

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18846

研究課題名（和文）被災住宅の復興支援技術：迅速計測及び即時三次元リサージュ描写による住民支援

研究課題名（英文）Study on the utilizing technology of rapid measurement and 3D Lissajous figure for reconstruction support of houses damaged by natural disasters

研究代表者

大久保 孝昭（Ohkubo, Takaaki）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：60185220

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,300,000円

研究成果の概要（和文）：本技術開発は、ドローンに高性能の無線加速度センサを搭載して、建築物に着陸させて微動計測を行い、建築物の構造安全性の診断を合理的に行う手法の開発に取り組んだ。基本的に、地震等で被災した建築物の損傷程度を微動計測に基づく3次元リサージュから現地で迅速に診断するための技術開発に取り組んだ。実建築物の計測実験および3次元振動台を用いた試験体での実験から、本手法により実建築物の計測が可能で、建築物の損傷の進展をドローン搭載の無線加速度センサによる常時微動による固有周波数の変化やリサージュ波形から推定でき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

研究代表者は、熊本地震および西日本豪雨災害時の応急診断・地域復興段階において、各種センサを被災地に持ち込み、戸建て住宅の計測を行い、被災住宅の補修・補強法を定めるための現地調査を行った。その際、被災住宅の損傷診断に最も効果的であったのが「3軸無線加速度センサを用いた振動リサージュ」であった。しかし、この調査では、調査者の安全確保のために計測対象の住宅数が限定された。本技術開発は、これを解決するためにドローンと無線加速度センサを併用した現地計測と解析手法の確立に取り組んだ。本技術は災害時のみならず、常時微動計測によるRC構造物の健全性診断にも活用できるものであり社会貢献ができると考えている。

研究成果の概要（英文）：This technology development involved equipping a drone with a high-performance wireless acceleration sensor and landing it on a building in order to measure microtremors and develop a method for rationally diagnosing the structural safety of buildings. Basically, the objective was to quickly diagnose on-site the extent of damage to buildings damaged by earthquakes, etc. using three-dimensional litharge based on microtremor measurements. From measurement experiments on actual buildings and experiments on test specimens using a three-dimensional shaking table, we found that it is possible to measure actual buildings using this method, and that the progress of damage to buildings can be monitored by constantly detecting microtremors using a wireless acceleration sensor equipped with a drone. It was shown that it is able to be estimated from the change in the natural frequency and the Lissajous waveform.

研究分野：建築材料学

キーワード：ドローン 無線加速度センサ 常時微動 診断 リサージュ 固有周波数 被災住宅

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、熊本地震および西日本豪雨災害時の応急診断・地域復興段階において、加速度センサ・亀裂変位計・濡れセンサなど、各種センサを被災地に持ち込み、戸建て住宅の計測を行い、計測結果を基に被災者の住宅の補修・補強法を定めるための現地調査を行った。被災住民の多くは、応急診断段階では住宅への立入り可否の判断、復興段階では被災住宅の改修工法・費用に関する不安を持っていた。その際、被災住宅の損傷診断・判定、住民への説明に最も効果的であったのが「3軸無線加速度センサを用いた振動リサージュ」であった。しかし、これらの調査では、下記 の理由により、計測対象の住宅数が限定された。

調査者の安全確保のため、センサ設置までに長期間の待機が必要な場合が多くあった。

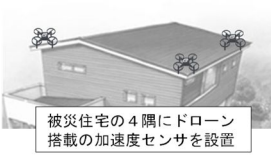

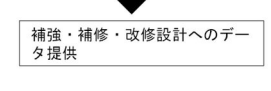
改修設計に役立つリサージュ描写には複雑なデータ処理と時間を要した。

本研究は、上記の背景を基に、地震等の自然災害により損傷を受けた住宅の早期復興のための迅速な診断システムが必要という認識で技術開発に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究で確立目標とする戸建て住宅の現地調査のフローを表1に示した。同表の最左段に想定している現地での調査フローをポンチ絵で示している。本研究で想定する現地調査では、被災建築物に接する機器は、ドローンと無線加速度センサであり、その組み合わせの選定は重要である。本研究では、研究代表者が既往の調査で活用してきた小型の3次元無線加速度センサをドローンに搭載して、常時微動を計測する計画であり、本研究項目で、最も重要な検討対象は「ドローンを住宅に着陸させた後に、加速度センサが住宅と一体化して微動を検知できること」である。次に重要な検討項目は「住宅の微動以外のノイズの除去」である。特にドローン自身やサスペンションの特性に伴うノイズは、実験によりフィルター処理方法(周波数解析)を確立して、対処する技術を検討することとした。

表1 現地計測の流れと検討項目

| 現地調査の想定フロー | 研究項目 | 具体的な検討内容 |
|---|--------------------------------|--|
|  | (1) 無線加速度センサとドローンによる計測システムの確立 | <ul style="list-style-type: none"> ●ドローン、ピックアップ、ロガーおよびPCからなる計測システムの詳細整理 ●ドローン(加速度センサ)の被災住宅への固定度の確保技術 ●加速度センサの傾き補正技術 ●ドローンおよびそのサスペンションの影響除去技術 |
|  | (2) 迅速なリサージュ描写が可能なアルゴリズムの確立 | <ul style="list-style-type: none"> ●迅速なリサージュ描写が可能なアルゴリズムの作成 ●実験室レベルの実験による解析精度の検証と向上 ●被災住宅の診断解析システムへの三次元リサージュの活用方策を提案するための検証実験 |
|  | (3) 社会実装のための実証実験と改修設計での活用手法の提案 | <ul style="list-style-type: none"> ●学内施設を用いた実証実験 ●三次元リサージュを活用した応急診断技術の提示 ●補修・補強・改修設計への三次元リサージュの活用方策の提示 |

3. 研究の方法

前節に示した研究目的を達成するために、具体的な研究課題として下記項目を抽出した。

(実建築物での実験)

1. ドローンの建築物への固定度の確保
2. ドローンのサスペンションが計測結果に及ぼす影響
3. ドローン計測時の風速が計測結果に及ぼす影響

4. 無線加速度センサの傾き補正技術

(3次元振動台を用いた模擬試験体による屋内実験)

1. 地震(振動)による木造躯体の損傷進展の診断手法の確認
2. 損傷の進展を評価する物性値の検討(リサーチ,固有周波数等)
3. 迅速な損傷診断を行うためのシステムの検討と開発

4. 研究成果

4.1 実建築物での実験

写真1に本研究のために選定したドローンに無線加速度センサを搭載した様子と,建物屋上にドローンを着陸させて微動計測を実施している様子を示す。



写真1 本研究に用いた無線加速度センサを積載したドローン

図1(a),(b)に9階建てRC建築物の最上階RC床で微動計測を行った結果を示す。

同図は建築物の梁間(短辺)方向の加速度波形であり,図(a)が通常計測,同図(b)がドローン計測の結果である。ドローン計測の加速度の絶対値が大きいことがわかる。これはドローンのサスペンションの影響である。図2(a),(b)には図2に示した加速度のフーリエ振幅を示している。同図に示すように,通常計測,ドローン計測ともに本建築物の一次固有周波数は1.95Hzと求められた。この建築物の固有周波数は梁間,桁行(長辺)方向ともに2.0Hzということが過去の計測で明らかになっており,今回の計測でも同じ値が求められた。同計測では一次固有周波数近辺の加速度と変位との関係について,通常計測とドローン計測を比較し,近似直性の傾きは両者ともに19gal/mmの値を示した。この値は当該建築物の剛性を示す重要な指標であり,これはドローン計測が通常計測と同等の計測が可能であることを示している。

また,戸建て住宅などの低層建築物のリサーチ描写に関し,1階建てRC造建築物の屋上の4隅にセンサを設置して通常計測とドローン計測の比較を行った。ここでは図示はしていないが,固有振動を表す水平方向の動きを描写できており,動画で観察しても通常計測と差がないことを確認して

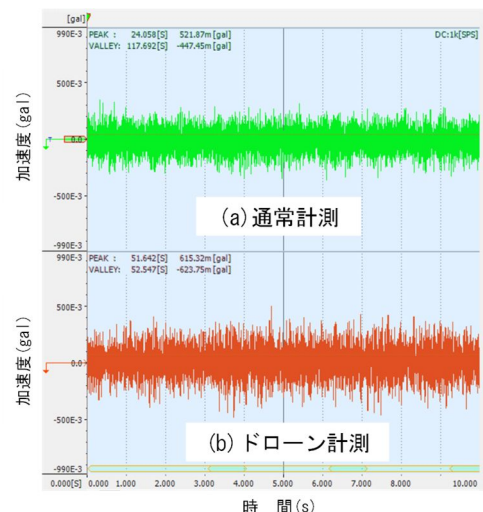


図1 9階建てRC建築物の微動計測結果

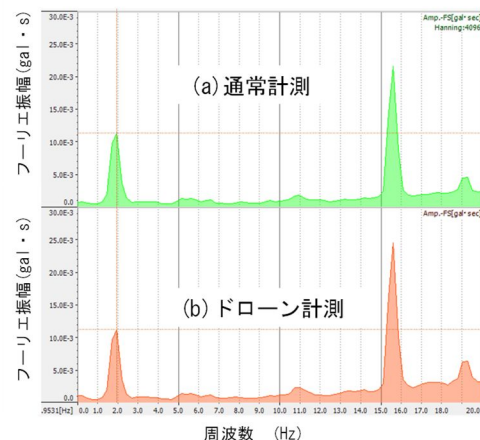


図2 9階建てRC建築物のフーリエ振幅(梁間方向)

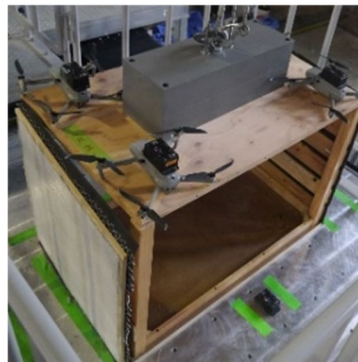
いる。このような剛性の高い低層のRC建築物でドローン計測と通常計測に差がないということはドローン計測の計測対象が広いことを示しており、ドローン計測による建築物の診断技術を確立する見通しが得られたものと考えている。

計測時の風速の影響に関しては、風速が速くなるほど常時微動加速度の絶対値が大きくなり、25Hz～30Hz程度の高周波成分の振動が大きくなった。この周波数帯がドローンの特性によるノイズと言える。本実験に用いたドローンは、通常の建築構造物の固有周波数よりも高く、建築物の固有値分析には影響が少ないと考えられるが、さらに風速が高くなるとこのノイズが大きくなりすぎるため、風速が高くなるほどローパスフィルターが重要になることを明らかにした。

4.2 3次元振動台を用いた模擬試験体による屋内実験

本研究における実験室

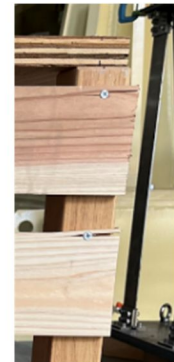
内試験では、図3(a)～(c)に示すように、木造建築物を想定した模型試験体を作製した。柱、床および天井を要するフレームの2つの壁面に、木造住宅で採用されるラスモルタルを振動方向に対して剛性を発揮するように施工した。ラス板の施工に関



(a) 試験体の全体像



(b) 健全試験体におけるラスの固定

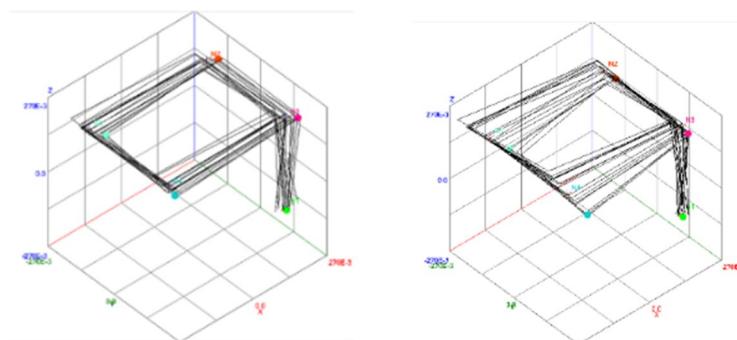


(c) 損傷の生じやすいラスの固定

図3 ラスモルタル外壁からなる模擬試験体

しては、健全な試験体と模擬地震動により損傷が比較的早く進む試験体を作製した。前者の例として図3(b)に示すようにラス板の端から1cmの部分に片側2本ずつビスで強固に固定した試験体(以下ラス板健全)、後者の例として図3(c)に示すようにラス板の端部で片側1本のビスのみで取り付けした試験体(以下ラス板劣化とする)を示す。試験体に振動を発生させる方法として、3次元振動台により一方向の正弦波振動を試験体に与えた。なお、振動は0.1Gから1.4Gまで徐々に加速度を大きくなるように設定した。なお、1Gは振動台に生じる加速度が約1000galとなるような振動の大きさを表している。振動台で振動を与える際の周波数に関しては、実験開始前に無線加速度センサを用いて常時微動から固有周波数を計測し、得られた結果を試験体の振動時の周波数に設定した。

ラス板劣化試験体のリサージュ曲線を図4(a),(b)に示す。同図(a)より、0.2g 10Hz 30s 振動後の比較的健全状態にある場合はすべてのセンサが同様に、すなわち設置位置の長方形を保つ



(a) 損傷が生じる前のリサージュ

(b) 損傷発生後のリサージュ

図4 ラスモルタル外壁からなる模擬試験体のリサージュ

たように振動していることが分かる。一方で損傷が進んだ同図(b) (1.4G 7Hz 1min 振動後) では、劣化面である N5 及び N4 地点がその他の計測地点と比較して振動が大きく、リサージュは台形に見えるような振動性状となっている。また、水平方向だけでなく鉛直方向の振動が発生していることがうかがえる。これは振動を与え続けたことで、接合部の剛性が緩んでいることが推測されるため、実際の建築物に置き換えると非常に危険な状態となっていること

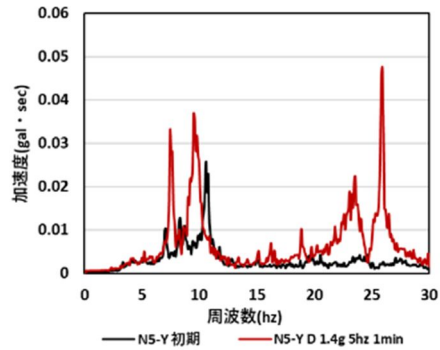


図5 振動前後のFFTの変化
(ドローン搭載の加速度センサによる計測)

を示している。同様に、固有周波数の変化でも損傷を確認することができ、図5に示すラス板劣化試験体においては、赤線で示す1.4G振動後のピーク値の周波数の値が小さくなっていることから、試験体の損傷を確認することができると判断される。

本実験に用いたドローンおよび加速度センサでは、主として以下の知見が得られた。ただし、これらの知見は、本実験で用いたドローンに限定される成果である。

1. ドローン計測の状態でも通常の設定方法とほとんど変化なく模擬劣化試験体の固有振動数を計測可能であった。また、模擬劣化試験体の柱脚接合部のボルトの数を減らすことで試験体の固有振動数が低くなるという計測結果から、ドローン計測の状態でも計測した固有振動数による剛性低下を検知できる固定度が確保されている。
2. ドローン計測時、10Hz以上の振動数で卓越する振動をうけた場合、ドローン自体が共振して揺れやすく卓越した振動数でのフーリエスペクトルの値が大きくなる特性がある。建築物の振動計測で重要な10Hz以下の卓越振動数でのフーリエスペクトルのピーク値にあまり変化はなく、本実験で用いたドローンの場合、計測で建築物の振動計測を行う際に問題はほとんどない。
3. ドローン計測時の風速が速くなるほど10Hz~20Hz程度の高振動数成分のフーリエスペクトルの値が大きくなっていることが分かった。ドローンは通常の建築物の固有振動数よりも高く、建築物の振動計測には影響が少ないと考えられるが、さらに風速が高くなると風速によるノイズが大きくなりすぎるため場合によっては、ドローン計測する際には風速については制限を設けることも必要となる。
4. ドローンが着陸する場所が斜面の場合、無線加速度センサにより角度を算定し、この補正技術を使用することで勾配屋根での計測、そしてリサージュ描写が可能である。
5. 無線加速度センサを試験体に直接設置した場合においてはFFT解析で損傷を検知ことができ、リサージュでの可視化も可能であった。なお、このリサージュ描写およびFFT解析による固有周波数の同定は実験と同時に行うことができ、本研究の目標を達成することができた。

以上、本研究では、ドローンに搭載した無線加速度センサを用いた常時微動計測による建築物の地震発生後の損傷検知について模擬試験体を用いた検討を行った。今後は、ドローンを遠隔地に飛行させて安全に建築物に着陸させて計測を行い、住宅の損傷や劣化を検知する技術開発やこれを可能とする制度の改正が必要であると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 大久保孝昭, 山成健太郎 | 4. 巻 第47巻 |
| 2. 論文標題 無線加速度センサとドローンの併用による被災建築物の検査技術 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 セメント・コンクリート研究討論会論文報告集 | 6. 最初と最後の頁 1,6 |
| 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 山成健太郎, 大久保孝昭 | 4. 巻 第46巻 |
| 2. 論文標題 無線加速度センサとドローンによる計測システム確立のための基礎的研究 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会中国支部研究報告集 | 6. 最初と最後の頁 1,4 |
| 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 大久保孝昭 | 4. 巻 第48巻 |
| 2. 論文標題 ドローン搭載の無線加速度センサによる建築物の検査・診断に関するフィジビリティスタディ | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 セメント・コンクリート研究討論会論文報告集 | 6. 最初と最後の頁 23,28 |
| 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 中山雄貴, 李ウトン, 田中夕渚, 大久保孝昭 | 4. 巻 第47巻 |
| 2. 論文標題 地震発生前後の常時微動計測による建築物の損傷診断技術の確立に関する基礎的研究 - ドローンに設置した無線加速度センサの活用 - | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会中国支部研究報告集 | 6. 最初と最後の頁 16,19 |
| 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 - |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 大久保孝昭 |
| 2. 発表標題 被爆建築物の調査事例の紹介と検査・診断技術の高度化に関する私見 |
| 3. 学会等名 テクノフェア2023 コンステック（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 大久保孝昭 |
| 2. 発表標題 建築物の検査技術開発に関する私見 |
| 3. 学会等名 特別講演会 建材試験センター（招待講演） |
| 4. 発表年 2024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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|