

氏 名	SAMIM MUSTAFA
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学 位 記 号 番 号	博理工乙第 241 号
学位授与年月日	平成 29 年 3 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学 位 論 文 題 目	AN ENERGY-BASED DAMPING EVALUATION USING BAYESIAN MODEL UPDATING FOR VIBRATION-BASED STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF STEEL TRUSS BRIDGES（鋼トラス橋ヘル スモニタリングのためのベイズ推定によるモデルアップデートを利用した エネルギー的振動減衰評価法）
論 文 審 査 委 員	委員長 教 授 松本 泰尚 委 員 教 授 奥井 義昭 委 員 教 授 陸好 宏史 委 員 教 授 齊藤 正人

論文の内容の要旨

Difficulties in practical application of vibration-based structural health monitoring (SHM) of structures include considerable amount of uncertainties in structural modeling and vibration measurement and sensitivity issues of modal parameters due to local damage in case of large structure. This dissertation proposes an analytical framework for SHM addressing the aforementioned difficulties by combining two techniques: a Bayesian based probabilistic approach for finite element model (FE-model) updating that accounts for the underlying uncertainties, and an energy-based damping evaluation for detecting damage at local level. The proposed vibration-based SHM approach could be promising in detecting damage at local level when the problem related to low sensitivity of frequencies and mode shapes due to local damage remains a concern and damage detection by change in stiffness parameters using FE-model updating utilizing data from a large number of sensors is not practically feasible due to limitation of budget and time.

The first step of the proposed methodology is to develop a baseline model using Bayesian probabilistic approach. For that an initial FE-model of the studied truss bridge is developed in MATLAB for the ease and faster analysis instead of linking a finite element analysis package with MATLAB. The structural members are modelled as three-dimensional frame elements. Six degrees-of-freedom (DOFs) are considered at each joint. In this dissertation, the Bayesian statistical framework is considered as it is capable of incorporating all types of available information, all types of uncertainties and incomplete experimental data. Several model updating approaches have been proposed based on identified modal parameters using Bayesian statistical frameworks. Though these were validated by small scale simulated structures, practical applications of Bayesian approaches for structural model updating utilizing incomplete identified modal data sets are yet to be explored. Secondly, so far the Bayesian based model updating approaches proposed in the literature are based on forming objective function by direct correlating the experimentally identified mode shapes with the corresponding components of analytical ones. However, relating mode shapes directly to get the optimal values required

proper scaling or normalization of mode shape components as the mass distribution of the FE-model and the actual structure are usually different, hence, the mode shapes may not be scaled consistently. To address these issues, an advanced Bayesian statistical framework is proposed in this dissertation by introducing a new objective function and a realistic parameterization of mass and stiffness matrices. In this framework, the likelihood function for mode shapes is formulated based on the cosine of the angle between the analytical and measured mode shapes which does not require any scaling or normalization.

It is evident from practical experiences that different parts of the structure are subjected to different level of deterioration due to corrosion and fatigue depending on their exposure conditions and dynamic characteristics. Hence, it is more practical to consider stiffness parameters corresponding to each element of the FE-model. In this dissertation, a realistic and reasonable parameterization of stiffness matrix is introduced by considering four stiffness parameters for each element considering both sectional and material properties. For the parameterization of mass matrix, mass density per unit length of each section is considered as uncertain parameter. It is important to note that, the variation of mass is assumed to be much smaller compared to the stiffness due to local damage. Hence, lesser number of uncertain parameters are assigned for mass matrix. Basically, the main purpose of the parameterization of mass matrix was to make the updating results more robust to the modelling errors. The proposed updating method is validated experimentally by updating a FE-model of existing steel truss bridge. It is found that the proposed updating framework is efficient enough in updating a FE-model of existing truss bridge having large discrepancy utilizing experimental data from limited number of sensors only.

After getting the updated FE-model which is supposed to be free from all the underlying uncertainties mentioned above, the next step is to use that for structural analysis and SHM. In this dissertation, an energy-based damping model is introduced for practical and effective SHM based on vibration measurement by estimating the contribution of modal damping ratios from different structural elements utilizing the data from updated FE-model and the identification results of damping from a small number of sensors. A previous study reported that the studied bridge with damage at local diagonal member showed a significant increase in the damping of global vibration mode of the structure. The energy-based damping evaluation is utilized to identify the cause of the modal damping increase by observing the change in the contribution from different structural elements on the modal damping ratios. The results of energy-based damping evaluation implies that substantial change found experimentally in the damping for the global mode coupled with local vibration of damaged diagonal member is caused by the significant increase in the equivalent loss factor of damaged diagonal member. This significant increase in equivalent loss factor of damaged diagonal member for the coupled bending mode is possibly caused by the significantly large amplitude of damaged diagonal member compared to its healthy state. Here, the consideration of amplitude-dependent loss factor could be reasonable as the damage discussed in this paper was due to cracks that could induce significant increase in frictional damping which is expected to be dependent on the amplitude of vibration. The results also suggests that the elemental modal damping ratios can be used to detect damage at local level by observing the change in elemental modal damping ratios of the coupled bending mode identified with a small number of sensors, which could lead to an effective SHM based on vibration measurement.

論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会が平成 29 年 2 月 8 日に実施した論文発表会、およびそれに先立って行われた学位論文審査委員会各委員による個別の論文審査における、当該学位論文の審査結果を以下に要約する。

当該学位論文は、振動特性を利用した鋼トラス橋のヘルスマニタリング手法をテーマとしている。橋梁など大量の社会基盤構造物の老朽化に対応することを目的に、構造物の振動特性を利用した構造ヘルスマニタリングの研究が国内外で盛んに行われてきたが、本格的に実用化されるには至っていない。そのための課題には、構造物の振動特性を理論的に把握するためのモデリングが多くの不確定要素を含むことや、振動計測から比較的容易に同定できる低次振動モードの固有振動数が構造物の部分的な損傷や劣化に対して持つ感度が低いことなどが挙げられている。これらの課題に対し、当該論文では、振動モード減衰と減衰要因の関係を理論的に検討することが可能なエネルギー的振動減衰評価法に、ベイズ推定による有限要素モデルのアップデートを援用したモニタリング手法を提案している。

当該学位論文は、本文 6 章および付録 2 部で構成されている。

第 1 章は、上述のような研究の背景と目的を述べている。

第 2 章は、関連する既往研究のレビューを記述している。まず、振動特性を利用した構造ヘルスマニタリングについて概観した後、これまでに提案されている構造ヘルスマニタリング手法を、有限要素モデルの利用の有無で分類し整理している。次に、振動特性を利用した構造ヘルスマニタリングを実用化するにあたっての課題、特に、振動計測の規模と同定可能な振動モードパラメータとの関係、同定される振動モードパラメータと局所的な損傷や劣化との関係、さらに有限要素モデルを用いる場合の不確定要素の扱いについて、関連文献を引用することで述べている。最後に、以上のレビューを踏まえた具体的な研究課題の設定として、エネルギー的振動減衰評価法とベイズ推定によるモデルアップデート手法を組み合わせたフレームワークの検討に至った経緯について述べている。

第 3 章は、当該論文で用いたベイズ推定によるモデルアップデートについて述べている。その特徴は、目的関数に規準化を要しない振動モードに関する項を導入してアップデートをより効率化したことと、各要素の質量と剛性をアップデート対象となるパラメータ化して局所的な変化をも対象としたモデルアップデートを行えるようにしたことである。本アップデート手法の有効性を確認するため、既往の研究で得られている実際の鋼トラス橋での限られた計測点での振動計測データを用い、当該橋梁の有限要素モデルのアップデートを試み、パラメータの初期値の設定によらずアップデート後には妥当なパラメータが得られたことが示されている。

第 4 章は、エネルギー的振動減衰評価法を利用した構造ヘルスマニタリングの枠組みについて述べている。当該論文で述べているエネルギー的減衰評価法の特徴は、各構造要素におけるエネルギー散逸のモード減衰への寄与度を推定できる点にある。このことで、構造要素ごとの減衰性能を表すロスファクター等のパラメータから、損傷や劣化の検知を可能にしようとするモニタリング手法である。エネルギー的減衰評価法では、振動モードごとに各構造要素でのひずみエネルギーの算出が必要であり、その算出に有限要素モデルを用いる必要がある。第 3 章の手法でアップデートした有限要素モデルを用いることで、各構造要素のひずみエネルギー、さらには減衰パラメータの推定精度が高まることが期待できる。本章では、健全な状態にある実際の鋼トラス橋での計測データにこの手法を適用し、構造要素ごとおよび部材ごとのモード減衰への寄与度を、計測結果から同定されたすべての振動モードに対して推定することができたことを示し、振動モードごとに

モード減衰への部材の寄与度が異なることなど、その物理的な解釈について考察を加えている。

第5章は、第4章で述べた構造ヘルスマニタリングの枠組みを、損傷を有する実際の鋼トラス橋へ適用した結果について述べている。当該橋梁では、海外での鋼トラス橋の崩落事故を受けた目視点検において斜材に亀裂が発見されたため、当て板による補修工事が実施された。工事前後で振動計測が実施されたが、工事前の計測は作業時間が制限されていたため、少数のセンサによる簡易計測しか実施できていなかった。このため、既往の研究では、局部的な斜材の亀裂が橋梁全体系の振動モードのモード減衰を顕著な増加につながったことが示唆される計測結果ではあったものの、その理論的な裏付けは十分には得られなかった。そこで、本研究の枠組みを当該橋梁に適用したところ、亀裂を有する部材やその接合部でのエネルギー散逸の増加が、当該部材の局部振動が連成した全体系振動モードのモード減衰を増加させ得ることや、部材や構造要素の減衰性能の振幅依存性が計測結果から得られたモード減衰の増減に影響を与えた可能性が明らかになった。

第6章は、当該論文の結論と今後の課題について述べている。本研究により、提案された振動減衰に基づく構造ヘルスマニタリングのアプローチは、比較的少数の計測点での振動計測結果から、鋼トラス橋の局部的な損傷を検知し得ることが示された。一方で、減衰も考慮したモデルアップデートの構築や、減衰の振幅依存性等を考慮したより適切な減衰モデルの提案などを今後の課題として挙げている。

また、2部の付録は、当該論文の論旨には直接関係しないものの、実際の橋梁での振動計測における適切なセンサ配置の決定手法、および有限要素モデルのアップデートを用いた損傷検知手法に関してそれぞれ検討しており、振動特性を利用した鋼トラス橋の構造ヘルスマニタリングに対して、有用な結果が示されている。

以上のように、当該論文は、振動減衰を用いた鋼トラス橋の構造ヘルスマニタリングに関して、理論的な考察に基づく枠組みを構築し、数値モデルおよび実際の橋梁での振動計測結果に適用することでその有効性を検証したもので、学術的、工学的に有用な知見が示されている。よって、学位論文審査委員会は、本論文が博士（学術）の学位を授与するに十分値するものと認め、合格と判定した。

なお、本論文の内容に基づく1編の論文がアメリカ土木学会（ASCE）の学術誌である Journal of Bridge Engineering で掲載予定となっている。また、1編が査読付き論文として国際会議 International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure のプロシーディングスに掲載されている。さらに、前述の Journal of Bridge Engineering, ASCE において審査中の論文が1編ある。また、本論文の内容のベースとなった研究に基づく論文が、国際誌 International Journal of Steel Structures に掲載済みであり、査読付き論文として国際会議 Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics のプロシーディングスに掲載されている。