

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360188

研究課題名(和文)動的光ファイバセンシング及び橋梁構造物の健全性モニタリングシステムの構築

研究課題名(英文)Development of dynamic fiber optic sensing technique for early damage detection and health monitoring system of bridge structures

研究代表者

呉 智深(WU, ZHISHEN)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：00223438

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円、(間接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、一定の空間領域内での平均ひずみを計測するロングゲージ(領域)光ファイバ(LG-FOS)センサと分布型センシング技術を開発するとともに、橋梁構造物の早期損傷検知と性能評価手法を確立した。具体的に、1. FBG方式とBOTDR/A方式によるLG-FOSセンサの高度化を行い、その優位性と実用性および耐久性を実験室レベルで検討した。2. LG-FOSセンサにより得られるひずみ分布により、構造物の早期損傷検知に対する各種指標を検討した。3. 開発したセンサ、装置、検知アルゴリズムを基に、早期損傷検知システムを開発し、茨城県内のRC桁橋、新潟県内の既損傷PC箱桁橋など既設構造物の現場検証を進めた。

研究成果の概要(英文)：Structural health monitoring techniques based on fiber optic sensors are expected to advance maintenance and disaster prevention practices of bridges recently, however, both FBG(Fiber Bragg Grating) point sensors and BOTDR/A(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer/Analyzer) distributed sensors still face essential problems. In this study, the advancements of strain sensing techniques based on both FBG and BOTDR/A techniques are first carried out through developing of long-gage (area) fiber optic sensors(LG-FOS). Moreover, the modal analysis approach, through which the modal macro strain vector(MMSV) and other modal parameters can be abstracted, based on the strain distribution measured by distributed LG-FOS is constructed. Then, the methodologies of monitoring the deformation and early damage detection are proposed. Finally, the established practical real-time health monitoring system for existing bridges is demonstrated through the installations of several existing bridges.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：工学 土木工学 土木材料・施工・建設マネジメント 維持・管理 光ファイバセンサ 早期損傷検知 橋梁構造物 健全性モニタリング

1. 研究開始当初の背景

橋梁に対する構造ヘルスマニタリング (SHM, Structural Health Monitoring) は各種構造システムの保守検査と維持・防災・リスク管理において提唱された新しい概念と手法である。SHM は橋梁構造物の建設時や供用後の必要になった時期など、あらゆる状況に応じて導入することが可能である。鉄道橋梁構造物の使用状況や健康状態および余寿命を適切に検査し、評価して (診断)、適切な補修や補強が実施されることが求められている。これに対して、従来の橋梁の稼働状態および損傷劣化性状などにより、ひずみ分布や変形などの静的応答による構造物の早期損傷検知や健全性モニタリングはあまり現実的にならず、その自動化、省力化、効率化、高性能化、大幅なコスト削減、などの要求が益々大きくなってきている。また、近年の大震災の教訓によれば、大地震や台風、洪水などの災害時には、特に鉄道橋梁に対して直ちに被災度を判定し、立入・通行・運行の可否を決定する発災時即応システムの構築が必要とされている一方、列車の高速運行を支える広域鉄道構造物に対して、頻度の高い中レベル地震に対する特別 (臨時) 点検も必要であり、センサベースとした早期損傷検知システムの構築が大いに期待される。さらに、新設構造物については耐久性や機能性に優れた構造形態とすることが必要であるが、人間の健康管理に対する自覚と自己調整能力、健康検査と診断のような常時ヘルスマニタリング機能を予め付加することにより、構造物の長寿命化を実現することも重要になっている。

2. 研究の目的

新材料、新方式による構造物の設計・建設が益々増えており、SHM に対する期待も大きくなっている。その上、仕様規定型設計思想から性能照査型設計思想に変更されつつある今日、SHM が性能保証用として使用されるという新しいケースも生まれている。以上のように、SHM は、1) 構造システムの安全性や信頼性の向上、2) 長寿命化、3) 突発的な災害や異変の回避、4) ライフサイクルコスト (LCC) 低減、5) 未知ファクタの考慮などを実現すること、6) 人的関与を極力避け、定量的かつ継続的なベースでのデータを取得すること、を目的としている。しかし、橋梁の稼働状態および損傷劣化性状などによるひずみ分布や変形などの静的応答による構造物の早期損傷検知や健全性モニタリングはあまり現実的にならず、センサによるモニタリングの試みとして、ひずみゲージ、変位計、あるいは加速度計などの点センサの設置により動的応答およびそれによる解析された固有振動特性により橋梁の全体性状に基づく健全性評価を試みた事例は多数見受けられるが、固有振動特性はやはり構造物の全体性状に関するものであり、構造物の損傷劣化による変化に関する実用上の同定は困難

であることは数多くの研究により明らかになってきている。本研究では、以上の背景を踏まえて、まず、一定の空間領域にある平均ひずみを計測するロングゲージ (領域) 光ファイバセンサ (LG-FOS) とその分布化技術を提唱・開発する。光ファイバセンサは 100Hz ~ 500Hz 程度の測定速度が得られ、光ファイバセンサゲージ部の持つ固有周波数帯をずらして 1 本の多点型センサにすることで、領域センサとすることができる。

RC 構造物に生じる疲労ひび割れや鉄筋、PC 構造物における PC 鋼材の腐食等、高精度を必要とする損傷に対して光ファイバによるセンシングの適用が期待されている。そこで、研究代表者らは、光ファイバセンサをある一定ゲージ長で連続的につないだ LG-FOS を作成し、動的情報を活用した橋梁構造物の早期損傷検知システムの構築に着手した。しかし、研究開始当初は通信用の光ファイバを用いていたため、折り曲げや損傷防止のための被覆と内部の光ファイバ (コアおよびクラッドのみ) の間にすべりが生じ、空間分解能やひずみ測定精度が低下する問題があった。また、環境ノイズや温度分布、温度変化の影響と上記の精度低下により、損傷により生じるひずみ増加がうまく検出できないことも重大な問題であった。そこで、光ファイバの測定部および定着部における被覆すべり制御に着目したセンサの精度向上と、早期損傷検知アルゴリズムの開発によるシステムの精度向上により、実用的な早期損傷検知システムの構築を目的として実施する。

3. 研究の方法

本研究では、FBG (Fiber Bragg Grating) および BOTDR/A (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer/Analyzer) 技術に基づく光ファイバセンシング技術を高度化し、一定の空間領域内での動的なマクロひずみ (平均化されたひずみ) を高速・高精度に計測できる LG-FOS とその分布センシング手法を開発する。また、このようなセンサにより得られる動的ひずみ応答を活用したモーダルアナリシス手法と、構造物の損傷劣化と密接な相関関係にあるひずみモーダルベクトルを損傷評価指標とした損傷検知手法を確立する。さらに、LG-FOS により取得したひずみ分布を活用した構造物の性能評価方法を提案する。最終的にこれらを実装した橋梁構造物の早期損傷検知および健全性モニタリングシステムを構築するとともに、試験施工により実用性を実証することを目的として実施する。研究方法は下記のように要約する。

(1) 分布光ファイバセンシング装置の高速化およびセンサの高精度化

通信用の光ファイバをセンサとして用いた場合、被覆 - 光ファイバ間にすべりが生じてひずみ測定精度や感度、空間分解能が大きく低下するが、連続繊維複合材との複合化による被覆すべり制御による、分布型光ファイ

バセンシングの高精度化，実質的な空間分解能の改善，そして高感度化の手法を考案し，実構造物への実装に用いる連続繊維複合材被覆光ファイバを試作する。

本研究では，高精度化について部材レベルの実験を重ねてセンサの構造形式を構築したうえで，これらのセンサを試験施工に供して，開発センサのひずみ測定精度の実証を行っている。さらに，定ひずみ領域の区間を残して連続繊維材を延長してひずみが生じる範囲を制限することにより，測定ひずみを拡大させ，ひずみ測定の安定性を向上させる。以上のように開発したセンサについて実験室レベルの実験を重ね，センサの構造形式を確立したうえで，これらのセンサを試験施工に供して開発センサのひずみ測定精度を実証する。具体的には，センサ自身の高サイクル引張疲労試験を200万サイクルを目途に，応力レベルを3レベル程度設定し，各3本（計9本）実施して，活荷重に対するセンシング精度の長期特性を検討する。また，構造物に直射日光が照射されたケースを想定して，0～90°の内，3レベル程度を設置した温度サイクル試験を各3本（計9本）実施して，センシング精度の高温度特性を検討する。一方，PPP-BOTDAについて，研究協力者（ニュープレクス（株））らの最近の研究により，プリポンプ光の形状変化や装置に対する安定化装置の導入により，実験室レベルでは100Hz程度のサンプリング速度で光ファイバの長尺方向の分布ひずみを測定できるようになっている。また，ひずみ測定精度は従来のBOTDRでは $\pm 50 \mu$ 程度であったが，共同研究者らが開発したPPP-BOTDAでは現状で $\pm 10 \mu$ に，空間分解能は，従来1m程度であったが，現在は2cmをそれぞれ達成している。本研究では，計測値のノイズ除去法を確立するために，室内実験にて簡易片持梁の曲げ試験を行うことで，RC橋脚モデルの振動実験および道路橋及び鉄道橋にセンサを敷設して現地計測について，既設構造物の損傷検知実験に適用し，PPP-BOTDAの動的計測の実用性を確認する。

（2）マクロひずみ応答分布による高精度損傷・構造性能評価手法の確立

これまでの研究により，一定の空間範囲の平均ひずみ応答の分布計測データによるモーダルアナリシスは変位応答のそれと同様に通常の動力学理論で展開できることを究明している。本研究ではこれを利用し，構造物の各測定範囲におけるひずみ固有ベクトルを用いたモーダル形状曲率や損傷状況を高精度で表現する手法を構築する。

本研究では，このような研究成果を活用し，構造物の各測定範囲におけるひずみ固有ベクトルを用いたモーダル形状曲率や損傷状況を高精度で表現する手法を構築する。また，一定ゲージ長のマクロひずみ自身も構造物の曲率や変形に比例していることから，マク

ロひずみを活用することにより構造物の性能評価精度をより高めた性能評価技術に関する検討もかなり進められた。開発したセンサおよび測定装置を鉄筋コンクリート製橋脚モデルに適用し，中規模地震を想定した振動を加える加振実験を行い，開発したセンサおよび測定装置によるセンシング性能の確認を行う。実験パラメータとして，振幅をひび割れが生じる前後3レベル以上を考慮する。また，T型断面の2mスパンのPC橋桁モデルを作成し，繰り返し荷重3レベル以上を考慮した曲げ疲労試験を行い，疲労破壊が生じる直前に起振器で振動を与え，領域センサによる動的センシングを実施することで，疲労亀裂の早期検知性状を検討する。

（3）早期損傷検知システムの開発と評価

本研究では，開発したセンサ，装置，そして早期損傷検知アルゴリズムを基に，早期損傷検知システムを構築する。そして，開発したシステムを既設構造物に実装し，システムの実用性を検討する。まず，構造物全体の動的ひずみ応答を取得するために，領域センサの適した配置箇所を決定する。そして，一定領域の動的ひずみ応答によるモーダルアナリシ手法やモード解析手法から，早期損傷検知アルゴリズムを構築する。また，ひずみ分布や動的ひずみ応答を活用して，橋梁構造物の損傷状況に対する重要な指標であるたわみ分布や荷重の同定手法も構築する。そして，構築したシステムを鉄筋コンクリート橋脚モデルの振動実験やPC橋桁モデルのPC鋼材の促進腐食実験および曲げ疲労試験に適用し，微細ひび割れ等，軽微な損傷に対する同定精度を検討する。

本研究では，橋脚モデルに対し，小，中，大規模地震を想定した加振実験を行い，開発したシステムのテストおよび評価を行った。そして，損傷検知システムの運用上の課題抽出や損傷検知に関する指標ならびに閾値等の明確化を行うことができた。以上の知見を踏まえて，茨城県内のRC橋梁および，既損傷を有する新潟県のプレキャスト箱桁橋を対象とした試験施工を開始・継続的な分布ひずみ計測・損傷検知システムによる損傷検知を実施しており，本研究で上記のように開発したセンサや装置，損傷検知システムの実用性を検証している。

4．研究成果

本研究では，一定の空間領域内での平均ひずみを計測するLG-FOSとその分布型センシング技術を開発するとともに，橋梁構造物の早期損傷検知と性能評価手法を確立し，これらを実装した早期SHMシステムを新たに構築することを目的とする。1年度目の研究では，大きく分けて，センサおよび計測装置の高精度・高速化，損傷検知アルゴリズムの構築，損傷検知システムの構築に関する研究を進めたが，いずれの研究に対しても，当

初の計画通りに達成できた。特に、3 番目のシステム構築については、国内、海外での実証実験も含んでおり、困難な課題であったが、研究者間で詳細に打ち合わせるにより、順調にセンシングシステムを導入、継続的な測定を行うことができた。また 2 年度目の研究は 1 年度目の結果を踏まえて、高精度化された FBG 方式と BOTDR/A 方式による LG-FOS センサの実製作・性能究明および実用性を実験室レベルで検討し、小ひずみレベル動的計測でのノイズ除去法の開発を実施してきた。これらの検討を継続するとともに、高精度化されたセンサの動的センシングに関するノイズ除去法と耐久性設計法を構築した。また、構造物のひずみ固有ベクトルによるモーダル形状曲率や損傷状態の高精度な同定手法を構築し、LG-FOS センサにより得られるひずみ分布の直接利用により、構造物の変形、荷重、内部損傷等を同定する手法を開発し、柱・梁供試体の曲げ破壊試験による各種同定手法の有用性を検討した上、構造物のひび割れや損傷の早期検知に対する各種指標の確立を検討した。そして、今までの研究成果は下記のように要約する。

(1) 光ファイバセンサの高精度化および PPP-BOTDA による動的センシング手法
光ファイバを保護する被覆と光ファイバ間のすべりが光ファイバセンシングの精度と有効空間分解能に及ぼす影響を定量的に究明した上、被覆 - 光ファイバ間のすべり制御および効率的な補強手法を構築した。また、FBG および BOTDR/A 方式によるロングゲージ（領域）光ファイバセンサの橋梁構造物の SHM に適したゲージ長を検討し、二種類の高精度化ロングゲージ光ファイバセンサの実製作・試験実装に成功した。また、光ファイバセンサの高感度化についても研究が進み、1 - 5 μ 以下の動的ひずみを上手く計測できるようになっている。一方、PPP-BOTDA による動的光ファイバセンシング手法に関する検討を実施し、センサの精度や感度の究明および性能向上を行っており、30 μ 以上のひずみ振幅を有する動的分布ひずみ計測を 100Hz 程度のサンプリング速度で実現させた。

(2) 高精度損傷検知アルゴリズムの開発
LG-FOS を用いて得られた動的ひずみ分布を活用したモーダルアナリシスに関する研究を進め、構造物の損傷により敏感に変化するひずみ固有ベクトル(MMSV)やモーダル形状曲率を用いた、高精度な損傷同定手法を構築した。一方、LG-FOS により得られたひずみ分布の直接的な利用により、構造物の変形や荷重および内部損傷を同定する手法も開発してきた。そして、RC 柱と RC 梁の曲げ試験を実施し、LG-FOS によるひび割れ発生およびひび割れ後の損傷レベルや鉄筋降伏などの早期検知に関する検討を行うことにより、開発した各種同定手法の有用性を確立した。

(3) 早期損傷検知システムの構築
開発したセンサ、装置、そして損傷検知アルゴリズムを基に、早期損傷検知システムの構築を進め、茨城県内の RC 桁橋および新潟県内の既損傷を有する PC 箱桁橋に実装・モニタリングを実施することにより本システムの実用性を見出した。また、アメリカ FHWA（連邦道路管理局）の LTBP（長期橋梁健全性）プロジェクトの枠組みでの既設構造物の損傷検知実験を合同で行い、本システムの有意性を示した。

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 5 件)

車谷麻緒, 寺田 賢二郎, 京谷孝史, 加藤準治, 櫻山和男: 破壊シミュレーションのための構造要素を用いた離散体解析法, 日本計算工学会論文集, Vol. 2013, pp. 20130010, 2013 (査読有)

Huang Huang, Caiqian Yang and Zhishen Wu, Electrical sensing properties of carbon fiber reinforced plastic strips for detecting low-level strains. Smart Materials and Structures, Volume 21, 035013, 2012 doi: 10.1088/0964-1726/21/3/035013 (査読有)

Wu Z.S., Adewuyi A.P., Xue S.T., Identification of damage in reinforced concrete columns under progressive seismic excitation stages, Journal of Earthquake and Tsunami, Volume 5, Issue 2, JUNE 2011, pp. 151-165.

DOI: 10.1142/S1793431111001030 (査読有)

A.P. Adewuyi, Z.S. Wu, Modal macro-strain flexibility methods for damage localization in flexural structures using long-gage FBG sensors, Structural Control and Health Monitoring, Volume 18, Issue 3, pages 341-360, April 2011

DOI: 10.1002/stc.377 (査読有)

Adewuyi, A.P. and Wu, Z.S., Vibration-based damage localization in flexural structures using normalized modal macrostrain techniques from limited measurements, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Volume 26, Issue 3, pp. 154-172, April 2011

DOI: 10.1111/j.1467-8667.2010.00682.

(査読有) x

〔学会発表〕(計 14 件)

Zhishen Wu, Huang Huang, Sensor capability enhancement of PPP-BOTDA for dynamic distributed strain monitoring of bridge structures, 9th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, CA, USA September 10-12, 2013

田久智行, 車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 中畑和之: ラチスモデルと損傷モデルによる異形鉄筋周辺の内部ひび割れの再現に関する研究第 68 回土木学会年次学術講演会, 2013.9, 津田沼

櫻健典, 鈴木修, 村山英晶, 吳智深, 鈴木博人: 光ファイバセンサを用いた鉄道高架橋のモニタリング技術の開発. 平成 25 年度土木学会全国大会第 68 回年次学術講演会 CS6-001, 2013.9, 津田沼

生井貴宏, 西尾真由子, 鈴木修, 村山英晶, 吳智深: 鉄道高架橋の振動特性変化に着目したモニタリング手法の研究. 平成 25 年度土木学会全国大会第 68 回年次学術講演会 CS6-002, 2013.9, 津田沼

高岡満, 鈴木修, 石沢孝, 村山英晶, 吳智深: 鉄道高架橋の動的挙動に着目したモニタリング手法の検討. 平成 25 年度土木学会全国大会第 68 回年次学術講演会 CS6-003, 2013.9, 津田沼

田村琢之, 鈴木修, 村山英晶, 吳智深: 鉄道高架橋の柱の変形と継ぎ目変位に着目したモニタリング手法の研究. 平成 25 年度土木学会全国大会第 68 回年次学術講演会 CS6-004, 2013.9, 津田沼

楊克侯, 鈴木修, 山本一美, 村山英晶, 吳智深: 鉄道高架橋のモニタリング手法の開発における解析的検討. 平成 25 年度土木学会全国大会 第 68 回年次学術講演会 CS6-005, 2013.9, 津田沼

車谷麻緒, 神野真弥, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 櫻山和男: 微細ひび割れの形成と接触を考慮した準脆性材料の圧縮破壊シミュレーション, 第 18 回計算工学講演会, 2013.6 東京

松浦遵, 根本忍, 車谷麻緒: コンクリートのひび割れ進展計測のための画像解析手法に関する基礎的研究, 第 41 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2013.3 長岡

Harada, T. and Suzuki, M.: Study on an effective bridge management method for local government, The 9th International Symposium on Social Management Systems (SSMS2013), SMS13-2268, 2013, Sydney, Australia.

小野勇人, 吳智深, 李哲賢. 光ファイバセンシングによる橋梁構造物の動的計測に関する研究. 平成 24 年度土木学会全国大会第 67 回年次学術講演会 V-068, 2012 井上康太, 吳智深, 木村亨. ロングゲージ FBG センサによる RC 柱の性能評価に関

する研究. 平成 24 年度土木学会全国大会第 67 回年次学術講演会 V-013, 2012 Huang Huang, Wu Zhishen, An integrated monitoring system used as global monitoring and local damage identification, 8th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, California, September 10-12, 2011, pp.635-642

宮田茉実, 吳智深, 分布型センシング技術の安定性評価に関する研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 巻:66, 頁: NO.VI-151, 2011 年 9 月 7 日, 愛媛大学

〔産業財産権〕

取得状況 (計 2 件)

(1) 名称: 分布型光ファイバセンサ

発明者: 吳智深 等

権利者: 吳智深 等

種類: 特許

番号: 4758227

取得年月日: 2011.6.11

国内外の別: 国内

(2) 名称: 風力監視装置

発明者: 吳智深 等

権利者: 吳智深 等

種類: 特許

番号: 4824593

取得年月日: 2011.9.16

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.civil.ibaraki.ac.jp/strc/wu/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吳智深 (WU, Zhishen)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号: 00223438

(2) 研究分担者

原田 隆郎 (HARADA, Takao)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号: 00241745

車谷 麻緒 (KURUMATANI, Mao)

茨城大学・工学部・講師

研究者番号: 20552392

岩下 健太郎 (IWASHITA, Kentaro)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号: 30544738