

複数部材損傷時の層剛性低下量における 部材損傷寄与分に関する加法性を用いた損傷位置同定法

STRUCTURAL DAMAGE LOCALIZATION METHOD USING ADDITIVITY ON STORY STIFFNESS DETERIORATION DUE TO DAMAGE OF STRUCTURAL ELEMENTS

鈴木 遥也^{*1}, 鍋島 国彦^{*2}, 藤田 皓平^{*3}, 竹脇 出^{*4}

*Nobuya SUZUKI, Kunihiko NABESHIMA, Kohei FUJITA
and Izuru TAKEWAKI*

A new structural damage localization algorithm for frame buildings is proposed based on the additivity on story stiffness deterioration due to damage of structural elements. In the additivity on story stiffness deterioration, the story stiffness variation to damage of each structural member is used to identify the location of damaged structural members. The story stiffnesses are evaluated from the time-history of floor accelerations by estimating the relationship between the story shear force and interstory drift. The validity of the proposed damage localization method is investigated by using a symmetric 2-bay 5-story frame and a setback 5-story frame.

Keywords : Structural Health Monitoring, Damage Localization, Story Stiffness Identification, Additivity, Planar Frame

構造ヘルスモニタリング, 損傷診断, 層剛性同定, 加法性, 平面骨組

1. 序

観測史上初となる震度 7 の揺れが短期間に 2 回観測された 2016 年の熊本地震や、津波を誘発して深刻な被害をもたらした 2011 年の東北地方太平洋沖地震など、近年、数多くの大地震が各地で発生している。それに伴い、建物の損傷を検出する損傷同定の需要が高まりつつあり、システム同定に多くの関心が向けられている。システム同定は大きく分類すると、固有周期・モードや減衰定数などを同定するモーダルパラメータ同定と、剛性や減衰係数などを同定する物理パラメータ同定とに分けることができる。前者は、一般に安定した結果が得られるという長所や、観測の容易性などの長所を有していることから、数多くの研究が報告されている。一方後者は、多くの観測データを必要とすることや、安定した結果が得られにくいこと、また、煩雑な計算を伴うことが多いことなどから、あまり研究が進んでいないのが現状である。しかしながら、構造物の損傷検出においては、物理パラメータの同定が望ましいことから、これらの同定を行うことへの需要は高いと考えられる。

物理パラメータ同定に関する既往の研究として、中村ら¹⁾は、せん断質点系構造物を対象に、同定対象層の上下層における水平加速度観測結果のみから、各層のせん断剛性、履歴減衰定数及び粘性減衰係数を求める手法を提案した。しかしながら、同定に用いる振動数領域の関数が低振動数領域で不安定となるという問題点があり、前田ら²⁾は ARX モデルを導入して振動数 0 における制約条件を付加することにより、これらの問題点を改善した。また、Kuwabara et al.³⁾は、前田ら²⁾の手法を用いて層剛性を同定した上で、部材が損傷し

た際の層剛性の変化から損傷層の検出を行っているが、損傷が生じている層の同定に留まり、損傷部材の位置の特定までは行っていない。これまでに損傷部材の位置を同定する手法については、数多くの研究がなされている⁴⁻⁶⁾。例えば、荒木ら⁴⁾は、モード応答の感度情報を用いて組合せ最適化による損傷位置の推定を行っているが、高次モードまでのモード応答を用いても、梁に損傷がある場合には損傷部材の位置の特定が困難であることが示されている。また、物理パラメータとして層剛性の変化に着目し、損傷部材の位置を特定する手法を展開している研究は少ない。

本論文では、平面骨組を対象として各部材が損傷した際の層剛性の低下量に関する加法性を新たに提案する。加法性に基づき単一の部材が損傷した際の層剛性低下量をそれぞれ加えることで、複数部材が損傷した際の層剛性の低下量を近似的に推定することが可能であることを示し、層剛性低下量に関する加法性を用いた損傷部材の位置を特定する損傷同定法を提案する。2 節では、本論文で提案する層剛性の低下量に関する加法性の説明と、Taylor 展開の 1 次近似を用いた加法性の理論的解釈を示した上で、加法性に基づく損傷同定法の考えを概説する。3 節では、2 層 1 スパン平面骨組を対象とし、層剛性低下量に関する加法性に基づく損傷同定法の妥当性を示す。4 節では、多層多スパン平面骨組における応答データを用いた損傷同定として、応答データから層剛性を評価した上で、加法性に基づく損傷同定法の具体的な適用手順を示す。5 節では、4 節で示す手順により、多層多スパン平面骨組モデル (Model A: 5 層 2 スパン対称平面骨組, Model B: セットバックを有する 5 層非対称平面骨組) に

^{*1} 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生
^{*2} 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 博士課程・修士(工学)
^{*3} 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 助教・博士(工学)
^{*4} 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Grad. Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.
Grad. Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., M.Eng.
Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.

対して、提案損傷同定法を適用し、その適用性を提示する。

尚、実際の建物における構造ヘルスマニタリングの運用を考慮すれば、本論文で提案する損傷位置同定法では、実建物のモデル化として1次固有周期をチューニングさせた骨組モデル等の事前準備が必要となり、実建物において観測されたデータを用いて提案同定手法の有効性を示すことが望ましい。しかしながら、構造部材の損傷を有する実建物での観測データの収集は極めて困難であり、文献4に見られるように、損傷同定手法の理論を示し、数値シミュレーションに基づく妥当性の検証を行うことも重要である。従って、本論文では、同定対象建物における観測データについて、数値シミュレーションによる応答データに用いることとし、損傷位置が未知である骨組の応答については計測ノイズの影響を考慮する。

2. 部材損傷による層剛性の低下に関する加法性に基づく損傷部材位置の同定法

2.1 部材損傷による層剛性の低下に関する加法性

複数部材が損傷している場合（以降、複数部材損傷時と呼称）、各部材損傷が層剛性に与える影響は異なるため、層剛性の低下量のみから損傷部材の位置を特定することは一般には困難である。そこで、本論文では「単一部材が損傷した場合の層剛性の低下量を加えると、複数部材が損傷した場合の層剛性の低下量を近似的に模擬できる」と仮定し、骨組架構における損傷部材位置の特定を行う損傷同定に適用する。以降、この性質を複数部材損傷時の層剛性の低下量に関する加法性(Additivity on Stiffness Deterioration : ASD)と称する。

Fig.1 に、2層1スパン平面骨組を例に ASD の概要を示す。複数部材損傷時（ここでは2部材）に ASD を仮定すると次式が成り立つ。

$$\Delta \bar{k}^{(i)} = k_i(\mathbf{I}) - k_i(\mathbf{I} + \{1 \ 1 \ 0 \ \dots\} \mathbf{D}) \approx [k_i(\mathbf{I}) - k_i(\mathbf{I} + \{1 \ 0 \ 0 \ \dots\} \mathbf{D})] + [k_i(\mathbf{I}) - k_i(\mathbf{I} + \{0 \ 1 \ 0 \ \dots\} \mathbf{D})] \quad (1)$$

$$\mathbf{I} = \{I_1 \ I_2 \ I_3 \ \dots \ I_n\}, \mathbf{D} = \text{diag}(\Delta I_1, \Delta I_2, \dots, \Delta I_n) \quad (2a,b)$$

ここで、 $\Delta \bar{k}^{(i)}$ は第 i 層の層剛性低下量を表しており、上付きチルダは、複数部材損傷時の真の層剛性低下量を表す。なお、 n ($=6$) は部材数を表し、 k_i 、 $\mathbf{I}$ 及び $\mathbf{D}$ は、それぞれ第 i 層の層剛性、損傷前の各部材の断面2次モーメントの集合、損傷による各部材の断面2次モーメントの低下量 ΔI_j （但し、負値）を対角成分に有する対角行列である。本論文では、層剛性 k_i は、建物架構を構成する柱及び梁部材の断面2次モーメントの関数とする。また、本論文で提案する損傷同定法において対象とする損傷は、曲げ系として梁端部での亀裂や破断、柱脚部の塑性化などに伴い、層剛性が変化するレベルでの損傷とする。具体的には、層剛性が10%以上低下する場合を想定する。これは、損傷度が小さい場合には、計測ノイズの影響等により損傷位置を特定することが困難であるためである。ただし、柱や梁の部材レベルでの損傷が層剛性に及ぼす影響を簡便に扱うために、本論文では層剛性に直接的に影響する断面2次モーメントを低減することで構造部材の損傷を疑似的に再現することとする。

本論文で提案する損傷同定法の基本理念となる ASD の理論的解釈を以下に示す。層剛性 k_i は、 $\mathbf{I}$ の多変数関数であるため、損傷後の層剛性を多変数関数の Taylor 展開の1次近似で表現すれば次式が得られる。

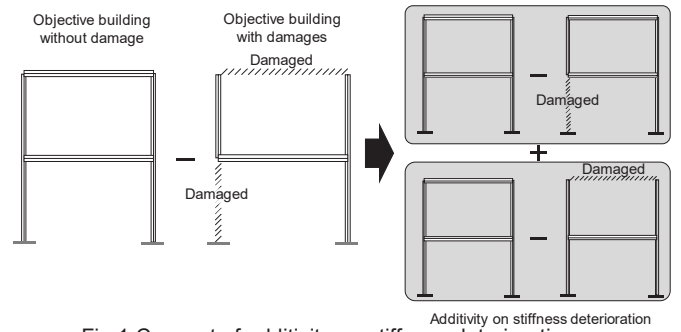


Fig.1 Concept of additivity on stiffness deterioration

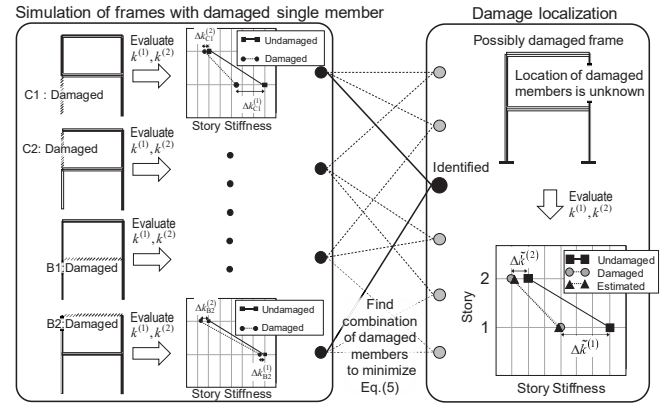


Fig.2 Damage localization based on additivity assumption

$$k_i(\mathbf{I} + \{1 \ 1 \ 0 \ \dots\} \mathbf{D}) \approx k_i(\mathbf{I}) + \left\{ \frac{\partial k_i(\mathbf{I})}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial k_i(\mathbf{I})}{\partial I_2} \Delta I_2 \right\} \quad (3)$$

ここで、(3)式の右边第2項は第 i 層の層剛性の低下量に対応することから、以下の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_i(\mathbf{I})}{\partial I_1} \Delta I_1 &= k(\mathbf{I} + \{1 \ 0 \ 0 \ \dots\} \mathbf{D}) - k(\mathbf{I}) \\ \frac{\partial k_i(\mathbf{I})}{\partial I_2} \Delta I_2 &= k(\mathbf{I} + \{0 \ 1 \ 0 \ \dots\} \mathbf{D}) - k(\mathbf{I}) \end{aligned} \quad (4a,b)$$

この(4a,b)式を(3)式に代入して整理すると(1)式が得られる。すなわち、ASDは、多変数関数に対する Taylor 展開の1次近似を利用することに相当し、 k_i が $\mathbf{I}$ に対して連続関数であり微分可能であれば、小さな変動領域において一般的に成り立つといえる。

2.2 複数部材損傷時の損傷位置を特定する損傷同定法の概要

本論文で提案する ASD に基づく損傷同定法は、損傷部材位置を特定することを目的としており、単一部材が損傷した際の層剛性の低下量を組合せることで、種々の組合せに対する各層の層剛性の低下量を評価し、複数部材が損傷した場合の層剛性低下量に対応する組合せを見出すものである。Fig.2 では、Fig.1 のように柱部材 C1 と梁部材 B2 が損傷した場合を例として ASD に基づく損傷同定法の概要を示す。図中の $\Delta \bar{k}_s^{(i)}$ は、部材 s のみが損傷した場合の第 i 層の層剛性の低下量を表す。同図に示すように、単一部材が損傷した場合の層剛性の変化をデータベースとして利用し、損傷部材数を仮定することで種々の組合せに対する層剛性低下量と、実際に損傷している架構の層剛性低下量とを比較する。その上で次式により定義する層剛性低下量に関する誤差量を最小化する組合せを抽出して損傷位置を特定する。

$$F = \sum_{i=1}^N \left(\Delta \bar{k}^{(i)} - \sum_{j \in \Phi} \Delta \bar{k}_j^{(i)} \right)^2 \quad (1 \leq \phi_j \leq n \ (\forall j)) \quad (5)$$

ここで、 $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_s\}$ とし、 N, n, s はそれぞれ対象架構の層数、

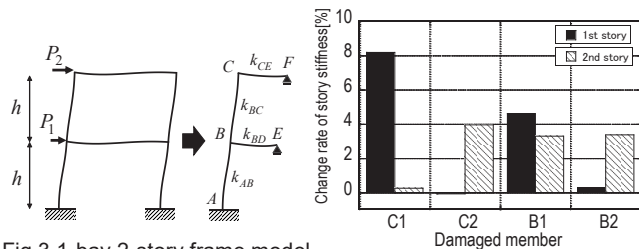


Fig.3 1-bay 2-story frame model

Fig.4 Sensitivity of story stiffness to member stiffness reduction

対象架構の部材数、損傷部材数を表す。ベクトル Φ の各要素である ϕ は損傷部材番号を表すため、 $\phi_p \neq \phi_q$ for $p \neq q (\forall p, \forall q)$ である。また、 $\Delta \tilde{k}^{(i)}, \Delta k_j^{(i)}$ はそれぞれ、実測データとして得られる複数部材損傷時の第 i 層の無損傷時からの層剛性低下量、シミュレーションとして得られる第 j 部材損傷時の第 i 層の無損傷時からの層剛性低下量を表す。従って、(5)式は、無損傷時からの層剛性低下量について、実際の損傷時と ASD に基づく推定値の二乗誤差の層方向和を表す。本提案手法の特徴は、同定対象建物の層剛性分布について、対応する骨組モデルを用いたシミュレーションにより様々な損傷部材の組合せを ASD に基づき検討することで、損傷を模擬した詳細モデルによる非線形解析を行うことなく、損傷した部材の位置を特定することが可能である点である。尚、多層モデルへの適用として想定する観測状況に基づく損傷同定法の具体的な手順については 4 節に示す。

本論文では、ASD に基づく損傷同定法の適用性を検討するため、現段階では損傷度を既知であるとし、 $\mathbf{D}$ を設定して単一部材の損傷による感度情報 (= 層剛性に与える影響) をシミュレーションにより取得する。なお、実際には、損傷度は未知であるため、(4)式の左辺 $\Delta I_1, \Delta I_2$ についても推定する問題が生じる。これについては今後の課題とする。

3. 2 層 1 スパン平面骨組モデルを用いた加法性に基づく損傷同定法の妥当性の検証

本損傷同定法では、(5)式に示した目的関数において、損傷した部材を含む層以外の層剛性の变化も利用することが特徴である。一般に、柱が損傷した場合には損傷した部材を含む層の層剛性が大きく低下する。一方、梁が損傷した場合には損傷した梁の上下層の層剛性も低下することが知られている³⁾。そこで 3.1 節では、2 層 1 スパン平面骨組の層剛性について、モーメント分配法及びたわみ角法を適用し、部材剛比を用いて陽に表すことで、単独の部材が損傷した際の層剛性に及ぼす影響を簡便な数式により表現する。これにより、様々な損傷度や損傷パターンに対して、剛性行列の逆行列を逐次求めることなく層剛性の变化量を容易に得ることが可能となる。

3.2 節では、陽に求めた層剛性を用いて、全 4 部材のうち 2 部材が同時に損傷した場合の 6 つの組合せについて、2 部材損傷時の層剛性変化と、単一部材損傷時の損傷パターンを ASD に基づき組合せて得られる層剛性変化の間の偏差を網羅的に示すことで、本損傷同定法の妥当性を例示する。

3.1 部材剛比を用いた平面骨組モデルの層剛性の定式化

等価せん断剛性は、静的な荷重を加えた際に得られる荷重-変位関係において、層せん断力を層間変位で除すことで求められる。各柱のせん断力は、柱脚及び柱頭の材端モーメントを階高で除すこと

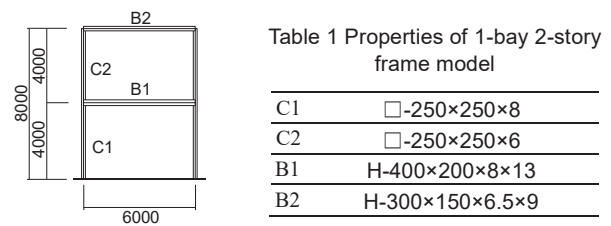


Fig.5 1-bay 2-story frame

Table 1 Properties of 1-bay 2-story frame model

C1	□ -250×250×8
C2	□ -250×250×6
B1	H-400×200×8×13
B2	H-300×150×6.5×9

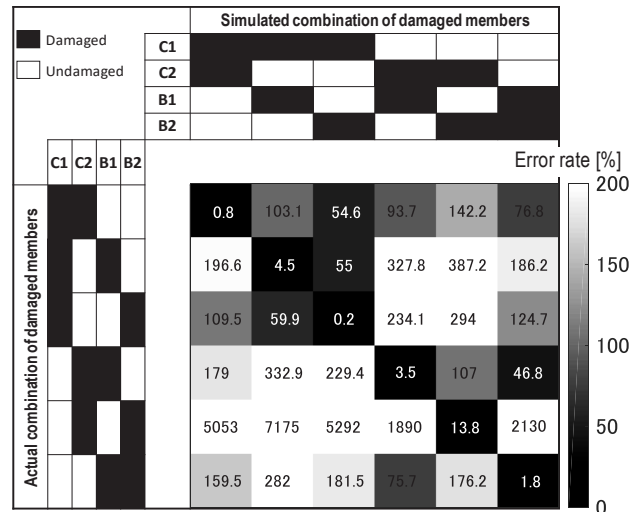


Fig.6 Validation of ASD using 1-bay 2-story frame

Case study: 2 members damaged

で得られ、それらの和が層せん断力となる。従って、各柱の材端モーメントとそのときの層間変位が既知であれば、骨組の層剛性を評価することが可能である。

Fig.3 に示すように対象骨組の対称性を利用することで、モーメント分配法^{7,8)}を用いて材端モーメントを導出する。さらに、得られた材端モーメントとたわみ角法を用いて部材回転角を得ることにより各層の層間変位を推定する。各層の層剛性は部材剛比を用いて次式のように表される。

$$k_1 = \frac{12EK_0k_{AB}}{h^2} \cdot \frac{\gamma_1(P_1 + P_2)}{\gamma_2P_1 + (\gamma_2 + \gamma_3)P_2} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{12EK_0k_{AB}k_{BC}}{h^2} \cdot \frac{\gamma_1P_2}{3k_{BC}\{\gamma_4P_1 + (\gamma_4 + 0.67\gamma_3)P_2\} + k_{AB}(-\gamma_5P_1 + \gamma_6P_2)} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \gamma_1 = (M_{BC}^1 + M_{CB}^1)(M_{AB}^2 + M_{BA}^2) - (M_{AB}^1 + M_{BA}^1)(M_{BC}^2 + M_{CB}^2) \\ \gamma_2 = (M_{BC}^1 + M_{CB}^1)(2M_{AB}^2 - M_{BA}^2) - (2M_{AB}^1 - M_{BA}^1)(M_{BC}^2 + M_{CB}^2) \\ \gamma_3 = 3(M_{AB}^1M_{BA}^2 - M_{BA}^1M_{AB}^2) \\ \gamma_4 = (M_{BC}^1 + M_{CB}^1)(M_{AB}^2 - M_{BA}^2) - (M_{AB}^1 - M_{BA}^1)(M_{BC}^2 + M_{CB}^2) \\ \gamma_5 = M_{BC}^1M_{CB}^2 - M_{CB}^1M_{BC}^2 \\ \gamma_6 = (2M_{BC}^1 - M_{CB}^1)(M_{AB}^2 + M_{BA}^2 - M_{BC}^2 - M_{CB}^2) \\ \quad - (M_{AB}^1 + M_{BA}^1 - M_{BC}^1 - M_{CB}^1)(2M_{BC}^2 - M_{CB}^2) \end{cases} \quad (8)$$

K_0 は基準剛度、 E はヤング係数、 P_1, P_2 は、各層に作用する水平外力、 h は階高を表す。また、 $\gamma_1 - \gamma_6$ における M_{ij}^1 及び M_{ij}^2 は、各層に独立部材回転角を与えた場合の部材 ij の i 端側材端モーメントを表す。層剛性の導出過程の詳細については、Appendix に示す。

Fig.4 では、Fig.5 及び Table 1 に示す骨組に対して(6)式及び(7)式を

用い、柱及び梁部材の部材剛比が10%低減した際の層剛性の変化率を示す。同図に示すように、ある部材の損傷が、損傷部材を含む当該層だけでなく他層の層剛性にも影響を与えることが確認できる。

3.2 加法性に基づく損傷同定法の妥当性の検証

(6)式及び(7)式により得られた層剛性を用いて、ASDに基づく損傷同定法の妥当性を数値的に示す。ここでは、2部材が損傷する場合(4部材中2部材が損傷する6ケース)を想定する。損傷度については、損傷部材の断面2次モーメントを10%低減させた。Fig.6では、行方向に想定した損傷ケースを列挙した上で、列方向に損傷同定としてASDで考慮する2部材の組合せを表す。同図では、想定する実際の損傷ケースと同定損傷ケースの対応関係として、層剛性差分の誤差率を濃淡マップと数値で示している。同図より、2部材が同時に損傷した損傷パターンの各行において、誤差率として各層の層剛性の差分の和が最小となる組合せが対角線上に見られ、再現する最良な組合せが実際の損傷パターンと対応していることが確認できる。特に、その他の組合せでは誤差率が急激に増大していることから、ASDに基づく損傷同定法の妥当性が示された。

4. 多層モデルに対するASDに基づく損傷同定法

本節では、ASDに基づく損傷同定法を多層モデルに対して適用する際の具体的な手順について詳述する。損傷同定で想定するシナリオとして、ここでは、地震被害後の余震を想定した地震動入力(Fig.7a)と、頂部強制加振(Fig.7b)を考慮する。本論文では、対象建物架構において観測される時刻歴データから各層の $Q-D$ 関係を推定し、復元力特性の勾配により層剛性を同定することで、層剛性の低下量の評価に利用する。但し、ここでは同定対象建物として設定した解析モデルに対するOpenSeesによる時刻歴応答解析により得られる応答データを実測データとして代用するものとする。

本損傷同定法を適用する事前準備として、無損傷状態の同定対象建物において、外乱(小地震や強制加振など)により実測される観測情報を用いて骨組モデルを事前に構築・同定する。具体的には、設計図書等に基づき、各部材寸法や建物質量の概算値等を用いることで、解析モデルを設定する。また、実建物では、非構造部材などの影響により設計時に想定した解析モデルと1次固有周期が乖離することがあるため、骨組モデルの1次固有周期が対応するようにパラメータのチューニングが必要となり、同定対象建物の層方向の層剛性分布を高精度で同定できていることが要求される。

本節で示す損傷同定の流れは、以下の通りである。

[手順1] 各層応答水平加速度の観測及び応答解析

本損傷同定法では、対象建物における実測データに加えて、特定の外乱を用いたシミュレーションによる複数条件下での床水平加速度応答を必要とする。ここで、特定の外乱とは、幾つかのシナリオが考えられる。例えば、余震などを想定する場合は、地表面で得られる実観測波形を入力として用いる。一方、頂部強制加振を用いる場合は、損傷後の建物頂部に加振機を設置し、加振により生じる加振力を既知として解析に用いる。

・複数部材損傷時の各層応答水平加速度(実測)

複数の損傷部材を有する同定対象建物の実測情報である。シナリオとしては、地震被災後の余震や強制加振などを想定し、入力についても観測可能とする。

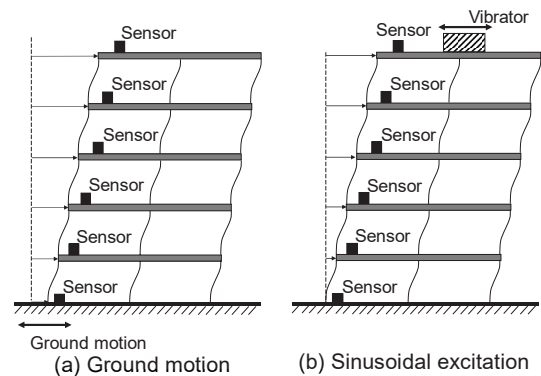


Fig.7 Scenario of sensing system for damage localization

本損傷同定法では、上記の実測データを取得した際に得られた入力(特定の外乱)を用いて、以下のような複数条件下でのシミュレーションによる床水平加速度応答が必要となる。

・無損傷時の各層応答水平加速度(シミュレーション)

事前に作成した解析モデルに特定の外乱を入力することで得る。

・単一部材損傷時の各層応答水平加速度(シミュレーション)

事前に作成した解析モデルを用いて、すべての柱および梁部材がそれぞれ単独で損傷した場合の特定の外乱に対する応答を時刻歴応答解析により得る。

これらのシミュレーションによる応答評価は、同定に用いる応答データを取得した際の入力と同一のものをを用いることが望ましいことを確認している。例えば、事前に作成されたモデルに対して静的解析等により層剛性を評価することができるが、荷重分布が異なることに起因して層剛性の変化に対する特徴が複数部材損傷時の場合と異なるため、損傷位置の同定に大きな影響を及ぼす。

数値シミュレーションにより応答を評価した場合は、計測ノイズ等の影響を受けない。しかしながら、実建物における観測データを用いる場合には一般にノイズの影響を考える必要がある。本損傷同定法において、複数部材損傷時の各層応答水平加速度は実観測情報を用いるため、一般にノイズが含まれると想定される。そこで、ここでは、実観測情報を想定した複数部材損傷時の水平加速度データに対して、有帯域ホワイトノイズを付加する。

[手順2] 特異値分解によるノイズの除去

時刻歴水平加速度データから層剛性を推定する上で、各層の層間変位が必要となる。加速度応答から変位応答を推定する数値積分法には種々の方法が提案されているが、ノイズの影響などによって積分値が発散することがあり課題となる。本論文では、特異値分解による低ランク近似を適用して、ノイズを含む加速度応答データから最大特異値とそれに対応する各特異ベクトルのみを用いて応答データを再評価することでノイズの影響を低減させる⁹⁾。

本損傷同定法では、手順1で得た各層の観測加速度時刻歴データ $\ddot{\mathbf{u}}_i = \{\ddot{u}_i(t_1), \ddot{u}_i(t_2), \dots, \ddot{u}_i(t_N)\}^T$ (N はデータの時間ステップ数を表す)を行方向に並べた行列 $\mathbf{A} = [\ddot{\mathbf{u}}_1 \dots \ddot{\mathbf{u}}_N]$ に対して、得られる特異値 a_k のうち、第1特異値 a_1 に対応するユニタリー行列 $\mathbf{U}, \mathbf{V}$ の特異ベクトル $\mathbf{U}^{(1)}, \mathbf{V}^{(1)}$ を用いて、ノイズの影響を低減させた加速度 $\ddot{\mathbf{u}}_j^{\text{denoise}}$ を次式により再評価する。

$$[\ddot{\mathbf{u}}_1^{\text{denoise}} \dots \ddot{\mathbf{u}}_N^{\text{denoise}}] = a_1 \mathbf{U}^{(1)} \mathbf{V}^{(1)T} \quad (9)$$

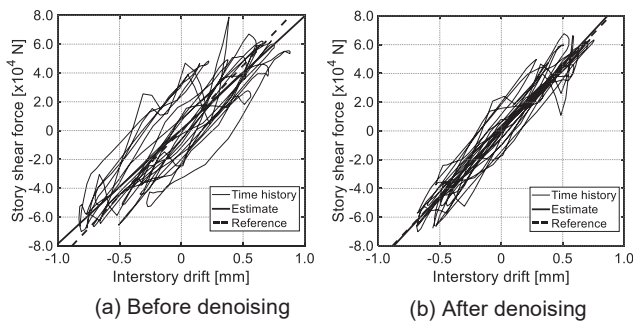


Fig.8 Restoring force characteristic for estimation of story stiffness

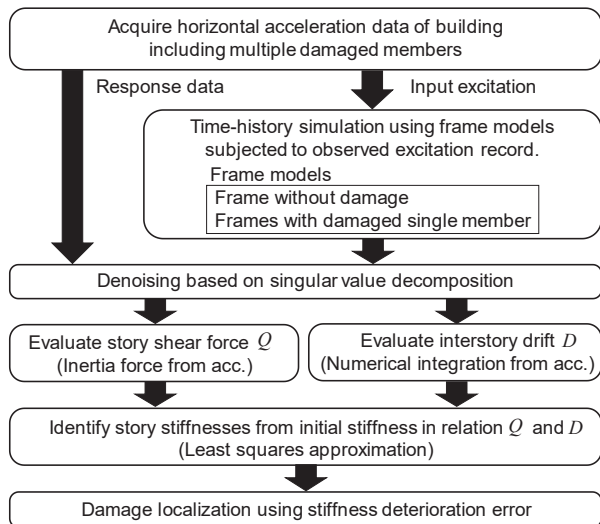


Fig.9 Flowchart of proposed damage localization method

[手順 3] 応答加速度の数値積分による層間変位の算出

手順 2 によりノイズの影響を低減させた水平加速度データ $\ddot{u}_j^{\text{denoise}}(t)$ から、変位の時刻歴データを求める。ここでは、数値積分法として、振り子法を用いる。振り子法では、1 質点系の長周期振り子（周期 15 秒）に加速度 $\ddot{u}_j(t)$ を作用させた際の変位応答が積分値 $u_j(t)$ に相当する。層間変位 D_i は、各層水平変位の差分により求められる。

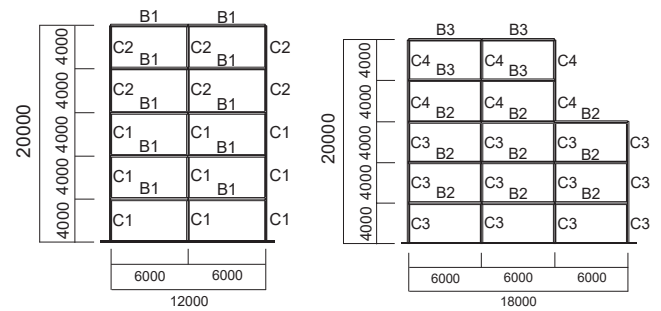
[手順 4] Q - D 関係を用いた層剛性の同定

各層の層せん断力 Q_i については、各層における水平加速度 $\ddot{u}_j(t)$ と質量 m_j の積として求めた慣性力を用いて、次式により評価する。

$$Q_i(t) = \sum_{j=i}^N m_j \ddot{u}_j(t) \quad (10)$$

D_i と Q_i の関係を図示し、最小二乗法により 1 次関数として線形近似を行う。その際の勾配パラメータを対象層の層剛性として同定し、ASD に用いることとする。同定を行う応答データから得られる Q - D 関係の乱れが小さいほど、精度よく層剛性を同定することが可能であると考えられる。従って、余震などのランダムな入力に対して Q - D 関係を評価する場合には、過渡応答時のデータではなく、振幅レベルが小さく定常的な履歴形状となっている区間のデータを用いて層剛性を評価する。

手順 2 に示した特異値分解による低ランク近似を用いたノイズ除去を行う前後における Q - D 関係の例として、Fig.8 では、後述する数値シミュレーションで扱う 2 スパン 5 層モデルについて El Centro 波を作用させた際の応答データ（主要動が作用した後の振幅レベルが小さい時間帯の応答を採用）を用いて、3% のノイズに対してノイ



(a) 2-bay 5-story symmetrical frame (Model A) (b) 5-story setback frame (Model B)

Fig. 10 Objective building frames

Table 2 Member section

C1	□-700×700×16	B1	H-488×300×11×18
C2	□-600×600×16	B2	H-600×200×12×19
C3	□-550×550×16	B3	H-500×200×9×16
C4	□-450×450×12		

Table 3 Damage condition

Case	Number of damaged members	Input	Number of samples (Model A / Model B)
Case 1	2	Sine Wave	300 / 465
Case 2	3	Sine Wave	2300 / 4495
Case 3	2	El Centro NS	300 / 465
Case 4	3	El Centro NS	2300 / 4495

ズの除去の前後で Q - D 関係を示す。同図では、最小二乗法により推定される層剛性と静的解析から得られる等価せん断剛性を参照値として併せて図示しており、ノイズの除去を行うことで Q - D 関係が明瞭になり、層剛性の同定精度が向上していることが確認できる。

尚、水平加速度から変位を数値積分によって計算した場合、変位の基線ずれが生じることがあるが、この影響は Q - D 関係の中心が移動することに対応するため、基線ずれが生じる前後において定常的な Q - D 関係が得られれば、勾配から同定を行う層剛性には影響が小さいと考えられる。また、本論文では Q - D 関係を描く際に、各層における水平加速度と質量の積として求めた慣性力を層せん断力と見なしたが、慣性力とせん断力は減衰項の影響で一般には釣り合わない。しかしながら、減衰項は、 Q - D 関係における最大振幅時の層せん断力と変形の関係には影響を及ぼさないため、層剛性評価への影響は小さいと考えられる。

[手順 5] ASD を用いた損傷部材位置の同定

複数部材損傷時の層剛性について、無損傷時の層剛性からの変化量を手順 4 により求めた上で、これと単一部材損傷時の層剛性の変化を ASD に基づき組合せた層剛性変化量との二乗誤差の層方向和として定義した目的関数 F ((5)式) を最小化することにより、損傷部材位置を同定する。

以上の手順として、多層建物を対象とした ASD に基づく損傷同定法のフローチャートを Fig.9 に示す。なお、対象骨組が対称性を有する場合は、対称位置にある構造部材の損傷が層剛性に及ぼす影響は互いに等しいため、このような位置関係（鏡像）にある部材が損傷部材として同定された場合に関しても、同定が成功したものと取り扱うこととする。

5. 損傷同定法の多層モデルに対する適用性の検証

本節では、Fig.10 に示す 5 層 2 スパン対称平面骨組(Model A)と、セットバックを有する 5 層非対称平面骨組(Model B)を対象に、4 節で示した提案同定法の適用性を検証する。損傷同定に用いる入力外乱は、余震を想定した地震入力として El Centro NS (1940)と頂部強制加振として正弦波を用いる。尚、正弦波の振動数はあらかじめ対象建物の 1 次固有周期が既知であるとし、1.2[Hz]とする。部材の損傷については、柱及び梁部材の断面 2 次モーメントを低減させるこ

とで部材損傷を模擬することとする。OpenSees において、部材ごとの損傷度として、断面 2 次モーメントを 10%から 50%まで 10%刻みで低減させる。但し、合成梁効果を考慮して、梁の断面 2 次モーメントは断面から得られる断面 2 次モーメントを 1.5 倍して与えることとする。複数の部材が損傷しているとした際の損傷部材数については、2 部材骨組の部材総数と損傷部材数によって、損傷同定シナリオのサンプル数が Table 3 のようにそれぞれのモデルで得られる。それらの全ての損傷シナリオに対して損傷同定をその都度行い、損

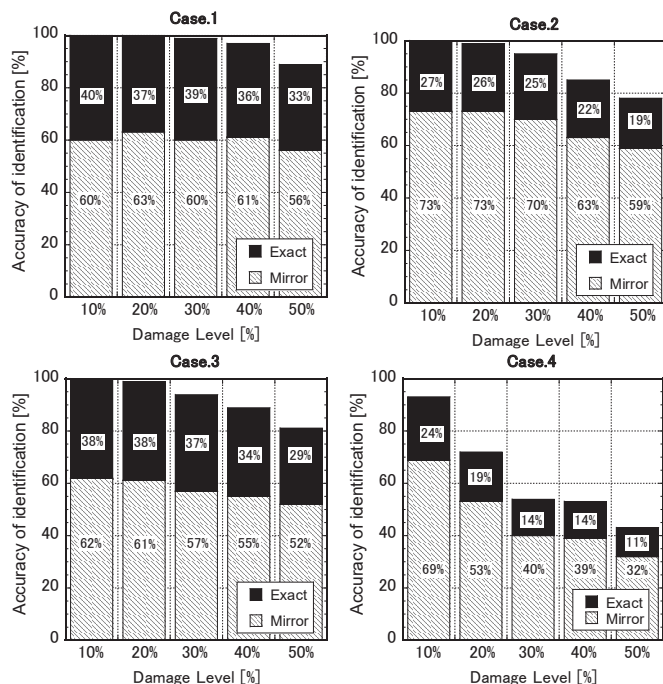


Fig.11 (a) Accuracy of damage localization without noise (Model A)

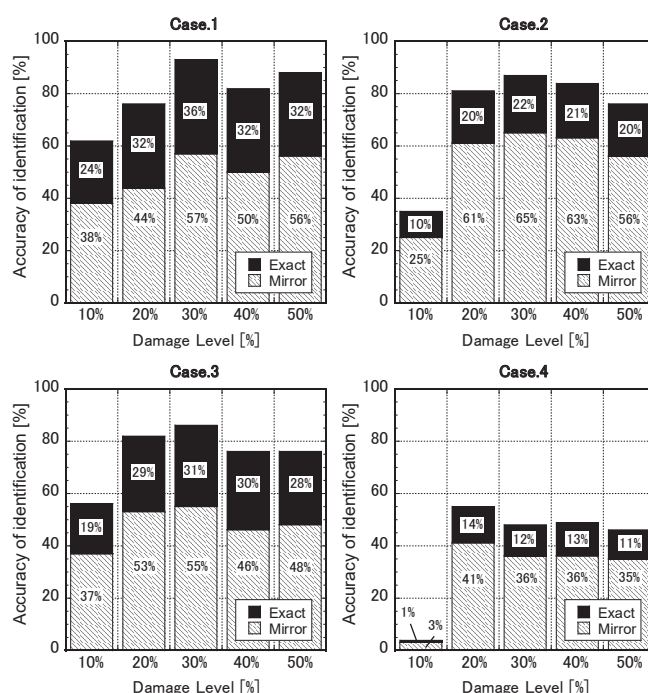


Fig.12 (a) Accuracy of damage localization with 3% noise (Model A)

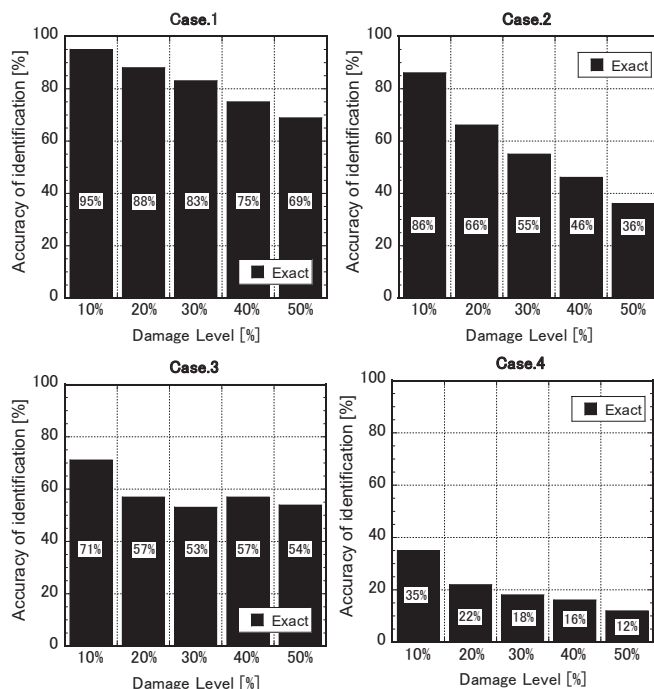


Fig.11 (b) Accuracy of damage localization without noise (Model B)

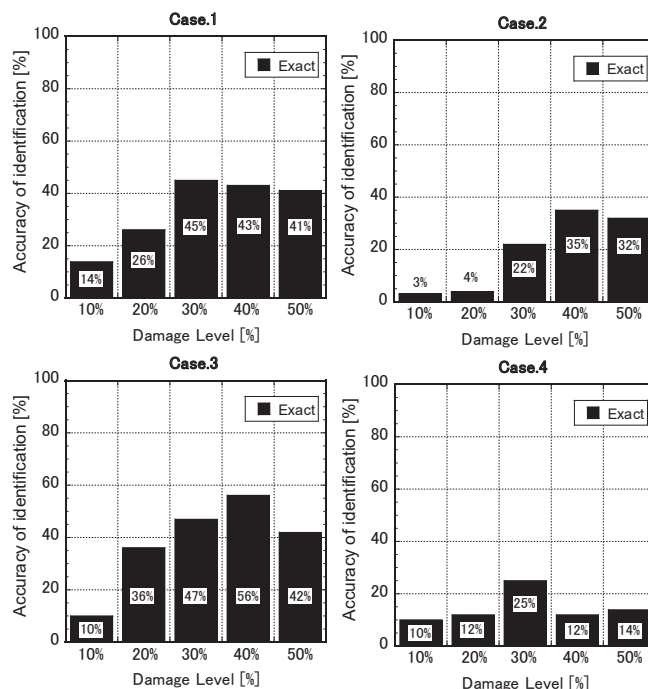


Fig.12 (b) Accuracy of damage localization with 3% noise (Model B)

傷同定結果を判定する。尚、非対称平面骨組である Model B では、左右対称に位置する部材が存在しないため、鏡像の位置関係として同定されるケースは 5.1 節及び 5.2 節では存在しないものとする。

5.1 ノイズの影響を無視した場合の精度検証

本節では、ASD に基づく損傷同定法の多層モデルへの適用性を示すため、観測ノイズを無視した場合における同定精度を検証する。観測ノイズを無視する場合の損傷同定では、4 節に示した同定手順において手順 2 を省略する。Fig.11 は、Table 3 に示す全サンプル数に対して損傷部材位置を特定し、設定された損傷位置を同定できたケースとして完全に一致した場合と鏡像の位置として同定された割合を累積棒グラフでそれぞれ示している。

Fig.11 より、Model A において、正弦波頂部加振を外乱として使用した場合では損傷部材数・損傷程度によらず概ね良好な精度で同定に成功している。一方、Model A に対して、El Centro NS 波を外乱として用いた Case 3 と Case 4 では、正弦波頂部加振を外乱として用いた場合に比べて同定精度が低い。これは、余震などのような入力波がランダム性を有する場合には、変位応答時刻歴データに定常応答と見なせる領域が存在しにくいためである。4 節で述べたように本損傷同定法では、定常応答時の変位時刻歴応答データの区間を用いて $Q-D$ 関係を得ることで、層剛性を同定することが重要である。Case 3 と Case 4 では層剛性の同定精度が低いことから、結果として損傷部材位置の同定精度に影響を及ぼしたと考えられる。

一方、Model B に対して本損傷同定法を適用した場合、Model A に比べて同定精度が劣る。これは、鏡像の位置関係にある部材がなく、同定成功のパターンが減ったためである。特に、第 1 層から第 3 層では、内柱 2 本についてそれぞれの柱が損傷した際の層剛性に及ぼす影響の違いは極めて小さく、一方が損傷した場合には、組合せの検定に失敗するケースが多い。

また、Fig.11 において、ノイズの影響を考慮しない場合では、損傷度が大きい場合に損傷部材位置の同定精度が低下している。これは、層剛性変化に関する加法性の仮定が成り立たなくなることによって起ると考えられる。すなわち、損傷度が大きい場合には、損傷した部材が相互に影響を及ぼすことで、それぞれの部材が単独で損傷した場合の層剛性変化の足し合わせで複数部材損傷時の層剛性変化を捉えられないことを示唆している。

5.2 ノイズの影響を考慮した場合の精度検証

次に、観測ノイズの影響を考慮した場合の応答データに対して本損傷同定法を適用する。ノイズの RMS 値が第 1 層の水平加速度の RMS 値の 3% となるように各層にそれぞれ独立の有帯域ホワイトノイズを付加したものを複数部材損傷時の応答水平加速度データとして用いることとする。

損傷部材数や損傷程度などに関する条件は 5.1 節と同様に Table 3 に示した 4 ケースとし、その結果を Fig.12 に示す。Fig.12 より、Model A に正弦波頂部強制加振を外乱として用いた場合 (Case 1 と Case 2) では、ノイズの影響を考慮した場合においても、精度よく同定が可能であることが分かる。一方、Case 3 及び Case 4 では、ノイズの影響を無視した場合と同様、定常応答と見なせる領域がないことに加えて、損傷度が小さい場合には、複数部材損傷時の剛性低下量とノイズによる剛性評価のばらつきが同程度であることに起因して、層剛性の同定精度に課題があり、損傷同定として損傷部材位置の特定

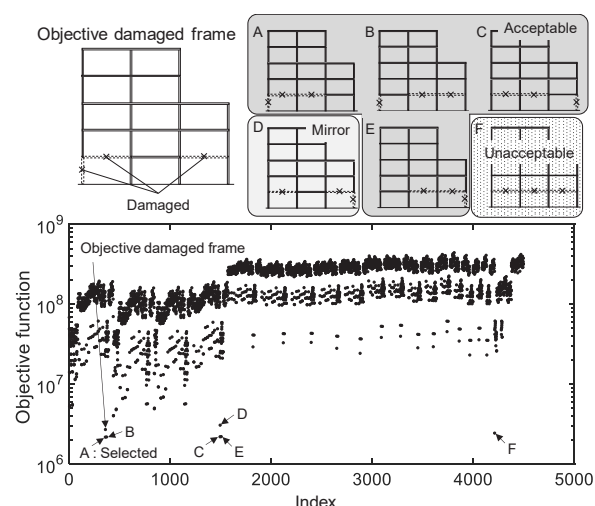


Fig.13 Variation of objective function for possibly damage patterns

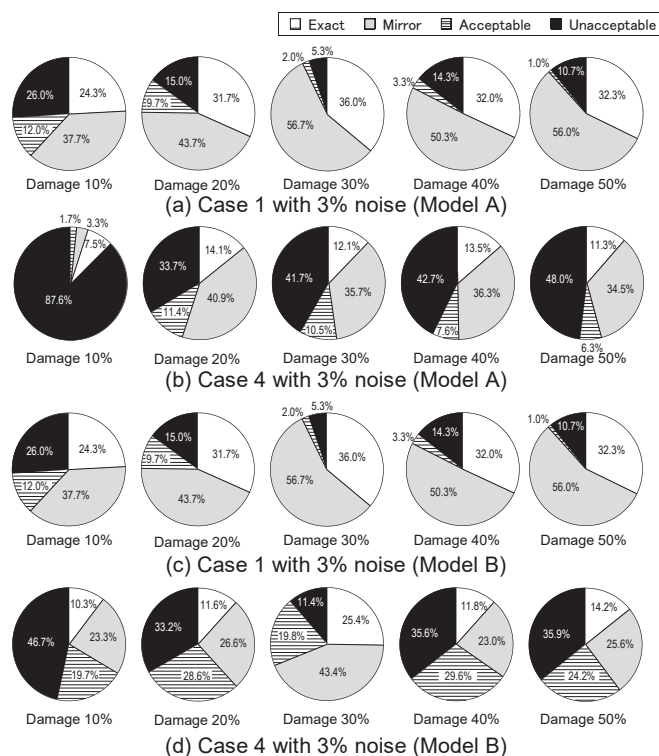


Fig.14 Accuracy of damage localization including mirror and acceptable damaged patterns

が困難であるといえる。

また、Model B では、Fig.11 でも見られたように、層剛性に関する感度がほとんど等しい部材が複数存在する。さらに Model A と同様に、ノイズの影響により層剛性評価にばらつきが生じるため、損傷部材の組合せの検定がさらに困難となる。非対称骨組のような場合に対して、本損傷同定法の同定精度を向上させるためには、損傷による層剛性への影響が等しい部材をグルーピングし、グループ別での判定を行うなどの対応が必要であると考えられる。

5.3 損傷部材の組合せ検定条件を緩和した場合の同定精度

Fig.12 で示した損傷部材位置の同定について、計測ノイズの影響を考慮した場合には、同定精度は低い。特に、Model B については、非対称骨組であることから鏡像の位置関係にある部材が存在せず、正解とする組合せと完全に一致する組合せのみを正解として算出し

たことに起因する。そこで、完全一致ではないケースの一例として、Model B の Case 2 において 1 層柱 1 か所と梁部材 2 か所が損傷している場合について、3 部材の全組合せに対する目的関数値を Fig.13 に示す。この場合は、目的関数値が最小となる A の組合せが選択されており、実際の損傷パターンとは異なる。同図に示すように、目的関数値に近い組合せとして A~F の損傷パターンが挙げられ、正解の組合せに近い柱及び梁部材が検定されていることが多く存在していることが確認できる。

そこで、本節では、損傷部材の組合せ検定条件を緩和し、各層において、損傷した柱及び梁部材と同定された結果の位置関係が鏡像の関係にある場合を鏡像(例えば、Fig.13 における D の損傷パターン)とし、さらに各層において損傷している部材の種類と部材数が一致する場合を許容とした場合(例えば、Fig.13 における A,B,C,E の損傷パターン)を分類した同定結果を Fig.14 に示す。Fig.14 より、鏡像や許容の損傷パターンを含めると、ノイズの影響を考慮した場合でも高い同定精度を示すことが確認できる。尚、Fig.14 において、許容できないケースが存在するのは、Fig.13 における F などの損傷パターンに見られるように、実際の損傷部材とは異なる部材の組合せによって層剛性の変化が評価される場合もあるためである。

6. 結論

本論文では、構造部材の損傷による層剛性低下量に関する部材寄与率の加法性を新たに提示した。それに基づき、地震被災後の余震や頂部強制加振に対する各層の床応答データを用いて、損傷部材の位置を特定する損傷同定法を提案した。但し、本論文では、各部材の損傷程度や損傷部材数が既知であると仮定することで、損傷部材の組合せを限定した上で損傷同定を行っている。しかしながら、実用上は損傷部材の損傷度やその個数も未知であるため、本損傷同定法の実用性を高める上でこれらの未知なパラメータの取り扱いは今後の課題である。本論文で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 層剛性低下量に関する加法性(Additivity on Stiffness Deterioration: ASD)を仮定した損傷同定法を提案した。ASD の理論的解釈として、ASD は Taylor 展開の 1 次近似に相当することを示した。本提案手法の特徴は、単一部材が損傷した際の層剛性の低下量を種々組合せることで複数部材が損傷した際の層剛性の低下量を推定し、実際の層剛性の低下量と最も一致する組合せを同定することで損傷した部材の位置を特定することである。
- 2) 2 層 1 スパン平面骨組を対象として、層剛性を部材剛比の関数として陽に表現し、柱及び梁部材の損傷が各層剛性に与える影響を容易に得ることで、ASD に基づく損傷同定法として種々の組合せに対する層剛性変化を網羅的に提示した。これにより、ASD に基づく損傷同定法の妥当性を例示した。
- 3) 外乱作用時の対象骨組の応答データから層せん断力 Q -層間変位 D 関係を評価し、線形近似した際の勾配から層剛性を同定した。計測ノイズの影響について、特異値分解による低ランク近似を適用することで、 $Q-D$ 関係を用いた層剛性の同定精度を向上させることが可能であり、損傷部材位置の同定に対して有効であることを示した。
- 4) 計測シナリオとして地震被災後の対象骨組に対して頂部強制加振を外乱として用いた場合を想定し、損傷度及び損傷部材数が既

知であるとした場合には、一定の精度で損傷部材位置の同定が可能であることを、2 つの多層多スパン平面骨組を対象とした数値シミュレーションにより示した。ノイズの影響を考慮しない場合には、損傷度が大きい場合に同定精度が低下する傾向がある。これは、層剛性変化に関する加法性の仮定が成り立たなくなることによって起因すると考えられる。一方、ノイズの影響を考慮した場合でノイズレベルが大きい場合には、部材感度に依存して損傷部材位置を完全に同定することは困難な場合があるが、損傷した部材が当該層の異なる位置に同定された場合も許容されるとすれば、損傷した部材を含む層を特定することが可能であることを示し、高い信頼性を有することを明らかにした。

本提案同定法では、正弦波加振時のように定常応答と見なすことができる波形の時間領域のデータを用いて $Q-D$ 関係を描き、層剛性を同定することができれば、損傷位置の同定精度も高いことが確認できる。これは、ASD に基づく部材損傷による層剛性の低下量を評価する際にも層剛性の同定をそれぞれ行っているため、得られる $Q-D$ 関係に依存して層剛性の同定精度が異なることに起因している。従って、El Centro NS (1940)などの地震波に代表されるようなランダム波を外乱とするような場合には同定精度の面で課題が残る。しかしながら、地震後の頂部強制加振を行うことは現実的とは言い難く、余震等の応答データの利活用について検討を行う必要がある。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (No.15H04079, 16K18184, 18H01584, 18K04431) による。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Nakamura M., Takewaki I., Yasui Y. and Uetani K., Simultaneous identification of stiffness and damping of building structures using limited earthquake records, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.65, No. 528, pp.75-82, 2000.2.
中村 充, 竹脇 出, 安井 謙, 上谷宏二 限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定, 日本建築学会構造系論文集, No.528, pp.75-82, 2000.2.
- 2) Maeda T., Yoshitomi S. and Takewaki I., Stiffness-damping identification of buildings using limited earthquake records and ARX model, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.76, No.666, pp.1415-1423, 2011.8.
前田朋宏, 吉富信太, 竹脇 出, 限定された地震観測記録と ARX モデルを用いた建物の剛性・減衰同定法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.666, pp.1415-1423, 2011.8.
- 3) Kuwabara, M., Yoshitomi, S. and Takewaki, I. A new approach to system identification and damage detection of high-rise buildings, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(5), pp. 703-727, 2013.
- 4) Araki Y., Miyagi Y. and Uetani K., Damage detection of frame structures using a sensitivity base grouping strategy and mixed combinational-nonlinear optimization, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.69, No.582, pp.65-71, 2004.8.
荒木慶一, 宮城佑輔, 上谷宏二, 感度に基づくグルーピングと組み合わせ非線形最適化による骨組構造物の損傷推定, 日本建築学会構造系論文集, No.582, pp.65-71, 2004.8.
- 5) Escobar J. A., Lopez Batiz O. and Sugahara M., Damage localization in reinforced concrete structures using the sensitivity matrix, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.63, No.508, pp.93-100, 1998.6.
エスコバル・S・ホセ・アルベルト, ロペス・パティス・オスカル, 菅

原まりも, センシティブティ・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, Vol.63, No.508, pp.93-100, 1998.6.

- (6) Hamamoto Y., Morita K. and Teshigawara M., Story damage detection of multistory buildings using natural frequency shifts of multiple modes, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.67, No.560, pp.93-100, 2002.10.

濱本卓司, 森田高市, 勅使川原正臣. 複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, No.560, pp.93-100, 2002.10.

- (7) Michael R. H., A moment distribution method for the analysis and design of structures by the plastic theory, *Structural and Building Engineering Division Meeting*, No.36, pp.51-97, 1953.

- (8) Nakamura T., Architectural structural mechanics with detailed diagram and exercise II, Maruzen, 1982.

中村恒善, 建築構造力学図説・演習 II, 丸善, 1982.

- (9) Murakami J., Tadokoro Y., Lower rank approximation method of linear prediction matrices by the block power method, *Journal of Information Processing*, Vol.34, No.8, pp.1675-1681, 1993.

村上 純, 田所嘉昭, ブロックべき乗法を用いた線形予測行列の低ランク近似法, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.8, pp.1675-1681, 1993.

Appendix 部材剛比を用いた層剛性の定式化

部材剛比を用いて 2 層 1 スパン骨組の層剛性の定式化を行う。部材剛比により陽に層剛性を表すことによって、ある部材が損傷した時の層剛性に及ぼす影響を定量化することが可能となり、単一の部材が損傷（＝部材剛比が減少すると仮定）した際に、損傷した部材を含む当該層以外の層剛性にも影響を与えることを明らかにする。

ここでは、部材剛比を用いて層剛性を表すために、モーメント分配法を適用する。モーメント分配法の特徴は、第 i 層のみに単位層間変形角 $R_i = 1$ を与えるために必要な拘束モーメントを解放した解放モーメント R_{M1} について、各節点周りで分配率 α_{ij} に従う分配モーメントと、分配された解放モーメントが他端に伝達する伝達モーメントの和によって、材端モーメントを近似的に評価できることである。材端モーメントは柱及び梁部材の諸元として基準剛度に対する剛比 k_{ij} の関数となる。分配率 α_{ij} は各節点に接続される柱及び梁部材の剛比によって表され、次式で表される。但し、梁部材については対称性を考慮した際の有効剛比として、部材剛比を 1.5 倍する。

$$\{\alpha_{BA}, \alpha_{BC}, \alpha_{BE}\} = (k_{BA} + k_{BC} + 1.5k_{BE})^{-1} \{k_{BA}, k_{BC}, 1.5k_{BE}\} \quad (A1)$$

$$\{\alpha_{CB}, \alpha_{CF}\} = (k_{CB} + 1.5k_{CF})^{-1} \{k_{CB}, 1.5k_{CF}\} \quad (A2)$$

第 i 層に単位変形角 R_i を与えた場合において、分配を 4 回、伝達を 3 回それぞれ繰り返した後の各部材端モーメントを次式に示す。

$$\begin{Bmatrix} M_{AB}^1 \\ M_{BA}^1 \\ M_{BC}^1 \\ M_{CB}^1 \\ M_{BE}^1 \\ M_{CF}^1 \end{Bmatrix} = \frac{1}{8} R_{M1} \begin{Bmatrix} -8 + 4\alpha_{BA} + \alpha_{BA}\alpha_{BC}\alpha_{CB} \\ -8 + 8\alpha_{BA} + 2\alpha_{BA}\alpha_{BC}\alpha_{CB} \\ 8\alpha_{BC} - 2\alpha_{BC}\alpha_{CB} + 2\alpha_{BC}^2\alpha_{CB} \\ 4\alpha_{BC} - 4\alpha_{BC}\alpha_{CB} + \alpha_{BC}^2\alpha_{CB} - \alpha_{BC}^2\alpha_{CB}^2 \\ 8\alpha_{BE} + 2\alpha_{BC}\alpha_{CB}\alpha_{BE} \\ -4\alpha_{BC}\alpha_{CF} - \alpha_{BC}^2\alpha_{CB}\alpha_{CF} \end{Bmatrix} \quad (A3)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{AB}^2 \\ M_{BA}^2 \\ M_{BC}^2 \\ M_{CB}^2 \\ M_{BE}^2 \\ M_{CF}^2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{8} R_{M2} \begin{Bmatrix} 4\alpha_{BA} - 2\alpha_{BA}\alpha_{CB} + \alpha_{BA}\alpha_{BC}\alpha_{CB} \\ 8\alpha_{BA} - 4\alpha_{BA}\alpha_{CB} + 2\alpha_{BA}\alpha_{BC}\alpha_{CB} - \alpha_{BA}\alpha_{BC}\alpha_{CB}^2 \\ -8 + 8\alpha_{BC} + 4\alpha_{CB} - 6\alpha_{BC}\alpha_{CB} + 2\alpha_{BC}^2\alpha_{CB} + \alpha_{BC}\alpha_{CB}^2 - \alpha_{BC}^2\alpha_{CB}^2 \\ -8 + 8\alpha_{CB} + 4\alpha_{BC} - 6\alpha_{BC}\alpha_{CB} + 2\alpha_{BC}\alpha_{CB}^2 + \alpha_{BC}^2\alpha_{CB} - \alpha_{BC}^2\alpha_{CB}^2 \\ 8\alpha_{BE} - 4\alpha_{CB}\alpha_{BE} + 2\alpha_{BC}\alpha_{CB}\alpha_{BE} - \alpha_{BC}\alpha_{CB}^2\alpha_{BE} \\ 8\alpha_{CF} - 4\alpha_{BC}\alpha_{CF} + 2\alpha_{BC}\alpha_{CB}\alpha_{CF} - \alpha_{BC}^2\alpha_{CB}\alpha_{CF} \end{Bmatrix} \quad (A4)$$

$$R_{M1} = 6EK_0 R_i k_{AB}, \quad R_{M2} = 6EK_0 R_i k_{BC} \quad (A5)$$

M_{st}^i は第 i 層に独立部材回転角 R_i を与えた場合の部材 st の s 端側材端モーメントを表す。 R_i を与えた際の第 j 層の層モーメント m_{ji} は、柱部材の材端モーメントの和として次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{12} \\ m_{22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -(M_{AB}^1 + M_{BA}^1) \\ -(M_{BC}^1 + M_{CB}^1) \\ -(M_{AB}^2 + M_{BA}^2) \\ -(M_{BC}^2 + M_{CB}^2) \end{Bmatrix} \quad (A6)$$

単位回転角 $R_i = 1$ を生じさせるために必要な荷重に対する実際に作用する荷重 P_i の比を X_i とすれば、層モーメントに関する層方程式は次式となる。

$$\begin{Bmatrix} 0.5P_1 + 0.5P_2 \\ 0.5P_2 \end{Bmatrix} h = \begin{Bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} \quad (A7)$$

荷重作用時の部材 st の s 端側材端モーメント M_{st} は、(A7)式を X_i について解いた結果と、(A3)式及び(A4)式で求めた各層に単位部材回転角を与えた場合の材端モーメントを用いて次式のように表される。

$$M_{st} = \sum_{i=1}^2 M_{st}^i X_i \quad (A8)$$

次に、(A8)式で得られた材端モーメントから層間変位をたわみ角法公式によって導出する。たわみ角法公式では、節点 s, t における節点回転角 θ_s, θ_t と部材 st の部材回転角 R_{st} を用いて材端モーメントが次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} M_{AB} \\ M_{BA} \\ M_{BC} \\ M_{CB} \end{Bmatrix} = 2EK_0 \begin{Bmatrix} k_{AB}(\theta_B - 3R_{AB}) \\ k_{AB}(2\theta_B - 3R_{AB}) \\ k_{BC}(2\theta_B + \theta_C - 3R_{BC}) \\ k_{BC}(\theta_B + 2\theta_C - 3R_{BC}) \end{Bmatrix} \quad (A9)$$

θ_s, R_{st} について整理すると、次式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} \theta_B \\ \theta_C \\ R_{AB} \\ R_{BC} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2EK_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 & 0 \\ 2 & 0 & -3 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & -3 \\ 1 & 2 & 0 & -3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} M_{AB} / k_{AB} \\ M_{BA} / k_{AB} \\ M_{BC} / k_{BC} \\ M_{CB} / k_{BC} \end{Bmatrix} \quad (A10)$$

(A10)式より得られる部材回転角に階高 h を乗じることで、各層の層間変位 δ_i は次式のように得られる。

$$\{\delta_1, \delta_2\} = h \{R_{AB}, R_{BC}\} \quad (A11)$$

ここで、2 層 1 スパン骨組の層剛性は、材端モーメントと層間変位 δ_i を用いて次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{Bmatrix} = -\frac{2}{h} \begin{Bmatrix} (M_{AB} + M_{BA}) / \delta_1 \\ (M_{BC} + M_{CB}) / \delta_2 \end{Bmatrix} \quad (A12)$$

従って、(A6)式から X_1, X_2 を求め、(A7)式に代入した上で、材端モーメントを求め、得られた材端モーメントから(A10)式のように層間変位を求めることで、層剛性 k_1 及び k_2 を部材剛比の関数として(A3)式及び(A4)式の左辺である独立部材回転角を与えた際の材端モーメント M_{st}^i を介して表すことが可能である。

STRUCTURAL DAMAGE LOCALIZATION METHOD USING ADDITIVITY ON STORY STIFFNESS DETERIORATION DUE TO DAMAGE OF STRUCTURAL ELEMENTS

*Nobuya SUZUKI^{*1}, Kunihiko NABESHIMA^{*2}, Kohei FUJITA^{*3}
and Izuru TAKEWAKI^{*4}*

^{*1} Grad. Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.

^{*2} Grad. Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., M.Eng.

^{*3} Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.

^{*4} Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.

After unexpected disasters such as off the Pacific coast of Tohoku earthquake (2011) and the Kumamoto earthquake (2016), structural health monitoring techniques are strongly desired to evaluate the structural state of a building immediately. In the structural health monitoring system, the system identification (SI) method plays an important role in dealing with a large amount of monitoring data. As far as the SI methods are concerned, there may exist two branches classified into a modal-parameter SI and a physical-parameter SI. The main objective of the modal parameter SI is to identify the modal quantities and damping ratios. On the other hand, in the physical-parameter SI, the story stiffnesses of the objective building are directly identified from the floor response data. In order to assess the structural state of the possibly damaged building, the physical-parameter SI method is more appropriate for the structural health monitoring compared with the modal-parameter SI method. In this paper, from the viewpoint of the development of the structural health monitoring system using the physical-parameter SI method, a new structural damage localization algorithm for frame buildings is proposed based on the additivity on story stiffness deterioration caused by structural member damages. In the additivity on story stiffness deterioration, the sensitivities of story stiffnesses to structural damages of structural members are used to identify the location of damaged structural members.

The additivity on the story stiffness deterioration can be proved by the Taylor series expansion of a multi-dimensional function. Based on the additivity on the story stiffness deterioration, the story deterioration of the damaged building with multiple structural members can be estimated by the superposition of the story stiffness variation due to the structural damage in a single member. In Section 3, it is shown that the story stiffnesses of a 1-bay 2-story frame are formulated by using the moment distribution method. Since the stiffness ratio of column and beam members are included explicitly in the formulated story stiffnesses, the sensitivity of the story stiffness to the stiffness of each structural member can be derived explicitly and we can understand that the story stiffness varies even if the structural members are damaged in other stories. Therefore, in the proposed damage localization method based on the additivity assumption, the location of the damaged members can be determined by evaluating the error of estimation of the story stiffness deterioration for various combinations of story stiffness deterioration for a single damaged member.

The story stiffnesses of a multi-story frame are evaluated by estimating the relationship between the story shear force and the interstory drift derived by the time-history record of floor accelerations. In order to evaluate the story stiffness reliably, it is desirable to obtain the stationary floor responses. For denoising the observed response data, the singular value decomposition using low-rank approximation is applied to the floor acceleration records. It is confirmed that the relationship between the story shear force and the interstory drift can be derived smoothly by denoising, which is important to evaluate the story stiffness. In numerical examples, both a symmetric 2-bay 5-story frame and a setback 5-story frame subjected to two different excitation scenarios such as the ground motion and the top floor forced excitation are used to investigate the validity of the proposed damage localization method in Section 4.

For the practical application to possibly damaged buildings, it is assumed that the damage severities of structural members and the number of damaged members are unknown. These problems are solved by the proposed damage localization method by improving the searching algorithm based on the superposition of story stiffness variation using the additivity assumption.

(2018年5月8日原稿受理, 2018年7月18日採用決定)