

令和元年6月28日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06587

研究課題名(和文)部分構造合成理論に基づく部材・構面・建物全体の微動振動モードと損傷の新同定法

研究課題名(英文) A technique for identifying modal parameters and damage of building members and frames from microtremor data based on substructure method

研究代表者

栗田 哲 (Satoshi, KURITA)

東京理科大学・工学部建築学科・教授

研究者番号：90195553

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)：人間が感じない建物の微小な振動を測定できるセンサーを使い、限定された台数のセンサーで建物の各部分を緻密に測定し、地震で損傷した箇所を検出する方法についてデータ分析法と損傷を検出する指標について研究を行った。その結果、膨大な測定データを効率良く分析することで、データ分析を短い時間で行う方法を提案した。また、建物のフレームの損傷、大梁の損傷については、損傷を検知する新たな指標を見つけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震から人間を守る建物で構造上重要な柱、大梁、耐力壁などは仕上げ材などで隠されているため、損傷がひどくない場合には地震による損傷を目視で見つけることが出来ない。本研究の成果はこのような損傷を検出する方法の開発に役立ち、しかも効率的で、検出コストを低くするものと考えている。

研究成果の概要(英文)：Using sensors that can measure the very small vibrations of buildings that are not felt by humans, we carefully measure each part of the building with a limited number of sensors, and we studied data analysis methods and indicators for detecting damaged parts by earthquakes. As a result, we proposed a method of performing data analysis in a short time by efficiently analyzing a large amount of measurement data. We also found new indicators for building frame damage and beam damage to detect damage.

研究分野：耐震工学

キーワード：構造ヘルスマニタリング モード同定 微動測定 スウェイ率・ロッキング率 軸変形 移動測定 FEM解析

## 1. 研究開始当初の背景

建物の構造健全性診断法の一つに、建物の構造特性（振動モード特性、剛性）を微動測定から同定し、構造特性の変化から、損傷箇所と損傷レベルを検出する方法がある。この構造健全性診断法の課題として以下の事項が挙げられる。

### (1) 部材損傷検出

直列多質点系振動モデルを用いて測定データからモデルの構造特性を同定し、構造特性の変化から損傷層を検出する方法については数多くの研究が行われてきた。その結果、層の損傷検出は可能なレベルに達している。しかし、部材の損傷検出に関する研究は極めて少なく、部材の損傷検出法の開発が現在の課題となっている。

### (2) 振動測定とデータ分析

振動計を部材周辺に設置して部材の損傷を検知する場合、構造物を構成する部材は多数あるため測定点が非常に多くなることが問題点として挙げられる。また、測定データも膨大で、大量のデータを使って損傷同定を行うと、同定の計算時間が非常に長くなるという問題もある。

## 2. 研究の目的

限定された数台の振動計を移動して建物の各部分の微動測定（部分測定）を行い、部材、構面、建物全体のそれぞれの振動モードを部分測定データから同定し、部材の損傷、構面の損傷、建物全体の損傷を検出する方法を開発することが、本研究の目的である。このために、部分測定したデータから、部材、構面などの振動モードを効率的に同定する方法を提案する。そして、地震で損傷した建物の振動モードを本方法により同定し、損傷した建物の振動モード特性、各種の伝達特性を調べ、構面の損傷、部材の損傷を検出する方法について検討する。

## 3. 研究の方法

振動モードの同定手法として FDD 法を使用し、FDD 法の基礎理論に遡り、部分測定した微動データから、構面、部材、建物全体の振動モードを効率的に同定する方法を提案した。次に、東北地方太平洋沖地震で大破した建物（東北大学人間環境系建物）に本方法を適用して振動モードを同定した。本方法の精度は FEM 解析、振動台実験により検討を行った。そして、同定した振動モードと FEM 解析の振動モードを比較し、部材の軸変形・曲げ変形などの伝達関数を調べ、構面、耐震壁、柱、大梁、床スラブのそれぞれについて損傷検知方法について検討を行った。

## 4. 研究成果

本研究で得られた主な研究成果は以下の通りである。

### 1) FDD 部分構造合成法の提案

提案したモード同定手法の概要を図 1 に示す。建物を複数の部分（部分構造）に分け、数台の振動計を移動させて部分構造毎に微動測定を行ったとする。提案した FDD 部分構造合成法の第一ステップは FDD 法を使用して各部分の振動モードの同定を行う。第二ステップは、部分構造と部分構造が接している部分（結合部）の変位の適合条件に基づいて部分構造の振動モードを合成する。計算は結合部分のモード合成だけであり、モード合成の計算時間は短く、効率的なモード合成法となっている。本方法により、建物全体を含め様々な範囲の振動モードを数少ない振動計を使って同定することが出来る。

### 2) FDD 部分構造合成法の精度

FDD 部分構造合成法の精度について様々な方法で調べた。ここでは、FEM 解析を用いた精度の検証について説明する。検証に使用した実建物は 2011 年東北地方太平洋沖地震で大破した東北大学人間環境系建物（写真 1）である。この建物の微動測定は、加速度計を使用して 2011 年 9 月、2011 年 10 月、2012 年 1 月に行った。測定の延べ日数は 5 日、部分測定の設定数は 17 である。図 2 に測定点配置の例を示す。部分測定データを使用した FDD 部分構造合成法により建物の緻密な振動モードの同定を行った。そして、同定した振動モードを FEM 解析のモードと比較した。FEM 解析で使用したモデルを図 3 に示す。こ

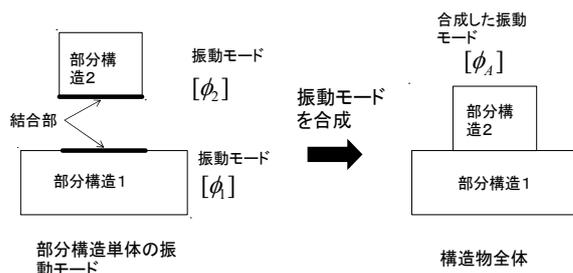


図 1 FDD 部分構造合成理論の概念



写真 1 東北大学人間環境系建物全景

のモデルは3次元モデルで、大梁、小梁、柱はビーム要素、耐力壁と床スラブはシェル要素でモデル化した。モデルの諸定数は様々の資料、既往の研究成果に基づいて設定した。固有値解析で得られた振動モードの例として、短辺方向並進1次と長辺方向並進1次の振動モードを図4-1と図4-2に示す。

同定した振動モードとFEMの振動モードの比較を図6に示す。この振動モードは短辺方向並進1次モードで、振動モードの水平位置は図5に示すX40通りとX20通りが交わる点(X40, Y20)である。この位置における柱部材の地震による損傷レベルは低い。FEMのモードと同定(微動測定)のモードとの違いは小さく、FDD部分構造合成法の精度が良いことが分かる。

### 3) 構面の損傷推定

構面の損傷検知する方法について様々な検討を行った。その結果、スウェイ・ロッキング率が構面の損傷推定に有効な指標となると考えられた。以下に、このことについて説明する。

東北大学人間環境系建物の妻面にある連層耐震壁は地震による損傷が大きかった。西側妻面の連層耐震壁の側柱の短辺並進1次振動モードについてFDD部分構造合成法(微動測定)とFEM解析の比較したものを図7に示す。FDD部分構造合成法の振動モードはFEM解析と異なっており、損傷により振動モードが変化したことが分かる。この振動モードをスウェイ成分、ロッキング成分、弾性変形成分に分解し、FDD部分構造合成法とFEM解析との比較したものが図8である。地震による損傷が大きかった連層耐震壁の構面では、ロッキング率はFDD部分構造合成法の方がFEM解析より小さく、弾性変形成分はFDD部分構造合成法の方が大きい。東北大学人間環境系建物は解体時に杭の引き抜き調査を行い、地震による杭の損傷は認められなかったことが報告されている。従って、同定結果から求めたスウェイ成分、ロッキング成分、弾性変形成分のFEM解析との違いは地震による構面の損傷に起因する。図8の結果は、損傷により構面の剛性が低下し、構面の変形が大きくなった結果、弾性変形成分は大きくなり、ロッキング成分が小さくなったことを示している。

以上のことから、構面のウエイ・ロッキング率の変化から構面の損傷を検知することが

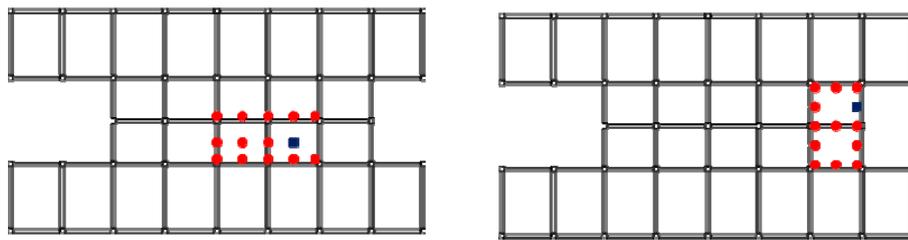


図2 部分測定の測定点配置の例 (●と■は測定点)

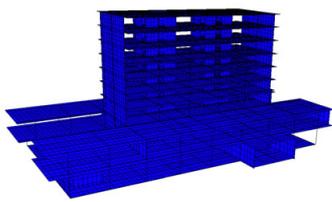


図3 3次元FEMモデル

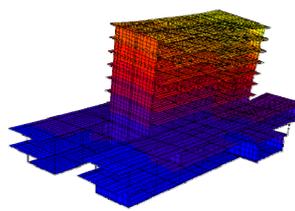


図4-1 短辺方向並進1次振動モード

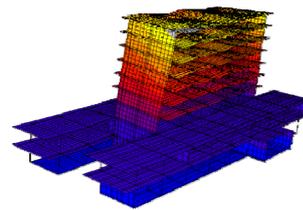


図4-2 長辺方向並進1次振動モード

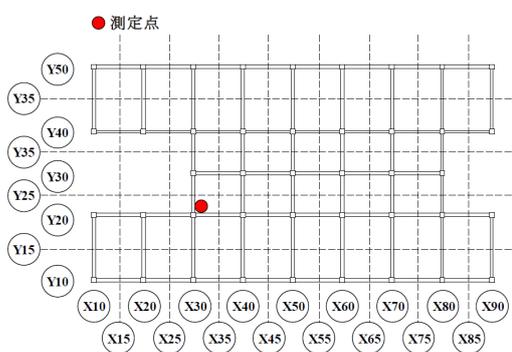


図5 建物の通り番号

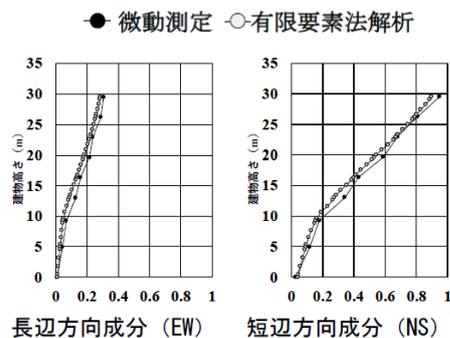


図6 水平位置(X40, Y20)における短辺並進1次振動モードの比較

可能と考えられる。

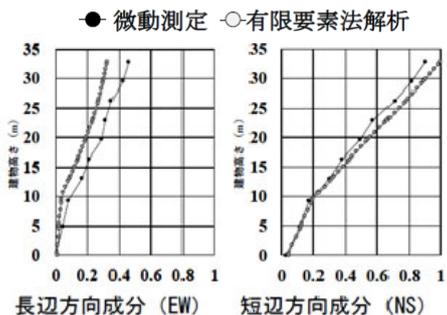
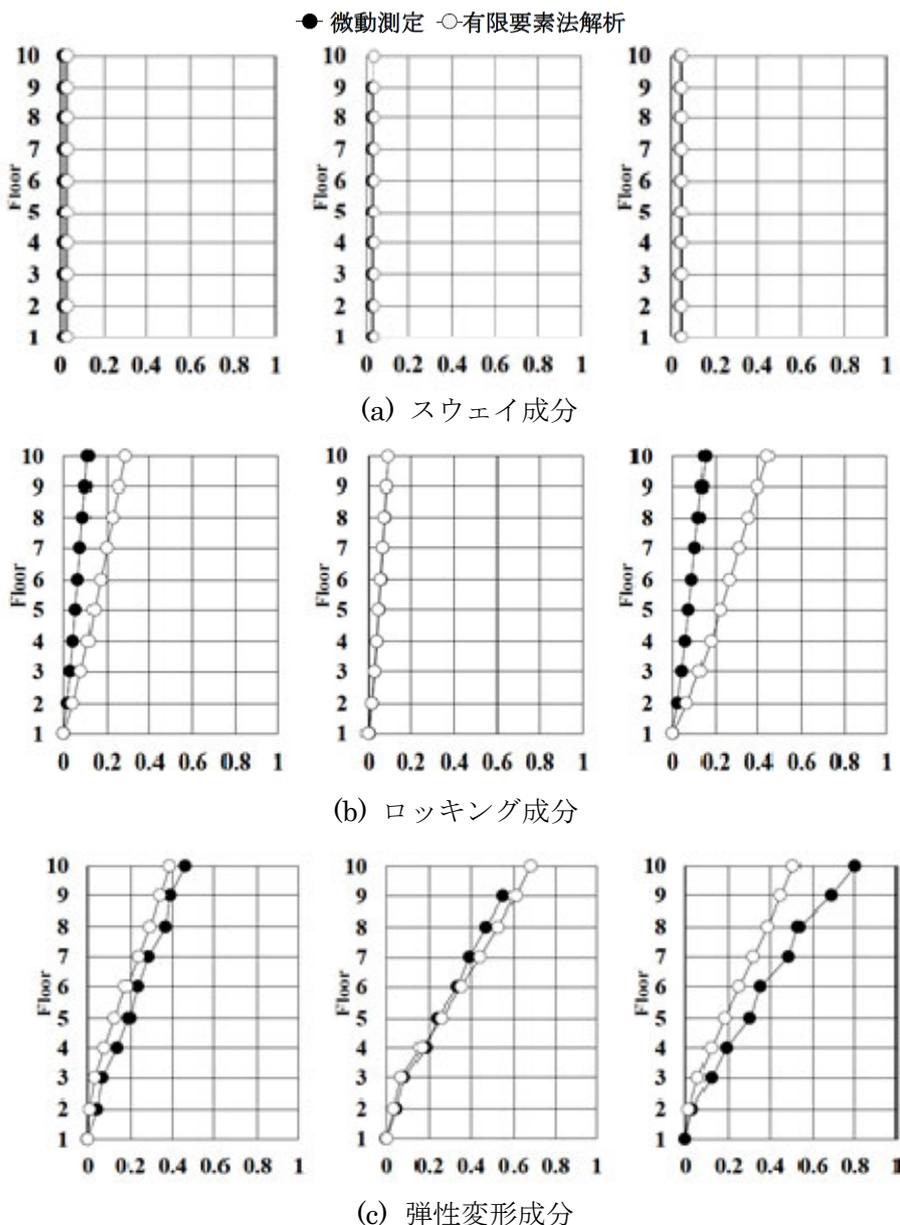


図7 水平位置 (X30、Y20) における短辺並進1次振動モードの比較



西妻面 (X30 構面)                      X40 構面                      東妻面 (X80 構面)

図8 短辺並進1次モードにおけるスウェイ成分、ロッキング成分、弾性変形成分の比較 (左側の図は西妻面 (X30 構面)、中央の図は X40 構面、右側の図は東妻面 (X80 構面))

#### 4) 部材の損傷推定

東北大学人間環境系の微動測定データを使用して、耐震壁、柱、大梁、床スラブの損傷を検知する方法について振動モードと伝達特性の両面から調べた。顕著な成果が得られた大梁の損傷推定について説明する。

図9に示す大梁の模式図で、梁の左端、中央、右端の近傍にある3測定点をB1、B2、B3とし、材軸をx軸とする。B1の材軸方向の測定データ $A_1^x$ とB2の材軸方向の測定データ $A_2^x$ の差 $a_2^x = A_2^x - A_1^x$ から軸変形を計算し、軸変形の $A_1^x$ に対する増幅率を伝達関数 $a_2^x(\omega)/A_1^x(\omega)$ から求めた。図10に示す大梁G1と大梁G2の軸変形の増幅率を図11に示す。9階のG1、7階のG1、6階のG2には、他の大梁には見られない鋭いピークが20~30Hzあたりであり、軸変形が著しく増幅されていることが分かる。軸変形が増幅される原因は地震による損傷である。従って、軸変形の増幅率により大梁の損傷を検知できると考えられる。

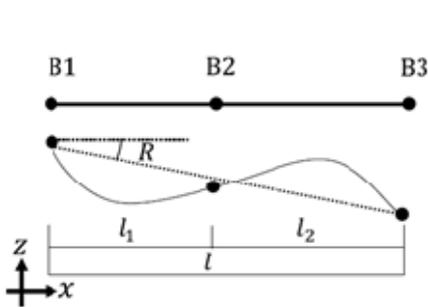


図9 梁部材の変形と測定点

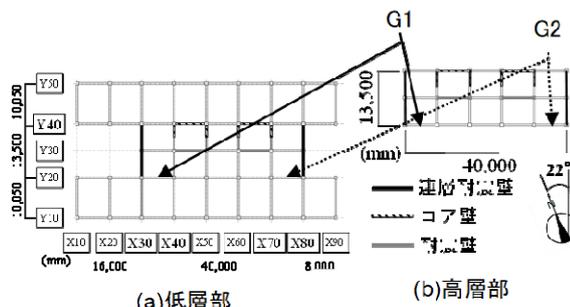
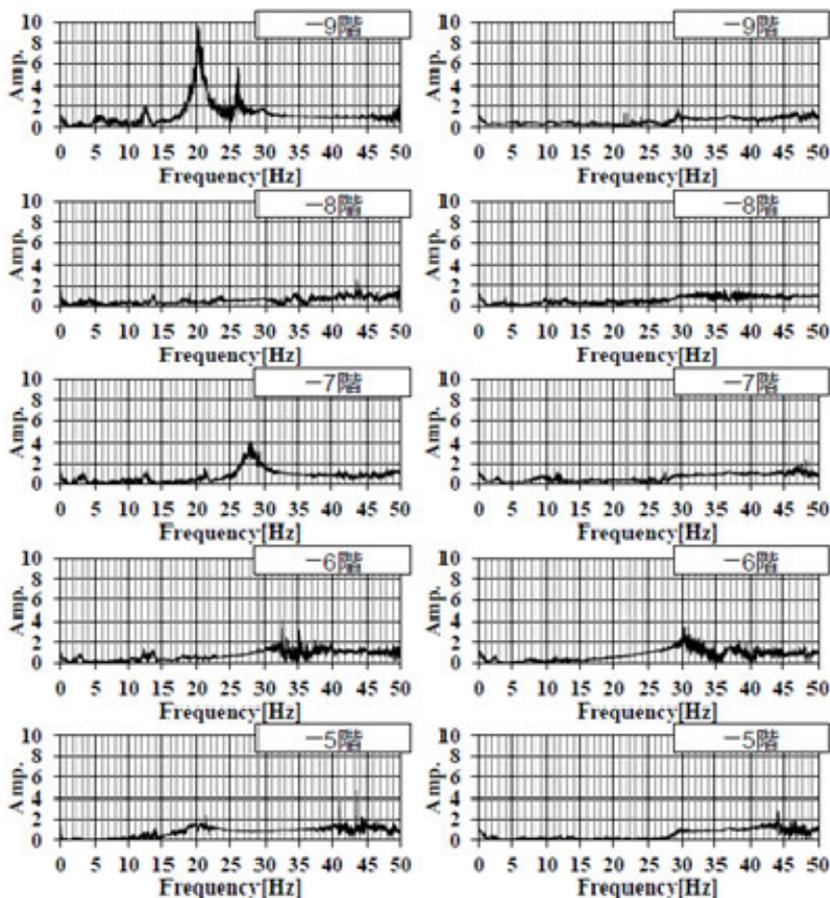


図10 大梁G1と大梁G2



(a) Y20 通り X30 - X40 間の  
大梁 G1

(b) Y20 通り X70 - X80 間の  
大梁 G2

図11 大梁の軸変形の増幅率

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

- ① 岡村洋臣、栗田哲、金南昔、源栄正人、三辻和弥、多点同時微動測定に基づく損傷建物の梁部材の周波数特性、日本建築学会学術講演梗概集、査読無、2018年、135-136
- ② 橋本脩平、栗田哲、金南昔、源栄正人、三辻和弥、常時微動測定に基づく軟弱地盤上の建物の振動数領域におけるスウェイ率・ロッキング率、日本建築学会学術講演梗概集、査読無、2018年、493-494
- ③ 栗田哲、岡村洋臣、大木暁仁、金南昔、三辻和弥、源栄正人、3.11地震で大破した建物の部材の振動特性、日本自然災害学会学術講演集、査読無、2018年、191-192
- ④ 三澤大輝、大木暁仁、栗田哲、金南昔、源栄正人、三辻和弥、多点同時微動測定に基づく損傷建物の部材の振動特性、日本建築学会学術講演梗概集、査読無、2017年、1115-1116
- ⑤ 百武悠史、栗田哲、広谷浄、尾形芳博、金南昔、微動測定に基づく女川3号機原子炉建屋の3次元振動モード特性 その1：微動測定と伝達特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、2016年、935-936
- ⑥ 栗田哲、百武悠史、広谷浄、尾形芳博、金南昔、微動測定に基づく女川3号機原子炉建屋の3次元振動モード特性 その2：3次元振動モード特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、2016年、935-936
- ⑦ 市川達也、栗田哲、金南昔、常時微動測定に基づく東京理科大学葛飾校舎研究棟の振動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、2016年、939-940

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：金 南昔

ローマ字氏名：Kim Namseok

所属研究機関名：東京理科大学

部局名：工学部

職名：助教

研究者番号(8桁)：80756966

研究分担者氏名：源栄 正人

ローマ字氏名：Motosaka Masato

所属研究機関名：東北大学

部局名：災害科学国際研究所

職名：名誉教授

研究者番号(8桁)：90281708

研究分担者氏名：三辻 和弥

ローマ字氏名：Mitsuji Kazuya

所属研究機関名：山形大学

部局名：災害科学国際研究所

職名：教授

研究者番号(8桁)：90292250