

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02229

研究課題名（和文）不確実性感度に基づくデータ同化で構造状態の不確かさを低減する橋梁地震リスク解析

研究課題名（英文）Uncertainty quantification considering global sensitivity for seismic risk analysis of existing bridge structural systems

研究代表者

西尾 真由子（Nishio, Mayuko）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：00586795

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：道路交通網を形成する高架橋などの既存橋梁構造システムに対して、経年劣化や損傷を考慮する地震リスク評価が適切な維持管理と防災・減災の計画策定に必要となる。本研究では、劣化損傷状態と地震動特性に依存する「不確実性感度」の高いパラメータを抽出して非適切性を回避しながら、高い信頼性と精度で事後分布を推定するデータ同化を示し、主に腐食損傷を与えた鋼部材供試体を用いた画像ひずみ計測でのデータ同化耐荷性能解析でその有効性を示した。さらに、多数構成部材と地震動入力の高次元パラメータ不確実性を扱う構造信頼性解析のための機械学習代替モデリング法を構築し、道路高架橋システムへの地震脆弱性解析に適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

データ同化において不確実性感度を考慮することで適切なモデルパラメータ事後分布が推定できることを示したこと、そして地震脆弱性解析の計算コストを大幅に低減する機械学習を活用した代替モデル法を構築した成果は学術的意義が大きい。また、インフラ構造物運用現場において、運用者が最も知りたい保有性能を得るためのデータ活用法と計算手法を示した社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：Seismic risk assessment considering deterioration and damage is required for appropriate maintenance and planning for disaster prevention and mitigation of existing bridge systems that form transportation networks. This study presented the data assimilation that derives posterior distributions avoiding the ill-posed condition by extracting parameters with high "sensitivity to uncertainty" that depends on damage conditions and characteristics of input earthquake motions. Its effectiveness was shown by the experimental study that is target to the data assimilation of load capacity analysis of a steel member specimen with locally introduced corrosion using vision-based strain sensing. In addition, the surrogate modeling method for structural reliability analysis dealing with high-dimensional uncertainties of structural properties and seismic motions was constructed. The applicability was shown by performing the seismic system fragility analysis of an elevated bridge structure.

研究分野：構造工学

キーワード：不確実性定量化 事後分布 非線形構造振動 構造信頼性 画像計測 地震脆弱性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

都市部高架橋や高速道路など重要交通網を形成する橋梁構造システムでは、地震発生時の機能確保が社会インフラ全体の防災・減災そして速やかな復旧のために重要である。しかし既存橋梁では老朽化による劣化損傷によって大中規模の地震で設計時に想定しなかった被害が生じることがある。これは、局所的な部材損傷が地震荷重に対する耐荷力を低下させること、また劣化による境界条件や物性値の変化が構造全体系の振動特性を変化させることが要因である。しかし実構造物では目視点検などで劣化損傷の有無は捉えられても、その損傷程度を定量的に考慮して保有性能を評価することは難しい。これは、劣化損傷による構造特性の変化に大きな「不確かさ」があるためである。

研究代表者は、構造モニタリングデータを用いて劣化損傷による既存状態の「不確かさ」をモデルパラメータのベイズ事後分布で低減する構造解析モデルを構築し、保有性能評価に用いるデータ同化法の確立に取り組んできていた。本研究はそれを、地震非線形応答解析のモデルパラメータ事後分布推定データ同化に拡張し、既存橋梁の地震リスク解析へと展開することを目的とした。近年は既存橋梁で維持管理と連動して防災減災を考える必要性が認識され、損傷を表した構造解析モデルを構築して、地震動に対する非線形動的解析の応答出力から劣化損傷が耐震性能に与える影響を明らかにする取り組みは数多くあった。しかし、対象橋梁ごとの構造状態を構造モニタリングで考慮して地震リスク評価を行う逆解析的なアプローチはまだ取り組みが少なかった。近年センシング技術の進歩により比較的低コストで構造モニタリングが可能となっている中で、インフラ運用現場でのデータ活用をより進めるには、運用者が最も知りたい保有性能の導出を示す必要があり、そのためデータ活用法と性能解析法を示すことが求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、構造モニタリングを活用する非線形地震応答解析のモデルパラメータ事後分布推定によるデータ同化を示し、既存橋梁の地震リスク評価への有効性を実証することとした。特に、劣化損傷状態と地震動特性に依存する「不確定性感度」の高いパラメータを抽出して推定問題の非適切性を回避しながら高い信頼性と精度で事後分布を得るデータ同化を着想し、その有効性を示すことを目的とした。具体的には、次の(A)-(C)の検証を進めた。

- (A) 劣化損傷状態と地震動特性に依存する「不確定性感度」の高いパラメータを抽出し、非適切性を回避して事後分布を推定するデータ同化法を示す。
- (B) 構造振動模型や部材模型を用いる実験で構築した推定法の非適切性回避の効果を示し、不確定性感度を考慮してパラメータ事後分布を高い精度と信頼性で推定できることを示す。
- (C) 構造状態をモニタリングデータで得る事後分布考慮するデータ同化地震リスク解析を示し、構造システムの地震脆弱性を既存構造物システムに対して検証する有効性を示す。

3. 研究の方法

(A)-(C)の3つの検証項目それぞれについて、以下のように検証を行った。

(A)(B)については、主に実験検証によって研究を進めた。局所的な腐食損傷を導入する平板鋼部材の引張耐荷力評価を対象に事後分布推定への検証を実施した。ここでは「不確定性感度」に基づく計測点配置での非適切性回避効果を検証するため、画像で得る分布的なひずみデータを用いて、計測点の数や配置、データ精度の影響を調べた。また、地震リスク評価でもとめられる

非線形構造振動解析での不確定パラメータ事後分布推定を念頭に、動画による非線形構造振動の計測および評価法の構築のため、振動台実験を実施した。

(C)では、本研究で検証対象とし事前から無線加速度モニタリングを行っていた実構造物の免震道路高架橋で非線形振動解析の数値モデルを構築し、従来の構成部材ごとのフラジリティを導出するアプローチではなく、構造物全体系のシステムフラジリティを導出して地震リスクを検証した。さらに、多数の構成部材特性とその損傷状態に関する不確定パラメータと入力地震動特性の不確定性と高次元の不確定性を考慮できる非線形構造振動解析の機械学習代替モデリング法を構築し、それを適用して、対象とした免震道路高架橋の詳細なシステムフラジリティ解析を実施した。

4. 研究成果

研究期間を通じて、(A)-(C)それぞれの検証項目について、以下の成果を得た。

(A)(B)について、腐食損傷を有する平板鋼部材の耐荷力解析を対象とした不確定パラメータ事後分布推定の検証では、画像計測によるひずみデータの量と精度に対する事後分布での不確定性低減度との関係を明らかにし、「不確定性感度」に基づく計測点配置で効果的に非適切性回避が可能となることを示した。その上で、不確定性が効果的に低減された事後分布を用いて構造状態を適切に考慮するデータ同化耐荷力解析を示した。また、非線形構造振動解析における不確定パラメータ事後分布推定を念頭に、非線形構造振動における非線形挙動の発現とその評価を画像から行う手法を構築し、建物せん断モデルの振動台実験を実施して、その有効性を示した。

(C)については、対象とした免震道路高架橋について、非線形地震応答解析の数値解析モデルを構築して、システムフラジリティ解析を行った。従来の構成部材ごとのフラジリティを導出するアプローチに対して、構造物全体系に対するシステムフラジリティを導出して地震リスクを検討する有効性を示した。ただし、従来のフラジリティ解析法では対象構造物の非線形解析を繰り返し実施する必要があるため、計算コストの面で確率論的に妥当に考慮できる不確定パラメータの数に制約が生じるという課題を認識した。そこで本研究では、高次元不確定性を扱う非線形解析への代替モデリング法としてディープカーネルに基づく手法を構築したことで、多数構成部材のパラメータ不確定性と入力地震動の不確定性を同時に扱う道路高架橋のシステムフラジリティ解析を実施できた。この代替モデルは「不確定性感度」を同時に推定することで代替モデルの妥当性を議論できる説明性を有するうえ、構造全体系が限界状態に至った際の破壊モードを確率的に評価できる。このシステムフラジリティ解析から、構造全体系の地震リスク評価のための構造モニタリングデータ取得に関する考察も得ることができた。

データ同化において「不確定性感度」を考慮することで適切なモデルパラメータ事後分布が推定できることを示したことで、そして地震フラジリティ解析の計算コストを大幅に低減する機械学習を活用した代替モデル法を構築したことで、インフラ構造物運用現場で運用者が最も知りたい保有性能を得るためのデータ活用法と計算手法を示す成果となった。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名 SAIDA Taisei, NISHIO Mayuko | 4. 巻 77 |
| 2. 論文標題 CONSTRUCTION OF GAUSSIAN PROCESS REGRESSION SURROGATE MODEL FOR NONLINEAR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS USING ARD KERNEL | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM)) | 6. 最初と最後の頁 I_93 ~ I_104 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_93 | 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 Ho Hoai, Nishio Mayuko | 4. 巻 225 |
| 2. 論文標題 Evaluation of dynamic responses of bridges considering traffic flow and surface roughness | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Engineering Structures | 6. 最初と最後の頁 111256 ~ 111256 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2020.111256 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Mayuko Nishio |
| 2. 発表標題 Capacity evaluation of existing bridges by integration of SHM data and numerical analysis |
| 3. 学会等名 11th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-11) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Rashid Muhamad, Mayuko Nishio |
| 2. 発表標題 System Fragility Analysis of a Geometrically Complex Bridge System for Seismic Risk Evaluation of Existing Highway Bridge Network |
| 3. 学会等名 8th World Conference on Structural Control and Monitoring (8WCSCM) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 才田大聖, 西尾真由子 |
| 2. 発表標題 ARDカーネルによる非線形地震応答解析のガウス過程回帰代替モデル構築 |
| 3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Rashid Muhammad, Mayuko Nishio |
| 2. 発表標題 FINITE ELEMENT ANALYSIS OF AN EXISTING SEISMICALLY ISOLATED BRIDGE STRUCTURE |
| 3. 学会等名 76th JSCE Annual meeting (The 23rd International Summer Symposium) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤開, 西尾真由子 |
| 2. 発表標題 局所損傷を有する構造部材の性能評価に向けた画像ひずみの適用性検討 |
| 3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Nishio, M., Shakya, M., Tran, T. |
| 2. 発表標題 Seismic risk analysis of existing bridges considering structural condition uncertainties |
| 3. 学会等名 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Rashid Muhammad, Mayuko Nishio |
| 2. 発表標題 Dynamic response evaluation of an existing bridge structure based on Finite Element Modelling |
| 3. 学会等名 9th Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES 2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 サキヤ摩耶, 西尾真由子 |
| 2. 発表標題 地震発生後の車両通行性に着目した既存橋梁システムのフラジリティ解析 |
| 3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 才田大聖, 西尾真由子 |
| 2. 発表標題 ARDカーネルによる非線形地震応答解析のガウス過程回帰代替モデル構築 |
| 3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Nishio, M., Shakya, M., Tran, T. |
| 2. 発表標題 Seismic risk analysis of existing bridges considering structural condition uncertainties |
| 3. 学会等名 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 藤野 陽三、日本鋼構造協会、池田 芳樹、阿部 雅人、伊山 潤、大島 義信、鹿嶋 俊英、日下 彰宏、楠 浩一、倉田 真宏、白石 理人、鈴木 誠、竹谷 晃一、長山 智則、西尾 真由子、野村 泰稔、松本 泰尚、 村山 英晶 | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 コロナ社 | 5. 総ページ数 306 |
| 3. 書名 構造物のモニタリング技術 | |

〔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 |
|---------|---------|
|---------|---------|