パラメトリック射影フィルタに基づくアルゴリズムを用いた 大型浮遊式海洋建築物模型の損傷同定解析

DAMAGE IDENTIFICATION ANALYSIS ON LARGE FLOATING OFFSHORE STRUCTURE MODEL BY FILTERING ALGORITHM BASED ON PARAMETRIC PROJECTION FILTER

遠藤 龍司*, 登坂 宣好**, 川上 善嗣***, 塩田 寿美子****

Ryuji ENDO, Nobuyoshi TOSAKA, Yoshitsugu KAWAKAMI
and Sumiko SHIOTA

This paper is concerned with the structural damage detection of the unit-linked floating structure model by coupled free vibration analysis, in combination with filtering algorithm. The structural damage analysis is generally formulated as an inverse problem. The formulated inverse problem must be analyzed under the consideration of stochastic properties on the response of structural system. The filtering algorithms have been known as one of the inverse analysis method. In this study, algorithm based on parametric projection filter is employed as new analytical algorithm on the structural damage identification. The coupled natural frequencies used as the observations and stochastic properties of system responses adopted the data obtained by experimental modal analysis. From identification results, adaptability and characteristics of the algorithm based on parametric projection filter are discussed on the inverse analysis of the fluid-structure interaction coupled system.

Keywords: *Large floating offshore structural model, structural damage detection, inverse analysis,
parametric projection filter, fluid-coupled natural frequency, experimental modal analysis*

大型浮遊式海洋建築物模型, 構造損傷検出, 逆解析,
パラメトリック射影フィルタ, 流体連成固有振動数, 実験モード解析

1. はじめに

未知空間としての海洋を有効利用しようとする観点から, 国土の狭い我が国の海洋開発が叫ばれて長い年月が経過した。この間に比較的静穏な海域では, 海中展望塔や海上水族館等の小規模な海洋建築物は建造されてきた経緯はあるものの, 本格的な海洋空間利用に関するプロジェクトは 1995 年のメガフロート技術研究組合の海上空港を想定した実海域実験まで待たなければならなかった¹⁾。一方, 日本建築学会海洋委員会は, 未来指向型の海洋建築物に関する調査・研究から脱却するとともに, より現実的な海洋空間利用を目指し, 陸域と海域をトータルスペースとして捉える都市機能補完型海洋建築²⁾⁻³⁾を提案している。海洋空間利用を目的として建造される海洋建築物は, いずれにしても高度な公共性を有することになるため, 構造安全性や居住性の観点から多大な人的労力を必要とする目視や, 超音波探傷等の非破壊検査に代わる逆解析に基づく損傷同定手法の開発が急がれるところである。

陸上構造物に対しては, Escobar ら⁴⁾の固有振動数と振動モードから構成される感度マトリックス法による鉄筋コンクリート構造物の損傷同定や濱本, 近藤⁵⁾の多変量 ARMA モデルによるブレード構造物の損傷解

析が報告されている。

筆者らは既報⁶⁾⁻⁷⁾において, ユニット連結型浮遊式建築物模型を対象として, 連成固有振動数を観測データとする逆解析による損傷検出の手法を提案した。このとき, 逆解析手法には, フィルタ理論を援用したアルゴリズムを採用し, 復元作用素として Wiener フィルタを用いる拡張 Kalman フィルタおよび射影フィルタに基づくアルゴリズムによる逆解析結果を比較して示した。よく知られている様に, 拡張 Kalman フィルタは復元作用素に Wiener フィルタを用いたアルゴリズムであり, 動的非線形システムの予測等に多用されている。

拡張 Kalman フィルタは繰り返し計算アルゴリズムとして用いた場合においても, 状態量の収束性は極めて優れているものの⁸⁾, 逆解析アルゴリズムとして現実の様々な問題に適用した際には同定値が目標値と大きく異なっていたり, 目標値に対して収束しない場合も見受けられる。一方, 登坂は Wiener フィルタとは異なる評価基準を満足する復元作用素として射影フィルタを援用したアルゴリズムを提案した⁹⁾。射影フィルタに基づくアルゴリズムは拡張 Kalman フィルタと比較し, フィルタリング過程における不安定性は否めないものの, 現実的な逆解析手法の

* 職業能力開発総合大学校建築工学科 助教授・工博

** 日本大学生産工学部数理情報工学科 教授・工博

*** 日本大学大学院生産工学研究科数理工学専攻
大学院生・修士(工学)

**** 前田建設工業(株)

Assoc. Prof., Dept. of Architectural Engineering, Polytechnic University, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Mathematical Information Engineering, College of Industrial
Technology, Nihon University, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Mathematical Engineering, College of Industrial
Technology, Nihon University, M. Eng.
Maeda Corporation

一つとして期待できるものと思われる。

ところで先に述べたユニット連結型浮体構造物に対する一連の逆解析において、文献6)では、観測データおよび観測データに含まれる誤差を考慮するための統計的性質が実測から求められておらず、連成自由振動方程式を用いた、いわゆるシミュレーション逆解析による拡張 Kalman フィルタ及び射影フィルタに基づくアルゴリズムの検証であった。シミュレーション解析では、両フィルタリングアルゴリズムとも、損傷による剛性低下率およびユニット連結部を対象とする損傷位置ともに精度よく同定可能であった。これに対し、損傷を想定したモデルの加振実験から得られた連成固有振動数および観測雑音の統計的性質を採用した逆解析の場合⁷⁾、拡張 Kalman フィルタに基づく逆解析アルゴリズムでは、浮体ユニット端部についての損傷位置および損傷程度はともに同定可能であるものの、浮体システム内部の連結部については損傷位置の同定が不可能な場合が見受けられた。また、射影フィルタに基づくアルゴリズムによる逆解析では、最終的に損傷位置および損傷程度ともに同定可能であるものの、フィルタリングの過程における損傷位置の変化と剛性低下を意味する未知パラメータの値がランダムに変化し、不安定なフィルタリング計算を余儀なくされた。そこで、拡張 Kalman フィルタや射影フィルタに基づくアルゴリズムに代わる第3のフィルタリングアルゴリズムによる逆解析の検討が意味を持つことになろう。

本論では、ユニット連結型浮遊式海洋建築物模型のユニット連結部の損傷解析を行うにあたり、第3のフィルタリングアルゴリズムとしてパラメトリック射影フィルタに基づくアルゴリズム⁸⁾を援用し、損傷に伴う連結部の剛性低下率と損傷位置を同定しようとするものである。パラメトリック射影フィルタには、射影フィルタに対する制約条件の緩和とノイズを抑制する度合いのバランスを調整する項が含まれている。この調整項の与え方がフィルタリングの計算過程の安定性と同定精度を左右すると考えられるにもかかわらず、この調整項について検討した例は筆者らのフレームモデル及びユニット連結型浮体モデルを対象としたシミュレーション逆解析の報告^{10), 11)}以外見当たらない。本研究では、観測データとしての固有振動数と観測誤差を実験モード解析に基づくヘルスマonitoringより求めた実測値を用い、逆解析手法としてのパラメトリック射影フィルタに基づくアルゴリズムの連成系への適応性と調整項の影響について検討することを目的とする。

逆解析の対象とする浮体は文献7)と同様であり、8ユニットから構成されるユニット連結型浮体模型とした。損傷同定は、浮体模型に対する加振実験と実験モード解析から得られた連成固有振動数に基づき、観測データおよび推定誤差共分散を設定した場合について逆解析を行い、パラメトリック射影フィルタの適応性と特性に対する検討を加える。

2. ユニット連結型浮遊式海洋建築物模型と実験モード解析

本論において同定解析の対象とする浮体は、文献7)で示したユニット連結型浮体模型と同様である。以下に数理モデルとして用いた非減衰流体連成固有方程式を示し、観測データおよび測定誤差の統計的性質を得るための実験モード解析について概要を再記する。

2.1 非減衰流体連成固有方程式

損傷同定逆解析に用いるウェットモードを考慮した非減衰流体連成固有方程式¹²⁾は次式のように書くことができる。

$$[-\omega^2(\mathbf{M} + \mathbf{M}_w(\omega)) + (\mathbf{K}_d + \mathbf{K}_j + \mathbf{K}_w)] = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{M}$ は浮体の質量行列、 $\mathbf{M}_w(\omega)$ は付加質量行列、 $\mathbf{K}_d$ は係留索剛性行列、 $\mathbf{K}_j$ は連結部剛性行列、 $\mathbf{K}_w$ は付加剛性行列である。実際の固有値計算に当たっては、空中における円振動数を初期値とする反復計算を行った。

2.2 加振実験と実験モード解析

観測データとしての連成固有振動数と観測誤差の統計的性質を実測から得るために、浮体模型を作成し、水槽底部に設置されている振動台を用いて加振実験を行った。図1に、加振実験に用いた実験水槽および浮体模型を示し、表1に浮体模型の諸元を示す。浮体ユニットはアクリル製直方体から成り、各ユニットは基本的に板ばね3枚により8連結した。また、各ユニットはコイルばねを介して水槽底部にテンションレグ係留した。尚、連結部剛性および係留索剛性は集中荷重による載荷試験を行い、いずれのばねの変位も非接触レーザー変位計を用いて測定し、荷重と変位の関係から求めた。

本論においても既報⁹⁾と同様に、各ユニット連結部剛性がすべて等しいモデルを正常モデルと呼び、No.1～No.4のいずれかの連結部において板ばね1枚のみで連結し、板ばねの剛性を低下させたモデルを損傷モデルと呼ぶことにする。図1(b)にユニットを板ばねで連結した概要を示し、図1(c)に損傷モデルの一例としてNo.4に損傷を仮定した例を示す。

実験モード解析の基本データとして必要な加振力と応答加速度を測定するため、No.1～No.4のいずれかの連結部に損傷を仮定した損傷モデルの両側面における一対の係留索を、水槽底部の上下加振が可能な振動台に係留した。係留索を介して入力する起振力はコイルばねの下部に配置したリングゲージにより測定し、各ユニットの応答加速度は、ユニット端部に設置した小型加速度センサで計測した。加振はスイープ加振とし、振動

(a) 実験水槽

(b) ユニット連結型浮体構造物

(c) 浮体モデルの設置(No.4 66%剛性低下モデル)

図1 実験水槽における加振実験

表1 浮体モデルの諸元

ユニット番号	係留索剛性 (gf/mm)	各ユニットの重量 (gf)	連結部剛性 (gf/mm)
No.1	2.99	730	2243.05
No.2	2.35		
No.3	2.32		
No.4	2.36		
No.5	2.31		
No.6	2.34		
No.7	2.36		
No.8	2.36		

台に設置したサーボ型加速度計の信号を付属の制御装置により検出し、50gal 一定の加速度で1Hz~10Hzをいくつかの加振範囲に分割してそれぞれ256秒間加振した。一連の実験モード解析の手法は汎用の実験モード解析ソフトを用いた。なお、(1)式から計算した連成固有振動数と、実験モード解析から得られた連成固有振動数はヒープおよびピッチの剛体モードから弾性7次モードまでほぼ一致した結果が得られたことを付記する⁹⁾。

3. 逆解析アルゴリズム

パラメトリック射影フィルタを復元作用素とするアルゴリズムもまた登坂により提案されており⁹⁾、厳しすぎる射影フィルタの制約条件を緩和し、これに伴うノイズを抑制する度合いのバランスを調整する様に構成されている。この調整項の与え方により、射影フィルタに基づくアルゴリズムに見られたフィルタリング過程での不安定性の緩和が期待できる。以下に非線形問題に拡張したパラメトリック射影フィルタに基づくアルゴリズムを概説する。

3.1 状態方程式と観測方程式

損傷することにより構造物の剛性は低下するものと定義し、ユニット連結型浮遊式海洋建築物の各ユニット間の連結部の剛性を未知の状態ベクトルとするシステム同定の立場から逆解析を行う。逆解析の対象とするシステムは、状態の遷移を表す状態方程式と状態に対する観測方程式により記述され、以下のような有限次元の離散的な時間確率ダイナミクスシステムで表される。

$$\bullet \text{ 状態方程式} \quad \hat{\mathbf{z}}_{t+1} = \Phi_t \hat{\mathbf{z}}_t + \Gamma_t \xi_t \quad (2)$$

$$\bullet \text{ 観測方程式} \quad \mathbf{y}_t = \mathbf{M}_t \hat{\mathbf{z}}_t + \mathbf{v}_t \quad (3)$$

ここに、 $\hat{\mathbf{z}}_t$ は t 時間ステップにおける推定値を意味する状態ベクトル、

ξ_t はシステム雑音ベクトル、 $\mathbf{y}_t$ は観測ベクトル、 $\mathbf{v}_t$ は観測雑音ベクトル、 Φ_t は状態遷移行列、 Γ_t は駆動ベクトル、 $\mathbf{M}_t$ は観測行列である。 $\mathbf{z}_t$ 、 ξ_t 、 $\mathbf{y}_t$ 、 $\mathbf{v}_t$ は確率変数ベクトル、 Φ_t 、 Γ_t 、 $\mathbf{M}_t$ は既知の確率マトリックスである。

本研究で対象とするユニット間の連結部の剛性は定数であるため、(2)式で表現された状態量はフィルタリングの過程で状態遷移構造をもたないものと仮定できる。したがって、状態方程式(2)における状態遷移行列は単位行列で表すことができ、システム雑音は考慮しないものとする、状態方程式は次式のように書くことができる。

$$\hat{\mathbf{z}}_{t+1} = \mathbf{I} \hat{\mathbf{z}}_t \quad (4)$$

ここに $\mathbf{I}$ は単位行列である。以上の仮定から、(3)、(4)式の表現における添字 t は時間変数ではなく、フィルタリングステップを意味することになり、統計的性質は以下のように仮定される。

$$E\{\mathbf{v}_t\} = 0, E\{\mathbf{v}_t \mathbf{v}_{t_k}^T\} = \mathbf{Q}_t \delta_{t_k}, E\{\mathbf{z}_0 \mathbf{v}_t^T\} = 0$$

$$E\{\mathbf{z}_0\} = \bar{\mathbf{z}}_0 \quad (\text{既知}) \quad (5)$$

ここに、 $\mathbf{z}_0$ は初期状態ベクトルであり、 $\bar{\mathbf{z}}_0$ は平均値ベクトルを意味する。また、 $\mathbf{Q}$ は観測誤差共分散行列であり、 E は期待値を、 δ はクロネッカーのデルタを意味する。

3.2 非線形フィルタリングアルゴリズム

本逆解析では状態量として連結部剛性を、また観測データとして連成固有振動数を採用する。剛性と固有振動数の関係は非線形であるため、観測方程式(3)を非線形に拡張すると次式のように書くことができる。

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{m}_t(\hat{\mathbf{z}}_t) + \mathbf{v}_t \quad (6)$$

ここに $\mathbf{m}_t(\hat{\mathbf{z}}_t)$ は、フィルタリング t 回目の状態量における観測量を意味する非線形ベクトル関数である。状態推定量 $\hat{\mathbf{z}}_t$ の周りで Taylor 展開し、高次項を無視すると疑似線形表現された観測方程式を得る。

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{M}_t \hat{\mathbf{z}}_t + \mathbf{v}_t \quad (7)$$

ここに $\mathbf{M}_t$ は感度行列であり、以下のように与えられる。

$$\mathbf{M}_t \equiv \left(\frac{\partial \mathbf{m}_t(\hat{\mathbf{z}}_t)}{\partial \hat{\mathbf{z}}_t} \right) \quad (8)$$

観測方程式(7)に対するフィルタ方程式は次式で与えられる。

$$\hat{\mathbf{z}}_{t+1} = \hat{\mathbf{z}}_t + \mathbf{B}_t (\mathbf{y}_t - \mathbf{m}_t(\hat{\mathbf{z}}_t)) \quad (9)$$

ここに $\mathbf{B}_t$ は復元作用素としてのフィルタゲインである。

3.3 パラメトリック射影フィルタ

(9)式で与えられるフィルタ方程式を繰り返し計算アルゴリズムとして完成させるためには、復元作用素が具体的に与えられなければならない。前述した様に復元作用素として Wiener フィルタを用いると拡張 Kalman フィルタリングアルゴリズムと呼ばれ、射影フィルタを用いると文献 6)~7) で特徴を考察した射影フィルタに基づく逆解析アルゴリズムとなる。本論では、これらの2種類のフィルタリングアルゴリズムに代わる第3の逆解析アルゴリズムとして、復元作用素にパラメトリック射影フィルタを採用する。図2はパラメトリック射影フィルタの概念図⁹⁾である。

$$J_{PPF}(\mathbf{B}) = \|\mathbf{B}\mathbf{M} - \mathbf{P}_{M^+}^N\|^2 + \gamma E_v[\|\mathbf{B}\mathbf{v}\|^2] \quad (10)$$
$$\mathbf{B}_t = \mathbf{M}_t^T (\mathbf{M}_t \mathbf{M}_t^T + \gamma \mathbf{Q}_t)^{-1} \quad (11)$$

NII-Electronic Library Service

方和の逆数の比をとると、観測データと連成固有振動方程式(1)から計算された固有振動数が最も近い連結部の値が最も大きくなり、 n 番の連結部の損傷を意味する評価値は(13)式の様に書くことができる。

$$\beta_n = \frac{1}{V_n} \bigg/ \sum_{n=1}^4 \frac{1}{V_n} \quad (13)$$

本解析モデルでは、対称性を考慮することにより、図1に示した連結部 No.1～No.4 の4ヵ所に損傷を仮定した。

4. 観測雑音の統計的性質の設定

観測データとして用いるための連成固有振動数を前述した実験モード解析から求めるとき、観測雑音共分散行列として設定するための観測誤差も同時に求めることができる。パラメトリック射影フィルタの誘導過程で仮定されている統計的性質である(5)式からもわかる様に、観測誤差は観測雑音共分散の対角成分として与えられる。本論では、観測データの分散を求めるために、各連結部に損傷を想定したモデルに対して20回の加振実験を繰り返した。加振実験より得られた連成固有振動数とともに、実験モード解析の過程であるカーブフィッティングの段階でもばらつきが生じるため、これらのばらつきも標本数に加え、まず標準偏差を求めた。実際に各連結部と各モードに関して標準偏差を計算すると、連結部による標準偏差の違いはほとんどなく、各モードにおける標準偏差を本実験における観測雑音として代表させても差し支えないものと判断した。すなわち、連結部 No.1～No.4 のいずれかに損傷を想定した逆解析においても、表2に示した各モードの標準偏差を用いるものとし、実際の観測雑音共分散行列の設定では、これらの標準偏差を2乗した分散を対角成分とした。

5. 逆解析結果の検討と考察

実験モード解析により得られた損傷モデルの連成固有振動数を観測データとするとともに、同様の測定から得られた標準偏差に対する分散を用いて損傷同定解析を行った。このとき、初期値は他の復元作用素における結果から勘案して正常剛性の2%とした。また、パラメトリック射影フィルタの特徴であるパラメータ γ は、まず0.1、1.0、10.0、30.0の4種類を設定した。解析結果の例として、 $\gamma=0.1$ および30の場合を図4～5に示す。結果を示すグラフの全てにおいて、横軸はフィルタリング回数を、縦軸は損傷の程度を意味する剛性低下率および、フィルタリングの過程において(13)式より計算された損傷位置を意味する評価値と呼ばれる値の無次元量である。なお、本解析では、状態量の変化が 1.0×10^3 以下となった推定値を同定値とした。先にも述べた様に、各ユニットは正常な状態において板ばね3本により連結しているのに対し、損傷を想定した連結部は板ばね1本で連結した。これより、連結部の

剛性は1/3となることから、状態量の目標値は、0.34付近となる。さて、 $\gamma=0.1$ とした場合、損傷を想定した各連結部の同定結果は、状態量が目標値に対して誤差を含むとともに、連結部 No.3 が損傷した損傷モデルは同定が不可能であった。そこで γ を変化させることにし、 $\gamma=1.0$ とした場合では $\gamma=0.1$ の場合に比べ、フィルタリング回数が多くなるとともに、状態量および評価値が激しく不安定に振動することになった。さらに、 γ を大きくすることにより、基本的にフィルタリング回数が多くなる傾向は変わらないものの、 $\gamma=30$ の場合との比較でもわかる様に、状態量、評価値の推移は徐々に安定する傾向を示した。これらの傾向から勘案して、さらに γ を大きく設定することにし、 $\gamma=100, 120, 180$ とした場合の逆解析を試みた。図6に $\gamma=180$ の場合の解析結果を示す。図4および5に示した結果と比較し、総じていずれの連結部に損傷を想定した場合も安定したフィルタリング計算が得られており、同定値に多少の誤差を含むものの極めて安定した収束性を得ることができた。すなわち、大きな γ の値を与えることでフィルタリングが安定し、状態量は目標値の近傍に収束するとともに、損傷位置も同定することが可能であった。

これは、パラメータ γ が観測雑音共分散に乗じられていることに起因すると考えられる。拡張 Kalman フィルタにおける復元作用素、すなわち Kalman ゲインには推定誤差共分散が含まれており、フィルタリング計算に応じて自動的に分散の大きさを更新し、安定したフィルタリングが得られるようなアルゴリズムになっている。これに対し、射影フィルタを復元作用素とするアルゴリズムでは、誤差の分散を更新する過程は一切含まれておらず、状態量の比較だけが実施されるため、問題によっては感度行列で計算される値と観測雑音共分散行列の演算からなるフィルタゲインが大きく変化してしまう現象が生じるものと考えられる。

一方、本論で採用したパラメトリック射影フィルタは Kalman ゲインとは異なるものの、パラメータ γ を乗ずることにより観測雑音共分散行列の値を逆解析の対象とするシステムに応じて人為的に変化させることで安定化が図られるものと考えられる。この点において、パラメトリック射影フィルタを採用することにより、共分散行列 $\mathbf{Q}$ を用いた正則化と同様の効果が得られたことになる。しかし、最終的に安定した結果が得られた図6においても、No.1およびNo.4に比較してNo.2とNo.3の同定精度が劣っている。こうした傾向は拡張 Kalman フィルタを用いた結果においても見られたが、拡張 Kalman フィルタと本論で採用したパラメトリック射影フィルタはいずれも収束安定性に寄与するパラメータが含まれている。No.2およびNo.3に剛性低下を仮定した固有振動数を求める場合の実験モード解析は、他の位置に剛性低下を仮定した場合に比較して、特に弾性モードの同定精度が多少劣っている。このようなモード同定の精度と収束安定化を優先するパラメトリック射影フィルタの特性に起因してNo.2およびNo.3の同定精度が多少劣ったものと考えられる。

ところで、表3に示した観測データを用いると、連結部 No.3 に損傷を想定した場合に限り、すべての γ の値に対し、No.1の評価値が大きくなっている。非常に安定したフィルタリング計算が得られている $\gamma=180$ とした場合にも、連結部 No.3 に損傷を仮定したにもかかわらず連結部 No.1 の評価値が大きくなることには変わりなく、連結部 No.3 の損傷同定は不可能であった。そこで、 $\gamma=180$ の場合を例に、連結部 No.3 に損傷を仮定した同定結果における、連結部 No.1 の状態量と連結部 No.3 の状態量の比較を図7に示す。これより、 γ が大きくなるにつ

表2 各モードにおける標準偏差と標本数

	標準偏差(Hz)	標本数
HEAVE	0.76	165
PITCH	0.51	104
弾性1次	0.45	120
弾性2次	0.24	500
弾性3次	0.34	296
弾性4次	0.49	455
弾性5次	0.45	558
弾性6次	0.17	119
弾性7次	0.23	137

表3 流体連成固有振動数 (Hz)

	連結部 No.1 損傷	連結部 No.2 損傷	連結部 No.3 損傷	連結部 No.4 損傷
HEAVE	1.67	1.53	1.50	1.64
PITCH	1.69	1.54	1.63	1.73
弾性1次	1.72	1.63	1.76	1.80
弾性2次	2.01	2.02	2.08	2.13
弾性3次	2.77	2.52	2.67	2.68
弾性4次	3.76	3.82	3.53	4.20
弾性5次	5.15	5.28	5.29	5.08
弾性6次	6.43	6.17	6.46	6.99
弾性7次	7.47	7.26	7.40	7.33

れてフィルタリングは安定するものの、微少な差で連結部 No.1 の状態量が連結部 No.3 の状態量の差異よりも目標値に接近して収束していることがわかる。この微少な状態量に起因して、評価値は連結部 No.1 の値が No.3 の値を上回ったものと考えられる。すなわち、この結果は観測データの特性から生ずるものと思われ、連結部 No.3 が損傷しているにもかかわらず、フィルタリングの過程において連結部 No.1 の固有振動数の変化は No.3 のそれに類似していたものと考えられる。

(a) Connector No.1

(b) Connector No.2

(c) Connector No.3

(d) Connector No.4

図4 損傷同定解析結果 ($\gamma=0.1$)

6. まとめ

観測データおよび観測誤差を損傷浮体模型の加振実験に基づく実験モード解析から求めた値を用い、パラメトリック射影フィルタに基づくアルゴリズムを逆解析手法とする損傷解析より得られた知見をまとめると以下の様になる。

- (1) 本逆解析手法による損傷同定解析では同定された状態量が目標値との間に多少の誤差を含むものの、逆解析の対象となるシステムに適応したパラメータ γ を設定することにより安定した収束性を示す。目標値との誤差は、数値モデルから計算された連成固有振動数と実測された連成固有振動数の差から生ずるものと考えられる。
- (2) パラメータ γ は、100, 120, 180 として設定したが、 γ が大きくなるに連れて安定したフィルタリング計算が得られ、本逆解析では $\gamma=180$ とすることにより安定した同定解析が可能であった。
- (3) パラメトリック射影フィルタに基づくフィルタリングアルゴリズムは γ を調整することにより安定化の一手法として、推定誤差共分散行列 $\mathbf{Q}$ を用いた正規化と同様な効果を得ることができる。

(a) Connector No.1

(b) Connector No.2

(c) Connector No.3

(d) Connector No.4

図5 損傷同定解析結果 ($\gamma=30$)

(a) Connector No.1

(b) Connector No.2

図6 損傷同定解析結果 ($\gamma=180$)

(c) Connector No.3

(d) Connector No.4

図6 損傷同定解析結果 ($\gamma=180$) 図7 連結部 No.1 と No.3 の状態量の比較 ($\gamma=180$)

- (4) パラメータ γ に大きな値を設定すると基本的にフィルタリング回数が増えることから勘案して、 γ を大きく設定することで状態量が目標値を探索する感度を鈍くする効果があると考えられる。実測値を用いた損傷同定解析では、観測雑音の他、数値モデルから得られた計算値と実測値にも多少の差を生じるため、 γ を大きく設定することで同定感度を鈍くし、数値モデルとの差や観測データに含まれる誤差を許容し、安定化が図れるものと考えられる。
- (5) 連結部 No.3 に損傷を仮定した場合のみ、損傷位置の同定が不可能であった。これは、本逆解析手法に起因するものではなく、連成固有振動数の特性によるものと思われる。本研究では拡張型のフィルタリングアルゴリズムを用いていることから、同定が不可能であった連結部 No.3 について、初期値を正常剛性の 10% として設定した場合の逆解析も試みた。また、本逆解析では初期値を設定する際、連結部 No.1 に微少な損傷を仮定した場合の他、連結部 No.3 に微少な損傷が生じたものとして初期値を設定した解析も試みた。さらに、様々な初期値の設定方法も試みたが、先に示した同定結果と同様であったことを付記する。

以上、パラメトリック射影フィルタに基づくアルゴリズムを、連成系に対する逆解析手法として採用した場合の適応性について述べた。これより、パラメータ γ を逆解析の対象とするシステムに応じて適切に設定することにより、本逆解析アルゴリズムは安定した逆解析が可能になることを示した。

参考文献

- 1) 大川豊, メガフロートの目指すもの, 日本造船学会会誌, 第 794 号, pp.7-12, 1995.
- 2) 日本建築学会海洋委員会, 「都市機能補完型海洋建築」を考える, 2000 年度日本建築学会大会 (東北) 海洋部門研究協議会資料, 2000.
- 3) 日本建築学会海洋委員会, 「都市機能補完型海洋建築」の実現に向けて, 2001 年度日本建築学会大会 (関東) 海洋部門研究協議会資料, 2001.
- 4) ESCOBAR S., LOPEZ BATIZ., Marimo SUGAHARA: センシティブィー・マトリックスによる鉄筋コンクリート構造物の損傷解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 508 号, pp.93-100, 1998.6.
- 5) 濱本卓司, 近藤一平: 鉛直・水平方向探索を用いた偏心を有する多層建築物の二段階損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, 第 519 号, pp.21-28, 1999.5.
- 6) Ryuji Endo, Yoshitsugu Kawakami, Takuji Imai & Nobuyoshi Tosaka: Identification Analysis of Structural Damage on Unit-Linked Offshore Floating Models, Int. J. of Offshore and Polar Engineering, Vol.9, No.3, 1999.
- 7) 川上善嗣, 遠藤龍司, 登坂宣好: フィルタリングアルゴリズムを用いた大型浮遊式海洋建築物模型の損傷同定解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 547 号, pp.215-222, 2001.9.
- 8) 登坂宣好, 大西和榮, 山本昌宏: 逆問題の数理解法, 東京大学出版会, pp.256-287, 1999.
- 9) 登坂宣好: フィルタ理論による計算力学の逆問題, 機械の研究, 第 49 巻 1 号, pp.118-126, 1997.
- 10) 塩田寿美子, 遠藤龍司, 登坂宣好: フィルタ理論を用いたブレース材を有するフレーム構造物の損傷同定解析, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.479-485, 2002.
- 11) 遠藤龍司, 川上善嗣, 塩田寿美子, 登坂宣好: ユニット連結型浮遊式海洋建築物の損傷同定解析に用いるパラメトリック射影フィルタの特性について, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.471-477, 2002.
- 12) Endo, R., Hamamoto, T., Wakui, K., Imai, T., Tosaka, N.: Modal Analysis of Very Large Floating Structures - Effect of connector and anchor stiffness on modal parameters -, THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, Vol.45, pp.131-142, 1996.
- 13) 登坂宣好, 遠藤龍司, 川上善嗣: 離散逆問題における射影フィルタの適切な化法, 日本大学生産工学部第 32 回学術講演会, pp.73-76, 1999.

(2001年11月8日原稿受理, 2002年7月4日採用決定)