

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：12701
 研究種目：研究活動スタート支援
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22860016
 研究課題名（和文）モデル妥当性を保障する構造同定定式化とそれを用いた光ファイバ社会基盤モニタリング
 研究課題名（英文）Structural system identification with the consideration of model validity by taking advantage of data from fiber-optic sensors
 研究代表者
 西尾 真由子（NISHIO MAYUKO）
 横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授
 研究者番号：00586795

研究成果の概要（和文）：

本研究では、光ファイバセンサが多様なデータ取得が可能であるという、他のセンサにはない特長をもつことを生かし、特に境界条件に着目して、数理モデルの妥当性を考慮した構造ヘルスマニタリングを可能とすることを目的とした。実験・解析・現場計測による検証から、光ファイバセンサによる多様なデータ取得の実証とデータ特性把握、分布ひずみデータの形状解析による境界条件変化検知法の構築、ベイズ推定によるモデル妥当性評価とモデルキャリブレーション法に関する基礎検討が行われ、それぞれにおいて有効性が示された。

研究成果の概要（英文）：

This study was for the purpose of realizing a structural health monitoring (SHM) that could take into account the validity of numerical models by taking advantage of the fiber-optic sensor, which enable the multiple and multivariate data acquisitions, e.g., static and dynamic strain data acquisition using a same optical fiber. From results of the experimental and analytical verifications, and the field measurements, the possibility of multiple and multivariate data acquisitions and their error characteristics, the availability of the constructed boundary condition monitoring algorithm that was realized by the feature extraction of distributed strain data from the fiber-optic sensor, and the basic effectiveness of the Bayesian inference based model calibration method were successfully shown.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,130,000	339,000	1,469,000
2011 年度	0	0	0
2012 年度	1,040,000	312,000	1,352,000
年度			
年度			
総計	2,170,000	651,000	2,821,000

研究分野：土木工学・構造工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：構造ヘルスマニタリング・光ファイバセンサ・システム同定・有限要素モデル

1. 研究開始当初の背景

橋梁を中心とする社会基盤構造物では、経年劣化に伴う事故が近年多発している。また老朽化が進む構造物が増加しており、そのメンテナンスに膨大な費用と労力が必要とされていることも、近年の社会基盤構造物運用において無視できない問題となっている。重篤な事故を未然に防ぎ、合理的な維持管理を行うために、構造健全性モニタリングを行うことの重要性は広く認知されているところであり、国内外で数多くの研究が行われている。構造健全性モニタリングは、構造物にさまざまなセンサを取り付け、取得されるデータから構造物の状態を定量的、客観的に把握するものである。社会基盤構造物では主に、振動データ、ひずみ・変位データが用いられ、振動特性（モード特性や減衰）、変位分布、数値モデルに対するシステム同定など、さまざまな「推定・同定」から、構造状態の定量的な評価を行うものとするものが主流である。

このような中で近年、光ファイバセンサでは同一の光ファイバにて、多様なデータ取得を分布的に行うことが可能となっている。例えば、一本の光ファイバを構造物に貼り付けておき、適宜計測器の設定を変えることで、ファイバに沿った静的な分布ひずみデータと、多点での動的データの取得、といったことができる。本研究では光ファイバセンサのこの特長に着目し、選択的データ取得によって『数値モデルの不確定性』を考慮できる、構造同定システムの構築が可能と考えた。同定問題では一般的に、対象となるパラメータと計測値の関係式、すなわち数理モデルが必要となる。しかし、数十年も実環境で供用される社会基盤構造物は、経年変化（劣化）によって、数理モデル自体が実構造物に対して不確定に変化してしまうことが考えられる。この点について橋梁で特に問題となるのが、境界条件の変化である。境界条件は「支承」によって与えられるが、可動部を持つ部材であるため、不確定性の高い機能不全が生じてしまうことがある。この変化を把握して、

数値モデルに定量的に反映させることは難しい。しかし、境界条件に不確定性が存在している場合は、ヘルスマモニタリングで共に対象となる、橋梁の桁や床版など他の部材の状態を、独立に評価することが難しい。しかしこれは、従来のモニタリングが、加速度振動データか静的ひずみデータというように、単一のデータ取得を考えているためである。光ファイバセンサで得られる多様なデータを用いることで、数理モデルの妥当性について評価をしながら、構造状態のモニタリングを行うことが可能となるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究では、光ファイバセンサが多様なデータ取得が可能であるという、他のセンサにはない特長をもつことを生かし、特に境界条件に着目して、数理モデルの妥当性を考慮した構造ヘルスマモニタリング手法を構築することを目的とした。このために、主に次の4点について検証を行った。

- (1) 光ファイバセンサによる多様なデータ取得の実証とデータ特性把握
- (2) 不確定モデルパラメータの挙動評価に基づく選択的データ取得手法の基礎的検討
- (3) 分布ひずみデータの特徴抽出による境界条件変化評価法の構築と有効性検討
- (4) モデル妥当性評価法とモデルキャリブレーション法に関する基礎検討

3. 研究の方法

本研究では、実験による検証、数値解析による検証、そして実橋梁の現場計測による検証を合わせて行った。実験では、境界条件を変化させることが可能な梁模型を作成し、静的載荷試験で光ファイバひずみデータ取得、振動試験で加速度データ取得を行い、検証に用いた。また、実橋梁での光ファイバ計測・振動試験もを行い、得られたデータを用いて同定法の検証や計測誤差特性の把握を行った。

さらに、梁模型や検証に用いた実橋梁の有限要素解析を行い検証に用いたほか、構造同定法やモデルキャリブレーション法の実行に際しても、コンピューターでの数値計算が大きな役割を果たした。

4. 研究成果

『(1) 光ファイバセンサによる多様なデータ取得の実証とデータ特性把握』および『(2) 不確定モデルパラメータの挙動評価に基づく選択的データ取得手法の基礎的検討』に対しては、主に実験および現場計測による検証を行った。

梁模型供試体は、境界条件を与える支承部材の回転・並進機構を固定できるものを作成し、さまざまな境界条件で計測を行うことができるものとした。実験では、ブリルアン散乱式分布型光ファイバセンサ PPP-BATDA によって、載荷時の梁の分布ひずみデータを取得した。取得されたデータから、境界条件の変化によって、支承部近傍のひずみ分布の形状が変化することが確認された。

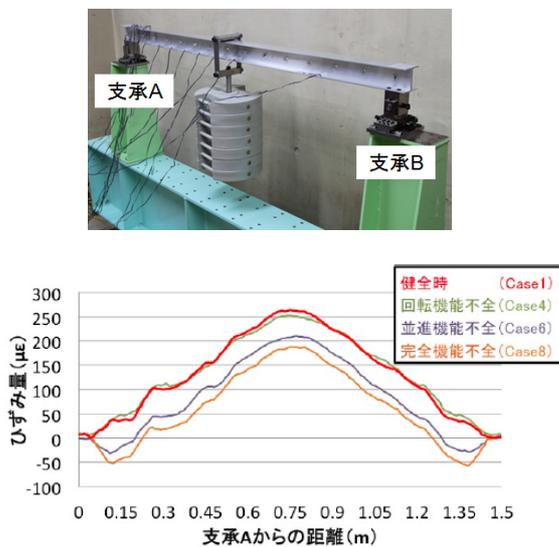


図1 梁模型の載荷試験の様子と光ファイバセンサ (PPP-BOTDA)で得られた分布ひずみデータ

現場計測では、ある PC 連続高架橋にて、支承部近傍でのひずみ分布と、1 スパン全体

のひずみ分布や振動データを取得できるよう、Fiber-Bragg grating 光ファイバセンサ設置を行い、車両通行時の動ひずみ計測を行った。すると、どちらのセンサ配置においてもデータ取得が適切に行われ、光ファイバセンサによって多様なデータ取得が可能であることが実証された。ただし、支承近傍でのひずみ計測では、通常の通行車両で生じるひずみが小さく、ひずみ分布形状の評価には、センサ精度の影響を特に考慮しなければならない、という留意点も把握された。

『(3) 分布ひずみデータの特徴抽出による境界条件変化評価法の構築と有効性検討』では、支承近傍の分布ひずみデータの形状解析によって、境界条件の変化を検知する指標を提案し、それをを用いた支承機能の診断法を構築した。検証は、梁模型で得られるデータを用いて行い、支承の機能低下を適切に検知できることを示した。さらに、梁模型の有限要素解析から境界条件を段階的に変化させた際のひずみ分布を導出し、構築した手法を適用すると、本研究で提案した指標と境界条件の変化度合いに高い相関が得られ、支承の状態を段階的に評価可能であることを示した。

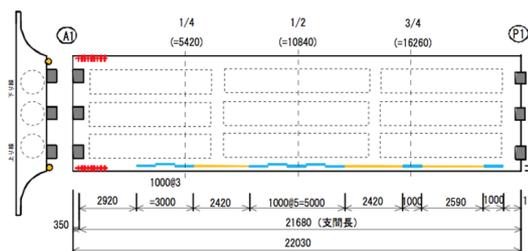


図2 実橋梁での光ファイバセンサ計測

『(4) モデル妥当性評価法とモデルキャリブレーション法に関する基礎的検討』では、既

存橋梁の数値モデルの妥当性評価に、ベイズ推定を用いることを、新たに試みた。ベイズ推定は、はじめに解析者が設定する事前確率分布に、観測データの尤度関数を乗ずることで、事後確率分布を得る。ほかの統計的推定法と比較して、少ないデータ数でも推定が可能であることから、同じ確率過程で多数のデータ群を取得することが難しい土木構造物には適しているといえる。そして、得られた事後分布から、構造の現在の状態をモデルに反映させるモデルキャリブレーションが可能であり、ここではその有効性を検証した。

対象としたのは、鋼製桁とRC床版をもつ桁橋であり、支承部に腐食による可動部の固着が確認されていた既存橋梁である。この橋梁で、加速度計による振動データを取得し、そのモード特性から、数値モデルに与える材料定数や支承機能を表すバネ定数などの事後分布を推定した。そして、事後分布の平均値を用いてモデルキャリブレーションを行ったところ、初めに構築したモデルと比較して、計測値により近い振動特性を示す数値モデルを得ることができた。今後、光ファイバ分布ひずみデータから評価される支承の機能変化を、このベイズ推定による方法の計測データとして用いることで、より精度の高い境界条件キャリブレーションを目指し検証を進める。

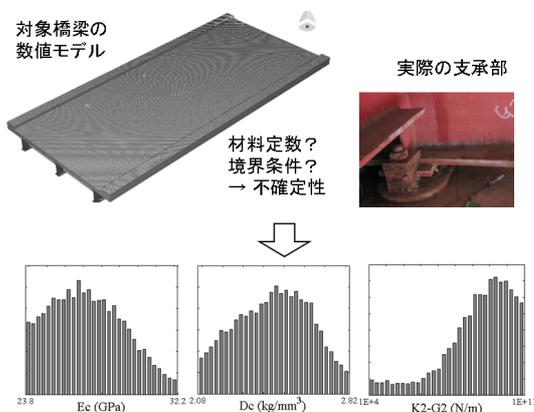


図3 ベイズ推定による既存橋梁の数値モデルキャリブレーション

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Mayuko Nishio, Juliette Marin, Yozo Fujino, Uncertainty quantification of the finite element model of existing bridges for dynamic analysis, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 査読有, 2012, 2, 163-173.
- ② 西尾真由子, 武田展雄, 分布型光ファイバセンサを用いた変位同定法による境界条件変化を考慮した構造物の変形モニタリング, *土木学会論文集 A*, 査読有, 2010, 66, 229-238.

[学会発表] (計8件)

- ① 西尾真由子, Marin Juliette, 藤野陽三, “ベイズ推定による既存橋梁の有限要素モデル妥当性評価に関する基礎検討,” 平成24年度土木学会全国大会 第67回年次学術講演会, I-521, 名古屋, 2012年9月.
- ② Marin J, Nishio M, Fujino Y, “Uncertainty quantification and validation of finite element models of bridge structures” The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA USA, September, 2011.
- ③ Nishio M, Hemez F, Worden K, Park G, Takeda N, Farrar C, Feature Extraction for Structural Dynamics Model Validation, IMAC-XXIX A conference and exposition on Structural Dynamics, Jacksonville, FL USA, 2011年1月.
- ④ Nishio M, Takeda N, Shape reconstruction of unsymmetric CFRP laminates for accurate manufacturing of composite structures, 3rd Asia-pacific Workshop on Structural Health Monitoring, 東京, 2010年12月1日, 東京.
- ⑤ Nishio M, Takeda N, Structural shape reconstruction with consideration of boundary condition changes using distributed strain data from PPP-BOTDA system, 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, 東京, 2010年7月13日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西尾 真由子 (NISHIO MAYUKO)
 横浜国立大学・大学院都市イノベーション
 研究院・准教授
 研究者番号：00586795