

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：12102
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2017～2020
課題番号：17H04934
研究課題名（和文）構造センシングを活用したモデル不確定性を低減する橋梁性能の高効率評価システム構築

研究課題名（英文）Construction of a high-efficiency performance evaluation system for existing bridges by the uncertainty quantification of model parameters using structural sensing data

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） 14,800,000円

研究成果の概要（和文）：持続可能な既存インフラ構造物の運用には、劣化損傷状態など実際の構造状態を考慮して保有性能を導出し、定量的に検証および比較することで、老朽化対策と地震などの災害対策を行っていくことが有効である。本研究では、加速度やひずみなどのセンシングで性能解析に用いる構造解析モデルパラメータの構造状態に関する不確定性を定量化する、ベイズ事後分布推定を示した。そして、複数の実橋梁で計測を実施し、構造状態を考慮する交通荷重性能評価や地震リスク評価につながるデータ取得を実証した。さらに、事後分布を用いる橋梁性能計算を、機械学習のスパースモデリングによる代替モデル構築で効率化できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
構造性能解析のモデルパラメータ事後分布推定に適切なデータ取得を行うために逆解析での重要な検討である観測計画に関する成果を得たこと、そして実橋梁のセンシングと数値モデルでその有効性を検証できた成果は、データ同化研究において学術的意義が大きい。また本研究の成果によって、インフラ構造物の維持管理に有用となる性能指標を導出できることを示した点で、センシングとデータ活用の意義と貢献を具体的に示せた点で社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：For future sustainable operations of existing civil infrastructures, it will be effective to take measures against risks both due to aging and disasters by quantitatively evaluating the current performance in considerations of actual structural conditions. This study showed the inference of Bayesian posterior distributions that quantifies the uncertainties of structural parameters of the numerical model for the performance analysis under the current structural conditions, by the data acquisition using acceleration or strain sensors. The measurements on multiple actual bridges were also conducted, and the data acquisition that could lead to the traffic load performance evaluation and the seismic risk evaluation were also demonstrated. Furthermore, it was shown that the computational cost of the Monte-Carlo structural reliability calculation using posterior distributions can be effectively reduced by the surrogate model by applying the Lasso sparse modeling method.

研究分野：構造工学

キーワード：データ同化 リンク 構造モニタリング ベイズ推定 構造信頼性 性能評価 地震リスク解析 スパースモデ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

既存橋梁を戦略的な意思決定のもと運用していくことが求められている。本研究で主に対象とする主要一般道路の中小規模橋梁は、国内およそ 70 万橋梁の約 2 割をしめ、人々の日常生活にも物流にも、そして災害時にも、重要な交通網を形成している。国や自治体の管理者は、老朽化対策の補修補強と、頻発する地震に備えた確実な耐震補強とを、厳しい財政的・人的コスト制約の中で優先順位を意思決定しながら実施している。この意思決定を難しくしているのが、橋梁が満たすべき「性能」をその時点でどれだけ確保できているのか、目視などにより部材ごとの損傷度を把握する点検のみでは評価できず、判断材料が不足している点である。既存橋梁がその時点で保有する「性能」を定量的にもとめられれば、意思決定を支援する有用な情報となる。

また近年、道路橋示方書を含め国内外の設計基準で導入が進む「性能照査型設計」とともに、「性能照査型維持管理」が提唱されている。前者は、設計橋梁が満たすべき要求性能のみを提示して照査する設計法で、後者は既存橋梁の実際の荷重や構造状態に対する保有性能を照査して、運用に用いることを考える。ただし既存橋梁の性能照査では特に、劣化損傷などによる構造状態の不確定性を考慮する必要があり、その具体的で有効な方法が求められていた。

2. 研究の目的

本研究は、センシングを活用して構造状態の不確定性をモデルパラメータのベイズ事後分布で表す構造解析モデル構築を確立し、それを橋梁性能評価に用いる有効性を示すことを目的とした。高効率モンテカルロ性能計算を実現し、複数橋梁で構造信頼性指標を比較して、橋梁運用での戦略的な意思決定を支援するシステム構築を目指し、具体的に以下の 3 つの検証項目を柱として、研究を実施した。

- (A) 評価性能に応じた橋梁の劣化損傷の妥当なモデル化を明らかにし、そのモデルパラメータベイズ事後分布推定のための最適観測計画を逆解析の不適切回避の観点から導出する。
- (B) 実橋梁計測で事後分布推定での最適観測計画の妥当性を示す。
- (C) モンテカルロ構造信頼性計算を高効率で実施する代替モデル構築の有効性を実証する。

3. 研究の方法

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) 特に桁端部での腐食損傷が問題となっている鋼鈹桁橋を対象として、有限要素 (FE) モデルを用いる解析検証で、評価性能に応じたモデルパラメータ事後分布推定のための最適観測計画の検討を実施した。腐食による部材断面欠損や可動部材の固着が、活荷重性能 (交通荷重への性能) の照査に用いる応力や変位に与える影響を調べた上で、不確定モデルパラメータの計測値や照査応答への感度を分散分析によって整理し、適切な事後分布推定に有効な計測について考察した。同様に、非線形時刻歴応答解析が必要となる地震性能解析でのモデルパラメータ事後分布推定を検証するため、道路橋耐震設計で検証されている標準的な免震橋梁の橋脚モデルを対象として、入力地震動の強さや周波数特性で異なるモデルパラメータ感度を考慮する方法を検討した。
- (B) 複数の実橋梁で無線加速度センサを用いた活荷重応答 (車両通過による応答) および地震時応答のモニタリングを実施した。地震応答モニタリングは、インターネットからデータをダウンロードできるシステムを構築し、現在でもデータ取得は実施可能である。そして同時に、

対象橋梁の地震応答解析モデルを実際の耐震設計計算書に基づいて構築し、複数の損傷シナリオが考えられる中でのフラジリティ解析を可能とした。そして、地震リスク解析のために、それぞれの対象橋梁地点で地盤データからハザード評価を実施した。

- (C) 実構造物をモデル化して行う性能評価解析では不確定性を考慮するモデルパラメータの数が多くなるが、評価する性能に関する構造解析出力に感度をもつパラメータは、その中の一部であることが多い。そこで本研究では、近年、機械学習分野で注目されるスパースモデリングの Lasso 回帰に着目し、(A)の検証で用いた鋼鈹桁橋の構造信頼性解析を対象として、性能解析の計算負荷低減における代替モデル構築の有効性を示す検証を行った。

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) 鋼鈹桁橋の桁端部腐食部による局所的な変状を表した FE モデルの物性値や境界条件のパラメータについて、その事後分布推定のための最適観測計画を分散分析で検証した。腐食による部材断面欠損や可動部材の固着が、活荷重性能（交通荷重への性能）の照査に用いる応力や変位に与える影響を調べた上で、不確定モデルパラメータの計測値や照査応答への感度を分散分析によって整理し、桁端部近傍でのひずみ分布を正規化して用いることが、適切な事後分布推定に有効であることを示した。さらに、この結果をうけて、適切なひずみデータ取得を簡便に可能とする方法として画像によるひずみ分布の適用性を検討した。境界条件を変更できる梁供試体を用いて、桁端部での変状によるひずみ分布の変化を画像ひずみ計測で捉えられることを示し、事後分布推定のためのデータとしての適用可能性を示した。同様に、道路橋耐震設計で検証されている標準的な免震橋梁の橋脚モデルを対象として、非線形時刻歴応答解析が必要となる地震性能解析でのモデルパラメータ事後分布推定を検証した。その結果、入力地震動の強さや周波数特性で異なる計測応答へのモデルパラメータ不確定性の寄与度、すなわちグローバル感度に基づく事後分布推定結果の信頼度認識の有効性を示した。

(B) 研究期間を通じて複数の実橋梁で無線加速度センサを用いた活荷重応答（車両通過による応答）および地震時応答のモニタリングを実施した。まず、活荷重応答計測で取得した振動データから、橋梁への入力として性能評価にも管理運用にも用いられる総交通量・大型車交通量の推定を可能とした。地震応答モニタリングでは、地盤種別の異なる箇所にある3橋を選定して、インターネットから小中規模地震での橋梁振動応答データを取得できるシステムを構築した。その上で、対象橋梁の地震応答解析モデルを実際の耐震設計計算書に基づいて構築し、複数の損傷シナリオが考えられる中でのフラジリティ解析を可能とした。構築した数値モデルと地震応答データの比較による、地震時刻歴応答解析の妥当性検証を実施し、その上で、照査する性能として大中規模地震発生後の車両通行性に着目し、構造の劣化損傷を考慮するフラジリティ解析の有効性を示した。また各対象橋梁地点でのハザード評価も実施し、データ同化による既存構造物の地震リスク解析への道筋を得た。

(C) 局所的な腐食を有する鋼鈹桁橋の交通荷重耐荷性能を評価するため、事後分布を用いるモンテカルロ構造信頼性計算に対して、Lasso 回帰によるスパース代替モデル構築を行った。Lasso 回帰によるパラメータ自動抽出性で桁端部損傷の影響を適切に考慮でき、その上で計算負荷を大きく低減できることを示した。目的応答への感度が高いパラメータをスパースに自動抽出し、説明性を有しながら高効率化する手法として、Lasso 回帰だけでなく非線形解析への適用も可能な

ガウス過程回帰での検討につなげることができた。

以上の研究成果より、センシングを活用して構造状態の不確定性をモデルパラメータの事後分布で表す構造解析モデル構築を示し、またそれを用いる橋梁性能評価の効率化について一定の成果を得ることができた。

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 サキヤ摩耶, 西尾真由子, 藤井浩子	4. 巻 19
2. 論文標題 構造パラメータ不確定性を考慮したフラジリティ解析とハザード評価に基づく免震橋脚の地震リスク解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 6_214 ~ 6_224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5610/jaee.19.6_214	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 西尾 真由子, 三浦 正樹, 珠玖 隆行	4. 巻 74
2. 論文標題 スパースモデリングによる既存橋梁の構造信頼性計算のための代替モデル構築	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2	6. 最初と最後の頁 I_125 ~ I_136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.74.I_125	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 Wattana Kaiwan, Nishio Mayuko	4. 巻 7
2. 論文標題 Application of a regression model for predicting traffic volume from dynamic monitoring data to the bridge safety evaluation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Civil Structural Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 429 ~ 443
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13349-017-0234-7	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12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Saravanan. T.J., Nishio. M., Suzuki. T.
2. 発表標題 Computer vision based in-plane strain field monitoring for local damage identification in structural members
3. 学会等名 The 12th International Workshop on Structural Health Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Nishio, M., Saravanan. T.J., Matsushima, F.
2 . 発表標題 Data acquisition for structural reliability analysis of corroded steel plate-girder bridges
3 . 学会等名 9th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ho, H., Nishio, M.
2 . 発表標題 Dynamic impact factor of steel box girder bridge under random traffic flow and surface roughness
3 . 学会等名 9th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Nishio, M., Shuku, T.
2 . 発表標題 Sparse surrogate modeling for structural reliability analysis of existing bridges using posterior distributions of model parameters
3 . 学会等名 Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM) 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tran, T., Nishio, M.
2 . 発表標題 Bayesian posterior distribution uncertainty of model parameters considering varying input seismic characteristics
3 . 学会等名 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Tran, T., Nishio, M.
2. 発表標題 Bayesian posterior distributions of nonlinear model parameters by using varying seismic responses
3. 学会等名 Engineering Mechanics Institute Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 サキヤ摩耶, 西尾真由子, 藤井浩子
2. 発表標題 構造パラメータ不確定性を考慮したフラジリティ解析とハザード評価に基づく免震橋脚の地震リスク解析
3. 学会等名 第15回地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nishio, M., Kuroda, R.
2. 発表標題 Structural reliability analysis of existing steel plate-girder bridges using posterior distributions of model parameters estimated by dynamic monitoring data
3. 学会等名 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wattana, K., Nishio, M.
2. 発表標題 Construction of a traffic estimation model using dynamic response features extracted from SHM data in a cable-stayed bridge
3. 学会等名 X International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tran, T., Nishio, M.
2. 発表標題 Variance-based sensitivity analysis considering parameter uncertainties in modelling seismic response of a building structure
3. 学会等名 12th International Conference on Structural Safety & Reliability (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 栗栖雄一, 西尾真由子
2. 発表標題 橋梁振動モニタリングデータの機械学習への適用による交通量推定と性能照査への展開
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三浦正樹, 西尾真由子, 珠玖隆行
2. 発表標題 スパースモデリングによる既存橋梁の構造性能計算のための代替モデル構築
3. 学会等名 第21回応用力学シンポジウム
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
---------	---------