。ここで、レーザー変位計およびデジタルハイスピードカメラは、同定対象に設置した目標を追尾することにより、簡易に応答を計測できるものである。そして各測定装置から得られた自由振動記録の観測データを、拡張カルマンフィルタによる同定理論^{1,2,3)}に用いて、モード減衰、固有振動数の同定を行っている。

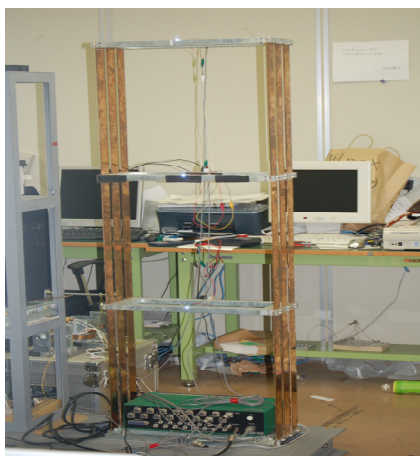


図-1(a) 鋼製3層フレームモデル

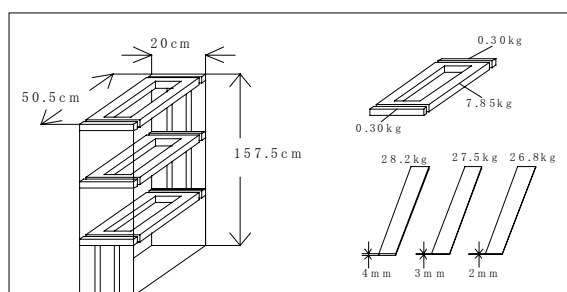


図-1(b) 鋼製フレームモデルの詳細

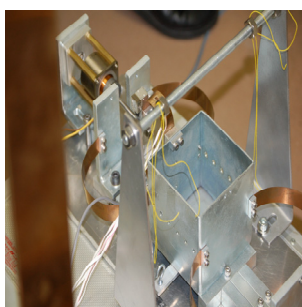


図-2 TMDモデル

2. 実験モデルと振動計測装置の概要⁴⁾

本研究では、図-1(a)に示す高さ 1,575(mm)の鋼製 3 層フレームモデルを用いて実験および解析を行った。各層間は、柱を模擬した 3 枚の板バネで構成されており、板バネを取り外すことにより、剛性を変化させることが出来る。図-1 (b)には諸元を示しているが、本研究では厚さ 4(mm)の板バネのみを用いた。各フロアの質量も調整できるようになっている。また、模型最上階には、図-2 に示す質量 (Mass) とバネによる TMD (Tuned Mass Damper)が搭載されており、本研究では、パッシブ

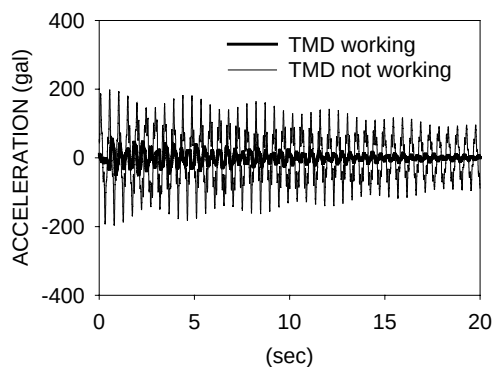


図-3 質点2の加速度応答波形
(加速度計)

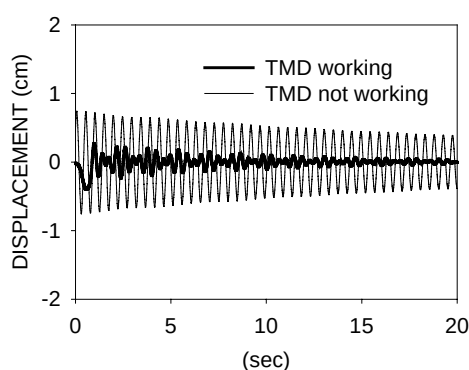


図-4 質点2の変位応答波形
(レーザー変位計)

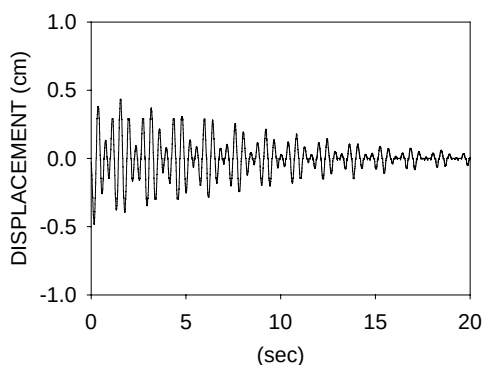


図-5 質点2の変位応答波形
(デジタルハイスピードカメラ)

な TMD として用いるが、パッシブな振動制御能力に加えて、適切な理論を用いて制御用アクチュエータを作動することにより、アクティブまたはセミ・アクティブに応答を制御出来るようになっている。

観測データは、各層にインパルス加振を行い、その後生じる自由振動記録を測定したものをを用いる。測定装置は加速度計 (共和電業社製: 2 GB) , レーザー変位計 (キーエンス社製: LB-1200) およびデジタルハイスピードカメラ (DITECT社製: HAS-500) である。レーザー

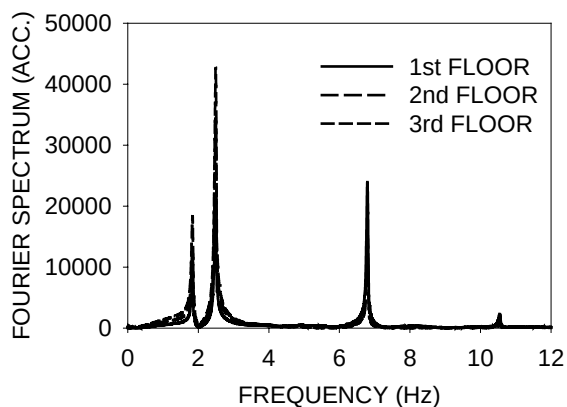


図-6 フーリエスペクトル
(TMDあり, 加速度計)

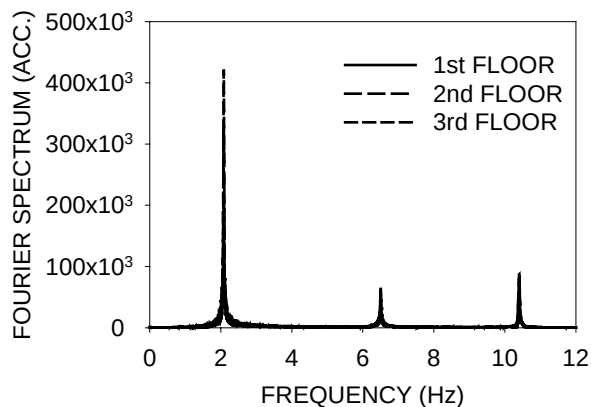


図-9 フーリエスペクトル
(TMDなし, 加速度計)

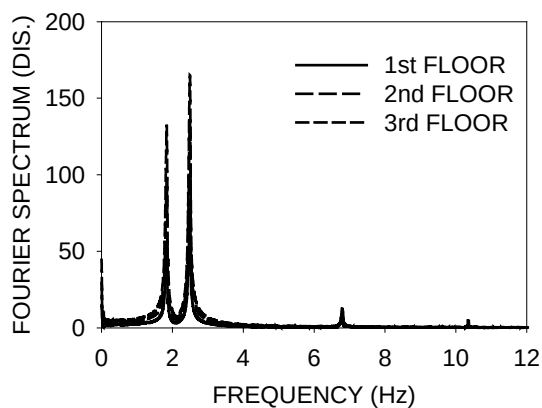


図-7 フーリエスペクトル
(TMDあり, レーザー変位計)

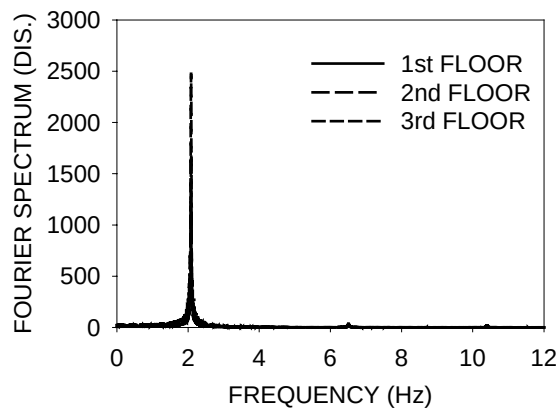


図-10 フーリエスペクトル
(TMDなし, レーザー変位計)

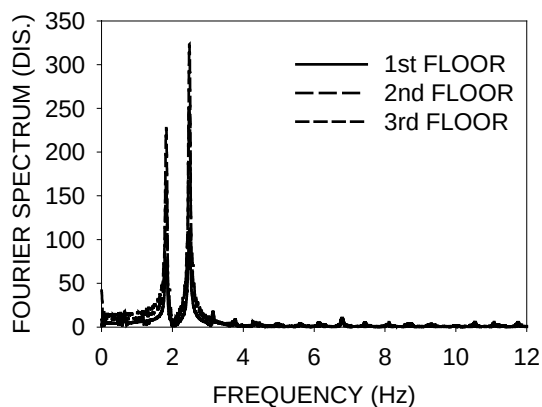


図-8 フーリエスペクトル
(TMDあり, デジタルハイスピードカメラ)

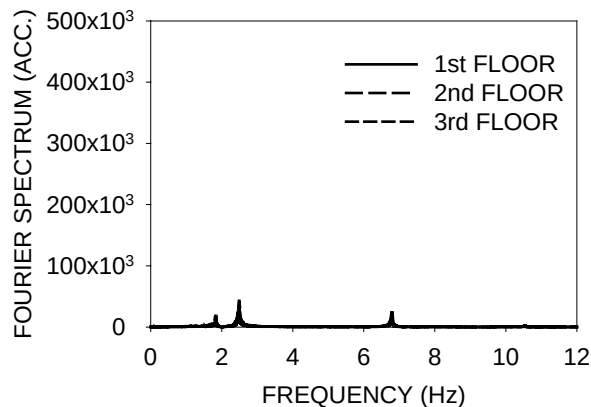


図-11 フーリエスペクトル
(TMDあり, 加速度計)

変位計とデジタルハイスピードカメラは、加速度計と異なり構造本体に計測装置を設置する必要が無く、機動性に優れている。

デジタルハイスピードカメラは最大4,000 (コマ/sec) 撮影できるものを使用し、各コマの画素数は約101万画

素であり、実験モデルの変位応答をカメラで解析するために2値化追尾システムを用いた。ここでは、モデルの加速度計設置位置に発光ダイオードを取り付け200fps (フレーム/sec) で光点を追尾し、「HAS-500 Basic 2ch Edition」による動画解析から変位を算出した⁵⁾。

データ測定結果の例を図-3から図-5に示した。図-3は、加速度計による測定結果であり、図-4と図-5はそれぞれレーザー変位計とデジタルハイスピードカメラによる変位応答記録であり、各測定装置のデータは別々の実験から得られたものである。これらのデータは3層目（頂部）にインパルスを与えて加振した際の2層目の自由振動応答を測定したものである。なおTMDは、TMD稼動部を固定した場合の1次固有振動成分を低減するように調整されている。図-3および図-4には、TMDを固定して単純に3層目の質量として用いた場合の応答も示している。初期条件が異なるので、定性的な解釈に留まるが、TMDの応答低減効果が確認できる。

本研究では、各測定記録に関しては、最低限の中立軸補正などの処理のみを行い、後述する拡張カルマンフィルタを用いた同定手法の観測データとする。これは、データ取得後の特殊な波形処理により、それぞれのセンサー自体の特性を失わないためである。また、図-6から図-8には、加振点を3層目としてTMD稼動状態における自由振動記録のフーリエスペクトルを、観測データ計測箇所ごとに示した。図-6に示した加速度記録から求められたフーリエスペクトルから、固有振動数は概ね1次：1.88(Hz)、2次：2.52(Hz)、3次：6.69(Hz)および4次：10.47(Hz)と読み取ることが出来た。ここで、4次振動モードまで励起されているのは、TMDの自由度が加わっているためである。図-7と図-8に示したレーザー変位計、デジタルハイスピードカメラによる変位記録では、3次および4次の振動成分を明確に検知することは困難であった。基本的に自由振動変位記録から高次振動成分を検出することは困難であるが、レーザー変位計およびデジタルハイスピードカメラに関しては、ターゲットの追従精度に関して、検討することが必要と思われる。

参考のために図-9および図-10には、3層目にインパルス入力を与え、TMD稼動部を固定して3層目における質量とした場合の応答のフーリエスペクトルを示した。図-9および図-10は自由振動記録であるために、1次振動モード成分が卓越していることが分る。図-6と図-9の比較では、TMDにより1次振動成分の低減がなされていることがわかり、比較のために図-6の縦軸を、図-9と同一にしたものを図-11に示したが、TMDの効果が顕著に現われていることが確認できる。

3. 拡張カルマンフィルタによる同定理論

拡張カルマンフィルタアルゴリズムの詳細は、文献 3)に委ねることとし、ここでは概略を示す。拡張カルマンフィルタアルゴリズムは、式(1)および式(2)に示す状態方程式と観測方

式を基本式としている。

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{f}(\mathbf{X}(k-1)) \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{h}(\mathbf{X}(k), t) + \mathbf{V}(k) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{X}(k)$ ：離散型状態ベクトル、 $\mathbf{V}(k)$ ：ガウス白色雑音であり、 $E[\mathbf{V}(k)] = 0$ 、 $E[\mathbf{V}(k)\mathbf{V}(l)] = \mathbf{R}(k)\delta_{kl}$ である。

拡張カルマンフィルタアルゴリズムは、初期の状態推定値 $\mathbf{X}(0)$ および初期推定誤差共分散値 $\mathbf{P}(0)$ を与えて漸化的に状態ベクトルの最適推定値 $\hat{\mathbf{X}}(k|k)$ を求めるアルゴリズムである。

拡張カルマンフィルタアルゴリズムの直接的な適用では同定結果に対する安定性の判断が明確ではなく、初期条件の与え方により不安定な同定結果が生じる場合がある。本研究では、拡張カルマンフィルタに重み付グローバルな繰り返し法を適用したEK-WGI法を用いることとする。EK-WGI法は、同定結果が初期条件の影響を受けなければ安定した同定結果であるという考え方に基づいたアルゴリズムである。解析に用いたプログラムはEXKAL2³⁾である。

4. 状態方程式および観測方程式の定式化

拡張カルマンフィルタアルゴリズムを同定問題に適用するためには、対象構造系の支配方程式と観測データの測定メカニズムを、適切に式(1)および式(2)に示した状態方程式および観測方程式へと表現する必要がある。

本研究で対象とする n 自由度線形構造系の自由振動方程式を次式で与える。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Z}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Z}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{Z}(t) = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{Z}(t)$ ：相対変位応答、 $\mathbf{M}$ ：質量行列、 $\mathbf{C}$ ：減衰係数行列、 $\mathbf{K}$ ：初期剛性行列である。

式(3)の物理パラメータで構成される $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ および $\mathbf{K}$ の要素を直接同定することも可能であるが、本研究では、各モード次数におけるモード減衰および固有振動数を同定することを行う。

モーダル解析法により式(3)の方程式を各モード次数ごとの運動方程式として表現する。変位応答は、モーダルマトリクスと時間関数を用いて次式で表される。

$$\mathbf{Z}(t) = \Phi\eta(t) \quad (4)$$

ここで、 $\eta(t)$ ：時間関数、 Φ ：モーダルマトリクスで

ある。また ϕ_{ij} を質点 i の j 次振動モードにおける ϕ の要素マトリクスとする。

j 次振動モードにおける時間関数は次式で与えられる。

$$\ddot{\eta}_j(t) + 2\beta_j \omega_j \dot{\eta}_j(t) + \omega_j^2 \eta_j(t) = 0 \quad (5)$$

ここで、 β_j : j 次振動モードにおけるモード減衰、
 ω_j : j 次振動モードにおける固有円振動数である。

式(5)より、質点 i における j 次振動モードの振動方程式は次式となる。

$$\ddot{\xi}_{ij}(t) + 2\beta_j \omega_j \dot{\xi}_{ij}(t) + \omega_j^2 \xi_{ij}(t) = 0 \quad (6)$$

ここで、 $\xi_{ij}(t) = \phi_{ij} \eta_j(t)$ である。

一方、質点 i の変位応答は、各モード応答を重ね合わせることににより求められる。

$$z_i(t) = \sum_{j=1}^n \xi_{ij} \quad (7)$$

また、加速度応答および速度応答も式(7)と同様にして得られる。

式(6)に示したモード振動方程式をもとに状態方程式の定式化を行う。ここで、 $x_{1ij} = \xi_{ij}$ 、 $x_{2ij} = \dot{\xi}_{ij}$ 、 $x_{3ij} = \ddot{\xi}_{ij}$ 、 $x_{4ij} = \beta_j$ 、 $x_{5ij} = \omega_j$ と状態空間表示を行い、線形加速度法により式(6)を離散化することにより次式の状態方程式を得る。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{i1}(k) \\ x_{i2}(k) \\ \vdots \\ x_{in}(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} g_{i1}(k-1) \\ g_{i2}(k-2) \\ \vdots \\ g_{in}(k-1) \end{bmatrix} \quad (8) \\ \mathbf{x}_{ij}(k) &= \begin{bmatrix} x_{1ij}(k) \\ x_{2ij}(k) \\ x_{3ij}(k) \\ x_{4ij}(k) \\ x_{5ij}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{ij}(k-1) \end{bmatrix} \quad (9) \\ &= \begin{bmatrix} D_{11}x_{1ij}(k-1) + D_{12}x_{2ij}(k-1) + D_{13}x_{3ij}(k-1) \\ D_{21}x_{1ij}(k-1) + D_{22}x_{2ij}(k-1) + D_{23}x_{3ij}(k-1) \\ D_{31}x_{1ij}(k-1) + D_{32}x_{2ij}(k-1) + D_{33}x_{3ij}(k-1) \\ x_{4ij}(k-1) \\ x_{5ij}(k-1) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{こ こ で, } D_{11} &= 1 + \frac{\Delta t^2 D_2}{6}, \quad D_{21} = \Delta t \left(1 + \frac{\Delta t D_3}{6}\right), \\ D_{13} &= \left(\frac{\Delta t^2}{3}\right) \left(1 + \frac{D_4}{2}\right), \quad D_{21} = \frac{\Delta t D_2}{2}, \quad D_{22} = 1 + \frac{\Delta t D_3}{2}, \\ D_{23} &= \frac{\Delta t}{2} + \frac{\Delta t D_4}{2}, \quad D_{31} = D_2, \quad D_{32} = D_3, \quad D_{33} = D_4, \\ D_1 &= -(1 + \Delta t x_{4ij}(k-1)x_{5ij}(k-1) + \frac{\Delta t^2 x_{5ij}^2(k-1)}{6})^{-1} \\ D_2 &= D_1 x_{5ij}^2(k-1), \\ D_3 &= D_1 (2x_{4ij}(k-1)x_{5ij}(k-1) + \Delta t x_{5ij}^2(k-1)) \\ D_4 &= D_1 (\Delta t x_{4ij}(k-1)x_{5ij}(k-1) + \frac{\Delta t^2 x_{5ij}^2(k-1)}{3}) \text{ である.} \end{aligned}$$

例えば、 i 質点の変位応答が観測データとして得られる場合に観測方程式は、次式で与えられる。

$$\mathbf{Y}_i(k) = [z_i(k)] = [\mathbf{J}, \mathbf{J}, \dots, \mathbf{J}] \begin{bmatrix} x_{i1}(k) \\ x_{i2}(k) \\ \vdots \\ x_{in}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{V}(k) \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{J} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ である。

式(10)は、観測点数および観測データの種類により容易に定式化できる。すなわち観測データが速度波形の場合には、 $\mathbf{J} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 、さらに加速度波形の場合には、 $\mathbf{J} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$ となる。

5. 同定結果

ここでは、異なる装置により測定した観測データを用いて、拡張カルマンフィルタにより各振動モードの動特性の同定を行った。振動モード情報の同定を行ったのは、実験モデルの同定精度をフーリエスペクトルと直接対比することが容易であることが理由である。対象とするモデルは、TMDを稼動状態にした場合である。はじめに、3層目にインパルス入力を与えて、各層ごとの自由振動記録1波を観測データとして動特性の同定を行った。同定に用いる定式化では、TMDを付加したことにより4次振動成分まで考慮した。観測データは加速度計の場合には加速度応答波形、レーザー変位計およびデジタルハイスピードカメラは変位応答波形である。

図-12および図-13にモード減衰と固有振動数の同定結果を示した。ここで、device1:加速度計、device2:レーザー変位計、device3:デジタルハイスピードカメラであ

る。加速度計を用いた場合には、概ね3次までの動特性が推定可能であり、レーザー変位計とデジタルハイスピードカメラでは、2次までの動特性を推定することが出来た。一方固有振動数に関しては、いずれの場合においても、2次までの推定結果はほぼ一致しており、フーリエスペクトルから得られる結果と非常に良い対応をしていることがわかる。各モード減衰の同定結果は、鋼製フレームモデルのために0.01以下の小さな値となっている。実験モデルの減衰特性の同定精度を評価することは困難であるが、加速度波形のフーリエスペクトルから読み取った各モード減衰は、1次：0.0086、2次：0.0078、3次：0.0043および4次：0.0019であり、デジタルハイスピードカメラの観測データに変動が見られるが概ね良好な値と思われる。

次に、インパルス入力の加振箇所を1, 2層とした場合も加えて、各層の応答を観測データとした際の同定結果を図-14および図-15に示した。図-14および図-15は、加速度計とレーザー変位計の結果を示している。この場合も固有振動数は非常に精度良く同定されており、加速度計を用いた場合には、データ観測位置によっては4次振動までの推定が可能であった。以上の解析結果と図-6から図-8に示したフーリエスペクトルから、当然のことではあるが卓越振動成分が明確であれば拡張カルマンフィルタによる同定は可能であることが分った。観測データの精度としては、レーザー変位計またはデジタルハイスピードカメラによる変位記録も主要な卓越振動成分を逸することなく計測が可能であることが分った。ここでは、観測記録を直接用いたが、適切なノイズ処理または波形の時間微分処理などにより速度、加速度波形への変換などを行うことで、同定結果の精度が向上するものと思われる。また、数多くの実験データ解析により、同定結果のばらつきに関する定量的な評価を行い、各測定装置の有効性に関する議論を行っていく予定である。

6. まとめ

本研究は、観測データを取得するための測定装置として、加速度計、レーザー変位計およびデジタルハイスピードカメラを用いて、それぞれの測定データを拡張カルマンフィルタによる共通の同定理論に適用することで同定結果の比較検討を行っている。各種の構造同定理論が整備されているが、本研究の目的は、同定に用いる観測データ取得方法に着目して、測定装置の違いによる精度の検証を行うことである。

用いた観測装置にごとの同定結果は、レーザー変位計およびデジタルハイスピードカメラを用いた場合には、

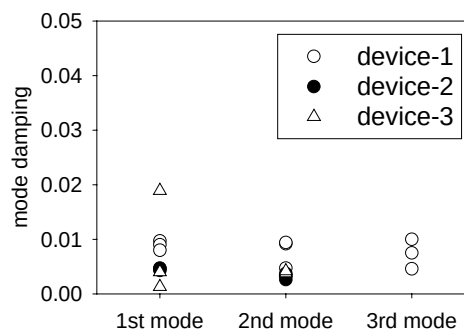


図-12 モード減衰
(3層目を加振)

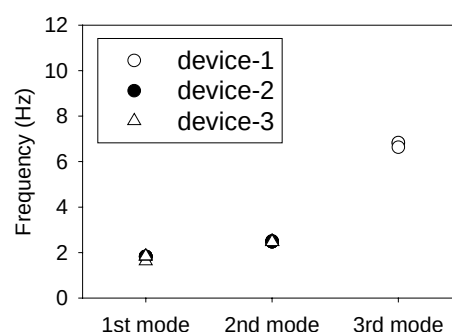


図-13 固有振動数
(3層目を加振)

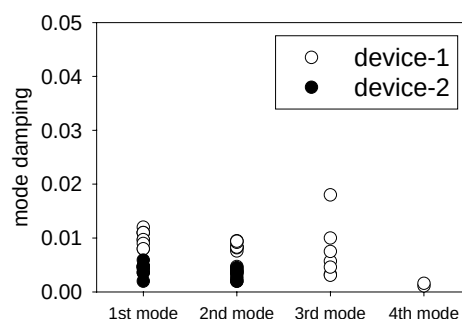


図-14 モード減衰

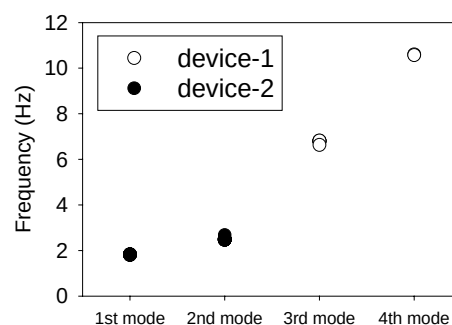


図-15 固有振動数

自由振動変位応答記録を用いて、2次までの動特性の推定が可能であり、簡易な計測手法として実構造の動特性同定への適用も可能と考える。

今後の課題としては、減衰係数、剛性などの物理パラメータの同定またはデジタルハイスピードカメラは面的な応答も検出可能であり、この情報の同定問題への適用を考えている。

謝辞： 本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部）・研究課題「環境防災都市における研究」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) Jazwinski, A. H.: Stochastic Process and Filtering Theory, Academic Press, 1970.
- 2) 星谷勝・斉藤悦郎:線形多自由度系の動特性の推定, 土木学会論文集, No.344/I-1, pp.289-293, 1984年4月.
- 3) Maruyama, O., Yun, C.-B., Hoshiya, M. and Shinozuka, M.: Program EXKAL2 for Identification of Structural Dynamic Systems, Technical Report National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER-89-0014), New York State University, 1989.
- 4) アブドラ アブリカム・塩尻弘雄 : 振動計測による構造要素の特性の同定, 構造工学論文集, Vol. 50B, 2004年3月.
- 5) DITECT 社 : <http://www.ditect.co.jp/index.html>

(2007.4.6受付)

Experimental Study of Sensor Technologies for Structural Identification

Hiroo SHIOJIRI, Osamu MARUYAMA and Kota TANABE

In this study, the extended Kalman filtering technique is utilized for the purpose of parameter identification and computer program EXKAL2 is used for its implementation. By using EXKAL2, numerical analyses are carried out with experimental data of three story model with tuned mass damper. The method is examined by applying it to free vibration test records which are measured by ordinary accelerometers, laser displacement measurement devices and a digital hi-speed camera.