

可変的パラメトリック射影フィルタリングアルゴリズムを 逆解析手法とする 3 層フレームモデルの水平剛性の同定 Identification Analysis on Lateral Stiffness of 3-Story Frame Structures Based on Variable Parametric Projection Filtering Algorithm

池田 義人 遠藤 龍司 (職業能力開発総合大学校)

Yoshihito Ikeda and Ryuji Endo

3 層フレームモデルのすべての層の水平剛性を同時に評価するために、逆問題解析によるシステム同定を行った。一般に、逆問題解析は一意解が存在しないことに起因して非適切な問題である。本研究では、正則化パラメータを含む可変的パラメトリック射影フィルタ (VPPF) に基づくアルゴリズムにより、実測された固有振動数を観測データとした逆問題解析を構成した。本アルゴリズムは繰り返し計算を必要としていることから、初期値の設定による解の精度への影響について検討を加えた。さらに、可変的に決定される正則化パラメータによる VPPF の特性について考察を加え、本手法の有効性を示した。

キーワード：システム同定、逆問題解析、VPPF アルゴリズム、固有振動数、正則化パラメータ

1. はじめに

資源に乏しい我が国では、建築物の有効活用が望まれている。しかし、日本列島の周辺には太平洋プレートを始めとする 4 枚のプレート境界の存在が知られており¹⁾、これらにより我が国は太平洋沿岸を中心として、世界で有数の地震国であることから、極めて厳しい耐震コードにより建築構造物等は設計されている。日本の耐震コードは中程度の地震に対するものと、大地震に対するものに大別される。中程度の地震に対する耐震設計では、構造物は弾性範囲の挙動が義務付けられ、いわゆる許容応力度設計に基づいている。他方、大地震に対する耐震設計では、人命を保護することを条件に、塑性変形が許容されており、保有水平耐力設計と呼ばれている。

このような中、様々な地震後において固有振動数を測定すると、中程度の地震後であったとしても明らかに固有振動数は長周期側に移行しており、構造剛性に何らかの変化が生じていることも考えられる。当然、大地震後では損傷が目視で確認できなくても塑性変形が進行していることが考えられ、対象となる建築物は構造安全性や耐震性の確認が必要となる。また地震に遭遇していない建築物であっても、時間の経過とともに経年劣化により各部材の剛性が低下し、部材レベルの損傷はシステムレベルの損傷へと発展していくことが考えられる。

建築物の耐震性は強度と剛性の観点から検討されなければならない。強度に関しては、応力度や耐力が耐震性の対象となり、剛性に関しては変形に関係付けられる。建築構造物は一般に不静定構造物であり、これらの構造物の耐震性は剛性の評価が極めて重要である。既存建築物の剛性の評価の方法として構造ヘルスマニタリング²⁾

が知られている。ヘルスマニタリングの多くは固有振動数を測定し、固有振動数の変化から剛性の変化を検出する逆問題として構成される。固有振動数の変化を剛性の変化に写像する方法は逆解析手法³⁾であり。様々な方法が提案されている⁴⁾。なかでも Kalman フィルタに代表されるフィルタ理論に基づく方法は、逆問題解析手法として以前から用いられている。

最近では非線形挙動の逆問題に対して、初期条件や境界条件あるいは、数理モデルに含まれるパラメータを実際の観測に基づいて構成するデータ同化⁵⁾の概念を取り入れたアンサンブルカルマンフィルタ⁶⁾や粒子フィルタ⁷⁾等の様々なフィルタが提案されている。

これに対して筆者らは、既存の Kalman フィルタとは異なる評価基準を満足するパラメトリック射影フィルタ⁸⁾に着目した。パラメトリック射影フィルタはティホノフの正則化パラメータに対応するパラメータが含まれており、非線形逆問題においても正則化の効果が期待できる。しかし正則化パラメータの最適値はそれぞれの逆問題により異なっており、パラメータの設定にあたっては試行錯誤が必要である。このような問題に対して登坂、遠藤は各フィルタリングステップごとにパラメータの値を計算的に決定する可変的パラメトリック射影フィルタを提案した⁹⁾。逆問題解析は一意的な解の保証がないため、未知数が多くなるにしたがい非適切性のリスクが増加する。本研究では提案した可変的パラメトリック射影フィルタに基づくアルゴリズムにより 3 層フレームモデルの水平剛性に関するシステム同定を行い、複数層同定の可能性と、その場合における可変的パラメトリック射影フィルタの特性について検討することが目的である。

このような構造ヘルスマニタリングに関する問題は以前から報告されているにも関わらず、現在まで実用化されるに至っていない。その原因として、高度な解析技術が必要であること、高精度なデータの観測技術が必要であること、そして極めて複雑なシステム同定解析を安定的に実施しなければならないこと等が挙げられる。本研究は中低層建築物のヘルスマニタリングの実用化を目指し、可能な限り簡便な計算システムと逆解析システムの構築を目標とした。

2. 構造システム同定

本研究では、離散的ダイナミックシステムに対するフィルタ理論¹⁰⁾を構造システム同定のための逆問題解析手法として援用する。構造システム同定とは、対象とする構造物の固有振動数を観測し、その構造物のすべての層の水平剛性を同定する逆問題と定義することにする。

2.1 フィルタリングアルゴリズム

フィルタリングアルゴリズムは、一般に状態方程式、観測方程式およびフィルタ方程式から構成される。本逆解析において状態量として採用する水平剛性は、フィルタリング過程において時間的遷移構造を持たないことを仮定すると、状態方程式は次のように表すことができる。

・状態方程式

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

すなわち、状態遷移行列 Φ は単位行列 $\mathbf{I}$ で表わされ、システム雑音は無視することができる。これより添字 t は時間項を表わすのではなく、フィルタリングステップを意味することになる。

次に観測方程式において、観測量を固有振動数とすると、状態量である水平剛性との関係は非線形となるため、観測方程式は次式の様に非線形に拡張する必要がある。

・観測方程式

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{m}_t(\tilde{\mathbf{z}}_t) + \mathbf{v}_t \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{m}_t(\tilde{\mathbf{z}}_t)$ は水平剛性の推定量 $\tilde{\mathbf{z}}_t$ における固有振動数を意味する非線形ベクトル関数である。そこで実用的な計算を行うために $\tilde{\mathbf{z}}_t$ の回りで展開し、高次項を無視すると次式の様な疑似線形化された観測方程式を得る。

$$\mathbf{y}_t = \hat{\mathbf{M}}_t \tilde{\mathbf{z}}_t + \mathbf{v}_t \quad (3)$$

ここに、 $\hat{\mathbf{M}}_t$ は感度行列であり次式で与えられる。

$$\hat{\mathbf{M}}_t \equiv \frac{\partial \mathbf{m}_t(\tilde{\mathbf{z}}_t)}{\partial \tilde{\mathbf{z}}_t} \quad (4)$$

これらのことより、フィルタ方程式は非線形ベクトル関数を用いた、いわゆる拡張型を用いる必要があり次式の様に表すことができる。

・フィルタ方程式

$$\tilde{\mathbf{z}}_{t+1/t} = \tilde{\mathbf{z}}_{t/t-1} + \mathbf{B}_t(\mathbf{y}_t - \mathbf{m}_t(\tilde{\mathbf{z}}_{t/t-1})) \quad (5)$$

・初期条件

$$\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1} = \tilde{\mathbf{z}}_0 \quad (6)$$

ここに、 $\tilde{\mathbf{z}}$ に関する下付き添字 $t/t-1$ は $t-1$ 回目のフィルタリングステップの情報に基づく t 回目の状態ベクトルを意味する。また、本研究における復元作用素 $\mathbf{B}_t$ は、射影フィルタ族の中の次式で与えられるパラメトリック射影フィルタを採用する。

・フィルタゲイン

$$\mathbf{B}_t = (\hat{\mathbf{M}}_t^T \mathbf{Q}_t^{-1} \hat{\mathbf{M}}_t + \gamma \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{M}}_t^T \mathbf{Q}_t^{-1} \quad (7)$$

逆解析手法としてのフィルタリングアルゴリズムは、観測データとしての固有振動数 $\mathbf{y}_t$ と、状態量である水平剛性 $\tilde{\mathbf{z}}_t$ を用いて、後に示す非減衰の自由振動方程式(16)から計算された固有振動数が一致するまで繰り返し計算するアルゴリズムである。従って、フィルタゲイン(復元作用素) $\mathbf{B}_t$ は繰り返し計算において、状態量の推定量 $\tilde{\mathbf{z}}_t$ の変化をコントロールする役割を担っていると考えられる。すなわち、フィルタリングの性質はフィルタゲイン $\mathbf{B}_t$ の性質に依存することになる。

フィルタ方程式(5)を繰り返し計算アルゴリズムとして駆動するためには、初期値を与える必要がある。非線形項を含んだ繰り返し演算であり、一意的な解が存在しないため、逆解析特有の計算が不安定となる非適切性のみならず、解の精度にも初期値が多大な影響を与えることが考えられる。

2.2 可変的アルゴリズムの構成

本研究で採用するパラメトリック射影フィルタの特徴として、正則化パラメータである γ がフィルタゲインに含まれていることが挙げられる。計算に当たってはこの γ を具体的な数値として与える必要がある。筆者らは当初、パラメータ γ の設定に際し、試行錯誤により様々な値を適当に設定した経緯がある¹¹⁾。その結果、パラメータ γ の値を小さく設定すると拡張 Kalman フィルタの性質に類似し、逆に大きな値を設定すると射影フィルタの性質に移行することになった。しかし、こうして設定した γ の値は、逆解析の対象とする数理モデルに最適な値である保証はなく、客観的な γ の値の決定法が望まれる所となった。そこで、正則化パラメータ γ の設定において可変的決定手法を導入することにより、任意の初期値からフィルタリングの計算過程を通して、自律的であり数理モデルに適応する数値を与えることのできる可変的パラメトリック射影フィルタリングアルゴリズム(VPPF)が提案された。

以下に VPPF について概説する。

フィルタリングの初期ステップにおいて非線形ベクトル関数を疑似線形化し、フィルタ方程式を表すと次式で与えられる。

$$\tilde{\mathbf{z}}_{0/0} = \tilde{\mathbf{z}}_{0/-1} + \mathbf{B}_0(\mathbf{y}_0 - \mathbf{M}_0(\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1})) \quad (8)$$

これより、状態ベクトルは観測ベクトルに比例するものと仮定すると、近似的に次式の様に表すことができる。

$$\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1} \doteq \mathbf{A}_0 \mathbf{y}_0 (= \mathbf{A}_0 \mathbf{M}_0(\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1})) \quad (9)$$

ただし、行列 $\mathbf{A}_0$ は対角行列である。一方、初期ステップのフィルタ方程式は、次式の様に表わすこともできる。

$$\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1} \doteq \mathbf{B}_0 \mathbf{y}_{0/-1} \quad (10)$$

ここに、 $\mathbf{B}_0$ はパラメトリック射影フィルタであり、具体的には次の式の様に表わされる。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_0 \mathbf{y}_{0/-1} &= \mathbf{B}_0 \mathbf{y}_{0/-1} \\ &= (\mathbf{M}_0^T \mathbf{Q}_0^{-1} \mathbf{M}_0 + \gamma_{0/0} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{M}_0^T \mathbf{Q}_0^{-1} \mathbf{y}_{0/-1} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)より、パラメータ γ の初期値に関する次の関係式を得る。

$$\gamma_{0/0} \tilde{\mathbf{z}}_{0/-1} = \mathbf{b}_{0/-1} \quad (12)$$

ただし、

$$\mathbf{b}_{0/-1} = \mathbf{M}_0^T \mathbf{Q}^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{M}_0 \mathbf{A}_0) \mathbf{y}_{0/-1} \quad (13)$$

である。以上の関係より、 $\gamma_{0/0}$ は $\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1}$ と $\mathbf{b}_{0/-1}$ との内積と $\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1}$ のノルムを用いて次式で表わすことができる。

$$\gamma_{0/0} = \frac{\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1} \cdot \mathbf{b}_{0/-1}}{\|\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1}\|^2} \quad (14)$$

式(14)を計算することにより、フィルタリング 1 回目の初期状態量に対する値が求まったのでこの γ を用いて $\mathbf{B}_{0/0}$ を求め、フィルタ方程式より $\tilde{\mathbf{z}}_{0/0}$ を得ることができる。次に $\tilde{\mathbf{z}}_{0/0}$ を用いて同様の計算により $\gamma_{0/1}$ を求め、フィルタ方程式より $\tilde{\mathbf{z}}_{0/1}$ が求められる。この一連の計算を γ が収束するまで繰り返し計算を行い、収束した値をフィルタリング 1 回目の γ の値とする。フィルタリング 2 回目では $\tilde{\mathbf{z}}_{1/0}$ を初期値として γ が収束するまで繰り返し計算し、各フィルタリングステップで同様の計算を行うことにより γ を決定することで可変的パラメトリック射影フィルタ (VPPF) を構成することができる。

2.3 可変的アルゴリズムの正則化

式(14)により構成した可変的アルゴリズムは、フィルタ方程式により、次のステップの状態量を繰り返し計算により決定していることからわかる様に、フィルタリング計算を正則化することなしに実施していることと同様である。経験的には状態量が 3 変数以上になると繰り返し計算が不安定になる場合が散見される。そこでこの問題を回避するために、多変数ベクトルで表現されている式(14)において、対角行列 $\mathbf{A}_0$ の特定の成分に着目し、すべての物理の関係が 1 対 1 対応となる変数として計算することが考えられる。これにより、 γ を決定するための繰り返し計算はスカラー表現となり次式で表わされる。

$$\gamma_{0/-1} = \mathbf{M} \mathbf{Q}^{-1} (1 - a_0 \mathbf{M}) \mathbf{y}_{0/-1} \tilde{\mathbf{z}}_{0/-1}^{-1} \quad (15)$$

ここに、 $\mathbf{M}$, $\mathbf{Q}$, a_0 , $\mathbf{y}_{0/-1}$, $\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1}^{-1}$ はそれぞれ $\mathbf{M}_0$, $\mathbf{Q}_0$, $\mathbf{A}_0$, $\mathbf{y}_{0/-1}$ および $\tilde{\mathbf{z}}_{0/-1}$ の特定された同一の成分である。

2.4 システム同定に用いるフレームモデル

構造システム同定に当たっては、せん断形モデルとして作成した各層の水平剛性が異なる 3 種類のフレームモ

デルとすべての水平剛性が等しいモデルを用いることにする。それぞれのモデルの概要を図 1 に、また表 1 にモデルの諸元を示す。すなわち、本システム同定で採用するフレームモデルは、すべての層の水平剛性が等しい場合を基本とし、各複数層が損傷により剛性低下したことを仮定した場合を 4 体作成した。なお剛性低下は、断面 2 次モーメントの低下量として評価した。

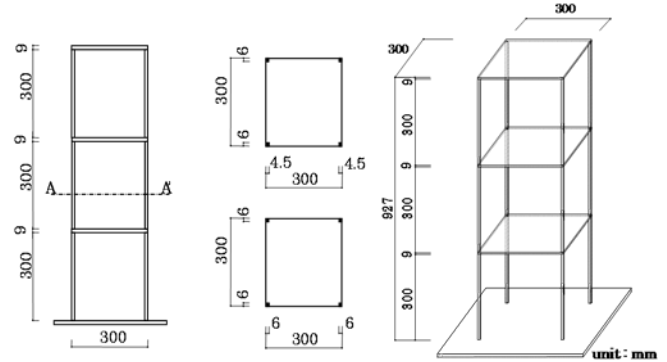


図 1 構造フレームモデルの概要

表 1 各モデルの諸元

柱 (mm)	剛性低下なし	全層	6.0×6.0
	1-2層剛性低下	1, 2層	6.0×4.5
		3層	6.0×6.0
	1-3層剛性低下	1, 3層	6.0×4.5
		2層	6.0×6.0
	2-3層剛性低下	2, 3層	6.0×4.5
		1層	6.0×6.0
階高(mm)			300
プレート(mm)			300×300× 9.0
ヤング係数(N/mm ²)			2.05×10 ⁵

2.5 観測データの測定

観測データは固有振動数であることから、その測定に当たっては実験モード解析¹²⁾を採用した。実験モード解析は固有振動数、固有モードおよび減衰比を求めるための実用的な実験解析手法であり、一般に加振実験から得られる周波数応答関数の測定とモーダルパラメータの同定の 2 つのカテゴリから成り立っている。本測定では比較的簡単な加振手法とされているインパクトハンマによる方法を用い、インパクトハンマに内蔵されているロードセルによる加振力と各層に設置された圧電型の加速度計からの応答によって周波数応答関数を求めモーダルパラメータを同定した。

実験モード解析のイメージを図 2 に示し、またカーブフィットされた周波数応答関数のグラフの例を図 3 に示す。周波数応答関数で 1 次モードの値よりも 3 次モードの値のほうが大きくなっているのは、加振位置を変えて数回加振したためである。

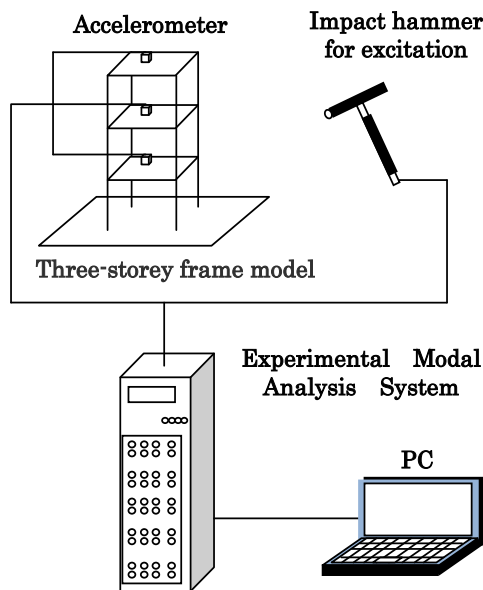


図2 3層フレーム構造物の加振実験

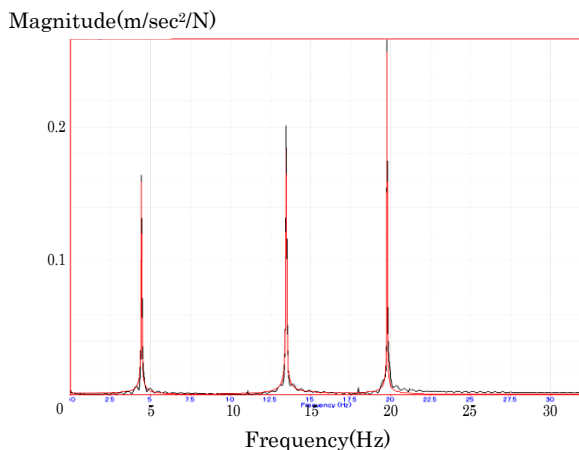


図3 カーブフィッティングと周波数応答関数

2.6 観測データと固有方程式

実験モード解析によって実測された固有振動数は、逆解析アルゴリズムにおいて数値モデルにより計算される固有振動数と比較されることになる。本システム同定で対象とする構造物は3層フレームモデルであり、観測データを固有振動数とすると数値モデルは非減衰せん断型質点系としての固有振動方程式(16)として構成することができる。

$$[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}] = 0 \quad (16)$$

ここに $\mathbf{K}$ は水平剛性行列、 $\mathbf{M}$ は質量行列、 ω^2 は固有値を意味する。

固有方程式(16)は一般的な固有値解析アルゴリズムを用いて固有値 ω^2 を求めることが可能であり、本計算ではQR法を採用した。先に示したフレームモデルに対して、固有値解析により求めた固有振動数と実験モード解析より求めた固有振動数を比較して表2に示す。実験値と計

算値には微小な差が生じており、本システム同定では、実測値に基づいて水平剛性が同定されることになる。

VPPF アルゴリズムによるフィルタリング計算の流れを図4に示す。

表2 各モデルの固有振動数の比較

モデル	実測値 (Hz)			計算値 (Hz)		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
低下なし	5.08	12.60	21.44	5.25	14.70	21.21
1,2層低下	4.49	13.52	19.76	4.61	13.61	19.57
1,3層低下	4.66	12.74	20.28	4.89	13.41	18.73
2,3層低下	4.75	13.37	19.05	4.76	12.90	20.00

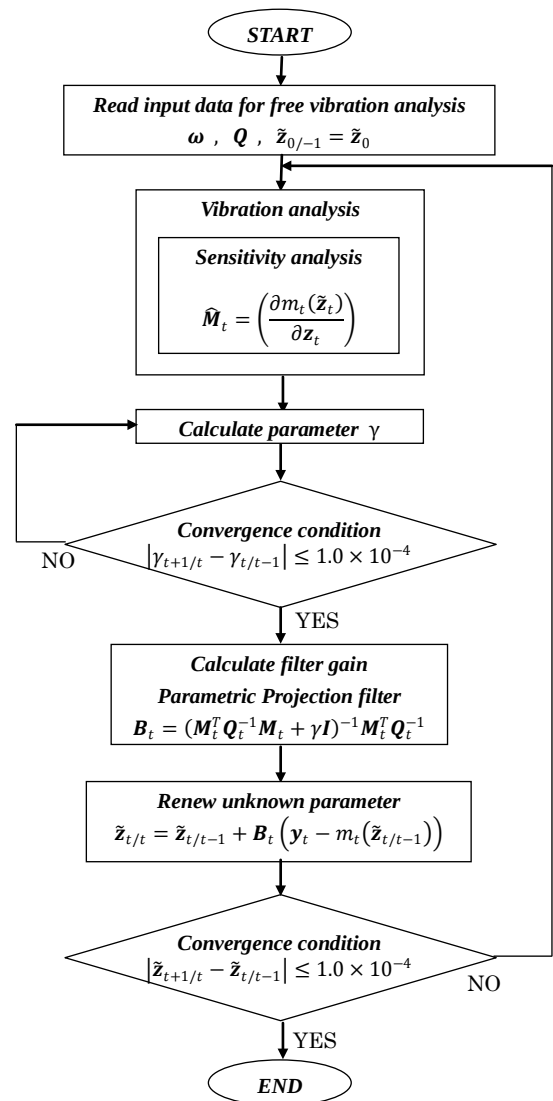


図4 VPPF アルゴリズムによる計算の流れ

3. システム同定結果と検討

一般に逆解析は、解の一意性が保証されないことに起因して、同定すべき状態量の数が多いほど非適切性のリスクが増加する。そのため逆解析は正則化を図る必要があることは先に述べた。本論では、正則化パラメータを各フィルタリングアルゴリズムにおいて計算的に決定する

可変的パラメトリック射影フィルタリングアルゴリズムを用いて、3 層フレームモデルの固有振動数を観測し全層の水平剛性を同定する逆問題を通して、3 状態量を未知数として同定することにし、可変的パラメトリック射影フィルタの特性について検討を加える。可変的パラメトリック射影フィルタの特性の 1 つに、正則化パラメータの決定に関して一次元化することにより正則化を図っていることが挙げられる。一次元化に当たっては式(15)の a_0 として採用する対角行列の要素に対応するモード次数の固有振動数を用いなければならない。採用する固有振動数のモード次数の正則化に与える影響をモード依存性と呼ぶことにし、モード依存性の検討は本研究の特徴である。他方、本逆解析手法は、非線形に拡張したフィルタ方程式による繰り返し計算に基づいているため、設定する初期値の値が解の収束性や精度に極めて大きな影響を与えることになる。そこで、設定した初期値が逆解析結果に及ぼす影響を明らかにする表現により結果を示すことにした。

図 5 に、正則化パラメータを 1 次モードの固有振動数により決定した場合のそれぞれのモデルの逆解析結果を示す。結果を示す図において、横軸は計算に用いた初期値であり、基本的に 1 から水平剛性の設計値の 3 倍までの値として 1 刻みの 108 ケースの初期値を設定した結果が示されていることになる。繰り返し計算に設定した初期値が適合した範囲では、結果のプロットが横軸と平行な直線を形成することになる。これらの結果では、剛性低下した層があるモデルも無いモデルも、初期値を小さく設定した僅かの範囲において、結果のプロットが直線をなしていることがわかる。しかし、大きな初期値を設定するに従い、結果の値は一定とならず、これらの値による同定は困難である。このような繰り返しによる収束計算では、正解値の上方に初期値を設定するか、下方に設定するかにより計算精度や安定性が異なることになる。正則化パラメータを 1 次モードにより決定する場合は、明らかに初期値を下方に設定する方が好ましいことがわかる。こうした特性は、Wiener フィルタを用いた Kalman フィルタリングアルゴリズムに類似している。

図 6 に、正則化パラメータを 2 次モードの固有振動数により決定した場合のそれぞれのモデルの逆解析結果を示す。図の様式は先と同等である。各モデルとも逆解析結果のプロットが成す直線は、明らかに図 5 で示した結果より長くなり、各層の水平剛性の同定は精度と安定性が改善されている。これらの結果より、本逆解析手法はモード依存性が見られ、本逆解析では 1 次モードを用いて正則化パラメータを決定するより、2 次モードを用いて正則化パラメータを決定したアルゴリズムの方が正則化の効果が顕著である。

また、初期値の設定に関し、正則化パラメータを 1 次モードで決定した場合と異なり、正解値より極端に小さい値で設定した場合は、一定の値に収束しないだけでな

く、発散する場合も散見された。これより初期値は正解値の上方に設定することが好ましいことがわかる。

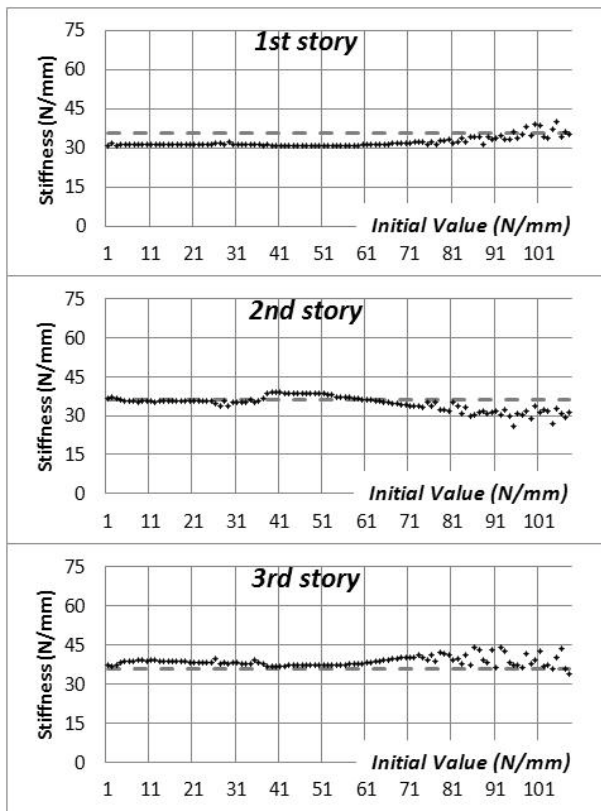
Kalman フィルタは収束性を優先する特徴があり、1 次モードで正則化した場合は、発散するケースはほとんど見られない。この観点からも 1 次モードで正則化を行った場合は、Kalman フィルタの特徴を有していることとなる。これに対して、2 次モードを用いて正則化した場合は、射影フィルタの特徴を有しているものと考えられる。

図 6 (b) は、1、2 層に剛性低下を仮定したモデルであるが、中間層に剛性低下を設定した場合、多少同定精度が劣る現象が見られる。

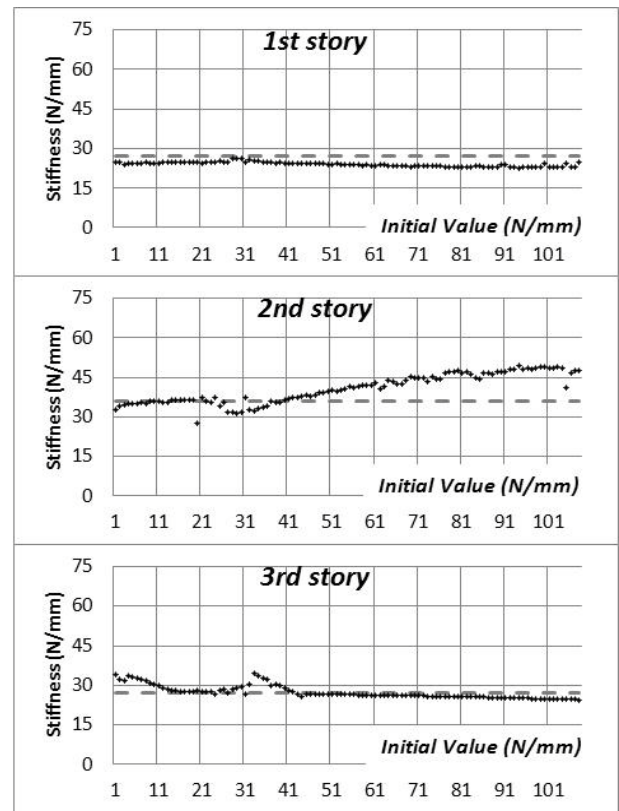
図 7 に、正則化パラメータを 3 次モードの固有振動数により決定した場合のそれぞれのモデルの逆解析結果を示す。2 次モードを用いて正則化パラメータを決定した先の場合とほぼ同様の結果と傾向が得られている。図 7 (b) の 1、2 層に剛性低下を仮定した場合のモデルは、2 次モードを用いて正則化を図った場合より解の精度は劣っている。この原因として、1、2 層の水平剛性が低下したモデルに対する正則化パラメータの値が適応していない可能性が考えられる。

そこで γ の値の変化を確認するために、図 8 に 1 層および 2 層の水平剛性が低下したモデルを例に、正則化パラメータを各モードで決定した場合の γ の推移と状態量の推移を示す。それぞれグラフの横軸はフィルタリング回数、縦軸は上段から S/N 比と同様の意味を有する無次元量の γ の値であり、下段は水平剛性である。正則化パラメータを 1 次モードの固有振動数を用いて決定した場合、 γ の値は 3000~4000 で推移しており、その際の状態量は正解値から大きく離れた値に収束している。これに対して、2 次モードおよび 3 次モードの固有振動数を用いて決定した場合の γ の値は、それぞれ 50~200 程度、40 前後と先と大きく異なっている。初期値との関係も含め、本逆解析に適應する正則化パラメータの値は数十~200 程度で推移することであると思われる。また図 8 の 2 次モードで正則化した場合の γ の値が、繰り返し計算の中盤から終盤において激しく変動している。これは、状態量の変動を安定化するために γ が変動して、計算を正則化している現象であると考えられる。この観点から、正則化パラメータの決定に関しては、2 次モードの固有振動数を採用する場合が最も適應するフィルタが構成されるものと思われる。

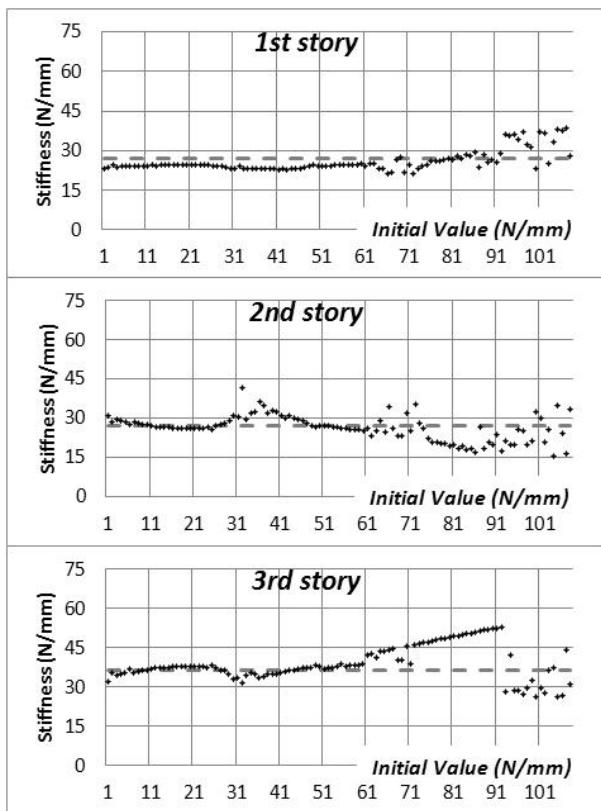
表 3 に正則化パラメータを 2 次モードおよび 3 次モードの固有振動数により決定した水平剛性の値を設計値と比較して示す。設計値とは多少の差異が確認できる。特に 1 層の水平剛性は、設計値より同定値が下回っている。モデルの作成にあたっては、接合部に溶接を用いる等、柱脚の固定支持や柱とスラブの接合部が剛接合となるよう可能な限り注意を払ったものの、完全には固定支持等が実現されておらず、同定値が設計値を下回ったものと考えられる。



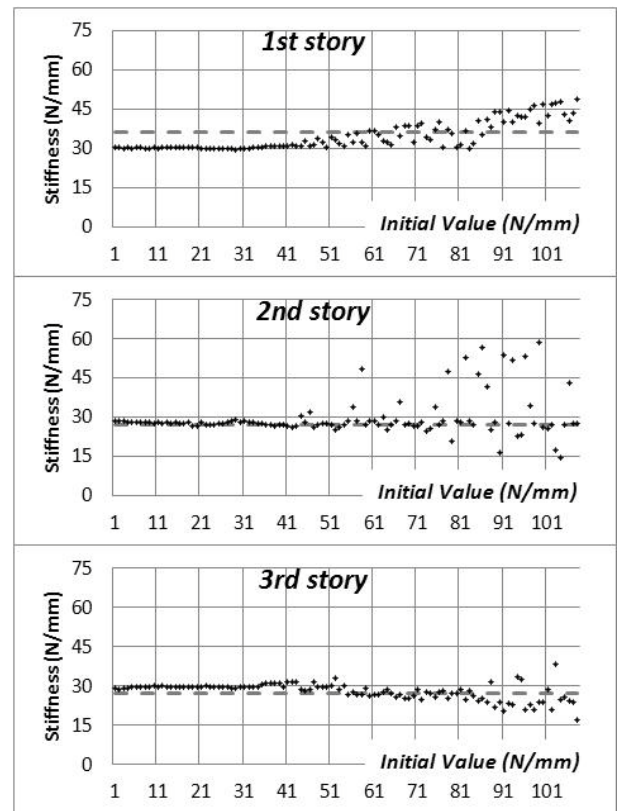
(a) 水平剛性同一モデル



(c) 1,3層水平剛性低下モデル

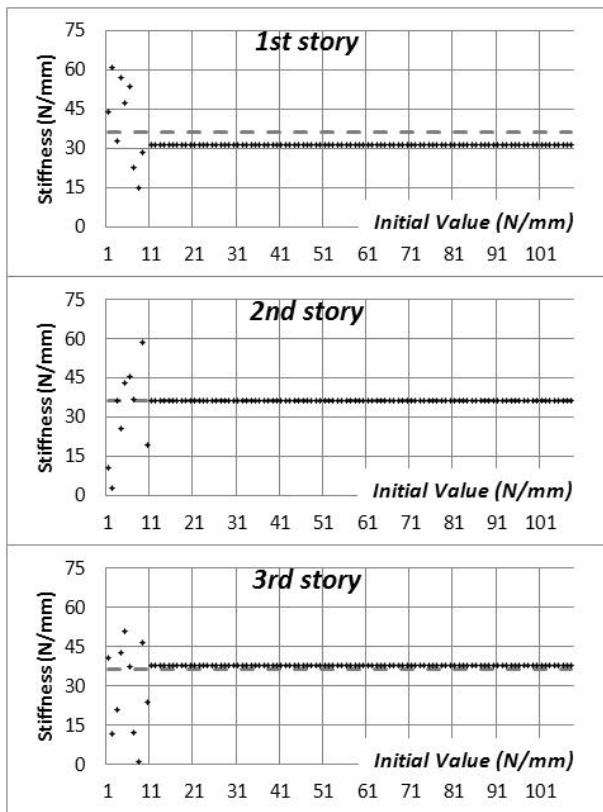


(b) 1,2層水平剛性低下モデル

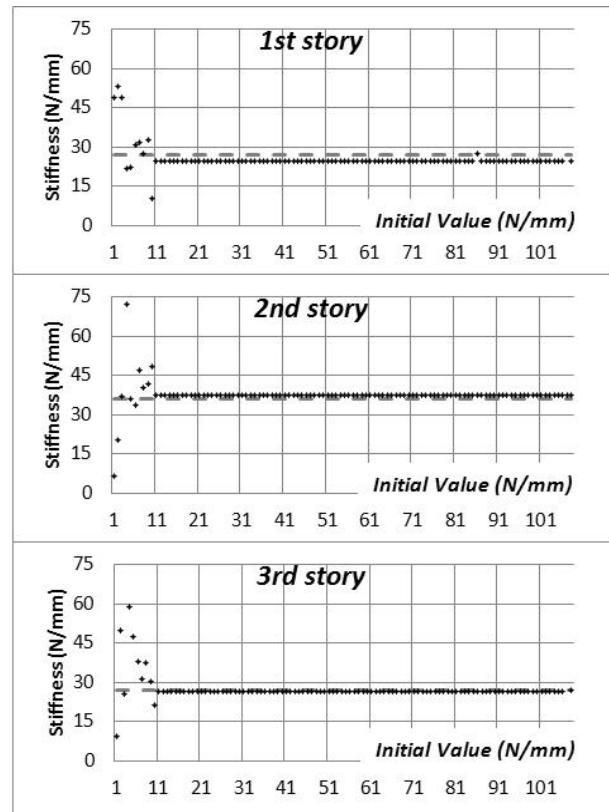


(d) 2,3層水平剛性低下モデル

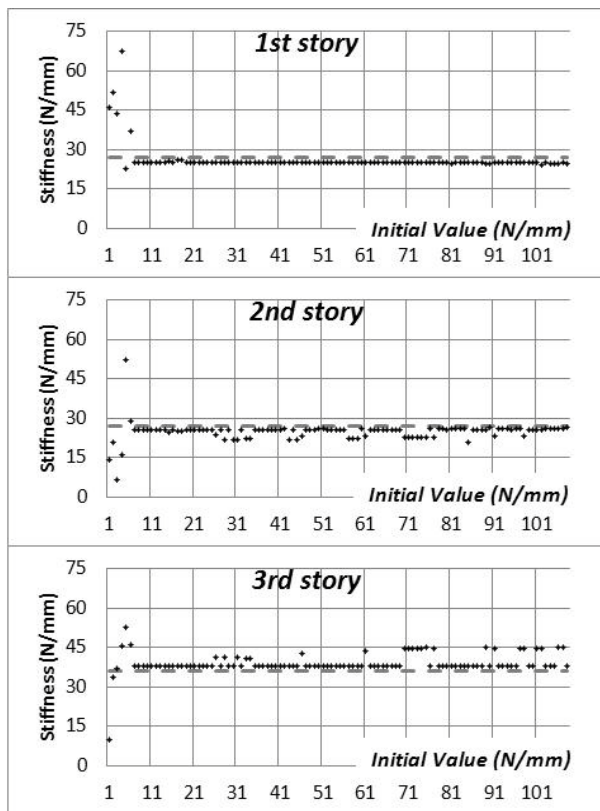
図5 正則化パラメータを1次モードで決定した場合の逆解析結果



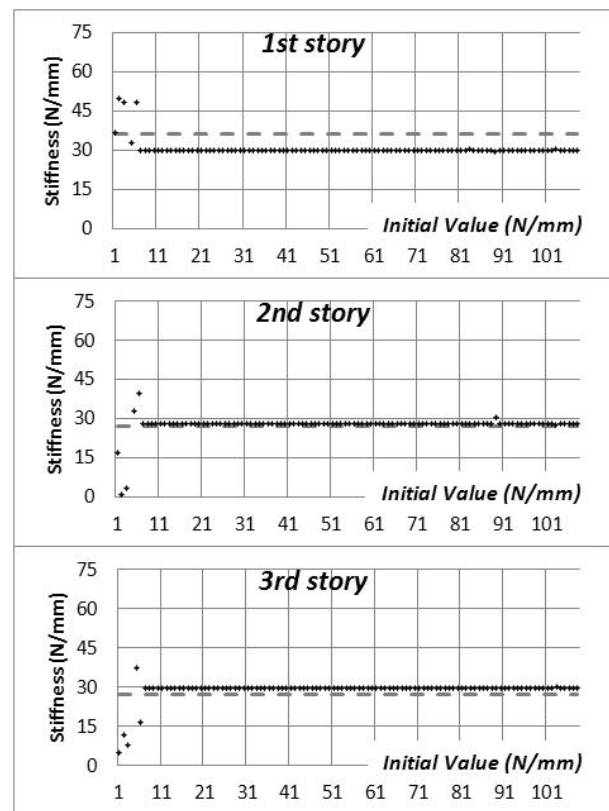
(a) 水平剛性同一モデル



(c) 1,3層水平剛性低下モデル

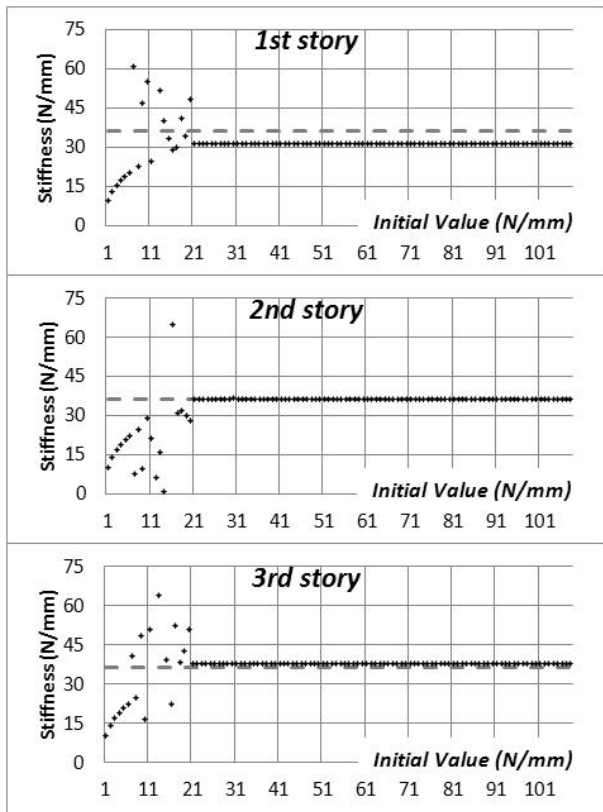


(b) 1,2層水平剛性低下モデル

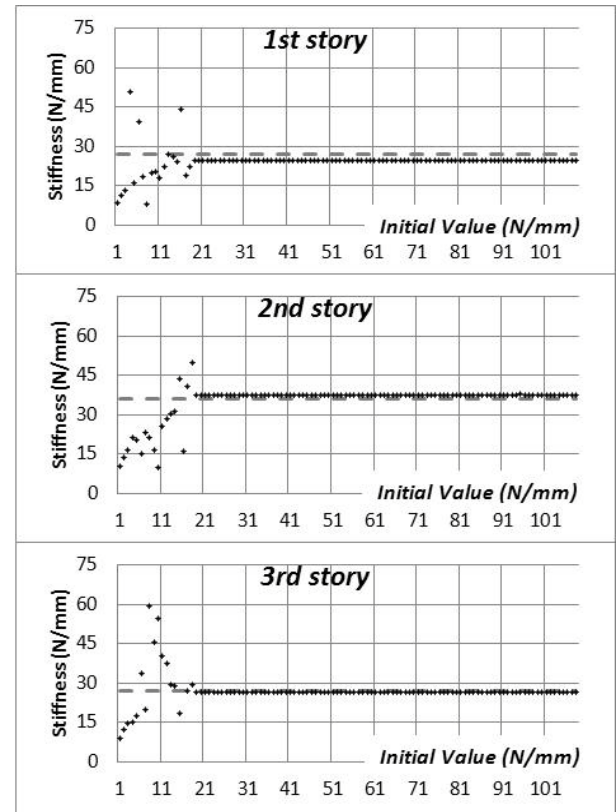


(d) 2,3層水平剛性低下モデル

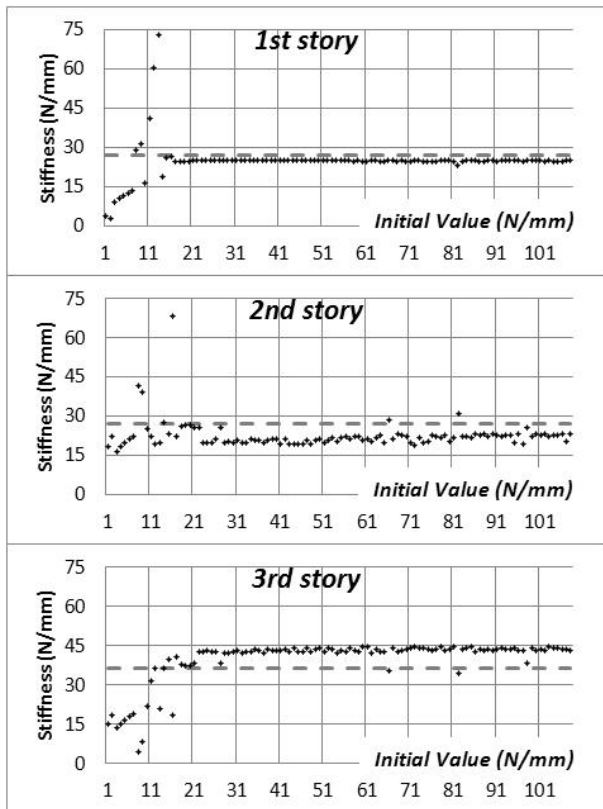
図6 正則化パラメータを2次モードで決定した場合の逆解析結果



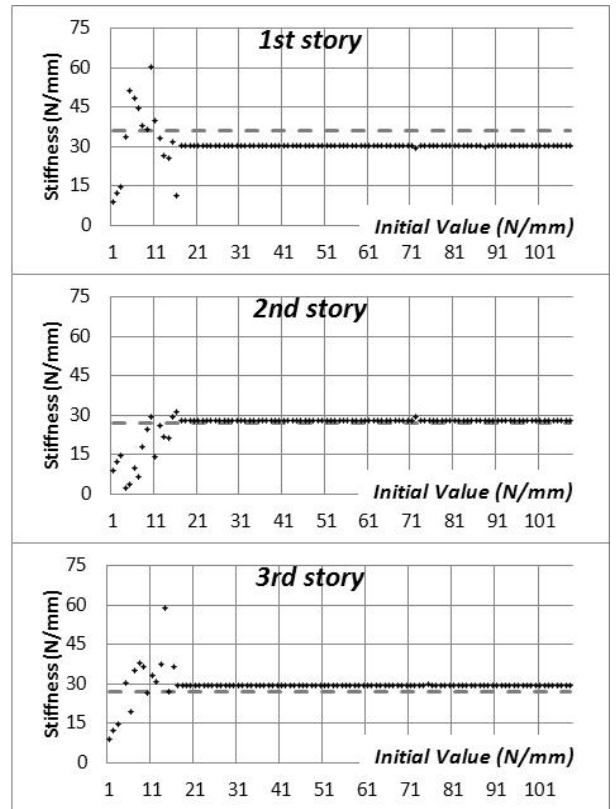
(a) 水平剛性同一モデル



(c) 1,3層水平剛性低下モデル

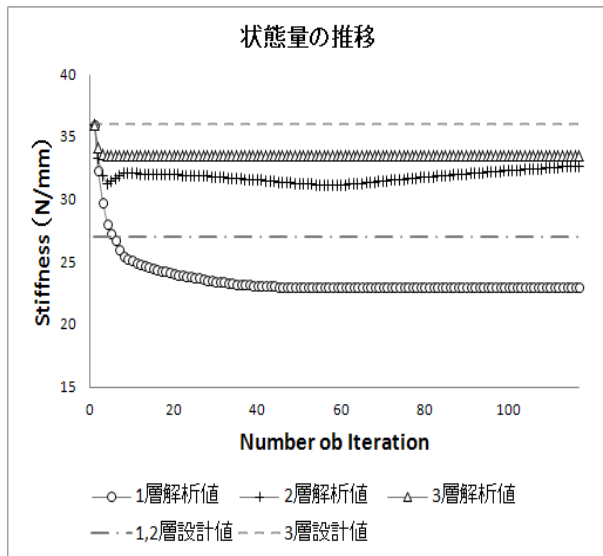
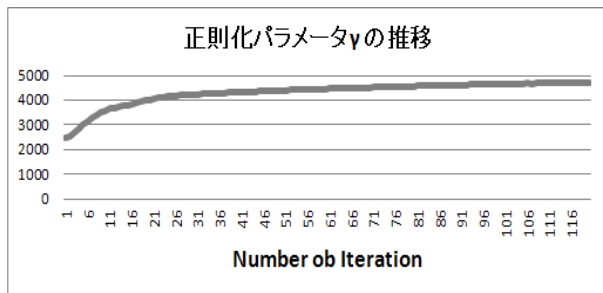


(b) 1,2層水平剛性低下モデル

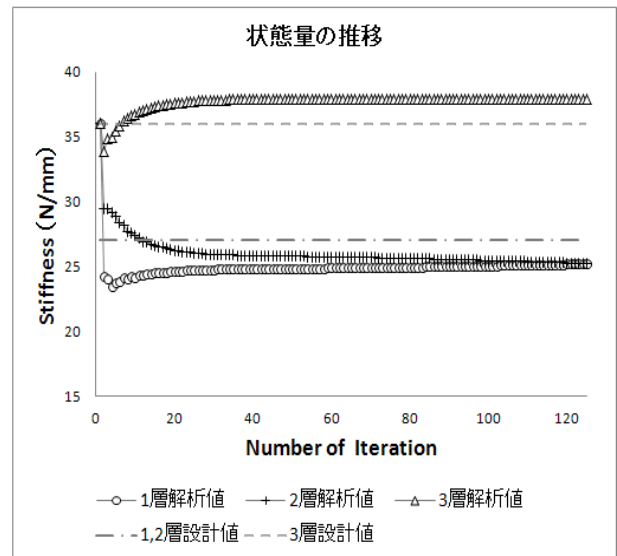
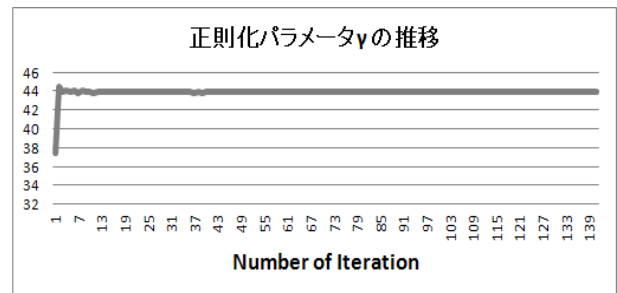


(d) 2,3層水平剛性低下モデル

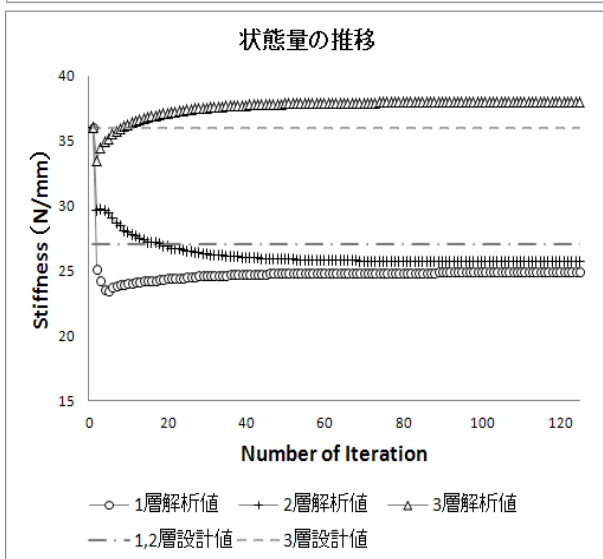
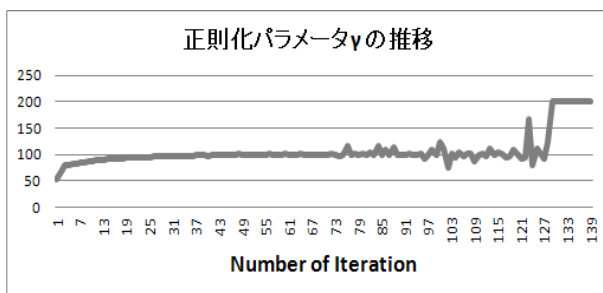
図7 正則化パラメータを3次モードで決定した場合の逆解析結果



(a) 1 次モードの固有振動数を使用した場合



(c) 3 次モードの固有振動数を使用した場合

図 8 正則化パラメータ γ の推移と状態量の推移

(b) 2 次モードの固有振動数を使用した場合

表 3 解析結果と設計値の比較

		1st Story (N/mm)	2nd Story (N/mm)	3rd Story (N/mm)
低下 なし モデル	Target Value	36.02	36.02	36.02
	γ : Mode 2	31.81	36.17	37.56
	γ : Mode 3	31.18	36.35	37.70
1,2 層 低下 モデル	Target Value	27.01	27.01	36.02
	γ : Mode 2	24.89	24.96	36.19
	γ : Mode 3	24.80	21.79	42.67
1,3 層 低下 モデル	Target Value	27.01	36.02	27.01
	γ : Mode 2	26.85	37.58	30.72
	γ : Mode 3	24.59	37.58	26.50
2,3 層 低下 モデル	Target Value	36.02	27.01	27.01
	γ : Mode 2	30.11	27.93	29.43
	γ : Mode 3	30.10	27.93	29.42

4. まとめ

既存建築物の長期有効活用を目的に、耐震性、安全性をモニタリングするための現実的な手法の開発を目指し、せん断型 3 層フレームモデルのシステム同定を通して、逆解析手法として採用した可変的パラメトリック射影フィルタの特性について検討した。その際、観測データとして用いた固有振動数は、実験モード解析により測定さ

れた値を採用し、現実的な特性が得られる様に配慮した。

本システム同定の結果から得られた、本逆解析手法の特性は以下の様にまとめられる。

- (1) 本逆解析手法における可変的パラメトリック射影フィルタの正則化にあたっては、モード依存性が見られ、1次モードより2次モードおよび3次モードの固有振動数を用いて正則化パラメータを決定した方が、適応型のフィルタが構成される。本逆解析においては、2次モードを用いて正則化する方が望ましい結果が得られた。
- (2) 本逆解析手法に用いた可変的パラメトリック射影フィルタは、Kalman フィルタ等の一般的なフィルタに基づくアルゴリズムよりも正則化による有効性が確認でき、一意解の保証がない問題であるにも関わらず、3状態量を同定することが可能であった。
- (3) 正則化パラメータを1次モードの固有振動数を用いて決定した場合は、状態量の推移が収束性を優先しており、Kalman フィルタによる特性と類似し、2次モードおよび3次モードの固有振動数を用いた場合は、射影フィルタの特性に類似していた。また、2次モードおよび3次モードによる正則化では、初期値を正解値の上方に設定し、上方から収束するような繰り返し計算が望ましい。
- (4) 製作したモデルで柱脚の固定支持を実現することは容易ではなく、観測データとして、実測された値を用いた本逆解析からも1~3層の中で1層の水平剛性が最も小さな値として得られ、逆解析により現実の水平剛性が確認された。これに対し、他の層のスラブと柱の接合部はほぼ剛接合が実現できていたものと思われる。

参考文献

- 1) Minoru Wakabayashi : Design of Earthquake Resistant Building, McGraw-Hill, 1986
- 2) 山本鎮男：ヘルスマニタリング, 1999, 共立出版
- 3) 登坂宣好, 大西和榮, 山本昌宏：逆問題の数理と解法, 1999, 東京大学出版会
- 4) Paula F. Viero, Ney Roitman : Application of some damage identification method in offshore platforms, Marine structure 12, pp.107 – 126, 1999
- 5) 中村和幸, 上野玄太, 樋口知之：データ同化：その概念と計算アルゴリズム, 統計数理, 第53巻, pp.211-219, 2002
- 6) R. Ghanem, G. Ferro : Health monitoring for strongly non-linear systems using the Ensemble Kalman Filter, Structural Control and Monitoring, Vol.13, pp.245 - 259, 2006
- 7) Akira Murakami, Takayuki Shuku, Shin-ichi Nishimura, Kazunori Fujisawa, Kazuyuki Nakamura : Data assimilation using the particle filter for identifying the elasto-plastic material properties of geomaterials, Int.J.Numer.Anal.Meth.Geomech., Published online in Wiley Online Library, DOI:10.1002/nag.2125, 2012
- 8) 遠藤龍司, 登坂宣好, 川上善嗣, 塩田寿美子：パラメトリック射影フィルタ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, 559号, pp.237 – 244, 2002
- 9) 遠藤龍司, 登坂宣好, 羽生大樹：可変的パラメトリック射影フィルタを用いた構造システム同定の初期値の影響, 計算数理工学論文集, Vol.10, pp.105 – 110, 2010
- 10) 片山徹：応用カルマンフィルタ, 1997, 朝倉書店
- 11) 塩田寿美子, 遠藤龍司, 登坂宣好：フィルタ理論に基づくフレーム構造物の損傷同定解析, 日本建築学会構造系論文集, 第605号, pp.95 – 102, 2006
- 12) 長松昭男：モード解析入門, 1993, コロナ社

(原稿受付 2014/01/15、受理 2014/03/25)

*池田義人, 助教

職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email:y-ikeda@uitech.ac.jp

Yoshihito Ikeda, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

**遠藤龍司, 教授・工博

職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email:endo@uitech.ac.jp

Ryuji Endo, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035