並列モデル同定を用いた多層建築物の部材損傷検出

MEMBER DAMAGE DETECTION OF MULTISTORY BUILDINGS USING PARALLEL MODEL IDENTIFICATION

濱本卓司*, 井上了太**
Takuji HAMAMOTO and Ryota INOUE

A parallel model identification scheme is presented to detect member damage of multistory buildings. Three different mathematical models are used in the identification process: the frame model with member-end rotational springs for detecting member damage, the frame model with joint rotational springs for detecting joint damage and the flexural-shear lumped mass model for detecting story damage. The natural frequencies and mode shapes of a target building are identified from acceleration records measured at each story by ARX model. The changes in modal properties before and after damage events are used to define objective functions for each mathematical model. The objective functions are minimized to estimate the location and extent of story, joint and member damage, respectively, by simple genetic algorithm. The proposed scheme is applied to acceleration records of shaking table tests for different beam damage conditions. Based on the identification results, the usefulness and limitations of the proposed scheme are discussed.

Keywords: *Parallel model identification, Member damage detection, Multistory building, Flexural-shear lumped mass model, Frame model with rotational spring, Genetic algorithm*
並列モデル同定, 部材損傷検出, 多層建築物, 質点系曲げせん断モデル,
回転ばね付きフレームモデル, 遺伝的アルゴリズム

1. 序

振動モニタリングとシステム同定を組み合わせた損傷検出法はグローバルモニタリングの代表的手法である。この損傷検出法の特長は、建物内に少数のセンサを配置して複数の低次モード特性を同定し、損傷前後のモード特性の変化から損傷の位置と程度を推定できる点にある。地震損傷を対象にした大型振動台実験により、層ごとに1つの加速度センサを設置すれば、質点系せん断モデルを用いることにより、地震前後における低次の固有振動数変化から損傷層の位置と損傷程度を推定できること¹⁾、地震作用時における低次の固有振動数の時間変化から層損傷の進行状況を追跡できること²⁾、がそれぞれ確認されている。また、質点系ねじれ振動モデルを用いたり³⁾、主に低次モードを励起する常時微動や地震動とともに、加振機を建物内に設置して高次モードを励起するアクティブ同定手法を導入したり⁴⁾することにより、地震前後における固有振動数変化とモード形変化から、損傷層を特定した後に損傷層内の損傷領域の位置と損傷程度を推定する方法の有効性も実験的に確認されている。しかし、従来のシステム同定手法により実建物の部材損傷検出を行うには、まだ多くの課題が残されている。

部材損傷検出を行いたい場合は、システム同定よりも損傷位置の近くにセンサを直接設置するローカルモニタリングの方が有効であ

る。しかし、ローカルモニタリングでは、損傷の位置が初めからわかっているわけではないため、解析や実験あるいは経験的に損傷が生じやすいと予想される位置、たとえば梁端や柱頭・柱脚などに多数のセンサを分散配置しておく必要が生じる⁵⁾。

少数のセンサで層損傷検出を行うグローバルモニタリングを用いるか、多数のセンサで部材損傷検出を行うローカルモニタリングを用いるかの判断は、損傷検出の目的に依存している。グローバルモニタリングでは、数少ないセンサのデータから損傷に関する情報を抽出せねばならず、全てのセンサのデータを一括処理することが必要になる。一方、ローカルモニタリングでは、膨大なセンサのデータを迅速に処理して損傷に関する情報を抽出することが要求されるため、各センサで最大値や累積値のような応答指標に変換しておき、それを相互比較して損傷を検出する分散処理が必要になる。現時点では、グローバルモニタリングとローカルモニタリングの距離は隔たっており、総合的なヘルスマニタリング技術を確立する上で、両者の隔たりを埋めることが求められている⁶⁾。

こうした状況を背景に、本研究では、グローバルモニタリングとローカルモニタリングの中間的手法として、各層に少数の加速度センサを置いて部材損傷検出を行う並列モデル同定手法を提案する。材端回転ばね付きフレームモデルを質点系曲げせん断モデルに変換

* 東京都市大学工学部建築学科 教授・工博
** 東電設計㈱ 工修
(元 東京都市大学 大学院生)

Prof., Dept. of Architecture, Tokyo City University, Dr. Eng.
Tokyo Electric Power Services Co., LTD., M. Eng.
(Formerly Graduate Student of Tokyo City University)

することにより、梁損傷が質点系モデルに適切に反映されるようにした上で、質点系曲げせん断モデルと実建物のモード特性の誤差を最小化させるプロセスを通じて、材端回転ばね付きフレームモデルの剛性パラメータを推定する。材端回転ばね付きフレームモデルのパラメータの数は質点系曲げせん断モデルのパラメータの数よりはるかに多くなる。このため、同一接合部に集まる部材の材端回転ばねを一つに集約し、接合部での集約回転ばねの剛性変化を同定することにより損傷部材近傍の接合部の位置を特定した後、その接合部に集まる各部材の材端回転ばねの剛性変化を個々に同定して部材損傷検出を行う。既往の振動台実験の時系列データ¹⁾を用いて、異なる梁端損傷に対して本手法を適用し、その有効性と適用限界を検討する。

2. 並列モデル同定

本研究で提案する並列モデル同定とは、時系列モデルを用いて損傷による対象構造物のモード特性の変化を同定した後、等価性を有する複数の数学モデルを並列させ、簡易モデルから詳細モデルへと物理パラメータを順次推定する方法である。本研究では、時系列モデルとして ARX モデル、数学モデルとして、図 1 に示すように、層剛性を物理パラメータとする質点系曲げせん断モデル、接合部での集約回転ばね剛性を物理パラメータとする集約回転ばね付きフレームモデル、および材端回転ばね剛性を物理パラメータとする材端回転ばね付きフレームモデルを用いる。3つの数学モデルの等価性を保証するために、材端回転ばね付きフレームモデルを基本モデルとして、それを縮約した集約回転ばね付きフレームモデル、さらに縮約した質点系曲げせん断モデルを構築する。

3つの数学モデルは、異なるレベルの損傷検出のために使用される。図 2 に示すように、質点系曲げせん断モデルは層レベルの損傷検出のために用いる。損傷層が特定できたら、集約回転ばね付きフレームモデルを用いて、損傷部材が接続する接合部の位置を特定する。損傷部材が接続する接合部が特定できたら、材端回転ばねモデルを用いて、損傷部材の位置を特定し損傷程度を推定する。すなわち、はじめに少数のセンサから得られる限定された情報を利用して簡易モデルにより構造全体の状態を大まかに把握しておき、徐々に詳細化させたモデルに切り換えて損傷位置を絞り込む焦点化手法を用いる。

しかし、詳細モデルになるほど未知パラメータの数は多くなり、少数のセンサから得られる限定された情報から詳細モデルを同定することは困難になる。本研究では、詳細モデルのパラメータの中で剛性変化の生じない集約回転ばねあるいは材端回転ばねを既知パラメータとして未知パラメータの数を低減し、限定された情報を詳細モデルの同定に結びつける方法を試みる。図 3 に示すように、ARX モデルを用いて損傷による極と留数の変化を同定した後、対応する質点系曲げせん断モデルの固有振動数とモード形の変化に変換し、その後の数学モデルの同定はモード空間で行う。損傷によるモード特性の変化から数学モデルの物理パラメータの変化を推定する方法は、モード同定に基づく損傷検出の標準的な手法である⁷⁾。質点系曲げせん断モデルは全体構造が対象になるが、集約回転ばね付きおよび材端回転ばね付きフレームモデルは損傷領域として絞り込まれた部分構造が対象になる。全体構造のモード特性の変化を引き起こ

す2つの部分構造の変化を推定するために、質点系曲げせん断モデルを2つのフレームモデルとそれぞれ並置して逆感度解析を行う。モード空間において3つの数学モデルを切り換えながら解を探索することを考慮し、最適化手法には物理パラメータを推定する際に柔軟な対処が可能な遺伝的アルゴリズム^{8,9)}を用いる。

図 1 並列モデル同定に用いる3つの数学モデル

図 2 並列モデルを用いた同定フロー

図 3 並列モデルを用いたシステム同定

3. 損傷検出のための数学モデル

並列モデル同定に用いる3つの数学モデル、すなわち材端回転ばね付きフレームモデル、集約回転ばね付きフレームモデル、および等価曲げせん断モデルの関係を以下に示す。

3.1 部材損傷検出のための材端回転ばね付きフレームモデル

多層骨組構造物の地震損傷は、梁端や柱頭・柱脚などの材端に生じやすい。本研究では、部材損傷検出のための数学モデルとして材端回転ばね付きフレームモデルを用いる。梁材、柱材、および材端回転ばねで構成される2次元モデルである。部材損傷を材端回転ばねの剛性低下として評価し、ばね間の梁材と柱材については弾性変形のみを考慮する。材端回転ばねの曲げ剛性は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$k_m = \frac{\mu_m}{1-\mu_m} \cdot \frac{4EI}{l} \quad (1)$$

ここに、 E はヤング係数、 I は断面二次モーメント、 l は部材長さ、 μ_m は柔性パラメータで、0のときピン接合、1のとき剛接合、下添字 m は部材番号を表している。部材の端部に損傷がないときは $\mu_m = 1$ 、損傷が生じると剛性が低下し μ_m の値は減少する。

材端回転ばねを有する梁材と柱材で全体骨組モデルを構成すると、部材端で曲げとせん断に関する回転角と材軸直交方向変位の2自由度を有するので、全部材に関する剛性マトリクスのサイズは、 $4M \times 4M$ になる。ここに、 M は部材数である。

3.2 接合部損傷検出のための集約回転ばね付きフレームモデル

部材損傷検出を行う前に、損傷した材端部が結合する接合部の位置を特定する。このために、材端回転ばね付きフレームモデルを集約回転ばね付きフレームモデルに変換する。集約回転ばねの剛性は、各接合部に集まる部材の材端回転ばね剛性の和として次式で与えられる。

$$k_j = \sum k_m \quad (2)$$

上式は、接合部 j に集まる部材 m のすべての材端回転ばねを加算することを表している。接合部で集約回転ばねを有するフレームモデルの全接合部に関する剛性マトリクスのサイズは $2J \times 2J$ になる。ここに、 J は接合部数である。

3.3 層損傷検出のための質点系曲げせん断モデル

層損傷検出には、通常、梁の変形を無視した質点系せん断モデルが用いられる。この場合、梁端部の損傷は柱頭・柱脚の拘束を弱めるという間接的な影響を通して層損傷として評価される¹⁾。これに対し、本研究では、梁端部の損傷を直接反映できる質点系曲げせん断モデルを用いる。材端回転ばね付きフレームモデルと質点系曲げせん断モデルの等価性を保証するために、以下の手順でフレームモデルから質点系モデルに変換する。

材端回転ばね付きフレームモデルから集約回転ばね付きフレームモデルに変換した後、集約回転ばね付きフレームモデルに静的縮約をかけて回転角を消去する。このとき剛性マトリクスのサイズは $J \times J$ になる。ここで、剛床仮定を適用して曲げせん断モデルに変換する。剛性マトリクスは $S \times S$ のフルマトリクスとなる。ここに、 S は層数である。最後に、ハウスホルダー変換により曲げを考慮した等価せん断モデルに変換する。剛性マトリクスのサイズは $S \times S$ のままで三重対角化されるので、質点系せん断モデルと同様に層剛性に変換できる。

4. 損傷指標の定義

部材損傷検出を行う過程で用いた3つの数学モデルに対応して3つの損傷指標を定義する。質点系曲げせん断モデルでは層損傷指標、集約回転ばね付きフレームモデルでは接合部損傷指標、材端回転ばね付きフレームモデルでは部材損傷指標をそれぞれ用いる。

4.1 層損傷指標

損傷部材の影響を受ける層の位置の特定と損傷程度を評価するために層損傷指標を定義する。層損傷指標は、損傷による層の剛性低下を損傷前の層剛性で除した層剛性低下率として次式で与えられる。

$$\alpha_s = \frac{\Delta k_s}{k_{s0}} = \frac{k_{s0} - k_{sD}}{k_{s0}} \quad (3)$$

ここに、 α_s は s 層の層剛性低下率、 Δk_s は損傷前後の層剛性の差、 k_{s0} と k_{sD} はそれぞれ損傷前と損傷後の層剛性である。

4.2 接合部損傷指標

損傷部材の影響を受ける接合部の位置の特定と損傷程度を評価するために接合部損傷指標を定義する。接合部損傷指標は、損傷による集約回転ばねの剛性低下を損傷前の集約回転ばね剛性で除した接合部剛性低下率として次式で与えられる。

$$\beta_j = \frac{\Delta k_j}{k_{j0}} = \frac{k_{j0} - k_{jD}}{k_{j0}} \quad (4)$$

ここに、 β_j は接合部 j の集約回転ばね剛性低下率、 Δk_j は損傷前後の集約回転ばね剛性の差、 k_{j0} と k_{jD} はそれぞれ損傷前と損傷後の集約回転ばね剛性である。

4.3 部材損傷指標

損傷部材の位置の特定と損傷程度を評価するために部材損傷指標を定義する。部材損傷指標は、損傷による材端回転ばねの剛性低下を損傷前の材端回転ばね剛性で除した部材剛性低下率として次式で与えられる。

$$\gamma_m = \frac{\Delta k_m}{k_{m0}} = \frac{k_{m0} - k_{mD}}{k_{m0}} \quad (5)$$

ここに、 γ_m は部材 m の材端回転ばね剛性低下率、 Δk_m は損傷前後の材端回転ばね剛性の差、 k_{m0} と k_{mD} はそれぞれ損傷前と損傷後の材端回転ばね剛性である。

5. 損傷同定

並列モデル同定における損傷同定のプロセスを以下に示す。

5.1 ARX モデルによるモード同定

各層に設置したセンサで計測された加速度時系列にARXモデルを適用して実建物の固有振動数とモード形を同定する。各層で振動を計測しているので、同定されたモード形は質点系曲げせん断モデルに対応していることになる。同定されたモード特性の損傷前後での変化に着目して、固有振動数変化率とモード形変化率をそれぞれ以下のように定義する。

固有振動数変化率は、損傷前後における固有振動数の二乗の変化率として次式により求める。

$$\Delta \Omega_n = \frac{\omega_{0n}^2 - \omega_{Dn}^2}{\omega_{0n}^2} \quad (6)$$

ここに、 ω_{0n} と ω_{Dn} はそれぞれ損傷前と損傷後の n 次固有円振動数である。損傷がないと固有円振動数の変化はないので0となる。

モード形変化率は、損傷前後におけるモード形の MAC (Mode Assurance Criterion) 値を利用して次式により定義する。

$$\Delta\Psi_n = 1 - \frac{|\{\varphi_{0n}\}^T \{\varphi_{Dn}\}|^2}{\{\varphi_{0n}\}^T \{\varphi_{0n}\} \{\varphi_{Dn}\}^T \{\varphi_{Dn}\}} \quad (7)$$

ここに、 $\{\varphi_{0n}\}$ と $\{\varphi_{Dn}\}$ はそれぞれ損傷前と損傷後の n 次モード形である。損傷がないとモード形の変化はないので 0 となる。

5.2 質点系曲げせん断モデルによる層損傷同定

各層に 1 台の加速度センサを配置した場合、通常は層レベルの損傷検出しかできない。これは、各層 1 自由度の質点系せん断モデルを用いてシステム同定を行うことによる限界である。柱に損傷が生じた場合、層剛性低下を直接引き起こすため、質点系せん断モデルでも比較的容易に損傷検出が可能である。しかし、梁に損傷が生じた場合、梁の損傷が柱の材端拘束を弱めるという間接的な影響で層剛性低下を引き起こすことになるため、層剛性低下は小さくなり損傷検出が難しくなる。実際、文献 1) では、柱の損傷はすべて精度良く同定できているものの、梁の損傷になると損傷同定の精度が落ち、中間層の梁損傷は同定できないケースも見られた。

本研究では、梁損傷の影響を直接的に評価する質点系曲げせん断モデルを用いる。ARX モデルで同定した実建物のモード特性の変化を質点系曲げせん断モデルの物理パラメータの変化に適合させるために、以下の目的関数を用いる。

$$F_s = \sum_{n=1}^{NF} c_n |\Delta\Omega_n^L(\alpha_s) - \Delta\Omega_n^R| + \sum_{n=1}^{NS} d_n |\Delta\Psi_n^L(\alpha_s) - \Delta\Psi_n^R| \quad (8)$$

ここに、 c_n と d_n は n 次の固有振動数とモード形の選択パラメータ (選択するとき 1、しないとき 0)、 $\Delta\Omega_n^L(\alpha_s)$ と $\Delta\Omega_n^R(\alpha_s)$ はそれぞれ質点系曲げせん断モデルと実建物の固有振動数変化率、 $\Delta\Psi_n^L$ と $\Delta\Psi_n^R$ はそれぞれ質点系曲げせん断モデルと実建物のモード形変化率、 NF と NS はそれぞれ固有振動数とモード形の数である。

F_s を最小化することにより、損傷前後における層の剛性低下率 α_s を同定し、損傷層の位置と損傷程度を推定する。

5.3 集約回転ばね付きフレームモデルによる接合部損傷同定

集約回転ばね付きフレームモデルと質点系曲げせん断モデルのモード特性の変化を適合させて、集約回転ばね付きフレームモデルの物理パラメータの変化を推定するために以下の目的関数を最小化する。

$$F_j = \sum_{n=1}^{NF} c_n |\Delta\Omega_n^I(\beta_j) - \Delta\Omega_n^L| + \sum_{n=1}^{NS} d_n |\Delta\Psi_n^I(\beta_j) - \Delta\Psi_n^L| \quad (9)$$

ここに、 $\Delta\Omega_n^I(\beta_j)$ は集約回転ばね付きフレームモデルの固有振動数変化率、 $\Delta\Psi_n^I(\beta_j)$ は集約回転ばね付きフレームモデルのモード形変化率である。

F_j を最小化することにより、損傷前後における集約回転ばねの剛性低下率 β_j を同定し、損傷部材が結合する接合部の位置と損傷程度を推定する。

5.4 材端回転ばね付きフレームモデルによる部材損傷同定

材端回転ばね付きフレームモデルと質点系曲げせん断モデルのモード特性の変化を適合させて、材端回転ばね付きフレームモデルの物理パラメータの変化を推定するために以下の目的関数を最小化する。

$$F_m = \sum_{n=1}^{NF} c_n |\Delta\Omega_n^M(\gamma_m) - \Delta\Omega_n^L| + \sum_{n=1}^{NS} d_n |\Delta\Psi_n^M(\gamma_m) - \Delta\Psi_n^L| \quad (10)$$

ここに、 $\Delta\Omega_n^M(\gamma_m)$ は材端回転ばね付きフレームモデルの固有振動数変化率、 $\Delta\Psi_n^M(\gamma_m)$ は材端回転ばね付きフレームモデルのモード形変化率である。

F_m を最小化することにより、損傷前後における材端回転ばねの剛性低下率 γ_m を同定し、損傷部材の位置と損傷程度を推定する。

6. 遺伝的アルゴリズムによるパラメータ推定

式(8)~(10)の目的関数を最小化するための最適化手法として遺伝的アルゴリズムを用いる。アルゴリズムのフローを図 4 に示す。損傷指標としての剛性低下率を 2 進数表現での遺伝子列として表し、規定した個体数の遺伝子をランダムに発生させた後、各個体の適合度を求めランク付けをする。高ランクの個体をエリートとして確保し、残りの個体にルーレット選択を適用し、各個体の適合度に比例した残存機会を与える。交叉プールの中で親の選択をし、選ばれたペア同士で一点交叉を行う。その後少数の遺伝子を突然変異させ、設定した世代数だけ同じ手順を繰り返す。本研究では、個体遺伝子表現は 16bit の 2 進数表現とし、個体数 1000、エリート選択率 15%、交叉確率 80%、突然変異率 1%、評価回数 3000 世代とした。

式(8)では、質点系曲げせん断モデルと実建物のモード特性変化が一致するような層剛性低下率の最適解を求めるために遺伝的アルゴリズムを適用する。式(9)では、集約回転ばね付きフレームモデルと質点系曲げせん断モデルのモード特性変化が一致するような集約回転ばね剛性低下率の最適解を求めるために遺伝的アルゴリズムを適用する。式(10)では、材端回転ばね付きフレームモデルと質点系曲げせん断モデルのモード特性変化が一致するような材端回転ばね剛性低下率の最適解を求めるために遺伝的アルゴリズムを適用する。

最適値への収束を示す指標として、式(8)~(10)の目的関数を用いて以下の適合関数を定義する。

$$Fitness = \frac{1}{1-F} \quad (11)$$

ここに、 F は一般的な目的関数を表わし、式(8)を用いるときは F_s 、式(9)を用いるときは F_j 、式(10)を用いるときは F_m となる。

図 4 遺伝的アルゴリズムのフロー

7. 同定結果と検討

7.1 振動台実験の概要

本手法の有効性と適用限界を検討するために、文献1)と同じく、図5に示す5層鋼製フレームの振動台実験において計測された各層での加速度時系列データを用いる。振動台での入力 $0\sim 200\text{Hz}$ の帯域限定ホワイトノイズである。柱部材の損傷に関しては、通常の質点系せん断モデルを用いた同定で十分精度が得られているので、ここでは表1のように、質点系せん断モデルでは同定精度が十分ではなかった梁部材の端部損傷に関する実験データのみを使用する。無損傷状態に対する実験を行った後、損傷状態として、①梁の左フランジ継手を除去した場合 (BS1, BS3, BS5), ②梁左端部に切り欠きを入れた場合 (BC1, BC3, BC5), ③梁の左フランジ継手のボルトを緩めた場合 (BB1, BB5) の3パターンの模擬損傷が設定された。

7.2 ARX モデルによるモード特性の同定

計測された加速度時系列データにARXモデルを適用して、1～5次の固有振動数とモード形を同定する。ARXモデルの次数は、残差が0近傍に十分収束する35次とした。ARXモデルにより同定された無損傷状態における固有振動数と減衰比を表2に示す。

図5 実験模型

図6 接合部番号と部材番号

7.3 質点系曲げせん断モデルの精度

5層の鋼製フレームの部材番号、接合部番号、材端回転ばね番号を図6に示す。無損傷状態において、質点系曲げせん断モデルと質点系せん断モデルをARXモデルの結果にフィッティングさせた後、固有値解析により求めた固有振動数を表2に示す。質点系せん断モデルでは高次モードになると精度が落ちるが、質点系曲げせん断モデルでは、4, 5次においても誤差が4%以内にとどまっている。計測データにARXモデルを適用して同定したモード形と固有値解析により求めた各モデルのモード形を図7に示す。1～3次では質

表1 損傷パターンの設定

損傷パターン	損傷箇所
BS1 (1層梁左端フランジ継手除去)	1層
BS3 (3層梁左端フランジ継手除去)	3層
BS5 (5層梁左端フランジ継手除去)	5層
BC1 (1層梁左端切り欠き)	1層
BC3 (3層梁左端切り欠き)	3層
BC5 (5層梁左端切り欠き)	5層
BB1 (1層梁左端継手ボルト緩め)	1層
BB5 (5層梁左端継手ボルト緩め)	5層

表2 無損傷状態における固有振動数の比較

モード 次数	モデル			
	ARX		曲げせん断	せん断
	固有振動数 (Hz)	減衰比	固有振動数 (Hz)	固有振動数 (Hz)
1	2.91	0.0030	2.95	2.97
2	8.85	0.0011	8.92	8.78
3	14.82	0.0010	15.10	14.21
4	20.33	0.0008	20.74	18.73
5	24.40	0.0007	25.19	21.74

図7 無損傷状態におけるモード形の比較

表3 同定のための採用モード次数

選択モード	損傷状態	固有振動数 変化率	モード形 変化率
1	全状態	1～5 次	なし
2	全状態	1～5 次	1～5 次
3	BS1	1, 2 次	1, 2, 5 次
	BS3	1, 2, 4 次	2, 3, 4 次
	BS5	2, 3, 4 次	3, 4, 5 次
	BC1	1, 2, 3 次	なし
	BC3	1, 2, 3, 4 次	3 次
	BC5	1, 2, 3, 4 次	3, 4 次
	BB1	1, 2, 3 次	なし
	BB5	1, 2, 3, 4 次	4 次

点系曲げせん断モデルと質点系せん断モデルの差はほとんどないが、4, 5 次のモード形振幅は中間層部分において質点系曲げせん断モデルの方が ARX モデルとの一致度は良い。1～3 次のみを用いて同定を行う場合はせん断モデルでも良いが、4, 5 次を含めて同定を行う場合は曲げせん断モデルを用いる必要がある。Saito *et al.*¹¹⁾ も同じ振動台実験を対象とした層損傷検出の際に、質点系せん断モデルの適用限界を指摘している。

7.4 同定のための選択モード

各損傷パターンの同定に用いる固有振動数変化率とモード形変化率のモード次数の選択を表3に示す。選択モード1は固有振動数変化率に関しては全モードを使用し、モード形変化率に関しては全モードとも使用しない場合である。選択モード2は固有振動数変化率とモード形変化率ともに全モードの情報を使用する場合である。選択モード3では、固有振動数変化率とモード形変化率のそれぞれにおいて、固有振動数変化率とモード形変化率の最大のモードを基準として、各変化率の1/3を下回るモードを除去した場合、すなわち感度の低いモードをノイズ混入の原因と見て除去した場合である。

7.5 遺伝的アルゴリズムの収束状況

遺伝的アルゴリズムによる目的関数の最小化過程を、梁端フランジ継手除去の場合を例として、選択モード3における層損傷、接合部損傷、部材損傷それぞれの場合について図8に示す。エリートと母集団平均の収束を併せて示した。層損傷の同定では、BS1とBS5は100世代と収束は速く、中間層損傷のBS3は世代数800でようやく

収束している。接合部損傷の同定では、BS1は400世代を要し、BS3とBS5は100世代と比較的早く収束している。部材損傷の同定では、BS1とBS5で100世代、中間層損傷のBS3では500世代を要している。

7.6 梁端フランジ継手を除去した場合の部材損傷検出

梁端フランジ継手を1層(BS1)、3層(BS3)、5層(BS5)で除去した場合の層損傷、接合部損傷、および部材損傷を同定する。

ARX モデルにより同定した固有振動数変化率を図9に、モード形変化率を図10に示す。選択モード3において、固有振動数変化率とモード形変化率の採用モード次数は、表3に示すように、それぞれBS1で1, 2 次と1, 2, 5 次、BS3で1, 2, 4 次と2, 3, 4 次、BS5で2, 3, 4 次と3, 4, 5 次となった。

選択モード1～3を用いて同定した層剛性低下率を図11に示す。選択モード1～3ともに、BS1では1層と2層、BS3では3層と4層、BS5では5層が損傷したと判別できる。層損傷の判別は、剛性低下率が負側に出たものと最大変化率の1/3を下回るものを無損傷とみなすことを基本とした。したがって、損傷接合部と考えられるのはBS1で接合部①か⑥、BS3で接合部③か⑧、BS5で接合部⑤か⑩のいずれかになる。

集約回転ばね付きフレームモデルにより同定した接合部剛性低下率を図12に示す。損傷層が特定されたとき、選択モード1と3は、BS1で接合部①、BS3で接合部③、BS5で接合部⑤が損傷したと判別できるが、選択モード2は、中間層損傷のBS3において損傷接合部の判別ができない。接合部損傷の判別は、剛性低下率が最大変化率の1/3を下回るものを無損傷とみなすことを基本とした。

材端回転ばね付きフレームモデルにより同定した部材剛性低下率を図13に示す。損傷接合部が特定されたとき、選択モード3は、BS1で部材11、BS3で部材13、BS5で部材15が損傷したと明確に判別できるが、選択モード1と2はBS3で判別しづらい。部材損傷の判別は、剛性低下率が最大変化率の1/2を下回るものを無損傷とみなすことを基本とした。選択モード3の部材剛性低下率はBS1～3で0.4～0.5の範囲で同定されているが、選択モード1と2では同定値のばらつきがやや大きい。

7.7 梁端に切り欠きを入れた場合の部材損傷検出

梁端の切り欠きを1層(BC1)、3層(BC3)、5層(BC5)に入れた場合の層損傷、接合部損傷、および部材損傷を同定する。

ARX モデルにより同定した固有振動数変化率を図14に、モード形変化率を図15に示す。モード形変化率は、BC1で全モードに、BC3で2, 3 次以外に、BC5で3, 4, 5 次以外にそれぞれ有意な変化が見られなかった。選択モード3において、固有振動数変化率と

図8 遺伝的アルゴリズムの収束状況

図9 梁端フランジ除去の固有振動数変化率

図10 梁端フランジ除去のモード形変化率

図11 梁端フランジ除去の層剛性低下率

図12 梁端フランジ除去の接合部剛性低下率

図13 梁端フランジ除去の部材剛性低下率

モード形変化率の採用モード次数は、表3に示すように、それぞれBC1で1, 2, 3次と採用なし、BC3で1, 2, 3, 4次と3次、BC5で1, 2, 3, 4次と3, 4次となった。

選択モード1～3を用いて同定した層剛性低下率を図16に示す。選択モード1～3ともに、BC1では1層と2層、BC3では3層と4層、BC5では5層が損傷したと特定できる。したがって、損傷接合部と考えられるのはBC1では接合部①か⑥、BC3では接合部③か⑧、BC5では接合部⑤か⑩のいずれかになる。

集約回転ばね付きフレームモデルにより同定した接合部剛性低下率を図17に示す。選択モード3は、BC1で接合部①、BC3で接合部

③、BC5で接合部⑤が損傷したと明確に判別できるが、選択モード1はBC3で、選択モード2はBC1とBC3で損傷接合部を判別しづらい。

材端回転ばね付きフレームモデルにより同定した部材剛性低下率を図18に示す。選択モード3は、BC1で部材11、BS3で部材13、BC5で部材15が損傷したと明確に判別できるが、選択モード1はBC3で判別しづらく、選択モード2はBC3でまったく判別できない。選択モード3の部材剛性低下率は0.25～0.35と同定されており、ばらつきがやや大きくなっている。

図14 梁端切り欠きの固有振動数変化率

図15 梁端切り欠きのモード形変化率

図16 梁端切り欠きの層剛性低下率

図17 梁端切り欠きの接合部剛性低下率

図18 梁端切り欠きの部材剛性低下率

7.8 梁端フランジ継手のボルトを緩めた場合の部材損傷検出

梁端フランジ継手のボルトを1層 (BB1), 5層 (BB5) で緩めた場合の層損傷, 接合部損傷, および部材損傷を同定する。

ARX モデルにより同定した固有振動数変化率を図19に, モード形変化率を図20に示す。モード形変化率は, BB1では全モードに, また BB5では4次以外には有意な変化が見られなかった。選択モード3において, 固有振動数変化率とモード形変化率の採用モード次数は, 表3に示すように, それぞれ BB1で1, 2, 3次と採用なし, BB5で1, 2, 3, 4次と4次となった。

選択モード1～3を用いて同定した層剛性低下率を図21に示す。

選択モード1～3ともに, BB1は1層と2層, BB5は5層が損傷したとほぼ判別できる。したがって, 損傷接合部と考えられるのは BB1では接合部①か⑥, BB5では接合部⑤か⑩のいずれかになる。ただし, 損傷程度が軽微なため, 前2例に比べると精度は落ちている。

集約回転ばね付きフレームモデルにより同定した接合部剛性低下率を図22に示す。選択モード1～3ともに, BB1は接合部①, BB5は接合部⑤が損傷したと判別できる。

材端回転ばね付きフレームモデルにより同定した部材剛性低下率を図23に示す。選択モード2と3は BB1で部材11, BB5で部材15が

図19 梁ボルト緩めの固有振動数変化率

図20 梁ボルト緩めのモード形変化率

図21 梁ボルト緩めの層剛性低下率

図22 梁ボルト緩めの接合部剛性低下率

図23 梁ボルト緩めの部材剛性低下率

損傷したと明確に判別できるが、選択モード1と2はBB1で判別しづらい。選択モード3の部材剛性低下率は、損傷は小さいが0.05程度と明確に同定されている。

8. 結び

少数のセンサを建物内部に配置し、部材レベルの損傷をある程度検出できるような損傷検出法の開発を目指して、並列モデル同定の概念を示した。少数の既知情報（モード特性）から多数の部材の損傷状態を直接検出することは無理があるので、本研究では、既知情報と未知情報の数のバランスを取りながら、層損傷、接合部損傷、

部材損傷と徐々に損傷領域を絞り込む方法を採用した。本手法の有効性は、まだ単純な純フレーム構造物で検証された段階ではあるが、基本的な概念は一般的な構造物に対しても適用できると考えられる。

以下に、本研究の範囲内で得られた知見を要約する。

- 1) 材端回転ばね付きフレームモデルとそれを縮約した曲げせん断モデルを同時に用いることにより、少数の加速度センサの配置でも、損傷層の特定、損傷接合部の特定を経て、損傷部材を特定し、その損傷度を推定ができる可能性がある。
- 2) 材端回転ばね付きフレームモデルを集約した曲げせん断モデル

は、高次モードでも精度よく固有振動数とモード形を再現することができ、せん断型モデルでは層レベルの損傷検出ができなかった場合でも、部材レベルの損傷検出まで可能になった。

- 3) 層レベル、接合部レベル、および部材レベルの損傷検出で用いた3つの数学モデルの損傷指標を推定するために用いた遺伝的アルゴリズムは、対象とするモード特性を全体として徐々に変化させながら目的関数を最小化でき、本損傷検出法に適した最適化手法といえる。
- 4) 部材レベルの損傷検出を行う場合、固有振動数変化率だけでは情報として十分ではなく、そうかといってモード形変化率に関する情報をすべて加えても逆に同定精度が落ちるという傾向が見られた。固有振動数変化率とモード形変化率のうち、感度の高いモードのみを選別して同定する方法が最も良い結果を与えた。
- 5) 本研究で用いた数学モデルで検出できる部材損傷は、梁端あるいは柱頭・柱脚に損傷が集中する場合であり、適用範囲は純フレーム構造物に限定される。ブレースや壁を含む構造には、さらに数学モデルの高度化が必要である。

謝辞

ここで使用した振動台実験のデジタルデータは日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」(1998~2003年)のセンサ部会性能モニタリングWGにおける損傷検出実験の結果を建築研究所で整理したものである。

参考文献

- 1) 濱本卓司, 森田高市, 勅使河原正臣: 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

- 2) 濱本卓司, 森田高市, 相馬澄子: 逐次最小二乗法による多層建築物の地震損傷追跡, 日本建築学会構造系論文集, No. 603, pp.39-46, 2005.5
- 3) 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, No. 519, pp.21-28, 1999.5
- 4) 濱本卓司, 大浴佳治, 三好敏晴: アクティブ同定手法を用いた多層建築物の損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, No. 539, pp.51-56, 2001.1
- 5) 圓 幸史朗, 池ヶ谷 靖, 中村 充, 柳瀬 仁: スマートセンサと無線ネットワークを用いた構造ヘルスマニタリングシステムの開発, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第6号, pp.17-30, 2007.11
- 6) 濱本卓司: 建築物の挙動をはかる新しいセンシング技術, 建築防災, Vol. 378, pp.2-9, 2009.7
- 7) Doebling, S.W. *et al.*: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Change in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory, LA-1370-MS, 1996
- 8) Hao, H., Xia, Y.: Vibration-based Damage Detection of Structures by Genetic Algorithm, J. of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol. 16, No. 3, pp.222-229, 2002.
- 9) Friswell, M.I., Penny, J.E.P., Gravey, S.D.: A Combined Genetic and Eigensensitivity Algorithm for the Location of Damage in Structures, Computers and Structures, 69, pp.547-556, 1998.
- 10) 松本慎也, 春日康博, 藤井大地, 藤谷義信: 接合部のコストを考慮した半剛接鉄骨建物の最小コスト解析, 日本建築学会構造系論文集, No. 528, pp.113-119, 2000.2
- 11) Saito, T., Mase, S., Morita, K.: A Probabilistic Approach to Structural Damage Estimation, Structural Control and Health Monitoring, 12, pp.283-299, 2005

(2010年3月10日原稿受理, 2010年6月7日採用決定)