

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560577

研究課題名(和文)非線形性発現に着目した構造物の損傷検知手法の構築

研究課題名(英文)Development of a damage detection method for structures using non-linearity expression characteristics

研究代表者

佐々木 栄一(Sasaki, Eiichi)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40311659

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構造物のモニタリングにより得られる時系列データから、構造物の応答特性、構造物の非線形性の発現を検出し、どの部位に不具合、損傷が生じたのかを発生した時間とともに検出する手法を構築するため、入力と出力との間の関係に含まれる非線形性の変化を迅速に分析・評価できる、画期的で実用的な、新しいデータ分析手法およびDamage Indexを提案するとともに、その適用性について、地震応答シミュレーションおよび実大実験データを活用して検証した。また検討結果から、モニタリングシステムにおけるセンサ位置の決定方法等を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new dynamic damage detection method for structures was proposed by developing non-linearity index analyzed from time series data obtained by sensing systems. The new dynamic damage detection method enables us to know the damage location and the damage level promptly just after the data acquisition. In this study, the applicability of the method was verified using the damage simulation results of structures and real-scale test results. Using the new damage index, non-linearity index, the sensor location arrangements can be proposed for sensing systems.

研究分野：鋼構造学

キーワード：維持管理 モニタリング 異常検知 非線形性

1. 研究開始当初の背景

米国におけるトラス橋梁の崩落事故や、我が国におけるトラス主要部材の破断など世界各国で橋梁の壊滅的損傷が発生しており、公共構造物の安全性を問う事態となっている。特に、これらの壊滅的な損傷は、定期点検などのメンテナンスが実施されている中での事故であり、今後、同様の損傷を防止するため、点検手法の高精度化、高度化が不可欠とされ、研究開発が活発に進められている。しかしながら、現状の点検手法では、点検者の目視や診断が基本となっているため、見落としや客観性の欠如、目視できない部位への対応などの問題も指摘され、点検技術者の能力確保のために資格制度の導入が進められる一方、構造物に各種センサ(加速度計など)を設置し、そこから得られるデータを分析することで客観的な処理により不具合を検出しようというモニタリング技術開発の試みが米国や我が国をはじめ世界的な動きとして活発に進められている。

構造物のモニタリング技術開発のコンセプトとしては、構造物を「システム」として捉え、温度や風、地震などの自然環境、人間活動に伴う重交通などの作用を「入力」とし、それらの作用に対する構造物の応答を「出力」と考え、「入力」と「出力」の関係から、構造物の仕組み・内部の不具合・劣化をシステム同定しようとする考え方がベースとなっていると考えられる。

これまでモニタリング技術の開発においては、「入力」を正確に把握することが不可欠とされ、構造物がいかに過酷な使用環境におかれているのかを把握するため、重交通の実態を明らかにする車両重量分析手法(Weigh-in-Motion)の開発が進められてきた。一方、「出力」として加速度計などから得られる時系列データから、構造物および構造部材の振動特性(固有振動数や減衰率など)を分析し、剛性変化や損傷を検出しようとする試みも進められている。このような固有振動数等振動特性に基づく損傷検知手法は機械部品などの分野では一般的になりつつあるが、現状、橋梁などの構造物では早期の損傷検出の点で課題があり、新たなデータ分析手法の提案、技術開発が必要となっている。また、このようなモニタリングで取得される時系列データは、ときに、非常に膨大なデータ量となることから、構造物の不具合・劣化の発生や状況を容易に認識・分析できる指標(Damage Index)の提案が重要となると考えられる。さらには、地震時など突発的な事象の場合も構造物の損傷を検出できることが、モニタリングシステムが具備すべき機能であり、突発的な事態にも対応できるデータ処理方法、Damage Indexの提案が求められる。

このため、構造物等のモニタリングシステムから得られる時系列データに含まれる突発的な異常を検知する試みが始められてお

り、長期橋梁モニタリングデータを用いた検討も進められている。

K. Worden and G. R. Tomlinson が提案しているように、構造物の不具合を検出する方法として、「入力」と「出力」の関係に含まれる非線形性(Nonlinearity)を検出するという試みに注目が集まっている。研究代表者らもこの考え方を基に、実在曲線斜張橋の地震時加速度データから非線形性の有無を検出する手法の提案を試み、「入力」と「出力」から得られる周波数応答関数(FRF)のHilbert変換前後の変化から非線形性の程度を定量的に評価する「非線形量(Degree of Nonlinearity, DON)」という新しい指標を示した。しかしながら、現状、この「非線形量(DON)」は、入力地震動のエネルギーとの関係を検討するため、地震時全時刻の応答データから得られた周波数応答関数に対して全周波数領域での積分計算しており、平均化され、特定の時間に構造物に弾塑性変形などの非線形性が発現したといったことを捉えるには、感度が鈍いという問題がある。さらに、橋梁の場合、免震支承の挙動、部材の塑性化、構造的にそもそも含まれる非線形性(特に長大橋梁の場合)など、複数の要因に起因する非線形性が発現する可能性があり、非線形性要因の分析などを実現するには更なる工夫が必要な状況と考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、構造物のモニタリングから得られる時系列データから、構造物の応答特性、構造物の非線形性などを分析し、どの部位に不具合、損傷が生じたのかを発生した時間とともに検出する手法を構築するため、局所の変化に着目したデータ異常検出手法(指標D)の考え方と、入力と出力の関係に含まれる非線形性発現を評価する「非線形量(DON)」の考え方を組み合わせ、新たに時間を追って非線形量変化を評価できるデータ分析手法およびDamage Indexを提案することを目的に研究を実施する。

本研究では、地震時損傷を実際に受けた橋梁等を対象として、詳細な有限要素によるモデリングにより、免震支承の挙動、部材の弾塑性挙動等を考慮した地震時損傷シミュレーションを行って、新たなデータ分析手法およびDamage Indexの提案・改良を行うとともに、実大構造物実験データなどを用いて様々な構造物(鋼構造、コンクリート構造等)の地震時損傷の検出可能性の検討し、提案手法の妥当性を検証する。さらに、適切なセンサ配置の決定方法に対する提案の検討を行い、最終的にモニタリングシステムへの実装を目指すこととした。

3. 研究の方法

本研究では、構造物のモニタリングデータから入力と出力との間の関係に含まれる非線形性の発現・変化を迅速に分析・評価でき

る，新しいデータ分析手法および Damage Index を提案するため，局所的变化に着目したデータ異常検出手法と，入力と出力との間の関係に含まれる非線形性を評価する「非線形量 (DON)」の考え方を組み合わせたデータ分析プログラムの開発，複数の非線形要因を考慮すべく詳細なモデリングを行った実構造物の地震時損傷シミュレーションによる提案手法の有効性検証，実大構造物実験データに基づく検証，実際の地震時損傷を再現した橋梁モデルでの検証，センサ位置の提案に対する検討を実施するとともに，モニタリングシステムへの実装を目指す検討を行った。

これらの研究を以下のような方法・手順により実施した。

- 1) データ分析プログラムの開発 (テーマ)
- 2) 複数の非線形要因を有する橋梁の地震時損傷シミュレーションによる検証 (テーマ)
- 3) 実大構造物実験データに基づく検証 (テーマ)
- 4) 実際の地震時損傷を再現した橋梁モデルでの検証 (テーマ)
- 5) センサ位置の提案に対する検討 (テーマ)
- 6) モニタリングシステムへの実装 (テーマ)

4. 研究成果

本研究は，上記のような方法・手順により検討を進めたが，それぞれの検討の成果について以下に示す。

1) データ分析プログラムの開発 (テーマ)

研究代表者が検討してきた，局所的变化に着目したデータ異常検出手法の異常発生時刻検知という利点と，構造物の損傷に関する有用な情報となり得る入力と出力との間の周波数応答関数 (FRF) に含まれる非線形性を評価する「非線形量 (DON)」の考え方を組み合わせ，時系列データに対して時々刻々の DON 変化 (動的 DON) を分析可能なデータ分析プログラムを開発した。Matlab を用いたプログラム編集により実施して FRF の Hilbert 変換前後の変化を定量的に評価できるプログラムである。具体的には，時系列データに対する窓関数の適用と Hilbert 変換の組み合わせ，パラメータとして，窓の長さ，DON 計算対象とする振動数範囲などが検討対象とできるようプログラムを構築した。

2) 複数の非線形要因を有する橋梁の地震時損傷シミュレーション (テーマ)

構造物として，橋梁を取り上げ，免震支承，部材の弾塑性挙動といった複数の非線形性を有し，複雑な応答挙動，損傷を呈すると考えられる橋梁モデルを選定し，FEM 動的弾塑性解析により地震時損傷シミュレーションを実施し，各節点での加速度波形をセン

シングシステムで取得した加速度データと考へ，入力地震波と応答加速度の関係から動的な DON 分析を行い，DON の変化と，それぞれの非線形性要因の実際の挙動との関係について検討し，それぞれの非線形要因の検出方法として，入力と出力として用いるセンサの位置などを検討し，グローバルは損傷の場合とローカルな損傷の場合で着目するセンサを変えることで，複数の非線形要因の検出が可能であることを示した。

3) 実大構造物実験データに基づく検証 (テーマ)

我が国においては，独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター E-Defence において実大構造物が多く行われ，その実験データは申請により利用可能となっているものがある。実験の対象となった構造物は，コンクリート構造，鉄骨構造など複数の材料，複数の構造形式からなっており，これらに対して，提案するデータ分析プログラム，Damage Index (動的 DON 指標) を適用することにより，目視困難なものを目視可能なものも含め，非線形性の発現が検出できるかどうかを確認することとした。その結果，コンクリート橋脚のひび割れ過程，損傷を非線形の発現の面からセンシングできることを示した。また，4 階建ての鉄骨構造の建物の崩壊実験では，柱が降伏する過程，崩壊が生じるタイミングなどを非線形発現の観点から検知できることを示した。さらには，2) で述べたようにデータの組み合わせにより，ローカルな損傷の検出が可能で，どこで損傷が発生したのかを分析できる可能性が示された。

4) 実際の地震時損傷を再現した橋梁モデルでの検証 (テーマ)

上記 2) での検討に引き続き，実際に発生した支承損傷等の地震時損傷を再現した橋梁モデルでの解析データに基づき，提案したデータ分析手法による損傷検知の可能性を検証した。その結果，上記 2) 3) と同様に，入力および出力に用いるセンサ位置を選定することで損傷の発生したタイミング，損傷位置等を検出できることを示した。

5) センサ位置の提案に対する検討 (テーマ)

上記，2)，3) および 4) の構造物の地震時シミュレーション，E-Defence データでの検証の結果，グローバルな損傷，例えば，支承の損傷による非線形性は，橋梁のどの場所にセンサを設置しても動的 DON として現れ検出できることを確認し，一方，ローカルな損傷，例えば部材の弾塑性挙動はセンサとセンサのデータ間の非線形性発現に着目することでその現象の発生位置や発生時刻などが検出できることを示した。これらのことから，想定される損傷に応じてセンサを配置し，

どの位置のセンサとセンサを組み合わせて分析すればよいのか、モニタリングシステムの設計・計画のために有益な方法論が提示できたと考える。すなわち、本研究での提案データ分析手法に基づいて、改めて加速度計などの有効な配置が提案できる。

6) モニタリングシステムへの実装(テーマ)

本研究で提案したデータ分析手法を、これまでに申請者が開発してきた構造物のモニタリングシステムへの実装し、データ分析を行って、異常検知機能として追加した。

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0件)

[学会発表](計4件)

佐々木栄二: 橋梁を対象としたセンシングシステムの開発と適用, 振動技術展, 2015. パシフィコ横浜(神奈川県, 横浜市)

佐々木栄一: 橋梁を対象としたセンシングソリューションの検討, 計測自動制御学会, 2014. 国際展示場(東京都, 江東区)

Eiichi Sasaki, Nguyen Khac Thanh, Navickas Rokas and Minesawa George: An anomalies detection method based on nonlinearity expression for SHM systems, The 12th Japan-Korea Joint Symposium on Steel Bridges, 2013. 琉球大学(沖縄県, 西原町)

Eiichi Sasaki, Nguyen Khac Thanh: Development of an anomalies detection method based on nonlinearity expression, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2013. 東京工業大学(東京都, 目黒区)

[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:
出願年月日:
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

佐々木 栄一 (Sasaki, Eiichi)
東京工業大学理工学研究科・准教授
研究者番号: 40311659

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: