

## 感度行列に着目した射影フィルタによる逆問題解析の特性

CHARACTERISTICS OF INVERSE PROBLEM ANALYSIS BASED ON PROJECTION  
FILTERING ALGORITHM FOCUSED ON SENSITIVITY MATRIX池田 義人<sup>1)</sup>, 遠藤 龍司<sup>2)</sup>, 登坂 宣好<sup>3)</sup>

Yoshihito IKEDA, Ryuji ENDO and Nobuyoshi TOSAKA

- |                     |             |                 |                                  |
|---------------------|-------------|-----------------|----------------------------------|
| 1) 職業能力開発総合大学校能力開発院 | (〒 187-0035 | 小平市小川西町 2-32-1, | E-mail: y-ikeda@uitec.ac.jp)     |
| 2) 職業能力開発総合大学校能力開発院 | (〒 187-0035 | 小平市小川西町 2-32-1, | E-mail: endo@uitec.ac.jp)        |
| 3) 東京電機大学未来科学部建築学科  | (〒 120-8551 | 足立区千住旭町 5,      | E-mail: nobtsk@cck.dendai.ac.jp) |

This paper presents an useful technique for inverse analysis method to identify unknown parameters corresponding to detect lateral stiffnesses of each stories of a 3-story frame model. Especially, characteristics of inverse analyses based on filtering theory using iterative calculation algorithm were studied numerically. Projection filter which is given as a simple formula was adopted as an example of some filtering algorithm. Our present study focused on the engineering quantities related sensitivity matrix, difference technique and setting method of initial values were proposed to calculate stably the iterative calculations. The effectiveness of proposed method are shown through some numerical demonstration for the inverse analyses.

**Key Words:** Inverse Analysis, Projection Filter, Sensitivity Matrix

## 1. 序論

振動系の逆問題の例として、固有振動数を観測し、ばね定数を同定する問題が知られている。工学問題として建築構造物を例にとると、地震等による損傷検出が知られている<sup>(1)</sup>。一般にこうした問題は構造ヘルスマニタリングと呼ばれており、通常は、加速度センサ等を用いて固有振動数を観測し、剛性低下した損傷層を検出しようとするものである。

筆者らはこれまで、中低層建築物を対象としていくつかのフィルタリングアルゴリズムを繰り返し計算手法とする逆解析法を用い、損傷層のみならず、すべての層の水平剛性を同定する構造システム同定<sup>(2)</sup>を報告してきた。ここ数十年の構造システム同定や構造損傷検出問題は、柱や梁の特定の部材をターゲットとした局所損傷検出問題<sup>(3)</sup>や、筆者らのように建築構造物全体を損傷検出の対象とする広域損傷検出<sup>(4)</sup>が報告されている。損傷検出手法もしくは逆問題解析手法は様々な状況に応じて提案されている。その中でも、動的システムに対する離散時間モデルに関するフィルタリングアルゴリズムとして、Kalman フィルタは良く知られている。そのため Wiener フィルタに基づく Kalman フィルタは進歩を遂げ、強非線形の逆問題では、数理モデルに含まれる物理・工学パラメータを実測から求め、極大現象に適合するパラメータを構成するデータ同化<sup>(5)</sup>が提案されており、この流れの中でアンサンブル Kalman フィルタ<sup>(6)</sup>や粒子フィルタ<sup>(7)</sup>が提案されてい

る。筆者らは、正則化パラメータを有するパラメトリック射影フィルタを提案し、局所損傷検出問題<sup>(8)</sup>や広域損傷検出問題<sup>(9)</sup>を報告してきた。この際、未知数が多くなると当然、繰り返し計算が駆動せず、収束解が得られない場合が数多く見られた。そこで、繰り返し計算における状態量の変化をコントロールするフィルタの、特に感度行列に着目し、収束解が得られる場合とそうでない場合について検討を加え、感度行列の差分近似の方法と初期値の設定方法の観点から、より安定した計算方法を提案した<sup>(10)</sup>。

本研究もこれら一連のパラメトリックスタディの一部であり、本手法は同定すべき状態量に差があるほど安定した繰り返し計算が困難となることを踏まえ、本論では特に損傷程度が大きい場合の感度行列とその行列式の繰り返し計算における推移から、本計算手法の妥当性を確認することを目的としている。本研究でも既往の文献<sup>(10)</sup>と同様に、感度行列のみで構成される射影フィルタを用いることにする。

## 2. 逆問題解析の構成

振動系を数理モデルとした逆問題解析を構成するにあたって、3層フレームモデルを対象に射影フィルタを用いた具体的な逆問題解析手法について述べる。

## 2.1. 逆問題解析の構成

Fig.1 に示すような、ばね-質点系により表現されるフレ

ーム構造物の損傷検出に関する逆問題を構成する。本構造モデルは、せん断系モデルとしての鋼製 (SS400 材) フレームモデル<sup>(10)</sup>であり、すべての層の水平剛性が等しい (損傷がない) モデルと複数層に 25% の剛性低下を仮定したモデルの 4 体を作成した。ここで、水平剛性とは、地震等の水平力に対する変形のしにくさを表し、建築物の耐震性能の評価指標の一つとして知られている。本構造モデルでは、柱の端部の接合方法として剛接合を仮定していることから、その値は、柱の構造のみに依存することになり、特に柱の形状およびヤング係数により決定されることになる。本モデルの諸元を Table1 に示す。逆解析に当たっては、柱の断面形状を調整することで、各層に剛性低下を設定することにした。

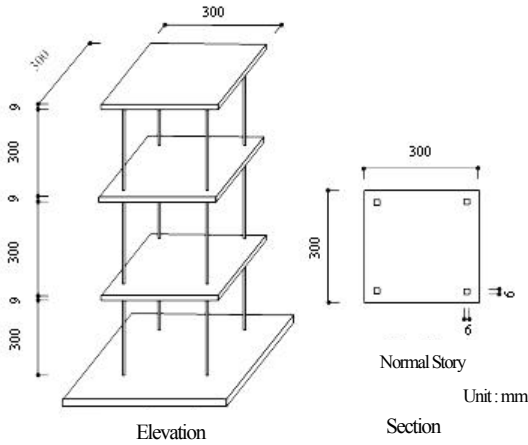


Fig.1 Outline of frame model

Table1 Structural parameters of frame model

Column Section (mm)	6.0×6.0
Height of Story (mm)	300
Scale of Plate (mm)	300×300×9.0
Young's Modulus (N/mm <sup>2</sup> )	2.05×10 <sup>5</sup>
Mass of each story (kg)	6.65
Lateral Stiffness (N/mm)	36.02

本逆問題解析では、状態量として各層の水平剛性を、観測量として各モードの固有円振動数を採用することにし、対象となる振動系の運動方程式は式(1)で与えられる。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{x}(t) = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここに  $\mathbf{M}$  は質量行列、 $\mathbf{K}$  は剛性行列である。また、 $\dot{\phantom{x}} = d/dt$  であり時間微分を意味する。なお、減衰が固有円振動数に与える影響は無視できるものとする。式(1)の解として、調和解を仮定する。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A} e^{i\omega t} \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{A}$  は振幅ベクトル、 $\omega$  は円振動数であり、 $i = \sqrt{-1}$  である。これを運動方程式に適用すると、同次代数方程式(3)を得る。

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (3)$$

同次代数方程式(3)が非自明解を持つ条件は(4)式で与えられる。

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (4)$$

式(4)を計算することにより固有円振動数  $\omega$  を求める順問題が構成される。逆問題解析では、質量行列  $\mathbf{M}$  を既知とする前提で、

固有円振動数  $\omega$  を観測量、剛性行列  $\mathbf{K}$  を未知状態量とすることで、各層の水平剛性を同定する。同定に当たっては、次節で述べる射影フィルタのフィルタリングアルゴリズムを採用する。

## 2.2. 逆問題解析手法

固有円振動数を観測し、水平剛性を同定する振動系の逆解析手法としてフィルタリングアルゴリズムによる繰り返し計算を採用する。筆者らはこれまで Kalman フィルタ (Winner フィルタ)、射影フィルタ、パラメトリック射影フィルタおよび可変パラメトリック射影フィルタを用いて様々な振動系の逆問題解析を報告<sup>(11)</sup>してきたが、同定すべき未知数が多くなると一意解が存在しないこと等に起因して適切な解が得られない。そこで、本研究では、安定した繰り返し計算を行うための手法を提案するために、観測雑音共分散行列等の誤差や雑音を考慮する項を含まない射影フィルタを再評価し、繰り返し計算における射影フィルタの特性について感度行列に着目し検討を加える。

本論では、動的システムに対する離散時間モデルのフィルタリングアルゴリズムを採用するが、状態量は時間的遷移構造を持たないことを仮定すると、状態量および観測量の添え字は時間ステップではなく繰り返し計算ステップを意味することになり、繰り返し計算アルゴリズムが以下のように構成できる。

・状態方程式

$$\mathbf{z}_{t+1} = \mathbf{I} \mathbf{z}_t \quad (5)$$

・観測方程式

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

ここに、 $\mathbf{z}_t$  は状態ベクトル、 $\mathbf{y}_t$  は観測ベクトル、 $\mathbf{v}_t$  は観測雑音ベクトル、 $\mathbf{I}$  は単位行列である。一般に  $\mathbf{z}_t$  は Gauss・Markoff 過程に基づき、 $\mathbf{v}_t$  は Gauss 過程に基づく統計量として定義される。このような統計的性質のもとでフィルタ方程式と初期条件が与えられる。また、 $\mathbf{m}_t(\mathbf{z}_t)$  は水平剛性の推定量  $\mathbf{z}_t$  における固有円振動数を意味する非線形ベクトル関数である。実用的な計算を行うために、 $\mathbf{m}_t(\mathbf{z}_t)$  を  $\mathbf{z}_t$  のまわりで展開し高次項を無視すると、次式のような疑似線形化された観測方程式を得る。

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

ここに、 $\mathbf{M}_t$  は感度行列 (SM : Sensitivity Matrix) であり次式で与えられる。

$$\mathbf{M}_t = \frac{\partial \mathbf{m}_t(\mathbf{z}_t)}{\partial \mathbf{z}_t} \quad (8)$$

これらの関係を考慮して、フィルタ方程式においても非線形ベクトル関数を用いた、いわゆる拡張型フィルタ方程式(9)を用いる必要がある。

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

初期条件は(10)式で与えられる。

$$\hat{\mathbf{z}}_{0/1} = \hat{\mathbf{z}}_0 \quad (10)$$

ここに、 $\mathbf{z}_{t/t-1}$  は  $t-1$  回目のフィルタリングステップの情報に基づく  $t$  回目の状態量の推定値を意味し、 $\hat{\mathbf{z}}_t$  は状態量  $\mathbf{z}_t$  の推定値、 $\hat{\mathbf{z}}_0 \equiv E[\mathbf{z}_0]$  であり、 $\mathbf{z}_t$  の初期値を意味し、 $E$  は期待値を意味する。また、フィルタ方程式(9)に含まれる  $\mathbf{B}_t$  はフィルタゲイン (復元作用素) であり、 $\mathbf{B}_t$  として、射影フィルタ族を用いると射影フィルタまたはパラメトリック射影フィルタを構成する

ことになる。

フィルタゲイン  $B_t$  は、繰り返し計算における  $t$  回目の情報量に基づく  $t+1$  回目の状態量  $z_{t+1/t}$  の変化をコントロールする役割を担っており、採用するフィルタにより収束性等の特徴が異なることが知られている<sup>(12)</sup>。

### 2.3. フィルタゲイン

本研究で採用する射影フィルタの一般化逆行列を用いた表現を式(11)に示す<sup>(13)</sup>。

$$B_{PF_t} = (M_t^T Q^+ M_t)^+ M_t^T Q^+ \quad (11)$$

ここに  $Q^+$  は観測誤差共分散行列に関する一般逆行列であり、 $M_t^T$  は感度行列の転置を意味する。式(11)の表現には、観測誤差共分散行列  $Q$  が含まれており、誤差を考慮した表現となっている。ここで、観測誤差共分散行列  $Q$  を正方行列として用いると、 $Q$  は相殺されることとなり、次式と等価となる。

$$B_{PF_t} = M_t^{-1} \quad (12)$$

すなわち、射影フィルタは観測誤差共分散行列を陽に含んでおらず、感度行列のみで表現される極めて単純なフィルタであり、感度行列に着目したフィルタの特性を検討するにあたって、適したフィルタであることが分かる。

### 3. 感度行列の構成と逆問題解析結果

ここでは、具体的な感度行列を構成し、差分近似の観点から検討を加える。

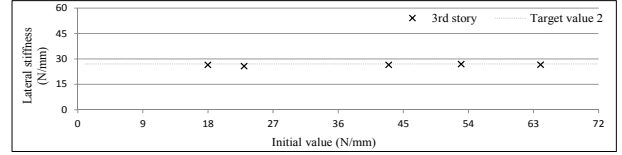
#### 3.1. 広域前進差分法による逆問題解析

感度行列は、状態量の変化に対する観測量の変化率として構成されているため、各要素の微分は解析的に求めることが困難であり、本研究では前進差分による近似により求めることにする。このときの具体的な計算を次式に示す。

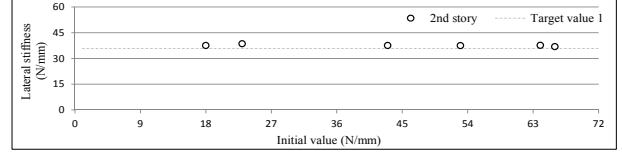
$$M_t = \begin{bmatrix} \frac{\omega_{1t} - \omega_{1,t-1}}{z_{1t} - z_{1,t-1}} & \frac{\omega_{1t} - \omega_{1,t-1}}{z_{2t} - z_{2,t-1}} & \frac{\omega_{1t} - \omega_{1,t-1}}{z_{3t} - z_{3,t-1}} \\ \frac{\omega_{2t} - \omega_{2,t-1}}{z_{1t} - z_{1,t-1}} & \frac{\omega_{2t} - \omega_{2,t-1}}{z_{2t} - z_{2,t-1}} & \frac{\omega_{2t} - \omega_{2,t-1}}{z_{3t} - z_{3,t-1}} \\ \frac{\omega_{3t} - \omega_{3,t-1}}{z_{1t} - z_{1,t-1}} & \frac{\omega_{3t} - \omega_{3,t-1}}{z_{2t} - z_{2,t-1}} & \frac{\omega_{3t} - \omega_{3,t-1}}{z_{3t} - z_{3,t-1}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここに、 $z_1 \sim z_3$  はそれぞれ繰り返し計算  $t$  回目の 1 層から 3 層の水平剛性、 $\omega_1 \sim \omega_3$  は繰り返し計算  $t$  回目の 1 次から 3 次モードまでの固有円振動数である。これより本研究で用いる感度行列は、列が振動モード次数、行が各層の水平剛性の変化に対応した差分として構成される。なお、繰り返し計算の駆動にあたってはすべての層に同じ値の初期値を設定し、前進差分においては初期値の 2% の差異を用いた。こうした初期値の与え方による差分を広域前進差分法 (GFD : Global Forward Difference) と呼ぶことにする。

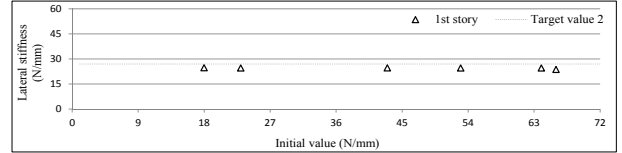
Fig.2 に 1, 3 層に 25% の剛性低下をさせたモデルの、広域前進差分法により感度行列を計算した場合の逆問題解析結果を示す。このときの観測量は実験値を用いている。図において、横軸は設定した初期値であり、1.0N/mm から剛性低下のない層の水平剛性の約 2 倍である 72.0N/mm までの 72 通りを設定した。これより図には、設定したすべての初期値に対する逆解析結果が描かれることになる。縦軸は水平剛性であり、破線は設計値



(a) Identification results on 3rd story



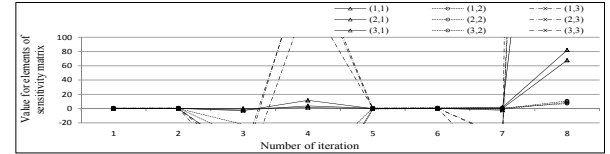
(b) Identification results on 2nd story



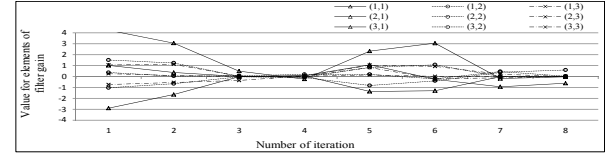
(c) Identification results on 1st story

An example of case where damage grade of 25% was assumed on 1st & 3rd stories

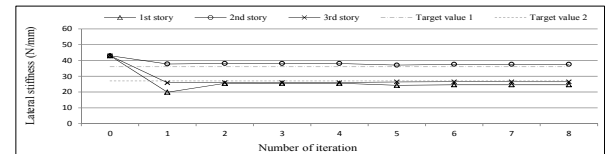
Fig.2 Results of identification analysis based on GFD



(a) Changes in the value for elements of sensitivity matrix



(b) Changes in the value for elements of filter gain



(c) Changes in the state of lateral stiffness

An example of case where damage grade of 25% was assumed on 1st & 3rd stories

Fig.3 Results on the engineering quantities calculated based on GFD under 43.0N/mm as initial value

である。各初期値に対して収束解が得られれば、その解がグラフにプロットされ、さらに、多くのプロットにより水平な直線が形成されれば、その値を同定値と決定することができる。Fig.2 の結果では、ほとんどの初期値に対して繰り返し計算が発散したため、僅かのプロットした描かれず、得られる収束解は極めて少ないことが分かる。

多くの初期値に対して繰り返し計算が発散したことから、繰り返し計算が不安定となっている可能性が考えられる。Fig.3 に、本感度行列に関する工学量の推移を示す。図において横軸は繰り返し計算ステップの回数である。なお、このときの初期値は収束解を得ることができた 43.0N/mm であり、図は上から(a)感度行列、(b)フィルタゲイン、(c)状態量の推移をそれぞれ表している。(c)に示す状態量の推移では、計算ステップの序盤で設計値に近づくような大きな変化を示し、中盤以降では一定の値を

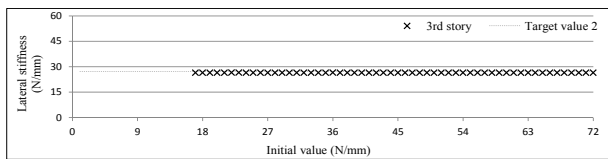
示している。これに対して、(b)に示すフィルタゲインの推移では、計算ステップの序段のみならず、中盤から終盤においても激しい変化を繰り返しており、繰り返し計算が不安定であることが分かる。さらに、(a)に示す感度行列の推移においても、激しい変化を繰り返している。この例では、感度行列の各要素の値が大きくなったときに、この逆行列で計算されるフィルタゲインの値が小さくなったことに起因して、繰り返し計算の収束条件を満たした極めて稀なケースであり、多くの初期値では、フィルタゲインが大きくなったタイミングで繰り返し計算が発散する結果となった。したがって、Fig.2 に示すような同定値が少ない結果が得られたと考察される。

### 3.2. 局所前進差分法による逆問題解析

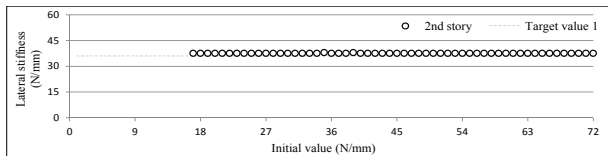
安定した繰り返し計算を行うための工夫の一つとして、次のように感度行列を構成する。このとき下付の添え字  $s_1 \sim s_3$  は、1層から3層の水平剛性を意味し、例えば  $s_1$  では、繰り返し計算における固有円振動数の計算において1層の水平剛性のみを更新させることを表している。

$$M_t = \begin{bmatrix} \frac{(\omega_{1t} - \omega_{1t-1})_{s_1}}{z_{1t} - z_{1t-1}} & \frac{(\omega_{1t} - \omega_{1t-1})_{s_2}}{z_{2t} - z_{2t-1}} & \frac{(\omega_{1t} - \omega_{1t-1})_{s_3}}{z_{3t} - z_{3t-1}} \\ \frac{(\omega_{2t} - \omega_{2t-1})_{s_1}}{z_{1t} - z_{1t-1}} & \frac{(\omega_{2t} - \omega_{2t-1})_{s_2}}{z_{2t} - z_{2t-1}} & \frac{(\omega_{2t} - \omega_{2t-1})_{s_3}}{z_{3t} - z_{3t-1}} \\ \frac{(\omega_{3t} - \omega_{3t-1})_{s_1}}{z_{1t} - z_{1t-1}} & \frac{(\omega_{3t} - \omega_{3t-1})_{s_2}}{z_{2t} - z_{2t-1}} & \frac{(\omega_{3t} - \omega_{3t-1})_{s_3}}{z_{3t} - z_{3t-1}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

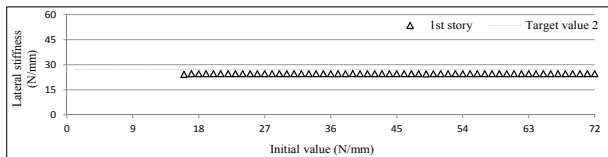
これにより、感度行列の1列目の分子は、1層の水平剛性の変化に対する固有円振動数の差分であり、2列目および3列目においても同様の差分となる。この方法を広域前進差分法に対して、局所前進差分法 (LFD : Local Forward Difference) と呼ぶことにする。Fig.4 に Fig.3 と同様のモデルの逆問題解析結果を示す。すべての層で数多くの初期値に対して安定した繰り返し計算がなされ、その結果、多くの収束解が得られている。また、得られた収束解の精度も高く、これらの収束解により水平



(a) Identification results on 3rd story



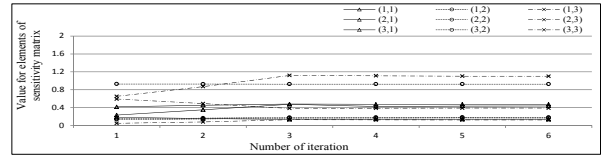
(b) Identification results on 2nd story



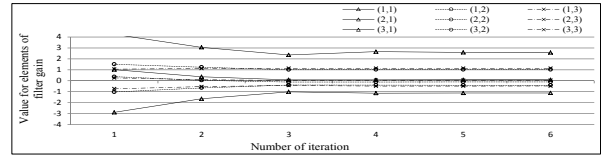
(c) Identification results on 1st story

An example of case where damage grade of 25% was assumed on 1st & 3rd stories

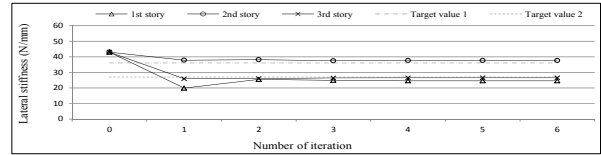
Fig.4 Results of identification analysis based on LFD



(a) Changes in the value for elements of sensitivity matrix



(b) Changes in the value for elements of filter gain



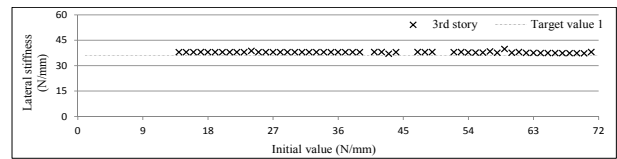
(c) Changes in the state of lateral stiffness

An example of case where damage grade of 25% was assumed on 1st & 3rd stories  
Fig.5 Results on the engineering quantities calculated based on LFD under 43.0N/mm as initial value

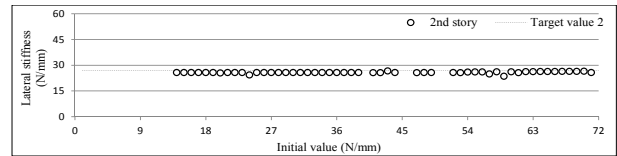
な直線が形成されており、同定が可能である。このときの各工学量の推移を Fig.5 に示す。感度行列およびフィルタゲインはいずれも計算ステップの中盤以降において一定の値を示しており、安定した繰り返し計算がなされていることが分かる。

### 4. 剛性低下の大きさと逆問題解析結果

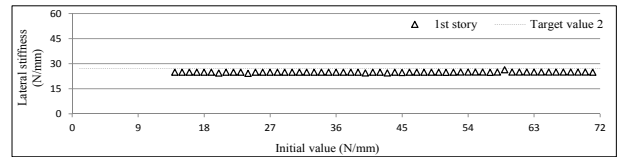
こうした逆問題解析は、剛性低下が大きくなると、同定する状態量の差が大きくなることから、非適切性のリスクが高くなり、解析が不安定になる。また、剛性低下のある層の位置も解析の精度に影響を与えることが分かっている。ここでは、3層フレームモデルの各複数層に剛性低下を仮定したモデルの逆問題解析結果を示し、剛性低下の大きさと剛性低下のある層の影響について述べる。



(a) Identification results on 3rd story



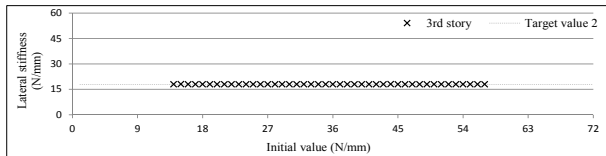
(b) Identification results on 2nd story



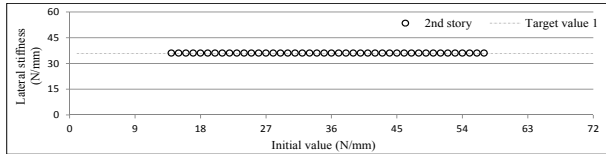
(c) Identification results on 1st story

An example of case where damage grade of 25% was assumed on 1st & 2nd stories

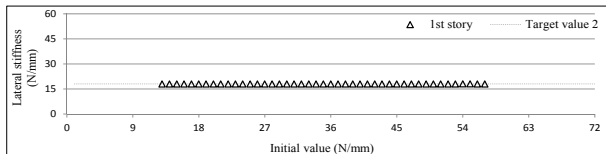
Fig.6 Results of identification analysis based on LFD



(a) Identification results on 3rd story



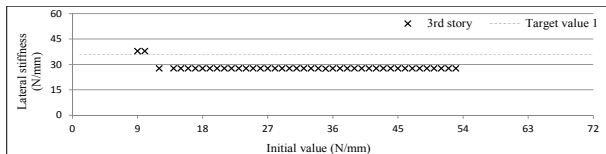
(b) Identification results on 2nd story



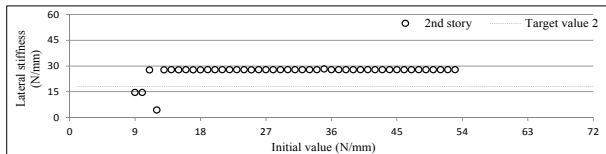
(c) Identification results on 1st story

An example of case where damage grade of 50% was assumed on 1st & 3rd stories

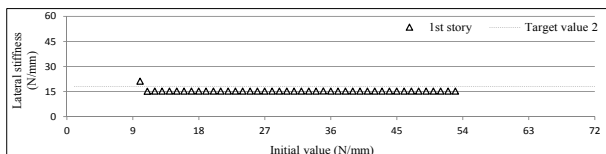
Fig.7 Results of identification analysis based on LFD



(a) Identification results on 3rd story



(b) Identification results on 2nd story

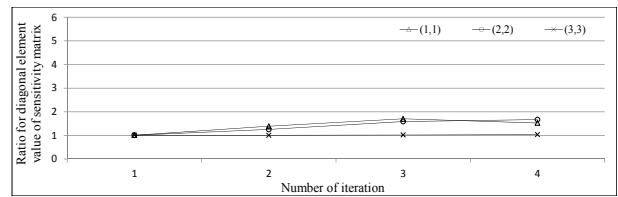


(c) Identification results on 1st story

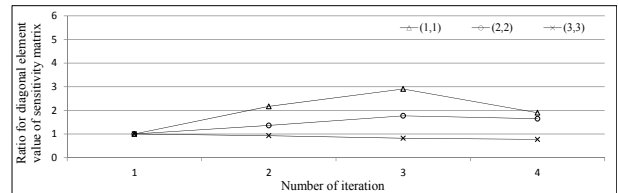
An example of case where damage grade of 50% was assumed on 1st & 2nd stories

Fig.8 Results of identification analysis based on LFD

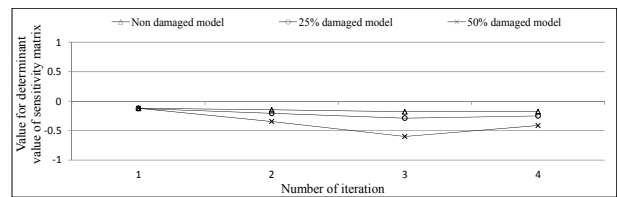
Fig.6は1, 2層に25%の, Fig.7は1, 3層に50%の, Fig.8は1, 2層に50%の剛性低下を与えたモデルの逆問題解析結果である。25%の剛性低下を1, 2層に与えたFig.6では, 同様の剛性低下を1, 3層に与えたFig.4に比べて, 収束解にバラツキが見られるものの, 同定は可能であると判断できる。剛性低下を50%と大きくした場合には, Fig.7に示す1, 3層に剛性低下を与えたモデルでは, 多くの収束解が得られ, これにより水平な直線が描かれていることから, 同定は可能である。これに対して, Fig.8に示す1, 2層に剛性低下を与えたモデルでは, 同様に水平な直線が描かれており, 一見すると同定が可能であるように思われる。しかし, 描かれた直線はいずれも設計値から離れており, 目的とする同定値が得られていない。このように, 剛性低下を大きくした場合や剛性低下を1, 2層に与えた場合には, 解析の精度が劣ることになる。



(a) Changes on the ratio for diagonal elements of SM in 25% damaged model



(b) Changes on the ratio for diagonal elements of SM in 50% damaged model



(c) Changes on the value for determinant of SM

An example of case where damage was assumed on 1st & 2nd stories

Fig.9 Results on the engineering quantities calculated based on LFD under 43.0N/mm as initial value

## 5. 感度行列の推移に着目した逆問題解析手法の提案

ここでは, これまでに示した工学量の中でも特に感度行列に着目することで, 剛性低下の大きさと剛性低下のある層の関係を明らかにし, これらの考察に基づき逆問題解析の精度の向上を目的として初期値の設定方法を検討する。

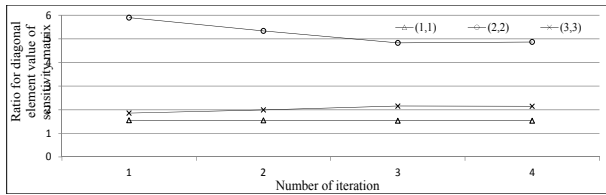
### 5.1. 感度行列の推移と解析モデルの影響

これまでに示した逆問題解析では, GFD, LFD 共に設定する初期値は層に関わらず同じ値を設定している。しかし, これまでに状態量を同定できなかった場合には, 設定した初期値の組み合わせが適応していない可能性が考えられる。そこで本節では, 感度行列の対角成分および行列式の推移に着目する。Fig.9に, 1, 2層の剛性低下を25%および50%とした場合の感度行列の対角成分とその行列式の推移を示す。図において, 横軸は繰り返し計算ステップ回数, 縦軸は剛性低下のない差分値で基準化した値である。なお, 行列式の値は基準化していない値である。

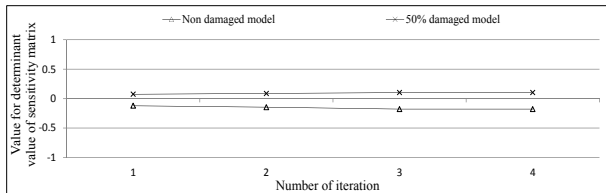
剛性低下のある1, 2層に対応する1行1列および2行2列の値の推移に変化が見られ, 剛性低下を50%と大きくした場合の方が大きな変化を示していることが分かる。また, 感度行列の行列式においても, 剛性低下を大きく仮定した場合の方が大きな変化を示しており, 繰り返し計算が不安定となった。

### 5.2. 初期値の設定方法の工夫

先に示した感度行列の対角成分の推移から, 1, 2層に設定した初期値が繰り返し計算に適応しておらず, 繰り返し計算を不安定にした可能性が考えられる。そこで, 工学的判断として1, 2層に設定する初期値を, 3層の半分とした場合の感度行列の推移をFig.10に示す。感度行列の対角成分に着目すると, Fig.9に現



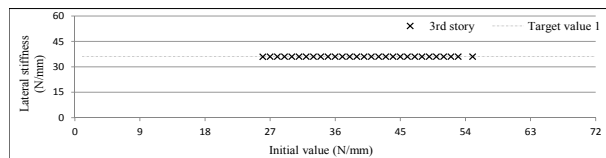
(a) Changes on the ratio for diagonal elements of SM in 50% damaged model



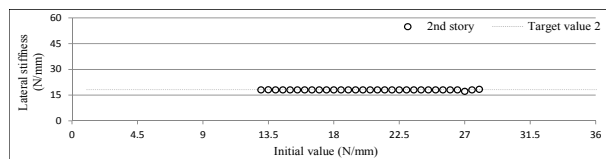
(b) Changes on the value for determinant of SM

An example of case where damage was assumed on 1st & 2nd stories

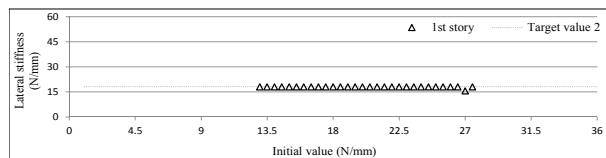
Fig.10 Results on the engineering quantities calculated based on LDM in the case of setting initial value for 3rd story was 43.0N/mm and other stories were half value



(c) Identification results on 3rd story



(b) Identification results on 2nd story



(a) Identification results on 1st story

An example of case where damage grade of 50% was assumed on 1st & 2nd stories

Fig.11 Results of identification analysis based on LFD to elaborate on setting initial value

れたような大きな変化は見られない。また、感度行列の行列式においても大きな変化が見られなくなり、安定した繰り返し計算がなされている。このときの逆問題解析結果を Fig.11 に示す。多くの初期値から得られた収束解による直線が設計値近傍に描かれており、同定が可能となったことが分かる。

## 6. まとめ

感度行列に着目した射影フィルタによる繰り返し計算としての逆問題解析の特性について検討をした結果、以下の知見を得ることができた。

- (1) 感度行列の計算を局所前進差分法とすることで、感度行列の推移は一定の値を示し、安定的な繰り返し計算が可能となった。
- (2) 感度行列の対角成分に着目することで、設定した初期値

が適応していない層を検討することができることが示された。

- (3) 感度行列の行列式の推移が大きい場合には、繰り返し計算が不安定となることが示された。
- (4) 感度行列の推移から、設定する初期値を工夫することで精度の良い逆問題解析ができることが示された。

## 参考文献

- (1) 土木学会: 土木学会における逆問題解析入門, 2008
- (2) 遠藤龍司, 百里富美子, 登坂宣好. 拡張 Kalman フィルタを用いたフレーム構造模型の損傷同定解析, 構造工学論文集, Vol.46B, 27-33, 2000.
- (3) Shanshan Wang, Quigwen Ren, Pizhong Qiao. *Structural Damage Detection Using Local Damage Factor*. J of Vibration and Control, 12(9), 955-973, 2006
- (4) Paula F. Viero, Ney Roitman. *Application of some damage identification method in offshore platform*. Marine structure 12, 107-126, 1999.
- (5) 中村和幸, 上野玄太, 樋口和之. データ同化: その概念と計算アルゴリズム, 統計数理, 第 53 巻第 2 号, 211-229, 2005.
- (6) R. Ghanem, G. Ferro. *Health Monitoring for Strongly Non-linear Systems Using the Ensemble Kalman Filter*. Structural Control and Monitoring, Vol.13, 245-259, 2006.
- (7) Akira Murakami, Takayuki Shuku, Shin-ichi Nishimura, Kazunori Fujisawa and 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, 2012.
- (8) 池田義人, 遠藤龍司, 石橋星弥. 津波による衝撃荷重を受けた柱・梁接合部の剛性の評価法 その 2 固定度を状態量とする逆解析手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 43-44, 2016.
- (9) 池田義人, 遠藤龍司, 登坂宣好. 拡張可変的パラメトリック射影フィルタを援用した構造システム同定, 日本建築学会構造系論文集, 第 704 号, 1503-1512, 2014.
- (10) 池田義人, 遠藤龍司, 登坂宣好. 構造損傷検出に用いる射影フィルタの感度行列に基づく基本特性, 日本建築学会構造系論文集, 2016 年 12 月掲載予定
- (11) 池田義人, 遠藤龍司, 登坂宣好. 3 層フレームモデルの水平剛性の同定に用いた可変的パラメトリック射影フィルタの特性, Transaction of JSCES, Paper No, 20140009, 2014.
- (12) 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, 605 号, 95-102, 2006.
- (13) 登坂宣好, 宇谷明秀. 新フィルタ理論—境界要素法による逆問題の解析手法, 境界要素法研究会境界要素法論文集, 第 10 巻, 119-124, 1993.