

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420564

研究課題名(和文) 層間変位計測を前提とした建築構造物の簡易健全度判定システムの構築

研究課題名(英文) Health monitoring scheme of building structures based on only the data of measured inter-story drift deformations

研究代表者

西谷 章 (Nishitani, Akira)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70156074

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)：層間変位は地震後の建物健全度判定に有用な情報となる。代表者のグループは、他に先駆けて、実建物に適用可能な層間変位の直接計測センサを開発している。本研究は、このセンサによる計測を前提とした簡易な健全度判定・損傷個所推定システムの構築を目的としている。

E-ディフェンス加振実験での層間変位センサによるデータ計測、センサのより小型化、より正確なデータ計測に向けたセンサ改良を実施している。健全度判定として、計測残留変位情報を利用した層降伏変位の推定、この推定値に基づく累積塑性変形量の算出と損傷梁位置の推定を提示した。現実的な対応として、限定層のセンサ計測を前提とした全層層間変位推定法も構築している。

研究成果の概要(英文)：Inter-story drift deformations are of great significance in judging building safety after a seismic event. The PI's group has already developed innovative drift displacement measurement sensors. This research aims at constructing a structural health monitoring scheme only with the measured drift displacement data utilized. To demonstrate the sensor usefulness, measurement was conducted in the opportunity of an E-defense shake table test. Toward more practical use, the sensor has been improved in terms of smaller sizing and more accurate measurement. The following judgement scheme without any prior information required has been presented: the damaged beam locations are identified after estimating story yield deformation values with the measured residue displacement data and computing the story cumulative plastic deformation values. From the practical standpoint, a methodology of estimating all the story deformations with the limited story measurement data has been proposed

研究分野：建築構造材料

キーワード：層間変位センサ 層間変位 層間変位計測 構造ヘルスマニタリング 健全度判定 傾斜角 三次スプレイン補間

## 1. 研究開始当初の背景

センサ技術の目覚ましい進展は現代社会を大きく変えつつある。自動車の自動運転、自動ブレーキ操作などは、この代表であると言える。このような状況は、建築の「耐震」の考え方、あり方にも大きな変化をもたらしつつある。

建築構造物の地震時の安全性に関しては、従来のような耐震設計技術の高度化による「事前の備え」のみならず、センシングデータに基づく「事後」のすみやかな安全確認も大きな関心を集め、重要な研究テーマとなっている。

国内的には、東北地震のさいの帰宅困難者大量発生 of 鮮明な記憶もあって、速やかな安全性の検証システムの確立・普及が望まれている。いま国際的にも、建築土木分野の構造ヘルスマonitoringは世界的に大きな研究競争となっており、大きな研究のマーケットを形成している。

建築では、地震時・地震後の安全度・健全度評価において、層間変位のデータが重要な情報を提供することが、広く認識されてきている。

しかしながら、実建物に実装可能な、非接触タイプの層間変位を直接計測するセンサは、かつて存在していなかった。このため、加速度計を設置して、積分により変位データに変換する手法が採用されていることが多い。

しかし、デジタルデータの積分計算には手法的にも課題が残るが、正確な残留変位データが得られないという大きな欠点が存在する。

このような状況を受けて、代表者の研究グループは、大掛かりな治具を必要としないコンパクトな非接触タイプの層間変位センサを開発してきている。このセンサは一部の建物にはすでに設置もされている。層間変位の直接計測であるので、加速度の積分では正確な把握ができない残留変位データも取得できるというメリットもあり、残留変位情報も健全度判定に応用可能となる。

## 2. 研究の目的

背景で述べたように、層間変位センサの実装が可能となったことを受けて、層間変位計測に基づく簡易な建物健全度判定システムの構築を目指した。

ここで、「簡易」とは、できるだけ事前の構造データ等の取得を必要とせず、計測した層間変位データをもとにした判定システムを目指す、という意味である。

構造に関する事前データをもとにした構造モデル情報(必ずしも部材等の情報に限らない。固有周期・固有モード等の情報も含む)とセンサ計測データを合わせて用いる判定手法に比べ、情報を計測値に限定した判定法の構築をターゲットとする。

これにより、古い建物等の理由により、構

造設計情報が手に入らないという状況であっても、センサさえ設置できれば、地震後の健全度判定を行うことが可能となる。

## 3. 研究の方法

センサの改良と健全度判定・損傷箇所検出手法の構築を同時並行的に進めた。

(1) センサの小型化は、大学が所有するような規模の超小型振動台実験にも対応させるためである。

開発したセンサは、「光源部」と「受光部」の二つの要素からなる。両者を直接的に接触させる必要はない。上階床(梁)下端に「光源部」を、下階床(梁)上端に「受光部」を設置する。光源からの光をうけて、「受光部」内部に電子の流れが発生する機構となっている。

光源が「受光部」の直上であれば、「受光部」内の電子発生状況は均一であるが、「光源部」が相対的に「受光部」とずれた位置に動くとき電子の発生状況が変化する。この性質を利用して「光源部」の位置を検出し、結果的に層間変位を測定している。

地震時に床梁には若干の曲げ変形を生じるが、この曲げ変形による「受光部」の設置位置の回転が計測結果に影響することが分かっている。回転角の計測を同時に行うことができれば、この回転の影響を修正した測定結果を導き出すことができる。小型振動台実験により修正効果の確認ができるように、ジャイロセンサを組み込む改良も行う。

(2) E - ディフェンス加振実験における層間変位計測データや計算シミュレーションの結果を用いて、累積塑性変形応答倍率の算出を試みる。

各層の層間変位データと絶対加速度データがあれば、各層履歴を描くことができる。降伏変形量を仮定すれば、この履歴情報から、累積塑性変形応答倍率を計算できる。

ただし、降伏変位をどう設定するかによって塑性変形量は違ってくる。そこで、まず降伏変位の推定を行ってから、累積塑性変形量を計算する手法を開発する。

E - ディフェンス実験では徐々に加振のレベルをあげていくので、加振ごとに塑性変形量は累積されていく。応答倍率指標の増大と加振ごとの被害発生状況を見比べながら、指標と損傷発生状況を関連づけながら、開発した手法によって、健全度の同定や損傷発生位置の同定がおこなえているかを検証する。

## 4. 研究成果

(1) 4層鉄筋コンクリート建物 1/3 モデルの E - ディフェンス加振実験に参加し、オリジナルの層間変位センサを建物モデルに設置して計測を行った。他の、レーザ変位計による計測結果との比較、加速度センサ計測結果との比較から、層間変位の直接計測の有用性

を確認した。

(2) オリジナルの層間変位センサは、実物大の建物模型への設置、さらには実装を意識したものであり、サイズ・重量の制約から、小型振動台に設置するような規模の建物模型には設置が難しかった。小型模型実験を行う必要から、センサの小型化を目指した改良を行った。

さらに、小型化した層間変位センサに、加速度センサとジャイロセンサを組み込んで、加速度・角速度の同時計測を可能とした。

角速度計測によって得られる、「受光部」設置位置の回転角情報によって、計測した層間変位データをより正確なものへと修正可能となった。

(3) 層間変位データを2階微分することで加速度データに変換できる。この微分結果に加え、1階床つまり地面レベルの加速計測データがあれば、各層の絶対加速度を計算できる(改良したセンサのように加速度計も組み込まれたセンサを用いれば、絶対加速度は自動的に取得できる)。

この絶対加速度データと層間変位データを合わせれば、各層履歴が推定可能である。履歴形状から累積塑性応答倍率を算出すれば、各層の健全度を判定できる。この手法を提示した。

(4) 上記の(3)の方法においては、降伏変形量の仮定に基づいて累積塑性変形倍率を評価していた。

しかし、塑性変形の仮定次第で塑性変形応答量は変わってしまう。この難点を解決するために、層間変位の直接計測の利点として、計測された「残留変位データ」を活用した降伏変形量の推定法を提案した。

あらかじめ複数の降伏変位を仮定して、層間変位応答の時刻歴から、「正側」の累積塑性変形量と「負側」の累積塑性変形量をそれぞれ計算し、両者の差と計測残留変形との比較を行う。そのうえで、計測された残留変形にもっとも近い結果を与える降伏変位を、「正解値」として採用する。

採用した「正解値」に基づいて累積塑性変形応答倍率を算出し、その結果をもとに、梁端部の損傷度を同定する。

この一連の手法の妥当性は、E-ディフェンス加振実験における鉄骨18層1/3建物モデルに設置した層間変位センサデータを利用して検証し、梁損傷の生じる床位置を同定している。一般的に、梁端部の損傷は側柱との接合部に発生する傾向にあり、梁損傷位置の特定も可能であると言える。

(5) 実装を念頭におけば、特に高層になればなるほど、全層へのセンサ設置は現実的ではなくなる。そのため、限られた層への設置を前提とした全層の層間変位推定手法の構築

も行った。

この推定にあたっては、建物構造情報を用いず、センサ測定結果のみに基づく推定を目指した。

3次スプライン補間によって推定を行っているが、この補間の精度は、建物1階床位置と屋階床位置の固定度・自由度の評価に左右される。固定度・自由度の設定を工夫することで、3次スプライン補間による全層推定を精度よく行えることを明らかにした。これによって、限定層のセンサ設置でも、(4)の手法と合わせることで、梁損傷位置の特定を可能とすることができる。

さらに、現状の構造モニタリングの実装では、加速度計の限定層配置が主流であることを考慮して、同様の3次スプライン補間による推定によって、全層加速度評価が可能となることも確かめた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

小寺健三, 西谷章, 沖原有里奈, 限られた層の加速度記録のみに基づく3次スプライン補間による全層の応答推定, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.83, 2018, 527-535 (DOI: 10.31.30/aijs.83.527)

Ping Xiang, Akira Nishitani, Shohei Marutani, Kenzo Kodera, Tomohiko Hatada, Ryuta Katamura, Kiyoshi Kanekawa, Takashi Tani, Identification of yield deformation and evaluation of the degrees of damage through the direct sensing of drift displacements, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 査読有, Vol.45, 2016, 2085-2102 (DOI: 10.1002/eqe.2752)

Akira Nishitani, Chisa Matsui, Yushiro Hara, Ping Xiang, Yoshihiro Nitta, Tomohiko Hatada, Ryuta Katamura, Iwao Matsuya, Takashi Tani, Drift displacement data based estimation of cumulative plastic deformation ratios for buildings, *Smart Structures and Systems*, 査読有, Vol.15, 2015, 881-896 (DOI: 10.12989/sss.2015.15.3.88)

[学会発表](計4件)

<国際会議招待講演> Akira Nishitani, Ping Xiang, Shohei Marutani, Tomohiko Hatada, Ryuta Katamura, New directions of health monitoring for building structures, CIMTEC 2016/ 6th International Conference Smart and

Multifunctional Materials, Structures and Systems, Perugia, Italy, 2016

丸谷翔平, 相葉浩樹, 畑田朋彦, 片村立太, 谷井孝至, 西谷章, 非接触型センサを用いた建物の層間変位計測システムその11 加速度・角速度の同時計測が可能な小型統合センサの開発, 日本建築学会大会(九州), 2016

Akira Nishitani, Shohei Marutani, Yushiro Hara, Ping Xiang, Tomohiko Hatada, Ryuta Katamura, Kiyoshi Kanekawa, Takashi Tanii, Direct measurement of inter-story drift displacements of scale model building in shake table tests, 6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering/11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA, 2015

畑田朋彦, 片村立太, 萩原一, 谷井孝至, 仁田佳宏, 西谷章, 層間変位計測に基づいた損傷モニタリングシステムのE-ディフェンスS造高層建物実験による検証: その3 損傷評価手法の検証, 日本建築学会大会(関東), 2015

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者  
西谷 章(NISHITANI, Akira)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号: 70156074

(2)研究分担者  
なし( )

(3)連携研究者  
なし( )

(4)研究協力者  
なし( )