

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03946

研究課題名（和文）層間周波数応答関数を用い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 layered structure by the frequency response functions of layers

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：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。本研究では、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、（1）伝達率関数を利用した健全性評価手法、（2）外力同定を利用した健全性評価手法を構築した。さらに常時微振動を利用した健全性評価を実現するために必要な（3）不規則励振力の同定法も構築した。構築した手法を数値シミュレーションと実験で検証し、有効な手法であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
伝達率関数、外力同定、不規則振動などは複雑な数学的な理論であるが、それを実際の健全性評価に適用するため、数学的な扱いを工学的な考え方に当てはめて解釈し、有効に利用した。この技術が確立されることによって、現存する構造物の健全性評価が、従来とは異なる方法で実施できることになり、持続可能社会の実現に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Structural health monitoring (SHM) is a very important technology for the realization of a sustainable society. In this study, we focused on hierarchical structures (such as high-rise buildings) that have a large impact on society if they are damaged. We constructed a SHM method using the transmissibility function and the external force identification method. Furthermore, we developed a method for identifying random excitation force, which is necessary to realize SHM using ambient vibrations. The constructed method was verified through numerical simulations and experiments, and it was confirmed that it is an effective method.

研究分野：振動工学

キーワード：振動工学 健全性評価 簡易診断 伝達率関数 外力同定 不規則振動 モード解析

1. 研究開始当初の背景

機械や構造物の健全性評価 (Structural Health Monitoring) 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に基づく方法が自然である。具体的には変位や加速度の時刻歴データを適当な時間間隔で周波数分析して共振周波数を求め、正常状態からの共振周波数の変化を監視すれば異常発生の判断は可能である。しかし固有振動数は構造物全体の特性であり、局部的に異常が発生したとしても、いずれの測定点のデータから得られる共振周波数も全て同じように変化する。したがって、数多くのセンサーを配置しても、それらのデータだけでは、異常の発生場所は特定できない。一般的には、異常の発生を検出した後、精密診断で発生場所の特定を行う必要がある。

また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などでモデル化される場合が多い。そのような特性変化を求める手法として実験モード解析がある。しかし実験モード解析は構造物全体に対するモード特性を扱うので、健全性評価に必要な局所的な特性変化は、異常時のモード特性が再現できるように最適化手法を用いて同定する必要がある。

すなわち一般的な診断手法は、構造物全体の特性を得た後に、最適化手法などを用いて、局所的な特性の変化を同定するものであり、そのときに異常の発生場所と程度が同時にわかることになる。この方法は原理的には可能であるが、同定すべき変数が多いので、実構造物へ適用性する場合は、数学モデルや測定データの精度が同定結果に及ぼす影響に十分注意する必要がある。また実際の現場では、オフラインで精密な診断結果が得られることも重要であるが、異常発生位置が素早く特定できることも重要と言われている。

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、

(1) 伝達率関数を利用した健全性評価手法

(2) 外力同定を利用した健全性評価手法

を構築する。さらに常時微振動を利用した健全性評価を実現するために必要な

(3) 不規則励振力の同定法

を構築する。

(1)の手法では、特定の階層の加振あるいは地盤振動による各階層の振動を測定する。ある階層の応答を入力と見なし、その階層の一段上の階層の応答を出力と見なしたときの伝達率関数が、その階層の特性だけで評価できることを利用する手法であり、伝達率関数を常時監視するだけで、異常発生階層が特定できる。

(2)の手法では、定期的に対象物を既知の加振力で加振し、応答を測定する。異常が発生して構造物の特性が変化すると応答が変化したが、それを、正常な構造物に仮想外力が作用して応答が変化したと考え、仮想外力の作用位置から異常発生階層を特定する手法である。

(3)の手法は、健全性評価では地盤振動や風などによる常時微振動を利用することも多いが、そのような外力は不規則外力であるので、調和外力とは異なり、統計的な扱いが必要となる。そこで外力のパワースペクトルを精度よく同定する手法を構築するものである。

3. 研究の方法

(1) 伝達率関数を利用した健全性評価手法

診断対象として3層構造物を考え、それを3自由度系でモデル化する。正常時の質量、剛性の特性パラメータはあらかじめ十分な精度で同定されているものとする。

時間領域の運動方程式を構築し、周波数 ω の調和外力を仮定すると応答も同じ周波数を持つ調和関数で表現できる。それらの式から3つの応答 X_1 , X_2 , X_3 を求める。

本研究では、隣り合う階層の変位の伝達率関数 TF を考える。具体的に

$$TF_{32}(\omega) = X_3/X_2, \quad TF_{21}(\omega) = X_2/X_1$$

を計算すると、 $TF_{32}(\omega)$ に含まれる特性パラメータは m_3, k_3 のみであり、ばね定数の異常を検出することを目的とするので、 $TF_{32}(\omega)$ がピークとなる周波数 (以下、ピーク周波数) から k_3 の異常が判別できる。次に $TF_{21}(\omega)$ に含まれる新たな未知の特性パラメータは k_2 のみであり、 $TF_{21}(\omega)$ のピーク周波数から k_2 の異常が判別できる。もしこの時点で k_3, k_2 に異常が無いにもかかわらず、系全体の共振周波数が正常状態から変化していたら、 k_1 の異常が考えられる。そのため特性方程式に3つの共振周波数を順に代入し、 k_1 の値を求める。このような手順で、2つの伝達率関数のピーク周波数を常時監視することで、異常発生の検出を速やかに行うことができ、さらに異常の程度を同定することができる。

実験装置を想定した数値例と、実験によって提案手法の妥当性、適用性を検証する。

(2) 外力同定を利用した健全性評価手法

診断対象として5層構造物を考え、それを5自由度系でモデル化する。正常時の質量、剛性の特性パラメータはあらかじめ十分な精度で同定されているものとする。

時間領域の運動方程式を構築し、周波数 ω の調和外力を仮定すると応答も同じ周波数を持つ調和関数で表現でき、周波数領域の運動方程式を構築する。

実際の異常は剛性変化として現れることが多いので、異常発生によって剛性マトリックスが $[k_0] \rightarrow [k_0] + [\Delta k]$ の様に変化するとする。診断のために、正常時と同じ外力を作用させると応答が $\{X_0\} \rightarrow \{X_0\} + \{\Delta X\}$ と変化する。運動方程式上では、特性マトリックスが変化したので、診断のための外力を作用させると応答が変化したことになるが、それを、正常な特性マトリックスを有する対象物に、診断のための外力の他に仮想的に付加外力が作用したことによって応答が変化したとみることにもできる。仮想外力を同定し、測定応答を最も精度よく再現できる仮想外力の作用位置の特性マトリックスに変化がある(異常が発生している)と判断することができる。この手法では、全ての階層の応答を測定する必要はないが、異常発生階層が特定できた後で、別の方法で異常の程度を同定する必要がある。

実験装置を想定した数値例と、実験によって提案手法の妥当性、適用性を検証する。

(3) 不規則励振力の同定法

診断対象として3層構造物を考え、それを3自由度系でモデル化する。正常時の質量、剛性の特性パラメータはあらかじめ十分な精度で同定されているものとする。

時間領域の運動方程式を構築し、周波数 ω の調和外力を仮定すると応答も同じ周波数を持つ調和関数で表現でき、周波数領域の運動方程式が構築できる。階層構造物に風などの不規則外力が作用する場合を想定するので、応答も不規則応答を扱う必要がある。具体的には外力のスペクトルと応答のスペクトル、及び両者を関係づける周波数応答関数の関係式を用いる。このとき、パワースペクトルが実数であることや共役の関係を利用して、予め変数を減らすことによって逆問題の不適切性を低減する点に特徴がある。

実験装置を想定した数値例と、実験によって提案手法の妥当性、適用性を検証する。

4. 研究成果

(1) 伝達率関数を利用した健全性評価手法

研究成果の一例として、実験による適用性の検証結果を示す。

図1は実験装置であり、3層構造物の第1層を加振している。図2は異常が発生した際の伝達率関数の変化を示す。共振周波数、反共振周波数が変化しており、この変化量から、具体的な剛性の変化量を同定できる。



図1 第1層を加振する3層構造物

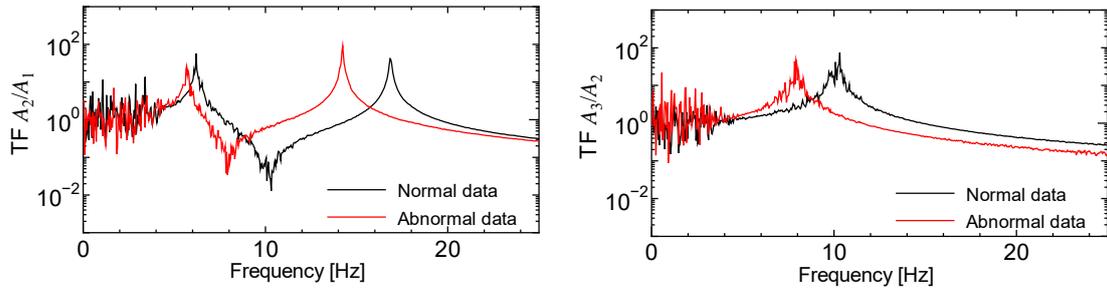


図2 正常時と異常時の伝達率関数の変化の一例

(2) 外力同定を利用した健全性評価手法

研究成果の一例として、実験による適用性の検証結果を示す。

図3は実験装置であり、5層構造物の第1層を加振している。図4は第1層に異常が発生した場合の異常発生階層の推定結果を示す。いずれの周波数においても、第1層の測定応答再現精度が最も高く、第1層に異常が発生していることを特定できる。



図3 第1層を加振する五層構造物

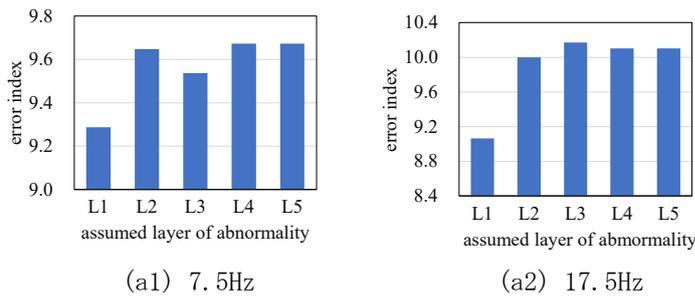


図4 第1層に異常が発生した場合の異常発生階層の推定結果

(3) 不規則励振力の同定法

研究成果の一例として、実験による適用性の検証結果を示す。

図5は実験装置であり、3層構造物の全ての階層を慣性型加振器で加振している。図6は作用させた不規則外力のパワースペクトルと同定結果を示す。十分な精度で同定できることがわかる。

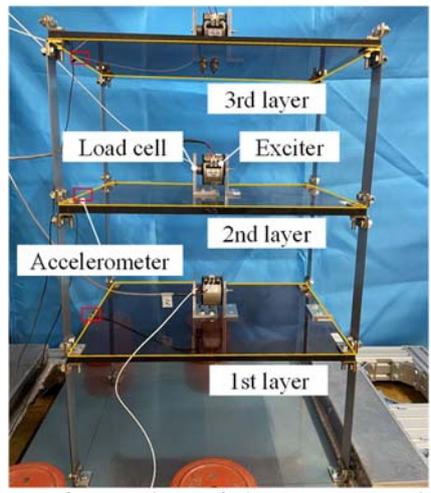


図5 全ての階層を加振する三層構造物

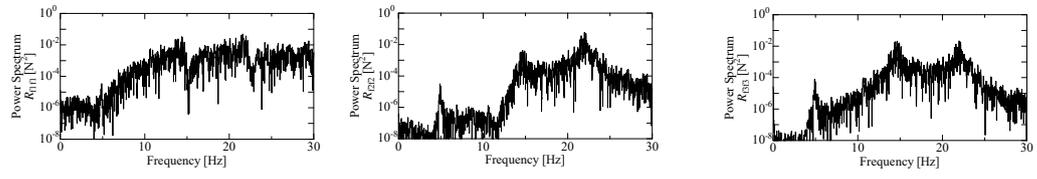


図6 (a) 作用させた不規則外力のパワースペクトル

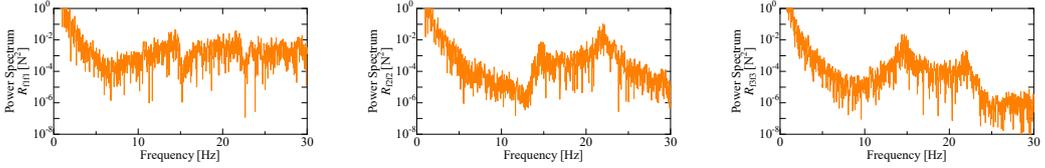


図6 (b) 同定された不規則外力のパワースペクトル

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 Shozo KAWAMURA, Sara ITO, Masami MATSUBARA and Daiki TAJIRI	4. 巻 10
2. 論文標題 Structural health monitoring for layered structure using a force identification approach	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.23-00091	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 河村庄造, 田中徹哉, 松原真己, 田尻大樹	4. 巻 89
2. 論文標題 階層構造物に作用する不規則励振力の同定に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.23-00012	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 Shozo KAWAMURA, Takenori YAMAGUCHI, Masami MATSUBARA, Daiki TAJIRI	4. 巻 9
2. 論文標題 Structural health monitoring for layered structures using transmissibility functions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	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/mej.22-00018	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中徹哉
2. 発表標題 階層構造物に作用する不規則励振力の同定
3. 学会等名 日本機械学会 D&D Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河村庄造
2. 発表標題 伝達率関数を用いた層状構造物の健全性評価
3. 学会等名 日本機械学会 D&D Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河村庄造
2. 発表標題 外力同定を援用した階層構造物の健全性評価
3. 学会等名 日本機械学会 D&D Conference 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河村庄造
2. 発表標題 階層構造物の健全性評価手法の比較と新しい手法の紹介
3. 学会等名 日本機械学会 東海支部第73期講演会
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
---------	---------