

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04431

研究課題名(和文)重要災害拠点を対象とした非構造部材を含む建物の総合的な耐震余裕度評価法

研究課題名(英文)Assessment of seismic residual performance of important facilities including non-structural members

研究代表者

藤田 皓平(Fujita, Kohei)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40648713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地震等の災害時の防災拠点施設等の重要施設において、地震によって生じた被害状況をいち早く把握し、建物を安全に安心して使用するために、非構造部材を含む建物全体をモニタリングするシステムを構築した。天井や天井裏の設備配管システムは、目視で損傷状況を把握することが困難でありことから、水道やガスといった建物の設備機能に支障が生じる以前に、吊り配管や吊りボルトなどに物理的な損傷を把握する天井裏設備の定点画像を収集した。地震前後に取得した画像から画像解析により対象とする配管に生じた変形や損傷を検知することが可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非構造部材の損傷は、建物の事業継続を困難とする直接的な原因となることもあり、耐震性としての余裕度を定量的に評価する必要性が認識されつつある。建築分野における画像処理に関する既往研究は、構造部材や実験時のデータ取得方法の一つとして研究・活用がなされているが、非構造部材を対象とした画像解析に基づくモニタリングの事例は見られない。本研究では、今後も発生が懸念される地震等の災害に対して、構造安全性の評価に加えて、建物内の様々な非構造部材において生じる損傷やそれに伴う建物設備機能の障害を検知する可能性を見出したことに意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, to quickly assess the damage caused by earthquakes at important facilities such as disaster prevention centers in the event of earthquakes and other disasters, and to ensure the safe and secure use of buildings, a monitoring system for the entire building, including nonstructural components, was established. Since it is difficult to visually assess the damage to the piping systems above ceilings, we collected fixed-point images of non-structural members to detect physical damage for suspended pipes and bolts before they interfere with the functions of building facilities. By comparing the images before and after earthquake, it is possible to detect the deformation and damages to the suspended pipe.

研究分野：建築構造

キーワード：モニタリング システム同定 損傷同定 非構造部材 画像解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震(2011年)では、震源から十分に離れた都市圏の超高層ビルでも大きな揺れを観測し、建物の安全性や生じた被害の迅速な把握が課題となった。また、熊本地震(2016年)では、病院・医療施設で事業継続が困難となったことが報告されている。このような被害事例では、スプリンクラー等の設備配管の損傷に起因した水損や、天井の脱落などの非構造部材の損傷により、構造躯体の損傷は軽微であっても事業継続不能と判断されたものも含まれる。吊り配管など天井裏や間仕切り壁内部に設けられた非構造部材の一部は、目視による点検が容易ではなく、物理的な破損などの損傷が生じたとしても、実際に機能障害に至るまで被害を把握することができないことから、建物を継続的に利用する上で必要な建物機能性に重大な影響を及ぼすような損傷を早期に把握することは極めて重要である。

甚大な被災をもたらす災害において、ライフライン(電気・水道・ガス等)の喪失による建物機能が著しく低下した場合であっても、建物を安全に安心して利用を継続することを目的として、地震の被災を免れないものとした減災対策や想定外の災害に対する緊急時の対策として事業継続計画(BCP: Business Continuity Plan)の必要性が認識されており、2017年4月から災害拠点病院へのBCP策定が義務化されたことから、被災後の重要復旧拠点や医療機関においては、BCPの策定が推し進められている。

災害が発生する以前の事前対策として建物機能の低下を抑制することや、事後対応として建物機能を早期に復旧するための枠組を構築することは、BCPの観点から事業継続性を高める上でも極めて重要である。建物全体の総合的なモニタリング技術として、従来からの加速度センサーに加えて、ネットワークを介した種々のセンサー情報を集約し、建築系ビッグデータを創出が望まれている。このような種々のセンサー情報に基づく建築系情報としてのビッグデータを有効に利用することで、構造安全性の迅速な評価や早期の機能復元性を高めた災害対応の枠組の構築が可能となる。さらに、今後発生する地震に対して建物の被害を軽減し、建物の社会的・都市的機能の復旧性(=レジリエンス)を高めることは、社会的に要請されている喫緊の課題である。

構造ヘルスマニタリング(SHM: Structural Health Monitoring)とは、建物の地震時応答や常時微動観測データに基づいて固有振動数や固有モードの変化を捉え、平常運用時の点検や地震直後の即時避難判断に活用されるシステムである。しかしながら、集約型センシングとして少数のセンサーによるSHMでは、主として建物全体系としてのモーダルパラメータ同定を対象としており、構造部材の損傷を特定することは困難である。さらに、非構造部材の損傷は、建物の事業継続を困難とする直接的な原因となることもあり、耐震性としての余裕度を定量的に評価する必要性が認識されつつある。建築分野における画像処理に関する既往研究は、構造部材や実験時のデータ取得方法の一つとして研究・活用がなされているが、非構造部材を対象とした画像解析に基づくモニタリングの事例は見られない。

2. 研究の目的

本研究では、災害時の防災拠点施設における機能復旧性の向上に資するために、非構造部材を含む建物全体の耐震性余裕度評価に資するモニタリングシステムの構築が必要であると考え、モニタリングデータの選別と耐震性余裕度評価として観測データから得られる特徴量を定量化することを目指す(図1)。モニタリングシステムとして、天井裏の設備配管を対象とした画像計測を可能とするシステムを構築する。本システムでは、地震前後に取得した画像から画像解析により対象とする配管に生じた変形や損傷を検知することを目指す(図2)。設備配管は一般的に棒状の長い形状を有し、平面的に画像で捉えることは困難であるため、収集された画像データから画像の深度を考慮したうえで配管の地震時残留変形の推定を行う手法を提案する。

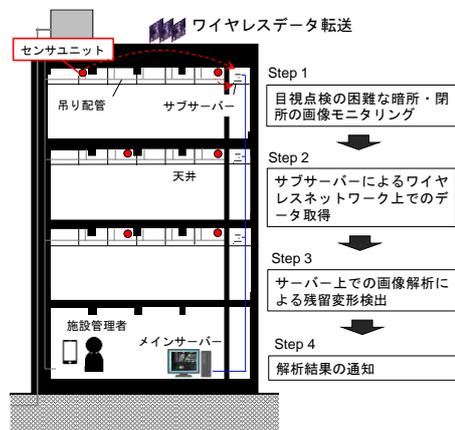


図1 モニタリングシステム

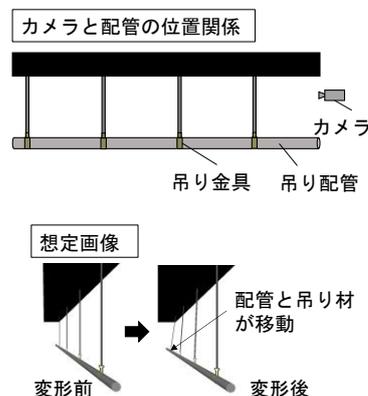


図2 画像による設備配管のモニタリング

4. 研究成果

本研究で構築したモニタリングシステムを用いて、実際の天井裏設備配管等を定点観測した際に得られる画像を収集すること、ならびに画像解析手法の妥当性を検証することを目的として、静的加力試験および動的加力試験を実施した。得られた画像データおよび検証結果を成果としてまとめる。静的加力試験では、吊り配管の軸方向に一致する方向に画像センサーを設置し、吊り配管に強制変形を与えるために外力を作用させ、変形時の画像データを収集した。図6は実際に得られた画像データの一例を示している。図6の画像では、実験室内を消灯し、暗所状態を再現している。暗所であっても赤外線ライト付きの画像センサーによって、配管や吊り金具が明瞭に捉えられていることが確認できる。さらに、手前の吊り金具については、金具の形状が把握でき、ピクセル長さと実長さの対応を用いることで深度推定が可能である。

試験では、配管に一定の変位を作用させ、それぞれの加力時と载荷前の状態の画像データが得られている。同試験では、配管の各点の変形量をレーザー変位計により測定しており、画像解析による変形量推定結果と比較する。図7では、試験体の平面図を示す。同図においては、加力位置と計測位置を示している。レーザー変位計による計測位置Fは、画像解析で用いる特徴点（吊りボルト）の近傍とした。载荷試験は、計測位置での変形が20, 40, 60, 80 mm となるように変位を漸増させた（試験ケースをNo.1,2,3,4とする）。図8では、それぞれの試験に対して画像解析による変形推定量と、レーザー変位計での測定変位、及びモデル解析（吊り配管を曲げ棒モデルとしてモデル化）による変位の比較を示している。提案画像解析手法による方法は、実測値とモデルによる解析の結果と概ね対応しており、提案画像解析手法による深度推定により各特徴点の水平変位量を評価することが可能であることを示した。

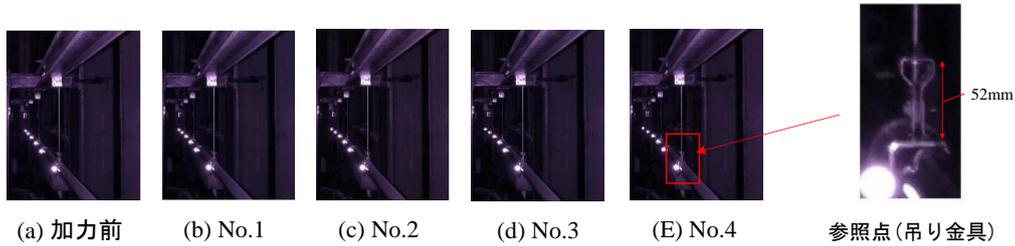


図6 吊り配管の変形時の画像データ

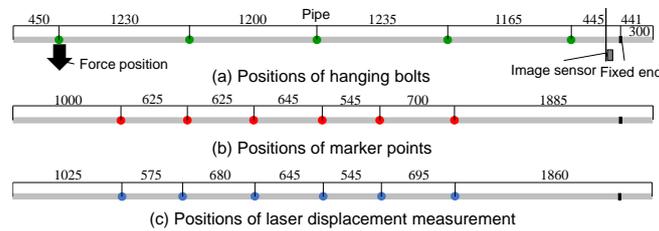


図7 吊り配管の吊りボルト位置と計測点関係

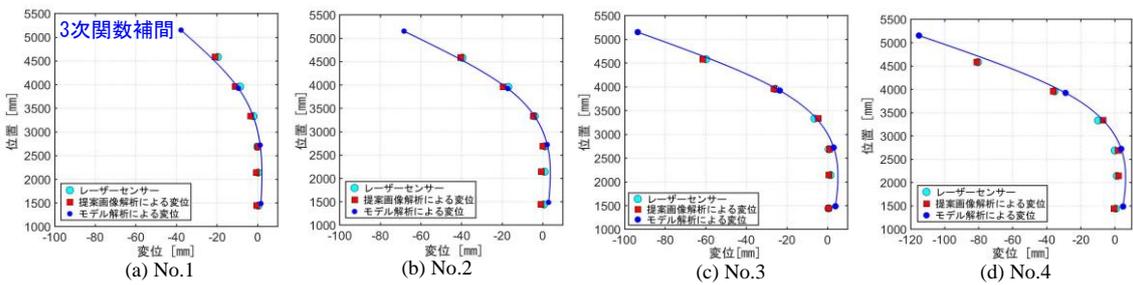


図8 画像解析による吊り配管の変形推定

動的振動試験については、防災科学技術研究所 E-ディフェンスにて、高機能医療施設を有する病院建物を再現した実大鋼構造架構に対する振動台加振実験（2020年12月）に実験メンバーとして参画し、本研究課題で構築した画像モニタリングシステム（画像センサユニット計20台）を設置し、地震時の画像データ収集の運用を実証した。試験体は、耐震建物（4階建）と免震建物（3階建）から構成された2棟であり、両棟は2階部でエキスパンションジョイントにより接続されている。耐震棟の3階と4階では、病院施設を考慮した天井と設備・医療配管が再現された。耐震建物の天井裏には、モニタリング対象となる設備配管（給水管やスプリンクラー管など）が現行の耐震基準に加えて、旧基準で設計されたものも比較として設置されている。これは、耐震支持の有無などの固定度に差異を設け、実際の建物においても耐震基準の異なる吊り配管等においてどのような違いがみられるかを比較検討するためである。設計基準の異なる配管が同じ径・材質の配管が対称的に配置されてため、各仕様の配管に対して、画像センサユニットを分散して設置した（4Fのセンサユニットの配置位置は図5に示している）。

本センサユニットに搭載した加速度センサーでは、加速度を常時モニタリングしている。加速度値が指定した閾値を超えた際に、映像及び画像データの収集を開始する。本実験では、トリガーとする閾値を0.3G（3 m/s²）として設定し、トリガー作動前20秒間のデータをオンボードメモリーに常に記録させることで、揺れの小さい範囲の加速度データについても出力することを可能にした。また、映像データに関しては、加振中の対象物の動きを撮影する（約90秒間）。得られた映像データを用いて、吊り配管の最大変位を推定する。ただし、実験段階で、トリガー作動前の映像データのバッファを残すことができなかったため、ある程度揺れが生じた時点からの映像データを収集した。

図9では、本試験により収集した画像データの一部を示す。画像内で特に白く点灯しているのは赤外線照射するライトである。図10では、加振時に収集した映像データに対して深度推定に基づき吊り配管に生じた最大変形を推定する手順を示している。同手法により吊り配管の固定部と中央部での振幅の違いを画像解析から把握することが可能であることを確認した。一方、揺れの前後により吊り配管に生じた物理的な損傷の検知を目的として、加振前後の画像データに対して差分解析を行った。差分解析では、変化がある画素位置を特定することが可能であり、図11のように吊りボルトの位置が変化したことを画像解析に基づき検知することが可能であることを明らかにした。

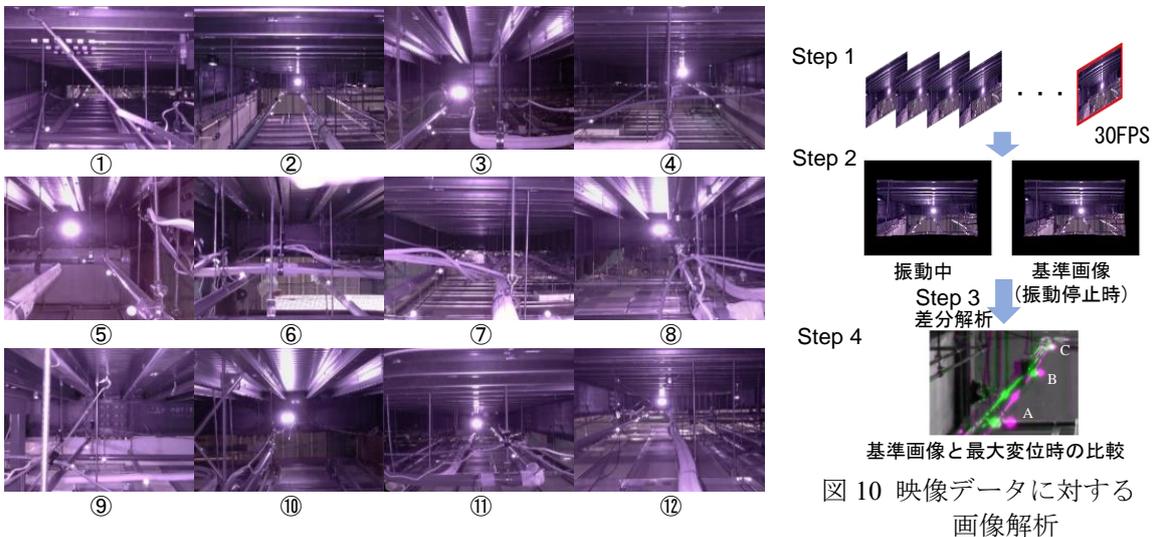


図9 振動試験において収集した画像データ

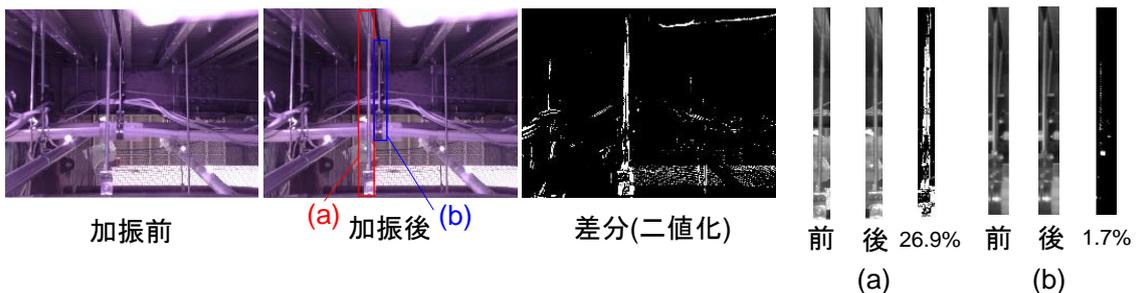


図11 差分解析による残留変形の推定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 榊原由理江, 河又洋介, 藤田皓平, 倉田昌宏	4. 巻 第87巻
2. 論文標題 目視点検が困難な吊り配管等を対象とした画像モニタリングシステム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 星 祐翔, 藤田皓平	4. 巻 67
2. 論文標題 限定された層位置での地震時応答観測を用いたモデル同定に基づく免震建物の非観測層における加速度分布及び免震層の復元力の推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 393, 401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 近藤克哉, 藤田皓平	4. 巻 66B
2. 論文標題 限定層の加速度記録に基づく弾塑性曲げせん断型モデルを用いたシステム同定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 423, 432
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 藤田皓平	4. 巻 59
2. 論文標題 層剛性低下量に関する加法性と機械学習を併用した骨組構造に対する損傷同定法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部報告集	6. 最初と最後の頁 529, 532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujita Kohei, Takewaki Izuru	4. 巻 4
2. 論文標題 Stiffness Identification of High-Rise Buildings Based on Statistical Model-Updating Approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbuil.2018.00009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SUZUKI Nobuya, NABESHIMA Kunihiko, FUJITA Kohei, TAKEWAKI Izuru	4. 巻 83
2. 論文標題 STRUCTURAL DAMAGE LOCALIZATION METHOD USING ADDITIVITY ON STORY STIFFNESS DETERIORATION DUE TO DAMAGE OF STRUCTURAL ELEMENTS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1607-1616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.83.1607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鈴木遥也, 藤田皓平	4. 巻 65
2. 論文標題 機械学習による損傷部材情報の予測と層剛性低下量に関する加法性を併用した損傷同定法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 239-246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 星 祐翔
2. 発表標題 少数のセンサーを用いた伝達関数のフィッティングに基づくシステム同定法
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 藤田皓平
2. 発表標題 地震時床応答に対する設備配管の信頼性理論に基づく損傷確率評価法
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 榊原由理江
2. 発表標題 天井裏の設備配管を対象とした定点モニタリングに基づく地震時残留変形推定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 藤田皓平
2. 発表標題 地震時床応答に対する設備配管の信頼性理論に基づく損傷確率評価法
3. 学会等名 近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 榊原由理江
2. 発表標題 天井裏の設備配管を対象とした定点モニタリングに基づく地震時残留変形推定
3. 学会等名 近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Kondo Katsuya
2. 発表標題 ESTIMATION OF SHEAR DEFORMATIONS IN SEISMIC RESPONSE FOR HIGH-RISE BUILDINGS USING SHEAR-BENDING MODEL
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Kohei Fujita
2. 発表標題 FRAGILITY EVALUATION OF PLUMBING SYSTEM SUBJECTED TO SEISMIC LOADING BASED ON FLOOR ACCELERATION RECORDS
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 藤田 皓平
2. 発表標題 層剛性低下量に関する加法性と機械学習を併用した骨組構造に対する損傷同定法
3. 学会等名 近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹脇 出 (Takewaki Izuru) (20155055)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------