部分構造の ARX モデルを用いた三次元構造物の局所損傷検出

LOCAL DAMAGE DETECTION OF A 3 DIMENSIONAL STRUCTURE BASED ON ARX MODEL OF SUBSTRUCTURES

白石理人 ——— * 1 齋藤知生 ——— * 2
三田 彰 ——— * 3

Michihito SHIRAISHI ——— * 1 Tomoo SAITO ——— * 2
Akira MITA ——— * 3

キーワード：
損傷検出, 局所損傷, 三次元構造物, 部分構造, システム同定, 残差解析

Keywords:
Damage detection, Local damage, Three-dimensional structure, Substructure, System identification, Residual analysis

A new sub structure-based damage detection method is proposed in this paper to locate local damages in a structure. The method assumes a dense array of sensor instrumentation to a structure to enable damage localization in structural member level. The performance of the method is demonstrated using numerical simulation data sets obtained from seismic response analysis of a three-dimensional 5-story steel structure frame model which has artificially damaged beams and columns. The proposed method successfully detects and locates the structural member level damages in the structure.

1. はじめに

近年, 南海トラフを震源とする巨大地震や首都直下地震などの発生が懸念される状況下で, 地震直後に建物の健全性・被災状況を迅速に把握し都市機能を速やかに回復させることの必要性が指摘されている。特にこれらの地震が甚大な被害をもたらすと予想される大都市部では, 建物の数があまりにも多いため従来のような専門家の現地調査による対応のみでは限界があり, それを補完するものとして建物に設置したセンサを用いてその健全性・被災状況を評価し, 建物利用者などに情報提供を行う技術への関心と期待が高まっている¹⁾。

これに対し, これまでも数多くの研究が行われてきたのが地震前後の建物の構造特性の変化からその健全性・被災状況を評価する方法であり, 構造特性を評価するスケールを建物全体から, 層, 部材と絞り込んでいくことで, 構造物内の損傷の有無から局所的な損傷の位置まで様々なレベルで建物の損傷を検出することができる。この構造特性の評価手法は地震時の損傷検出を直接的な目的としていないものも含めると非常に多くの蓄積がある。建物全体系を対象としたものでは, 様々なモーダルパラメータの同定手法^{例えば 2, 3)}が提案されており, 層レベルでは, その損傷を直接的に検出する手法⁴⁾, モーダルパラメータから間接的に検出する手法^{6, 7)}, それらを組み合わせた層剛性の推定手法⁸⁾等を挙げることができる。その反面, 部材レベルで局所的な損傷検出を可能とする手法⁹⁾については数が限られている。これは, 現在までは技術・コスト両面の制約から実際に建物に設置可能なセンサの数は少数であり, それを前提とした研究が行われてきたためであろう。

その一方で, 半導体微細加工技術を応用し電子回路のみならずセ

ンサ等の機械要素部品も一つの基板上に集積する MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術や, 通信ネットワーク技術などを応用することで, 近い将来にはセンサの小型・低価格化が進み, 構造物へのセンサの高密度かつ大規模な配置や, データの分散処理が可能となることが期待されている¹⁰⁾。すでにこのような技術を利用したセンシングシステムのプロトタイプ上に様々な構造特性の評価手法を実装した実証的な研究^{11~13)}も進められている。

構造物に生じる損傷は本来局所的なものであるから, 建物の健全性・被災状況の評価は局所的なスケールで行う方が, 損傷に対する感度は高くなることが予想され, 損傷位置を直接的に特定することも可能となる。そこで本研究では上述のような新しいタイプのセンサを構造物に大規模かつ高密度に配置できることを前提に, 構造物の部材レベルの局所損傷を検出可能な損傷推定手法を新たに提案する。本論文ではこれまでせん断型の質点系モデルに対して提案されてきた構造物を仮想的な部分構造に分割しその各々に対して損傷検出を行う手法^{14, 15)}を3次元に拡張し, フレーム構造物の部材(梁柱)レベルの損傷を検出する手法を構築する。そして, S造5階建て建物をモデル化した3次元フレームモデルについて, 一部の部材断面を欠損させることによる擬似的な損傷を仮定した上で地震応答解析を行い, そのデータに対して本手法を適用することで手法の有効性を検証する。

2. 損傷検出手法

2.1 損傷検出の手順

図1に提案する損傷検出手法の概要を示すとともに, 以下にそれを手順1~4に分けて述べる。

本稿は2013年度日本建築学会大会(北海道)にて発表した内容に, 新たな結果と考察を加えて再構成したものである。

¹⁾ 清水建設株式会社 主任研究員
(〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

²⁾ 清水建設株式会社 主任研究員・博士(工学)

³⁾ 慶應義塾大学 教授・Ph. D.

¹⁾ Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation

²⁾ Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

³⁾ Prof., Keio Univ., Ph. D.

【手順1】地震前後の構造物の振動計測

予め対象とする構造物に振動センサを設置し、構造物に損傷が生じた、もしくは損傷が生じたと疑われる地震の前後において、構造物の振動を計測する。具体的には大地震の前後の中小地震や、大地震の主要動の前後の揺れなどが想定される。振動センサは、MEMS 技術等を用いた小型・安価なセンサの使用を前提に、建物の構造体フレームの全ての節点(梁柱接合部)に設置し、各センサ間で時刻同期を取った計測ができるものと仮定する。また各センサでは従来の並進3軸方向(x, y, z)の加速度に加えて、回転3軸方向(θ_x , θ_y , θ_z)の角速度も計測できるものとする。これは、最近の MEMS 型の振動センサに見られる、並進方向加速度に加え回転角速度(ジャイロ)成分も検出可能なものの適用を想定しているためである。

【手順2】構造物の部分構造への分割と動特性の同定

構造物内の一つの節点を中心とし、そこに直接接続された梁柱等の構造フレーム部材を仮想的な部分構造として構造物全体系から分割する。そしてその部分構造を入出力を持つシステムと見なし、中心位置のセンサで観測されたデータを出力 y 、梁柱の反対側端部のセンサを入力 u として、その入出力関係を同定する。これは各部材が直角に接続された一般的なフレーム構造物の場合、最大6センサ×6軸 = 36 入力、1センサ×6軸 = 6 出力の多入力多出力のシステム同定問題として取り扱うことができる。今回は出力については各方向別に取り扱い、次式に示す多入力1出力の ARX モデルとして同定した。ここで n_k は入力数を、 ${}_k u$ は k 番目の入力を示す。

$$y(t) = -\sum_{j=1}^{n_a} a_j y(t-j) + \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{n_b} {}_k b_{j,k} u(t-j) + e(t) \quad (1)$$

【手順3】地震前後のシステム比較による部分構造内の損傷検出

大地震により部分構造を構成するフレーム部材が損傷し、剛性変化が生じた場合、それに対応して部分構造の動特性が変化する。従って、大地震の前と後のデータを用いて、その特性変化を検出できれば部分構造内部の損傷を検出することができる。特性変化の検出方法としては、大地震前後のデータから同定したシステムを構成するモデル係数の比較、モデル係数から求めた固有振動数等の動特性の比較、そして、地震前のデータから同定したシステムに地震前後のデータを入力した際の残差の比較などが考えられる。

これらの中から今回の検討では地震前後の残差比較により損傷検出を行うこととした。これは損傷前の構造物の観測データにより同定されたモデルは、損傷後の構造物で新たに得られた観測データを再現できないという前提に基づく手法¹⁶⁾であり、モデルの同定が地震前の1回で済むことが特徴である。その手順を図2に示す。まず事前(地震前の無損傷時)に部分構造モデルを同定しておく。次に、実際の観測出力 y と、同定済みのモデルに観測データを入力したシミュレーション出力 $\hat{y}$ の差(残差) ε を、次式のように計算する。なお、シミュレーションに用いる観測データは入力 u のみとし、出力 y はシミュレーション結果の $\hat{y}$ を再帰的に用いる。

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (2)$$

$$= y(t) - \left(-\sum_{j=1}^{n_a} a_j \hat{y}(t-j) + \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{n_b} {}_k b_{j,k} u(t-j) \right) \quad (3)$$

残差の計算は地震前後のデータ(例えば大地震の主要動前後の区間)に対して行い、結果をそれぞれ ε_b 、 ε_d として、部分構造 i に対する損傷指標 D_i を次式のように定義する。ただし y_b 、 y_d は地震前

後の観測出力、そして、 $\|x\|$ はベクトル x のノルムを示す。

$$D_i = \frac{\|\varepsilon_d\|}{\|y_d\|} / \frac{\|\varepsilon_b\|}{\|y_b\|} \quad (4)$$

部分構造が地震前後で変化しなければ、残差 ε_b 、 ε_d は概ね同じ大きさとなるが、損傷を受けていればモデルが変化するため、地震後の残差は地震前の残差よりも大きく、損傷指標 D_i も大となる。なお、残差 ε を出力 y で除しているのは地震前後のデータの振幅が残差に与える影響を、また地震後の残差 ε_d を地震前の残差 ε_b で除しているのは各部分構造におけるモデルの同定精度の違いが結果に与える影響を、それぞれ排除することを目的としている。

【手順4】部分構造の損傷検出を構造物内の対象部分に適用

手順1~3を構造物内の対象とする部分構造に対して繰り返し適用することで、各部分構造内部の損傷を(4)式の損傷指標から検出し、構造物内における損傷の位置は、損傷が検出された部分構造の位置から特定する。部分構造は複数のフレーム部材から構成されるため、単一の部分構造の位置のみからは損傷部材を特定することはできないが、隣接する複数の部分構造の損傷指標から損傷部材を特定することが可能である。

なお、実際の損傷判定に際しては、地震前後の残差 ε_b 、 ε_d の分散の大きさの違いを統計的に検定することなども考えられるが、本検討では損傷位置特定の可能性を示すことを主目的に、各部分構造について(4)式の損傷指標を算出することとした。

図1 損傷検出手法の概要

図2 部分構造内部の損傷検出フロー

2.2 損傷検出手法の特徴

本手法において、手順 1～3 は部分構造毎に完全に独立した処理であり、その各処理に必要なとなるデータは当該部分構造内センサのデータのみである。従って、構造物全体として考えた場合、その処理を複数の装置で分散的に同時並行で行うことが可能である。対象とする構造物が多くの節点を持つ大規模な構造物である場合、全てのセンサからのデータ量とその処理に要する計算量は膨大なものとなり、分散処理が可能な本手法の特徴は実用上有利といえる。さらに、本手法は必ずしも構造物全体に適用する必要はない。例えば、損傷が疑われる層の周辺のみ部分構造を対象に処理を行うことや、始めからセンサを構造物の一部分のみに設置し、その部分のみを損傷検出対象とすることも考えられる。

3. 応答解析モデルと設定した損傷

3.1 応答解析モデル

提案手法の検証を目的に、図 3 に示す実大 S 造 5 階建て震動台実験用の試験体に対して作成した応答解析モデルについて、無損傷(オリジナル)のモデルと 4 ケースの擬似的な損傷を設定したモデル、計 5 ケースのモデルに対する地震応答解析を行い、その結果を用いて本手法の有効性を確認した。応答解析モデルは東京工業大学 都市地震工学センター (CUEE) により実施された 2011 年度 E-defense ブラインド解析コンテスト¹⁷⁾の際に、清水建設(株)技術研究所で作成した 3 次元フレームモデルを利用した。今回の検討では全ての部材が線形領域に収まるように部材の降伏耐力を調整するとともに、免震部固定として応答解析を行った。

応答解析は 1kHz サンプリングで行い、構造物内のすべての梁柱接合部に 6 軸の振動センサを設置することを仮定し、9 節点(X1～X3 通り、Y1～Y3 通り)×6 階(1 階～R 階) = 全 54 節点における並進 3 軸方向の絶対加速度(x, y, z)と、回転 3 軸方向の角速度(θ_x , θ_y , θ_z)を出力した。

3.2 設定した部材損傷

表 1 に設定した部材損傷の一覧を示す。損傷ケース 1, 2 ではそれぞれ 3 階床、2 階床の梁 1 本の H 型鋼の上下フランジ幅をオリジナルの 200mm から 100mm とすることで部材損傷を模擬した。同様に損傷ケース 3 では 3 階の角型鋼管柱 1 本の板厚をオリジナルの 16mm から 12mm とした。さらに、損傷ケース 4 としてケース 1～3 の損傷をすべて同時に付与したモデルも設定した。

図 3 対象構造物

各損傷ケースの応答解析モデルの固有値解析により求めた固有振動数と、その無損傷時に対する低下率を表 1 に合わせて示す。今回の検討では、損傷ケース 1, 2, 4 において梁損傷を模擬する際、Y 通り方向の梁に損傷を与えたため、梁の強軸方向の曲げ剛性低下の影響が顕著に出ると考えられる y 方向の固有振動数のみを 3 次モードまで示した。固有振動数の低下率を見ると、損傷ケース 4 の 1 次モードにおける 1.74%が最大で、それ以外はすべて 1%以下である。この結果から、構造物の一部分の部材損傷のような比較的軽微な損傷が固有振動数といった建物全体系の動特性に及ぼす影響は僅かであり、そのみを用いた損傷検出は困難であることが予想される。

4. 損傷検出結果

4.1 手法の検証手順

まず無損傷の応答解析モデルの基礎部分に各方向独立したホワイトノイズを 3 方向入力した応答解析を行い、その結果のうち 20 秒間のデータを用いて、部分構造モデルの同定を行った。次に全 5 ケースのモデル(無損傷と損傷ケース 1～4)の基礎部分に El Centro 波(x 方向に EW 成分、y 方向に NS 成分、z 方向に UD 成分)を入力した応答解析を行った。そしてその結果と先に同定した部分構造モデルから (3) 式により残差を計算した。その際、応答解析結果の 5～15 秒を地震前の区間、20～30 秒を地震後の区間とし、地震前の残差 ε_b は無損傷のモデルのみを、地震後の残差 ε_d は無損傷も含めた各損傷ケースのモデルに対しても計算した。これは構造物の損傷は地震の主要動により生じると仮定し、その前後の区間を用いて損傷検出を行うことを想定したためである。そして無損傷の ε_b と各ケースの ε_d を (4) 式に代入し、全 5 ケースについての損傷指標を算出した。

表 1 設定した損傷と固有振動数

損傷ケース	設定した損傷		固有振動数 (無損傷モデルに対する低下率)		
	損傷位置	損傷程度	y 方向 1 次	y 方向 2 次	y 方向 3 次
無損傷	—	—	1.381 Hz (0.00 %)	3.858 Hz (0.00 %)	4.701 Hz (0.00 %)
損傷 ケース 1	3 階床 X3 通り - Y2Y3 間 G2 梁 (H-400×200×9×12)	上下フランジ幅 200mm → 100mm	1.368 Hz (0.91 %)	3.854 Hz (0.11 %)	4.701 Hz (0.00 %)
損傷 ケース 2	2 階床 X2 通り - Y1Y2 間 G2 梁 (H-400×200×9×12)	上下フランジ幅 200mm → 100mm	1.370 Hz (0.75 %)	3.837 Hz (0.54 %)	4.701 Hz (0.01 %)
損傷 ケース 3	3 階 X1 - Y3 通り C2 柱 (□-350×350×16×16)	柱板厚(全周) 16mm → 12mm	1.380 Hz (0.08 %)	3.856 Hz (0.04 %)	4.701 Hz (0.00 %)
損傷 ケース 4	損傷ケース 1～3 の損傷を同時に設定		1.357 Hz (1.74 %)	3.831 Hz (0.69 %)	4.701 Hz (0.01 %)

モデルの同定、残差計算には応答解析結果を 500Hz にダウンサンプリングしたものを用い、入力には並進加速度 x , y , z 方向と、回転角速度 θ_x , θ_y , θ_z 方向のすべてを利用した。一方、出力については損傷ケース 1, 2, 4 で損傷を付与した Y 通り方向の梁損傷の影響が顕著に現れた回転角速度 θ_x 方向と並進加速度 y 方向に対する結果のみを以降は示すこととする。モデル次数は、(3)式に示す残差計算に伴う再帰的な処理の際、対象とするデータサンプルによって値が急変しないような安定した計算を行うため、適切に設定する必要がある。今回は試行錯誤的にこれを決定し、出力が θ_x 方向の場合に 8 次、 y 方向の場合に 12 次とした。

図 4 に部分構造の一例として、3 階の X3-Y2 通りの節点を出力点とした部分構造の模式図を示す。この例では入力センサが 5 点あるため、5 センサ $\times$ 6 軸 = 30 入力、出力は出力センサにおける θ_x 方向、もしくは y 方向の 1 出力となる。図 5 にこの部分構造の出力センサ (3 階 X3-Y2 通り) における θ_x 方向の応答解析結果を示す。図中にはモデルの同定と残差計算に用いた区間も合わせて示した。なお、残差 ε_b の計算区間が必ずしも地震の主要動前となっていないが、今回の検討では無損傷と各損傷ケースで個別に応答解析を行っており、結果には影響を与えない。

対象とした 5 階建て建物では、上述のような部分構造を 9 節点 (X1 ~ X3 通り, Y1 ~ Y3 通り) $\times$ 5 階 (2 階 ~ R 階) = 計 45 個設定し、それぞれについて損傷指標を計算することになる。1 階が出力点となる部分構造については、1 階柱脚固定として応答解析をしているため、損傷検出の対象としていない。

4.2 部分構造の応答と残差

図 4 に示した部分構造の出力センサ (3 階 X3-Y2 通り) の θ_x 方向について、図 6 に残差 ε_d の計算区間における応答波形とパワースペクトルを示す。同様に図 7 には残差 ε_d の波形とパワースペクトルを全 5 ケースについて示す。

図 4 部分構造の例 (3 階 X3-Y2 通りを出力点とした部分構造)

図 5 応答解析結果とモデルの同定、残差計算に用いた区間 (3 階 X3-Y2 通り, θ_x 方向, 無損傷モデル)

まず、無損傷のケースの図 7(a) では残差波形が小さく、図 7(f) のパワースペクトルにおいても、いずれの帯域でも殆ど成分が見られないことがわかる。次に各損傷ケースの残差について考察する。部分構造を構成する部材の一部 (3 階床 X3 通り-Y2Y3 間の梁) に同じ損傷がある損傷ケース 1, 4 では、対応する図 7(b), (e) において図 6(a) の応答波形と類似した形状の残差波形が見られ、それらはスペクトルからもほぼ同じ大きさの残差であることが確認できる。一方、対象とする部分構造以外の場所にそれぞれ異なる損傷を持つ損傷ケース 2, 3 では、スペクトルから残差は見られるもののその大きさは相対的に小さく、形状もそれぞれ異なる。このことは、残差の大きさは当該部分構造に含まれない場所の損傷の影響も受けるが、その影響は部分構造内に損傷部材を含む場合に比べ小さいことを示している。図 7(a) ~ (e) の残差波形のグラフ中には各波形について (4) 式で算出した損傷指標 D_i を合わせて示した。部分構造内に損傷がある損傷ケース 1, 4 では他に比べその値が著しく大きいことがわかる。

図 6 応答波形 (残差 ε_d 計算区間) とパワースペクトル (3 階 X3-Y2 通り, θ_x 方向, 無損傷)

図 7 残差波形 ε_d とパワースペクトル (3 階 X3-Y2 通り, θ_x 方向)

図8 応答解析モデル(黒線部分が損傷を与えた部材)

図9 損傷指標 D_i (出力方向: θ_x)

図10 損傷指標 D_i (出力方向: y)

4.3 損傷検出結果と考察

建物全体の部分構造について(4)式で算出した損傷指標 D_i を、部分構造モデルの出力を θ_x 方向とした場合を図9に、 y 方向とした場合を図10に示す。これらの図は2階～R階の各階9個($X1 \sim X3$ 通

り、 $Y1 \sim Y3$ 通りの節点が出力点)の部分構造における損傷指標の大きさを灰色の濃淡で表現しており、色が濃いほど損傷指標が大きいことを示す。比較のため図8に対応する各損傷ケースについて損傷を付与した部材を黒色で着色した応答解析モデルも示した。

まず、出力を θx 方向とした図 9 について考察する。(a)無損傷ではすべての部分構造の損傷指標が小さいが、(b)損傷ケース 1 では損傷を付与した梁(3 階床 X3 通り-Y2Y3 間)を含む 3 階の部分構造 X3-Y2 と X3-Y3 の損傷指標が他と比べて著しく大きい。同様に、(c)損傷ケース 2 では損傷を付与した梁(2 階床 X2 通り-Y1Y2 間)を含む 2 階の部分構造 X2-Y1 と X2-Y2 の損傷指標が大きい。また、柱(3 階 X3-Y3 通り)に損傷を与えた(d)損傷ケース 3 においても、その柱を含む 3 階と 4 階の部分構造 X1-Y3 の損傷指標が大きい。これらの結果から提案する各部分構造の損傷指標を用いて各部分構造内の損傷を検出可能であること、さらに、損傷指標が大となった部分構造を両端部を持つ部材という判断基準により、梁や柱といった部材レベルで損傷位置を特定できる可能性があることがわかる。損傷ケース 1 ～3 の部材損傷を同時に付与した(e)損傷ケース 4 では、(b)から(d)に示す損傷指標を重ね合わせた形となっており、構造物内に複数個所の損傷が存在する場合でも、同様に部材レベルでそれらの位置を特定できる可能性があることもわかる。ただし、(b)損傷ケース 1 や、(d)損傷ケース 3 では、損傷部材を含まない損傷近傍の同じ階の部分構造においても損傷指標が大きくなっている例もある。特に損傷ケース 3 では損傷部材の周辺にほぼ同レベルの大きさの損傷指標が見られ、部材の特定までは難しい。これは柱損傷を与えた損傷ケース 3 は梁損傷の損傷ケース 1、2 と比較して、表 1 の固有振動数の低下率が明らかに小さいことが示すように、今回設定した損傷程度が相対的に小さかったことが一因であると考えられる。

次に、出力を y 方向とした図 10 について考察を加える。出力が θx 方向の場合と同様に、(a)無損傷ではすべての部分構造の損傷指標が小さいのに対し、各損傷ケースでは損傷部材周辺の損傷指標が大きくなっており、その周辺に損傷した部材があることを示唆している。しかし、(b)損傷ケース 1 と(d)損傷ケース 3 では、損傷位置を建物の高さ方向では特定できているが、平面内では特定できていない。(c)損傷ケース 2 では高さ方向に関しても損傷を与えた 2 階ではなく、3 階の損傷指標が大きくなる結果となった。これらの結果から、部分構造モデルの出力方向は損傷位置の推定精度に大きな影響を与え、特に平面内の推定精度に対してその影響が大きいことがわかる。

5. まとめ

本研究では MEMS 技術等を用いた小型・安価なセンサの使用を想定し、建物の構造体フレームの全ての節点(梁柱接合部)に、並進 3 軸方向の(x , y , z)加速度と、回転 3 軸方向の(θx , θy , θz)角速度を検出可能なセンサ設置を仮定して、構造物の部材レベルの局所損傷を検出する方法を提案した。この手法はこれまでせん断型の質点系モデルに対して提案されてきた仮想的な部分構造に対して損傷検出を行う手法を 3 次元に拡張したものであり、分散型の処理が可能であることから、複数装置での同時並行処理や、構造物内の特定の部分のみを損傷検出対象とすることが可能といった特徴を持つ。

S 造 5 階建て建物をモデル化した 3 次元フレームモデルについて、無損傷ケースと一部の部材断面を欠損させることによる擬似的な損傷 4 ケースを設定して地震応答解析を行い、その結果を用いて提案手法を検証した。その結果、本手法により構造物内の損傷の有無の検出と、梁や柱といった部材レベルで損傷位置を特定できる可能性があることが示された。本手法は構造物内に複数個所の損傷が存在

する場合に対しても適用可能であることも示された。

その一方で、損傷ケースによっては部材単位での正確な損傷位置特定が難しい場合があること、現段階では部分構造モデルの出力を任意の 1 方向としているが、この選択が特に平面内において損傷位置の推定結果に影響を及ぼすこと等の問題点が、今回の検討により明らかとなった。また、モデル次数の選択指針が明確でないことも課題として残った。さらに、本稿で未検討の課題としては、損傷程度の定量的な評価、観測ノイズの影響に対する検討などが挙げられる。加えて、提案手法の実用化のためには、実験、実測データでの検証も必要となる。これらについては今後の検討課題とし、稿を改めて報告することとした。

参考文献

- 1) 強震観測とモニタリング技術が災害時に果たすべき役割, 2012 年度日本建築学会大会(東海) 構造部門(振動) パネルディスカッション資料, 2012.9
- 2) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 454 号, pp.29~38, 1993.12
- 3) 斎藤知生: モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定, 日本建築学会構造系論文集, 第 508 号, pp.47~54, 1998.6
- 4) 中村充, 安井謙: 微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 517 号, pp.61~68, 1999.3
- 5) 吉元怜毅, 三田彰, 森田高市: 振動モードとセンサ特性を考慮した構造物の並列処理型損傷同定, 構造工学論文集, 第 48B 号, pp.487~492, 2002.3
- 6) 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, 第 560 号, pp.93~100, 2002.10
- 7) T. Saito, S. Mase, and K. Morita: A probabilistic approach to structural damage estimation, Structural Control and Health Monitoring, Vol.12, No.3-4, pp.283-299, 2005.7
- 8) 池田芳樹: モード情報との整合性を考慮したせん断振動型建物の層剛性の同定, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻 第 646 号, pp.2237~2243, 2009.12
- 9) 濱本卓司, 井上了太: 並列モデル同定を用いた多層建築物の部材損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻 第 655 号, pp.1661~1670, 2010.9
- 10) J.P. Lynch, K. Loh: A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring, The Shock and Vibration Digest, Vol.38, No.2, pp.91~128, 2006.5
- 11) 圓幸史朗, 池ヶ谷靖, 中村充, 柳瀬高仁: 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
- 12) 白石理人: ワイヤレスセンサネットワークによる分散型のモード特性同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.245~246, 2008.9
- 13) 長山智則, B.F. Spencer, Jr., 藤野陽三: スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発, 土木学会論文集 A, 第 65 巻 第 2 号, pp.523~535, 2009.6
- 14) Z. Xing, A. Mita: A substructure approach to local damage detection of shear structure, Structural Control and Health Monitoring, Vol.19, No.2, pp309~318, 2012.3
- 15) 白石理人, 三田彰: サブストラクチャ法による東北地方太平洋沖地震時の S 造 5 階建て建物の層剛性変化の検出, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.525~526, 2012.9
- 16) H. Sohn, C. Farrar: Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals, Smart Materials and Structures, Vol.10, pp446~451, 2001.6
- 17) 東京工業大学 都市地震工学センター(CUEE) ブラインド解析応募サイト, <http://www.cuee.titech.ac.jp/context/>

[2013 年 6 月 17 日原稿受理 2013 年 8 月 12 日採用決定]