

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560115

研究課題名(和文) 接着接合構造体のための長期安定型SHMシステムの開発

研究課題名(英文) Development of SHM System for Long Term Monitoring of Adhesively Bonded Structures

研究代表者

日下 貴之 (Kusaka, Takayuki)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：10309099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、PZT素子の圧電特性に及ぼす外力の影響を明らかにし、外力による特性変化の小さい感度安定型PZT素子を開発することを試みた。さらに、PZT素子の特性変化をソフトウェア的に補完できるSHMシステムを構築し、CFRP接着接合部材を対象とした長期安定型SHMシステムを開発することを試みた。その結果、熱残留応力を付与した応力遮蔽板を接合することによって、PZT素子の見かけ上の強度特性を大幅に改善できることが明らかになった。また、Lamb波の散乱をスカラー化した評価指標を用いることによって、はく離亀裂のような内部損傷を定量的に評価できることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The effects of applied force on piezo-electric properties of PZT transducers were studied to improve the long term reliability of PZT transducers. A SHM system for CFRP adhesively bonded structures was proposed using the newly developed PZT transducers and diagnostic software.

The results suggested that the microscopic damages of PZT transducers caused by applied force could be reduced by stress shielding plates with thermal residual stress. The internal damages induced in adhesive layer could be quantitatively evaluated using the scalar index based on the dispersion of Lamb waves.

研究分野：機械工学

キーワード：機械材料・材料力学 損傷力学 ヘルスモニタリング

1. 研究開始当初の背景

近年、燃費性能や運動性能の向上を目的として、航空機や自動車など、様々な機械構造物に CFRP 材が使用されるようになってきている。しかし、これらの構造物に CFRP 材を用いる場合には、金属材料のような溶接による接合が困難となるため、ボルト・リベットなどを用いた機械接合やエポキシ樹脂などを用いた接着接合が必要となる。

しかし、一般に、CFRP 材は強度や弾性率などの力学特性の異方性や不均質性が顕著であり、接合部での強度低下が金属材料以上に重大な問題となる。このような問題に対し、一義的には接合技術の改善が有効な方策であることは言うまでもないが、一方で、構造物のライフサイクルを見据えた設計と保守の技術を確立することも有効な方策であり、各種の SHM システムの開発が試みられている。中でも、PZT などの圧電素子を用いた SHM システムは、少数の素子で広範な領域を短時間で能動的にモニタリングできるといった優れた特徴を有することから、その実用化が大いに期待されている。

反面、PZT 素子は材料そのものが脆性であり、構造物中に組み込んで使用する場合には、構造物にかかる種々の負荷によって破損や劣化などを生じるリスクがあり、特に、航空機などの高度な信頼性を要求される構造物では、SHM システムそのものが長期的に安定して動作することが必須であり、PZT など使用する素子の耐久性を含めて、信頼性の高い SHM システムの開発が望まれている。

2. 研究の目的

以上のようなことから、本研究では、PZT 素子の圧電特性に及ぼす外力の影響を明らかにし、その結果をもとに、外力による特性変化の小さい感度安定型 PZT 素子を開発することを試みた。さらに、PZT 素子の特性変化をソフトウェア的に補完できる SHM システムを構築し、その応用事例として、CFRP 接着接合部材を対象とした長期安定型 SHM システムを開発することを試みた。具体的には、微視構造の改善によって外力に対する耐久性を大幅に向上させた新型 PZT 素子を用いて、センサー/アクチュエーター・ネットワークを構築し、Lamb 波の散乱現象を基礎とした CFRP 接着接合部材の損傷可視化システムを構築することを試みた。

具体的には、以下の 4 点を研究目的・検討項目とした。

- (1) PZT 素子の圧電特性に及ぼす外力の影響を明らかにすること。
- (2) 外力による特性変化の小さい感度安定型 PZT 素子を開発すること。
- (3) PZT 素子の特性変化を補完できる SHM システムを構築すること。
- (4) CFRP 接着接合部材を対象とした長期安定型 SHM システムを開発すること。

3. 研究の方法

検討項目(1)については、PZT 素子を埋め込んだ CFRP 積層板に引張荷重を与えながら PZT 素子の切断面をその場観察することによって、素子の微視的損傷の状況と圧電特性の変化との関連性を明らかにすることを試みた。その際、圧電特性の評価にはポータブルピエゾドライバを使用し、応答信号をウェーブレット変換を用いて時間領域と周波数領域の両面から評価した。また、試験片を走査型電子顕微鏡を用いて分析することによって、機械的変形に伴う PZT 素子の微視的構造の変化をより詳細に検討した。特に、微小き裂の進展と圧電特性の変化との関連性に着目し考察を行った。

検討項目(2)については、検討項目(1)で得られた知見をもとに、臨界ひずみを向上させるための素子のメゾ構造および製造プロセスを考案することを試みた。具体的には、PZT に働く面内引張ひずみを緩和するため、申請者が開発した熱処理法を用いて、PZT に圧縮残留ひずみを導入することによって、素子中の PZT 部分の破損を遅らせることを試みた。また、数値解析を援用し、素子構造の最適化を図った。また、考案した製造プロセスを用いて PZT 素子を試作することを試みた。さらに、万能材料試験機を用いて、試作した PZT 素子の静的荷重下における圧電特性の変化を定量的に評価することを試みた。

検討項目(3)については、数値解析を援用し、損傷の位置、寸法、種類などの因子が応力波伝播挙動に及ぼす影響を明らかにすることを試みた。損傷の評価には DI 法を用い、Lamb 波の散乱をスカラー値化することを試みた。また、SHM システムの核となる損傷診断ソフトウェアを開発することを試みた。このシステムでは、PZT 素子をアレイ状に配置し、応力波伝播経路を共有するセンサー/アクチュエーター間の応答信号の相関を解析することによって、圧電特性の劣化した PZT 素子の出力信号をソフトウェア的に補完することを試みた。なお、解析には、動的陽解法に基づく汎用ソフトを使用した。

検討項目(4)については、検討項目(2)で開発した PZT 素子を貼付した CFRP 接着接合試験体を試作した上、万能試験機によって接着接合部に人工損傷を導入し、損傷導入の前後における応力波伝播挙動の変化をポータブルピエゾドライバを用いて測定した。あわせて、光学顕微鏡による断面観察によって、人工損傷の位置および寸法を測定した。また、検討項目(3)で開発した SHM システムを用いて、試作した CFRP 接着接合試験体の損傷同定を試みた。この種の接着接合部材では、CFRP の繊維破断や樹脂割れ、接着接合界面での剥離損傷、接着剤内部での凝集破壊などの検出が求められるが、本検討項目では、これらを高速かつ高精度に同定できるシステムの開発を目標とした。

4. 研究成果

検討項目(1),(2)については,荷重方向に直交する面に平行に PZT 素子に微視損傷が発生するとともに,電極付近で剥離型の損傷が発生し,見かけ上の圧電特性の低下が起こることが明らかになった.一方,PZT 素子に電極を兼ねた応力遮蔽板を加熱接合し,PZT 素子に圧縮残留応力を導入することによって,PZT 素子の見かけ上の強度特性を大幅に改善できることが明らかになった.また,有限要素法による損傷解析および圧電解析の結果から,PZT 素子に発生する損傷が圧電特性の低下に及ぼす影響が明らかになった.

検討項目(3),(4)については,Lamb 波の散乱をスカラー化した評価指標(DI 値)を用いることによって,はく離亀裂のような内部損傷を定量的に評価できることが明らかとなった.また,数値解析結果から,はく離亀裂周辺の曲げ剛性低下による横波の伝播速度の変化が DI 値に影響を及ぼすことが明らかになった.また,PZT 素子をアレイ状に配置し,応力波伝播経路を種々変更することによって,はく離亀裂の分布状況を定量的に評価できることが明らかになった.ただし,PZT 素子間の距離が大きい場合には,損傷診断の精度が著しく低下することも明らかになった.また,PZT 素子の損傷による波動伝播挙動の変化と接着層の損傷による波動伝播挙動の変化の分離について課題が残り,PZT 素子の損傷挙動に対するより詳細な知見が必要であることが示唆された.

上記を受けて,検討項目(1),(2)で行った 2 個の PZT 素子を対にした評価方法を改め,1 個の PZT 素子とひずみゲージとを組み合わせた試験方法を考案した.加えて,PZT 素子の損傷状態についてその場観察を行い,PZT 素子の圧電特性劣化の初期の要因が剥離損傷ではなく,垂直応力によるマイクロクラックであることが明らかにした.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- (1) 野村泰稔, 森本大貴, 日下貴之, 古田均, “カオス応答アトラクタのリカレンスプロットに基づく構造物の損傷位置同定”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, 2013, 209-221, 10.1299/kikaic.79.4210.
- (2) 日下貴之, 野村泰稔, 日根野陽介, 久木祥兵, “非接触変位場計測によるコンクリート構造物のき裂検出システムの開発”, 土木学会論文集 F6, Vol.69, 2013, I75-I80, 10.2208/jscejsp.69.I_75.
- (3) 野村泰稔, 古田均, 日下貴之, 吉田和世, 石橋健, “画像相関法とフラクタル次元解析を用いた Baseline-free 損傷検出法”, 土木学会論文集 A2, Vol.69, 2013, I633-I642, 10.2208/jscejam.69.I_633.

〔学会発表〕(計 7 件)

- (1) Sota Oshima, Takayuki Kusaka, Ryota Tanegashima, “Development of Crack Detection System Based on DIC Method Using Flexible Nodes Arrangement”, 2015 年 03 月 03 日, 立命館大学, 京都府・京都市.
- (2) Sota Oshima, Takayuki Kusaka, Ryota Tanegashima, “Improvement of Accuracy of Crack Detection System for Concrete Structures Using Non-contact Displacement Measurement”, 3rd International Symposium on Functionalization and Applications of Soft/Hard Materials, 2014 年 11 月 08 日, 立命館大学, 滋賀県・草津市.
- (3) 野村泰稔, 寺元丈雄, 日下貴之, “融合粒子フィルタに基づくデータ同化技術を利用した構造同定と未観測データの取得”, 日本材料学会第 63 期学術講演会, 2014 年 05 月 18 日, 福岡大学, 福岡県・福岡市.
- (4) Yasutoshi Nomura, Takayuki Kusaka, Daiki Morimoto, “Structural Health Monitoring Based on Chaotic Excitation and Recurrence Quantification Analysis”, 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, 2013 年 06 月 17 日, New York, USA.
- (5) Takayuki Kusaka, Yasutoshi Nomura, Yosuke Hineno, Toshifumi Fujii, “Crack Growth Detection for Concrete Structures Based on Non-contact Displacement Measurements”, 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, 2013 年 06 月 17 日, New York, USA.
- (6) 三木啓史, 野村泰稔, 日下貴之, “カオス応答アトラクタの評価に基づく構造異常診断”, 日本機械学会関西支部第 88 期定時総会講演会, 2013 年 03 月 17 日, 大阪工業大学, 大阪府・大阪市.
- (7) Yasutoshi Nomura, Takayuki Kusaka, Daiki Morimoto, Hitoshi Furuta, “Baseline-less Structural Health Monitoring System Based on Recurrence Quantification Analysis”, 7th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2012 年 07 月 10 日, Stresa, Italy.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

日下 貴之 (KUSAKA TAKAYUKI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：10309099

(2)研究分担者

野村 泰稔 (NOMURA YASUTOSHI)

立命館大学・理工学部・任期制講師

研究者番号：20372667