

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 10 月 18 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06666

研究課題名(和文) 外装材挙動を利用する損傷モニタリングのためのMEMS技術開発と振動台実験

研究課題名(英文) Experimental study for MEMS sensor monitoring system to assess seismic response of Non-structural element of building

研究代表者

梶原 浩一 (Kajiwara, Koichi)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・総括主任研究員

研究者番号：10450256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：将来の大規模地震が発生した際に、普段の生活と経済活動を維持・継続するためには、インフラ構造物の耐震性能の向上に加えて、地震を受けたインフラ建物が速やかに使用できるか否かを判別する必要がある。このために構造ヘルスマニタリングの研究が盛んに進められている。ここでは、建物に具備される外装材の応答をMEMS(micro-electro-mechanical systems)センサで捉え、建物全体の損傷等を推定するモニタリング手法の有効性を検証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義としては、これまで、軸方向の振動を捉えるMEMSセンサの活用が一般的であったが、部材の回転を捉えるMEMSのジャイロセンサに着目し、これを用いた建物の揺れのセンシングにより建物の層間変形を推定する手法の検討を進めたところにある。また、社会的な意義では、建物に具備されるカーテンウォールなどの外装材に組み込むことで、社会でのモニタリングシステムの活用を一般化するための取組にある。

研究成果の概要(英文)：In order to maintain and continue normal living and economic activities in our society, preparing for the future large-scale earthquake event, it is necessary to judge the performance of the infrastructures after the earthquake as a matter of course to improve the earthquake resistance before the earthquake. For this reason, many investigations have been conducted on structural health monitoring.

Here, we have researched a system that estimates the structural characteristics of a building after the earthquake by capturing the response of non-structural element installed in the building with MEMS(micro-electro-mechanical systems) sensor. In this research, we have finished the basic investigation for practical use.

研究分野：振動実験、振動解析、耐震工学

キーワード：MEMSセンサ 構造ヘルスマニタリング 振動台実験 外装材

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

南海トラフ地震や都市直下地震では、膨大な数の建物が極めて強く揺さぶられる。その後の被害程度、継続使用性の評価は、速やかな社会回復に向けての必須の課題である。近年、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度センサが、従来から用いられているサーボ型加速度センサに比べて、廉価で軽量、コンパクトであることから、様々な分野での利用が進んでおり、実建物での地震応答計測への適用・計画も増えている。大地震後の社会の回復に資する建物損傷モニタリングのさらなる進化、社会での適用展開においては、新たな切り口の設置法、利用法の工夫も必要である。

2. 研究の目的

本研究では、MEMS センサが建物の構造ヘルスマニタリング(SHM)に活用され始めていることを背景とし、更なる社会への普及を見据えて、建築に具備される外装材への MEMS センサの組込とその応答挙動の解析手法を研究の目的として、建物の部分骨組の振動台実験にて、MEMS センサを取り付け、建物損傷の発現に関わる層間変形の推定手法について検討する。

3. 研究の方法

研究の目的を、建築に具備される外装材への MEMS センサの組込とその応答挙動として層間変形の解析手法を研究としたことから、まずは、外装材について、その設置位置が図面上で明確なカーテンウォールを対象とした。これにより、センサの設置等の手間が省け、センサの位置も設計図面上で明確になると考えたからである。これに組み込むアイデアを共同創出した防災科研、大学、サッシメーカーとの特許共同出願を前提とした守秘義務協定を結んで研究を進めることとした。組み込みの詳細なディテールは特許にも関わるためここでは明確に紹介しない。この組み込んだ MEMS センサで層間変形を推定するために、一般には水平方向の加速度応答を捉えるセンサを用いるところであるが、設置点の回転速度を捉える Gyro 型の MEMS センサに着目し、それにより計測されるデータの解析手法を検討した。この共創により、本研究に係る実験は、防災科研の大型耐震実験施設を利用した加力による柱・梁部材モデルによる応答評価実験^{1)~4)}に加えて、不二サッシ株式会社、文化シャッター株式会社と大学が海外で行うカーテンウォールを具備したフレームモデルの振動台実験^{5),6)}での MEMS センサの設置計測、本報告書の4. 研究成果で示す不二サッシ株式会社のカーテンウォール載荷装置での実験も実施した。以下が、研究方法に係る、当初の全体計画であるが、上記の実験での計測も加えられ、概ね計画通りに推進した。

平成 29 年度(2017 年度)は、骨組全体からなる構造システム(建物)の損傷過程、破壊特性を部分的に切り出し表現するサブストラクチャ実験について事前検討を進めると共に、平成 30 年度に防災科研の大型耐震実験施設を利用することを前提とした、試験体設計と実験計画を立案する。ここでは、試験体設計のほか、振動台を用いた加振方法と治具の設計、事前解析に加え、MEMS センサを用いたデータの評価方法と導入計画、計測計画の立案も実施する。

平成 30 年度(2018 年度)は、平成 29 年度に計画した内容に基づく試験体製作と実験を実施する。年度始めより、試験体の仕様書の作成・発注、試験体製作の管理、運搬、設置、加振実験、計測、データ格納、試験体撤去・廃棄について、実験計画に沿って一連の作業を進める。また、防災科研内の手続きとして、振動台の利用申し込み、実験計画書と安全計画書の作成・提示、運用委員会への説明を実施する。実験では、部分構造に効果的に変形を与える実験手法を検討・適用する。

平成 31 年度(2019 年度)は、平成 30 年度に実施した実験のデータ分析と評価を、実験過程での損傷状況と照らして実施し、防災科研の研究報告書として取りまとめる。更に、国際誌をはじめとする各学会関連論文の執筆を進める。その際、実験手法を利用しやすく記載・開示することによって、他の研究者が効率的に参照、転用できるように配慮し、耐震工学研究を中心に、実験による各方面の施設の活性化について貢献することを意識する。報告書の内容では、骨組損傷と内外装の損傷の視点から、MEMS センサを用いた損傷のモニタリング技術について、本研究での成果を示す。

4. 研究成果

4. 1. はじめに

ここでは分担している名古屋大学らと取りまとめた成果を示す。カーテンウォールの耐震性能は基本的に各社が製品試験を実施して独自に得た技術によって向上してきたため、実験研究資料の閲覧は容易ではなく、地震時のカーテンウォールの挙動を表現する解析モデルの提案は見当たらない。こうした中、不二サッシ株式会社と文化シャッター株式会社の協力のもと、現場施工方式のアルミカーテンウォールを取り付けた振動台実験から、アルミフレームの詳細な変形分布を得るとともに、その挙動を表現する解析モデルを提案した⁷⁾。

ここでは、カーテンウォールが躯体の変形に十分に追従することに着目し、建物の層間変形角モニタリングシステムの構築を目指している。上記を意図して実大のカーテンウォール実験を実施し、部材の詳細な変形分布を把握するとともに、数値解析によって実験で得られた挙動の表現を試みた。

4. 2. 実験概要

4. 2. 1 試験体概要

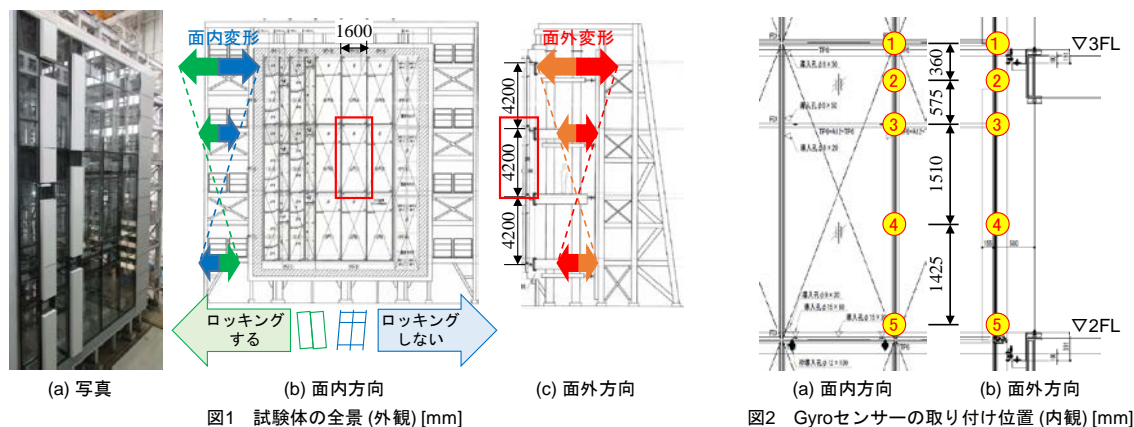


図1 試験体の全景(外観)[mm]

図2 Gyroセンサーの取り付け位置(内観)[mm]

試験体の全景を図 1 に示す。階高 4200 mm の建物の 3 層分を想定して製作されており、ガラス張りのアルミカーテンウォールと押出成形セメント版の部分が合わさって構成されている。本研究で注目するアルミカーテンウォールはスパン 1600 mm で、無目で仕切られた上部には幅 1540 mm、高さ 1120 mm、厚さ 6 mm の単板ガラスが使用され、下部には幅 1550 mm、高さ 2995 mm、厚さ 6

mm のガラスの間に 12 mm の空気層を設けた複層ガラスが使用されている。ガラスとサッシの間は、現場打ちのシーリング材(2成分形シリコーン)および工場付けのガラススペーサーによって連結されている。

GSAT-A-900 性能	
定格容量	±15.71 rad/s
非直線性	±0.5%RO以内
ヒステリシス	±0.5%RO以内
定格出力	約2.0 V



図3 Gyroセンサーの仕様⁵⁾と設置状況(Gyroセンサー④)

4. 2. 2 载荷計画と計測概要

実験は不二サッシ株式会社が開発する F 型層間変位試験装置を用いて行い、面内・面外方向に層間変位を入力した。図 1 に示すように、面内・面外方向共通して 2 層目を不動床として層間変位を生じさせた。面内方向には層間変形角で 1/300 rad から 1/80 rad まで、面外方向には 1/300 rad から 1/100 rad までの変位を入力した。変位は静的および動的に入力し、動的载荷では超高層建物の固有周期を想定して周期 5 秒の正弦波を入力した。

続いて実験の計測計画についてまとめる。計測は図 1 中赤枠で示した 2 層の中央ユニットに集中させ、このユニットについて以降の検討を行う。本実験では、歪ゲージと変位計の他に Gyro センサ（角速度計）を使用している。Gyro センサは MEMS センサの一種であり、比較的安価で高性能であることから、近年建物のモニタリングへの利用が検討されている。建物の層間変形角モニタリングシステムの開発を意図して、図 2 に示すように方立に Gyro センサを取り付け、各位置の局所回転角と層間変形角の対応関係を整理した。本実験で使用した Gyro センサは共和電業製の GSAT-A-900 であり、センサの仕様⁸⁾と設置状況を図 3 に示す。

4. 3. 実験結果

カーテンウォールの層間変形追従性能

カーテンウォールの部材角と躯体の層間変形角を比較する。躯体の層間変形角は躯体の 3 層床と 2 層床の相対変位を階高 4200 mm で除して算出し、カーテンウォールの部材角はユニットの上枠と下枠の水平変位の差分を階高で除して算出した。図 4 に面内・面外の各方向について両者を重ねて示す。ここで、変形角が正の向きはロッキングが抑制される方向、負の向きはロッキングする方向である。また図 4 で変形がピークに至った時点の層間変形角に対するカーテンウォールの部材角の比率を算出し表 1 に示す。相対的に面内方向の正曲げで比率が小さくなっているが、これはロッキングが制限されたことでカーテンウォールフレームに力が加わり、その際に上下ユニット境界でずれが生じたためである。一方で、他の場合では層間変形角と部材角は精度よく一致している。

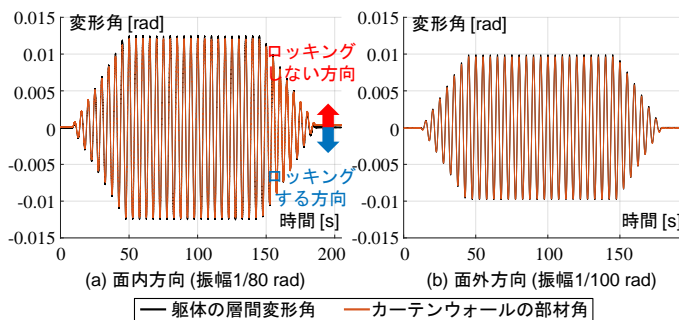


図4 躯体の層間変形角とカーテンウォールの部材角

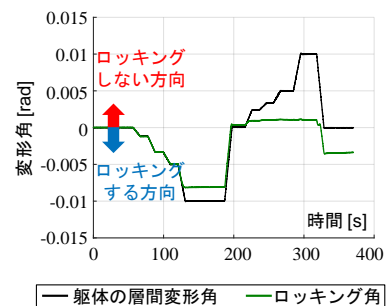


図5 カーテンウォールのロッキング角

表 1 躯体の層間変形角に対するカーテンウォールの部材角の比率

部材角/層間変形角	面内方向		面外方向	
	正 (ロッキングしない)	負 (ロッキングする)	正	負
	0.92	1.03	0.97	1.00

4. 4. まとめ

本研究では、超高層建物に用いられるユニット式アルミカーテンウォールを対象に、面内および面外方向の層間変位追従試験を実施し、MEMS の Gyro センサを用いて方立の詳細な変形分布を計測した。また、実験で得られたカーテンウォールの挙動を表現する解析モデルの構築に取り組んだ。以下に得られた知見を示す。

(1) 層間変位追従性能について、面内・面外方向それぞれで層間変形角 1/80 rad, 1/100 rad まで試験体に損傷が生じないことを確認した。面内変形について無目に細工を施しロッキング挙動を抑制した面内方向の場合、躯体の層間変形角と方立の部材角に 8%程度の差が生じたが、その他の方向の変形については両者の差は 3%以内であった。

(2) 面内方向の 1 ユニットについて、シーリング材による拘束やガラスのロッキングといったカーテンウォールの各要素を取り出し、バネと線材によって数値解析モデルを構築した。

(3) 実験で得られた変位を静的に入力する正負交番繰り返し解析を実行した結果、方立の変形分布について、解析結果は実験結果を 1 割程度の誤差の範囲で表現することができた。一方で、ガラスとサッシの相対変位については解析結果が実験結果を上回る傾向が見られた。数値解析モデルの精度の高めるためには、ここでは考慮していないガラススペーサーによって生じる抵抗力を適切に評価する必要がある。

以上より、本研究により、外装材としてカーテンウォールを対象に Gyro 型の MEMS センサを内在させる方法で応答挙動をセンシングし、応答による建物の層間変形を推定できる見通しを得た。今後、実構造物での実証実験を踏まえ、社会で活用いただけるように研究を深化させたい。

<引用文献>

- 1). 青柳克弘, 岡崎太一郎, 長江拓也, 松宮智央, 高橋典之, 丸山一平, 梶原浩一, 中澤博志, 御子柴正 (2018) 部分架構の動的載荷実験と同時損傷評価手法の開発 第 4 報 現場式柱梁接合部の繰り返し載荷性能, 日本建築学会北海道支部研究報告集, Vol.91, pp.183-186
- 2). 野々山優輔, 鳥谷尾駿佑, 長江拓也, 岡崎太一郎, 松宮智央, 高橋典之, 丸山一平, 中澤博志, 御子柴正, 梶原浩一 (2018) 部分架構の動的載荷実験と同時損傷評価手法の開発 第 5 報 床スラブの影響を含めた分析と数値解析, 日本建築学会北海道支部研究報告集, Vol.91, pp.187-190
- 3). 青柳克弘, 岡崎太一郎, 長江拓也, 松宮智央, 高橋典之, 中澤博志, 御子柴正, 梶原浩一 (2019) 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その 8 床スラブの合成効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.837-838
- 4). 野々山優輔, 長江拓也, 岡崎太一郎, 松宮智央, 高橋典之, 中澤博志, 御子柴正, 梶原浩一 (2019) 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その 9 合成梁の変形性能と剛性劣化挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.839
- 5). 陳威中, 鳥谷尾駿佑, 長江拓也, 梶原浩一, 太田匡信, 神崎喜和, 鍾育霖 (2019) カーテンウォールの地震応答を評価する数値解析と Gyro センサモニタリングシステムのための実験研究 その 1 台湾 NCREE 振動台実験施設を用いた実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.679
- 6). 太田匡信, 陳威中, 鳥谷尾駿佑, 長江拓也, 梶原浩一, 神崎喜和, 鍾育霖 (2019) カーテンウォールの地震応答を評価する数値解析と Gyro センサモニタリングシステムのための実験研究 その 2 分析結果と数値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.679
- 7) Toyao S., Nagae T., Chen J., Kajiwara K., Kanzaki Y, Chung Y : Assessment of a curtain wall system used in high-rise buildings and development of a monitoring method, International Conference in Commemoration of 20th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake Taipei, September 15-19, 2019
- 8) 株式会社共和電業 : 3 軸ジャイロセンサ GSAT-A-900(-J) 取扱説明書

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Chung Yu-Lin, Kuo Kuan-Ting, Nagae Takuya, Kajiwara Koichi	4. 巻 17巻3号
2. 論文標題 Seismic responses of a free-standing two-story steel moment frame equipped with a cast iron-mortar sliding base	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EARTHQUAKES AND STRUCTURES ,	6. 最初と最後の頁 245-256
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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 青柳克弘，岡崎太郎，長江拓也，松宮智央，高橋典之，丸山一平，梶原浩一，中澤博志，御子柴正
2. 発表標題 部分架構の動的載荷実験と同時損傷評価手法の開発 第4 報 現場式柱梁接合部の繰返し載荷性能
3. 学会等名 日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol.91，pp.183-186
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野々山優輔，鳥谷尾駿佑，長江拓也，岡崎太郎，松宮智央，高橋典之，丸山一平，中澤博志，御子柴正，梶原浩一
2. 発表標題 部分架構の動的載荷実験と同時損傷評価手法の開発 第5 報 床スラブの影響を含めた分析と数値解析
3. 学会等名 日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol.91，pp.187-190
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青柳克弘，岡崎太郎，長江拓也，松宮智央，高橋典之，中澤博志，御子柴正，梶原浩一
2. 発表標題 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その8 床スラブの合成効果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，pp.837-838
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野々山優輔，長江拓也，岡崎太一郎，松宮智央，高橋典之，中澤博志，御子柴正，梶原浩一
2. 発表標題 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その9 合成梁の変形性能と剛性劣化挙動
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，pp.839
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳威中，鳥谷尾駿佑，長江拓也，梶原浩一，太田匡信，神崎喜和，鍾育霖
2. 発表標題 カーテンウォールの地震応答を評価する数値解析とGyroセンサモニタリングシステムのための実験研究 その1台湾NCREE 振動台実験施設を用いた実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.679
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田匡信，陳威中，鳥谷尾駿佑，長江拓也，梶原浩一，神崎喜和，鍾育霖
2. 発表標題 カーテンウォールの地震応答を評価する数値解析とGyroセンサモニタリングシステムのための実験研究 その2分析結果と数値解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.679
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyao S., Nagae T., Chen J., Kajiwara K., Kanzaki Y, Chung Y
2. 発表標題 Assessment of a curtain wall system used in high-rise buildings and development of a monitoring method
3. 学会等名 International Conference in Commemoration of 20th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake Taipei, September 15-19, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 建築物の履歴情報記憶システム	発明者 神崎喜和、太田匡 信、梶原浩一、長江 拓也	権利者 不二サッシ株式 会社、防災科学 技術研究所、名
産業財産権の種類、番号 特許、2020-43929	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	榎田 竜太 (Enokida Ryuta) (20788624)	国立大学法人東北大学・災害科学国際研究所・准教授 (82102)	
研究 分担者	岡崎 太郎 (Okazaki Taichiro) (20414964)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	
研究 分担者	長江 拓也 (Nagae Takuya) (90402932)	名古屋大学・減災連携研究センター・准教授 (13901)	
研究 分担者	高橋 典之 (Takahashi Noriyuki) (60401270)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究 分担者	松宮 智央 (Matsumiya Tomohiro) (20454639)	近畿大学・建築学部・准教授 (34419)	

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
---------	---------