

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：82115

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00293

研究課題名（和文）災害拠点建物群の早期復旧に資する衛星情報を活用した被災判定自動化技術の開発

研究課題名（英文）Development on automatic damage judgement techniques for quick recover of disaster management center buildings using satellite information

研究代表者

向井 智久（MUKAI, TOMOHISA）

国土技術政策総合研究所・建築研究部・室長

研究者番号：30318208

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の成果として、1）高精度時刻同期型加速度計とGNSSセンサが災害時に連動する自動計測装置の開発に関して、加速度計とGNSSセンサそれぞれの計測精度を検証し、それらを建物に設置した際に適切に稼働することを確認した。2）計測データから被災情報等を判定するアルゴリズムの開発に関して、損傷したRC造5階建て架構試験体を対象とした被災判定技術の提案を行い、静的非線形増分解析の結果を用いて被災判定が適切に出来ることを確認した。3）多くの建物の被災判定を自動化させるスケーラビリティのあるシステムの検討に関して、クラウドを用いて計測データ収集システムを設計および一部実装した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、建物の応答変位を直接計測するGNSSセンサの計測精度を検証し、それらを既存加速度センサー内に取り込み、実建物において計測できることを検証し、かつそれらの計測データの一元的な収集システムの開発を行ったものでこれまでに実施されたことのない研究として位置づけられる。これらが今後建物に実際に設置されることで、地震後の迅速な被災判定の実施の結果、災害後における防災拠点施設の効率的な災害対応に資することができる。また計測されたデータを用いて被災建物の損傷評価に結びつく検討方法を提示したことで、建物の振動計測から被災判定まで一連の流れを示したことに意義がある。

研究成果の概要（英文）：As a result of this research, 1) Regarding the development of an automatic measurement device in which a high-precision time-synchronized accelerometer and a GNSS sensor are linked in the event of a disaster, the measurement accuracy of each accelerometer and GNSS sensor was verified, and when they were installed in a building. It confirmed that the system works properly. 2) Regarding the development of an algorithm for determining damage information from measurement data, a damage determination technology for a damaged RC five-story frame test specimen was proposed, and the method to determine damage was confirmed to work properly using the results of static nonlinear incremental analysis. 3) a measurement data collection system using the cloud was designed and partially implemented as a study for a scalable system that automatically collects damage assessment results for many buildings.

研究分野：建築物の損傷評価

キーワード：GNSS 高精度時刻 測位精度 被災判定技術 耐震レジリエンス性能

1. 研究開始当初の背景

地震によって被災した建築物の損傷状態をあらかじめ設置された加速度計を用いて評価する「構造ヘルスマニタリング」技術が各機関で開発され、その一部が社会実装されつつあるが、その普及数は多くはない。その技術は、建築物にあらかじめ複数台取り付けられた加速度計を物理的にケーブルで接続し、加速度計間の時刻同期やデータ転送、給電を行い、地震時の揺れを計測するものであるが、そのケーブル敷設を省力化し、導入障壁を下げる必要がある。さらにその転送された計測データを用いて、当該建築物の被災状態を判定するため、加速度データを積分して最大応答および残留変位に変換する必要があるが、それは設置した加速度計の性能や加速度の積分手法、建築物の卓越振動数等に依存するため、この方法を用いた場合の適用範囲が存在するものの、それらは十分に明らかにされていない状況にある。そのような中、本研究開始前の申請者らの研究より、屋外にて地震時の変位応答を模擬する振動装置を用いて高性能測位 GNSS センサの計測データから応答変位を算定し、地震動の種類にかかわらずその精度が概ねよいことを確認できているものの、当該センサはかなり高性能な製品であることから、建築物群で普及できるより一般的なセンサを用いて被災建築物の判定の可能性を模索する必要がある。また GNSS 測位センサを地震による建築物の応答変位計測装置として活用する場合、地震の揺れを感知する情報を共有するため加速度計との連携した動作が必要であり、加速度計と GNSS センサが有機的に連動することで、災害時の建築物の全体的な揺れを検知し、自動的に通信負荷の小さいデータ計測・配信ができる合理的なメインユニットの開発が必要である。またメインユニットと連動して、建築物内の局所的な損傷を評価するための多点計測サブユニットもより詳細な損傷状態把握のために必要である。さらに GNSS 測位センサにより得られる変位は建築物の絶対変位に相当するが、建築物の損傷評価の観点から敷地地盤の変位を除いた相対変位を算定する必要があり、敷地条件によって地表面の変位を GNSS センサで計測するには高度なデータ処理技術等を駆使して地表面における正確な変位データの算定が必要になる。

次に、計測データを用いて建築物の被災状態を評価する方法が必要であるが、現状過去の地震被害データ等に基づく層レベルの定性的評価にとどまっており、定量的な部材レベルの損傷評価手法が必要である。実際の建築物内にある部材レベルの損傷評価を行うためには、部材単体ではなく、架構を対象とした構造実験により、架構全体挙動と部材挙動との関係性を把握し、かつ各部材の損傷計測を実施し、それらを用いた評価手法の確立が必要である。さらに災害により生じる損傷に基づき、被災建築物の復旧に要する時間を評価することも迅速な復旧にとって必要である。申請者らは、損傷した部材の修復に要する時間に着目した評価指標の提案を行っており、今後、それらを実建築物の修復性評価に展開することが課題である。

最後に前述の計測データが多地点で実施され、それは建築物群の被災情報の迅速な把握が早期復旧にとって極めて重要な災害後の初動となる。その実現のためには、当該情報が地震後速やかに収集、分析、結果の表示を行う必要があるが、その実現のためには高速インターネット通信網の活用は必要不可欠となる。その際、年々厳しさを増す各建築物管理機関のセキュリティポリシーを考慮すれば、ここでの送受信システムもセキュアな環境で行うことが必須となる。

2. 研究の目的

大きな災害後には被災エリアの建築物群の迅速な復旧が社会経済やコミュニティ活動等にとって極めて重要であることから、建築物群にセンサを取付け、災害時の被災情報の迅速な把握のための研究開発が盛んだが、我が国が力を入れつつある宇宙開発の一環である衛星（GNSS(Global Navigation Satellite System/全球測位衛星システム)）センサは、建築分野において災害時の建築物群の挙動把握の観点で、その利活用はなされていない。本研究は、災害後迅速な

対応が求められる災害拠点建築物群の早期復旧に資する衛星情報を活用した被災判定自動化技術の開発を目的とし、次の研究項目を実施し、災害後迅速に復旧できる都市形成促進に寄与することを最終目的とする。(1) 高精度に時刻同期された加速度計と GNSS センサが災害時に連動する自動計測装置の開発、(2) 計測データから被災情報等を評価するアルゴリズム開発、(3) 多くの建築物群の被災判定を自動化させるスケーラブルなシステムの検討

3. 研究の方法

(1) 加速度計と GNSS センサが災害時に連動して自動的にデータを計測する装置の開発

メインユニット：本検討では、各国の衛星信号を屋内に伝送できる GNSS 測位センサと加速度計との連携を基盤技術とする。具体的には、地震が発生した時点で加速度計がその揺れ情報を GNSS 測位センサへ伝送すると同時に両者が計測を開始し、揺れの収束時点で再度その情報を GNSS 測位センサへ伝送するとともに両者が計測を終了し、計測データを管理サーバに送信する一連の自動化システム（図 1 参照）を実施する。また建築物の頂部変位を計測する GNSS 測位センサの観測データを損傷評価の観点から必要となる計測精度を明らかにし、それに見合ったセンサの開発を行うとともに、高精度な損傷評価のための地盤変位の計測手法およびその推定手法の開発を災害拠点建築物に対して実施する。

サブユニット：メインユニットとの連携を図る上で当該ユニット同様、計測データが高精度時刻を有する GNSS 時刻同期型多点観測用 MEMS センサモジュールを開発する。センサモジュールを製作後、計測機能や時刻同期機能を確認するために、図 2 に示すセンサモジュール開発用振動試験装置により試験を行う。

両ユニットの基本性能を試験で確認した後、実大架構試験体の振動実験においてこれらセンサの機能を検証する。上記一連の検討で性能の確かさが確認できたユニットを実建築物に設置し、高精度時刻同期や地震などの災害による建築物の揺れをトリガーにしたデータ観測の妥当性を検証するための実証設置を比較的大きな避難施設を模擬した揺れの状態を再現できる種子島宇宙センター内にある建築物にて実施する。

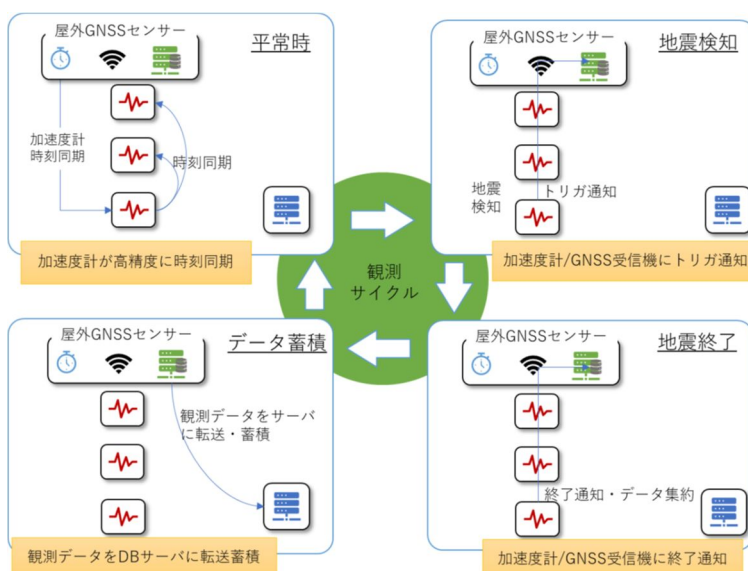


図 1 地震発生を想定した一連の観測システム

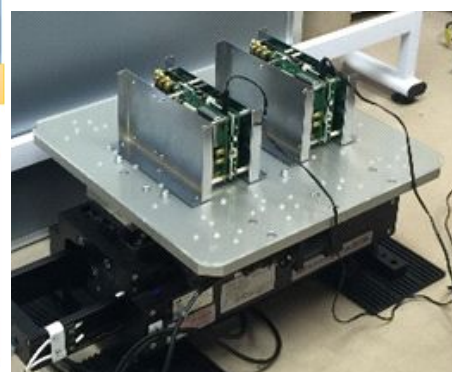


図 2 検証用振動試験装置

(2) 計測データから被災情報等を判定するアルゴリズム開発

本研究では、(1) で構築する高精度時刻で同期されたセンサ計測システムに基づき、1) 異なる 2 点のセンサで計測された値から建築物全体の損傷程度の把握を、2) 層や部材レベルで局所的に設置し計測したセンサから、部材の損傷程度を把握する方法について、過去に実施した災害拠

点建築物を想定した実大架構試験体の実験データを用いて検討する。具体的には、実大の5階建ての鉄筋コンクリート造架構試験体の最上階変位と最下階層せん断力を用いて建築物全体の損傷性状を評価するための構造特性曲線を抽出する。その抽出された曲線の割線剛性変化率と発生している損傷を関連付け、建築物全体を評価するための特異点を損傷程度に応じて定義する。また部材の損傷状態を直接考慮し建築物全体の被災度を解析的に計算する手法を提案する。次に、部材実験を実施し、上記で得られた特異点から修復時間を算定する方法を適用し、その妥当性を明らかにする。その上で、地震時に計測されるデータから被災情報として部材に生じる損傷量等を評価するアルゴリズムを提案する。

(3) 多くの建築物の被災判定を自動化させるスケーラビリティのあるシステムの検討

(1) から得られるデータと(2)で提案されるアルゴリズムの一部を用いて、建築物の被災判定を自動的に行う手法を検討する。まず計測データを送信する場合に、専用線を配した上で物理的にサーバを設置して対応する場合と、公衆回線網を用いてクラウド上で対応する場合の検討を行い、それぞれの環境下におけるシステム構築の方法およびその拡張性について検討し、将来、膨大な被災建築物群の観測データを一斉に集約、処理、表示できるスケーラビリティのあるシステムを提案する。さらに、そのシステムと連携する上で必要となるセンサの必要性能や仕様について検討する。次に(2)で提案される被災情報の判定アルゴリズム、本システム上で災害後迅速に機能する状態のシステム構築のための設計を行う。具体的には、多くの建築物に対して被災判定法およびその結果の収集をクラウド上に試行的に整備する。さらに建築物の被災情報を通信させる場合にセキュリティを確保する目的で、通信データを暗号化する形式を採用する。

4. 研究成果

本研究の成果として、1)高精度時刻同期型加速度計とGNSSセンサが災害時に連動する自動計測装置の開発に関して、加速度計とGNSSセンサそれぞれの計測精度を検証し、それらを建築物に設置した際に適切に稼働することを確認した。2)計測データから被災情報等を判定するアルゴリズムの開発に関して、損傷したRC造5階建て架構試験体を対象とした被災判定技術の提案を行い、静的非線形増分解析の結果を用いて被災判定が適切に出来ることを確認した。3)多くの建築物の被災判定を自動化させるスケーラビリティのあるシステムの検討に関して、クラウドを用いて計測データ収集システムを設計および一部実装した。以下に個別の結果の概要を示す。

(1) 高精度に時刻同期された加速度計とGNSSセンサが災害時に連動する自動計測装置の開発

メインユニットについては以下6項目を実施

- M1) 衛星測位における建築物の地震時応答変位観測に関する基礎研究
- M2) 振動台を用いた安価な加速度センサの計測性能評価法のための基礎研究
- M3) 衛星測位技術を用いた屋外試験体の動的応答変位観測に関する基礎研究
- M4) 屋外にある実大架構を対象とした各種計測装置から得られる応答変位の精度検証
- M5) 衛星測位を用いた建築物の地震時応答変位計測精度に関する研究 その1 実験計画・その2 実験結果

上記までの検討で、メインユニットに用いるセンサの種類とそれらの計測精度を明らかにするとともに、地震時に加速度計とGNSSセンサが地震感知後に連動して自動的に計測を開始終了する仕組みを設計し、それらを試行的にセンサユニットとして製作した。

M6) M5 までに検証されたメインユニットの実建築物への実装として以下 2 棟への取り付けを実施した。

(1) JAXA 筑波宇宙センター総合開発推進棟の SHM システム導入について

(2) JAXA 種子島宇宙センター第 3 衛星フェアリング組立棟の SHM システム導入について

サブユニットについては以下の項目を実施：

S1) 衛星測位における建築物の地震時応答変位観測に関する基礎研究

本検討において、GNSS モジュールを交換した 2 台の iPNT 対応地震センサに、同一の GNSS 時刻情報を入力し、テーブルをたたいて振動を計測した。絶対時刻でそろえた 2 台のセンサの z 軸加速度の計測結果より両者が一致していることを確認した。

本検討の課題として、iPNT 対応地震センサの開発自体が途中で中止されており、細かい不具合が修正されていないため、改造方法の妥当性とセンサの基本的な性能は確認できたものの、実際の構造物に設置して長期的に運用するほどの信頼性は不足している。さらに開発ドキュメントの分析を進め、改良して完成度を高めていくことは可能と考えられるが、そのための開発コストが必要となる。

(2) 計測データから被災情報等を評価するアルゴリズム開発

本検討では静的非線形増分解結果を用い、設計段階において想定される地震動に対して建築物の最大応答変形が既知の状態を想定し、建築物全体の耐震安全性評価を個別部材の損傷状態を考慮する形で行う方法を提示した。

本手法をより一般化するためには、下記の 2 つの課題を解決する必要がある。

1. 損傷度-塑性率関係の定義を実験値や実観測データを使用せずに算定する方法が必要
2. 設計された建築物に対する本手法の適用性の検証

(3) 多くの建築物群の被災判定を自動化させるスケーラブルなシステムの検討

多くの建築物の観測結果の収集をクラウド上に試行的に整備した。さらに建築物の被災情報を通信させる場合にセキュリティを確保する目的で、通信データを暗号化する形式を採用した。それらにより構築した web ページを図 3 に示す。実際に観測している建築物の地震時の応答データが適切に送信されていることを複数の地震後に確認した。

観測データ探索

建物情報	配信ユニット	強震計	観測期間	更新日時	サイズ	DL
建築研究所	親機 本館塔屋(西側)空調控室	本館B1F強震計	2023/06/11 18:57:30 ~ 2023/06/11 18:58:33	2023/06/11 19:05:43	39,474	↓
建築研究所	親機 本館塔屋(西側)空調控室	本館7F強震	2023/06/11 18:57:30 ~ 2023/06/11 18:58:34	2023/06/11 19:00:31	40,068	↓
建築研究所	親機 本館塔屋(西側)空調控室	本館5F強震	2023/06/11 18:57:30 ~ 2023/06/11 18:58:34	2023/06/11 19:00:20	40,068	↓
建築研究所	親機 本館塔屋(西側)空調控室	本館B1F強震計	2023/06/06 15:42:01 ~ 2023/06/06 15:43:04	2023/06/06 15:50:41	27,647	↓

図 3 クラウドサービスを活用した地震観測データ自動収集システム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 向井智久, 田嶋一之, 室井 翔太	4. 巻 60
2. 論文標題 全球測位衛星システムを用いた建物の計測技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学3月号	6. 最初と最後の頁 255-261
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 渡辺美雪, 向井智久, 衣笠秀行	4. 巻 Vol.42
2. 論文標題 実大架構試験体を用いた構造特性曲線に基づく迅速かつ適切な地震被災判定法に関する基礎研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 709-714
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 吉田まほ子, 向井智久, 衣笠秀行	4. 巻 Vol.44
2. 論文標題 壁付き部材の損傷度の違いが耐震性能残存率に与える影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 193-198
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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田嶋一之・向井智久・毎田悠承・南部禎士・鹿嶋俊英
2. 発表標題 衛星測位における建築物の地震時応答変位観測に関する基礎研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田まほ子・渡辺美雪・向井智久・有木克良・倉田成人・衣笠秀行
2. 発表標題 振動台を用いた安価な加速度センサの計測性能評価法のための基礎研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺美雪・向井智久・吉田まほ子・衣笠秀行
2. 発表標題 被災RC建築物の残存耐震性能評価法に関する研究 その1 静的立体架構実験に基づく実損傷と整合した静的耐震性能残存率算出方法の検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 向井智久・渡辺美雪・吉田まほ子・衣笠秀行
2. 発表標題 被災RC建築物の残存耐震性能評価法に関する研究 その2 静的立体架構解析に基づく静的耐震性能残存率算出方法の検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田まほ子・向井智久・田嶋一之・中村聡宏・有木克良・衣笠秀行
2. 発表標題 衛星測位技術を用いた屋外試験体の動的応答変位観測に関する基礎研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田まほ子, 向井智久, 田嶋一之, 中村聡宏, 根本直行, 若目田美冴, 村田康一, 衣笠秀行
2. 発表標題 屋外にある実大架構を対象とした各種計測装置から得られる応答変位の精度検証
3. 学会等名 日本地震工学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 倉田成人・向井智久・坂下雅信・石井真・篠原隆浩・宗圓忠臣・有木克良・樽木洋貴・勅使川原正臣
2. 発表標題 RC造建物の振動減衰性状評価方法の検討 その39: 屋内GNSS情報配信による時刻同期機能を有する地震センサシステム
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021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	衣笠 秀行 (KINUGASA HIDEYUKI) (00224999)	東京理科大学・理工学部建築学科・教授 (32660)	
研究分担者	倉田 成人 (KURATA NARITO) (00416869)	筑波技術大学・産業技術学部・教授 (12103)	
研究分担者	田嶋 一之 (TAJIMA KAZUYUKI) (10866023)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・施設部・主任研究開発員 (82645)	

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