

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04019

研究課題名（和文）ひずみ測定と不規則外力の同定を援用した構造物の健全性評価手法の確立

研究課題名（英文）Structural health monitoring of structures by strain measurement and force identification

研究代表者

河村 庄造（Kawamura, Shozo）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：00204777

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：研究目的の一つである「異常の発生場所の特定」については、階層構造物を対象とし、異常が発生した階層の壁のひずみのみが正常時から変化することを利用して異常発生階層を特定する手法を提案した。次に構造物の周波数応答関数、および階層間の伝達率関数を用いて異常の程度を定量的に同定する手法を開発した。いずれも数値シミュレーションと実験によって妥当性を検証できた。もう一つの研究目的である「不規則外力の同定」については、測定された不規則応答のデータからスペクトルを算出し、システムの相関関数を利用して、不規則外力のスペクトルを同定する手法を構築した。数値シミュレーションと実験によって妥当性をほぼ検証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は機械や構造物の健全性評価に関する研究であり、持続可能社会の実現のために非常に重要な技術課題である。学術的には健全性評価は逆問題に属する研究である。逆問題は結果から原因を推定する問題であり、一意に原因を特定することは非常に難しい。その困難を、対象物の構造的な特徴を表す数学モデルに基づいて解決している。また周波数応答関数という既知の特性を、従来とは異なる取り扱いをすることによって健全性に有効に利用している。社会的にはインフラの健全性評価に直結する成果である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of the research is "identification of the place where the abnormality occurs" and "identification of random excitation". Regarding "identification of the location of the anomaly", we proposed a method for identifying the anomaly occurrence hierarchy by using the fact that only the strain of the wall of the hierarchy in which the anomaly occurred changes from the normal time for the hierarchical structure. Next, we developed a method to quantitatively identify the degree of anomaly using the frequency response function of the structure and the transmissibility function between layers. In each case, the validity could be verified by numerical simulation and experiment. For "identification of irregular external force", we calculated the spectrum from the measured random response data and constructed a method to identify the spectrum of random excitation using the correlation function of the system. The validity could be almost verified by numerical simulation and experiment.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：振動工学 健全性評価 周波数応答関数 ひずみ測定 外力同定

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

機械や構造物の健全性評価は、持続可能社会の実現のために非常に重要な技術課題である。現在、種々の対象物に対し、様々な物理量を用いた評価手法が提案されている。

対象物の振動挙動に基づく従来の健全性評価方法としては、対象物の固有振動数の変化を見ることが自然である。具体的には加速度やひずみの時刻歴データを適当な時間間隔で周波数分析して固有振動数を求め、正常状態からの固有振動数の変化を監視すれば異常発生の判断は可能である。しかし以下のような課題がある。

#### (a) 異常の発生場所の特定

固有振動数は構造物全体の特性であり、局所的に異常が発生したとしても、すべての測定点のデータから計算される固有振動数は変化する。すなわち固有振動数の変化から異常発生は判断できるが、十分な数のセンサーがないと発生場所は特定できない。一般的には、異常の発生を判別した後、精密診断で発生場所の特定を行う必要がある。

#### (b) 異常の程度の推定（非規則外力の同定）

実際の異常は部材自身の損傷や劣化、部材の結合部の緩みなど様々であるが、数学モデルにおいては、局所的な剛性の低下や、減衰性能の低下でモデル化される場合が多い。局所的な剛性低下に関しては、異常時の固有振動数の変化が再現できるように、最適化手法を用いて同定することが可能であるが、減衰性能の推定は困難である。それは構造物に作用している外力が不規則な特性を有しているため、加速度等の振幅の大きさの変化を定量的に評価することができないためである。

### 2. 研究の目的

損傷を受けると社会への影響が大きい階層構造物(高層ビルなど)を対象とし、風などの不規則外力による応答を測定して健全性評価を行う手法を確立する。このとき当初の課題に対して、以下の二項目を具体的な目的とする。

#### (a) 異常発生の検出と同時に異常の発生場所(階層)を特定できる手法の提案

#### (b) 構造物に作用する不規則外力を統計的に同定する手法の提案

### 3. 研究の方法

#### (1) 異常の発生場所の特定

初めに階層構造物の二次元モデルに対してシミュレーションによる検討を行う。このとき、床面で壁面の動きが拘束される点が特徴である。そして実際の健全性評価においては、風などによる常時微振動を常時監視するので、乱数を不規則外力と見なして構造物に作用させ、ひずみの時間変化を数値シミュレーションによって求める。正常時にはほぼ零であった特徴点のひずみが異常発生時に有意な値になり、異常発生以外の階層の特徴点ではひずみがほぼ零のままで変化がないことを確認する。

三層程度の構造物を製作し、実験的に検証する。実験では、慣性型の加振機を導入し、地震のように基礎を水平方向に不規則加振する場合と、各階の床上加振機を設置して不規則加振する場合を実施する。

#### (2) 不規則外力の統計的同定

対象物が1自由度線形系であれば作用外力の同定は比較的容易であるが、実際には多自由度系であり、センサー数は必ずしも多くないことが大きな課題である。これまでの研究では、外力の周波数が一つに定まっている定常振動を扱っているが、本研究課題の場合は外力が周波数特性を有しており、それが大きな困難となる。そこで、外力の統計的な性質を狭帯域過程あるいは広帯域過程と仮定し、その過程の代表パラメータを未知数とする方法を構築する。

上記の方法に対し、数値シミュレーションによる同定精度の検討と実験による適用性の検証を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 異常の発生場所の特定

平成 30 (2018) 年度には、階層構造物を対象とし、異常が発生した階層の壁のひずみのみが正常時から変化することを利用して異常発生階層を特定する手法を提案し、数値シミュレーション及び実験で妥当性、適用性を検証した。

令和元 (2019) 年度は、前年度と同じく階層構造物を対象とし、異常の程度を定量的に同定する手法を開発した。階層構造物の最上階に加振装置を設置することを想定し、構造物の周波数応答関数を利用して、異常が発生して各層の変位(加速度)が変化した際に、全ての階層の質量及び剛性の変化量を未知数として同定する手法を構築した。そして数値シミュレーションによって妥当性を確認した。

令和 2(2020)年度は、前年度と同じ階層構造物に対し、階層間の周波数応答関数に基づいて、異常が発生した階層とその程度を同定する手法の基本的な考え方を構築した。そして数値シミュレーションによって妥当性を確認した。

(2) 不規則外力の統計的同定

平成 30(2018)年度は、多自由度系に作用する不規則外力の振幅と位相を同定することを目指したが、位相情報が平滑化されることがわかった。

令和元(2019)年度は、測定された不規則応答のデータからパワースペクトル、クロススペクトルを算出し、システムの自己相関関数、相互相関関数を利用して、不規則外力のパワースペクトル、クロススペクトルを同定する手法を構築した。そして数値シミュレーションによって妥当性を確認した。

令和 2(2020)年度は実験的に検証を行った。その結果、構造物の共振点付近では、作用する不規則外力の特徴を再現できたが、共振点から離れて応答倍率が低い周波数帯域では、同定精度が十分ではないことがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shozo Kawamura, Sho Miyagi, Tomohiko Ise, Masami Matsubara	4. 巻 6
2. 論文標題 Structural health monitoring of layered structure by strain measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.18-00390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 河村庄造, 平原直人, 伊勢智彦, 松原真己	4. 巻 84
2. 論文標題 機械・構造物に作用する外力の同定に関する研究（質量付加と特異値打ち切りによる適切化手法の提案）	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.18-00061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Takuo Henmi
2. 発表標題 Identification of statistical characteristics of random excitation acting on machines or structures
3. 学会等名 The 18th Asia Pacific Vibration Conference, Sydney, Australia（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuhiko Owa
2. 発表標題 Proposition of isolation table considering the long-period earthquake ground motion (Method of changing natural frequency of isolation system with additional spring)
3. 学会等名 The 18th Asia Pacific Vibration Conference, Sydney, Australia（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Go Kikuchi
2. 発表標題 Study of the effect of shape processing of a specimen on the modal properties
3. 学会等名 The 18th Asia Pacific Vibration Conference, Sydney, Australia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Miyagi
2. 発表標題 Structural health monitoring of layered structure by strain measurements
3. 学会等名 the 25th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮城 祥
2. 発表標題 ひずみ測定による層状構造物の健全性評価（実験による適用性の検証）
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018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
---------	---------