

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820367

研究課題名(和文) 実験的荷重同定法を用いたCFRP構造物の動的応答の推定法の開発

研究課題名(英文) Estimation of Dynamic Response of CFRP Structures Based on Experimental Impact Force Identification

研究代表者

跡部 哲士 (Atobe, Satoshi)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：40586468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：航空宇宙分野で近年広く活用されているCFRP(炭素繊維強化プラスチック)構造物に異物が衝突した際の動的応答(変位、ひずみなど)を、構造に内蔵させたセンサからの計測情報より推定する手法の開発を行った。本手法では、異物衝突による衝撃荷重の作用位置と時間履歴をセンサ応答から同定し、同定荷重を用いて構造物に生じる変位・ひずみを推定する。なお、衝撃荷重の同定および動的応答の推定には、作用した荷重と構造物の応答を関係づける実験的変換行列を用いている。本手法の妥当性は、インパルスハンマで打撃したCFRP積層板の動的応答を推定する実験により検証した。

研究成果の概要(英文)：Impact events with foreign objects are threats to composites that are widely applied to aerospace structures. This study proposes a method for estimating the dynamic response of a CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) structure subjected to external forces. The location and the time history of the applied force are identified using the measured data obtained from a built-in sensor network, and the identification results are then utilized to estimate the corresponding displacement and strain. Here, experimental transfer matrices are employed to calculate the response of the structure to the applied force. Experiments were conducted to verify the validity of the proposed method by performing the estimation of the dynamic response of a CFRP laminate subjected to impact force applied with an impulse hammer.

研究分野：構造ヘルスマモニタリング

キーワード：航空宇宙構造 複合材料 同定 異物衝突 衝撃荷重

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などの先進複合材料は、厳しい軽量化が要求される航空宇宙機の主要構造材料として近年広く用いられている。しかし、複合材構造は複雑な損傷挙動を示し、構造強度を著しく低下させる層間はく離、母材き裂、繊維破断などの外見からは識別困難な内部損傷が生じるため、実用上の課題も存在する。そこで、構造物の信頼性・安全性を確保するため、内蔵したセンサからの計測情報を用いて構造健全性を自動かつ実時間で監視する構造ヘルスマonitoringの研究開発が世界中で活発に行われている。

運用中の機体に作用する飛行荷重や異物衝突時の衝撃荷重などは損傷を発生させる原因となる。高度な構造ヘルスマonitoring技術を開発するにあたって、損傷の発生を推定するうえで有用な情報となる、構造物に作用した荷重およびそれに対する構造の動的応答 (変位, 加速度, ひずみなど) を把握する手法は必要不可欠な要素技術である。

2. 研究の目的

本研究では、センサを内蔵した CFRP 積層板を対象に、構造物に作用している未知の荷重を実験的同定法により求め、構造全体の動的応答 (面外変位, ひずみ) を同定荷重から推定してモニタリングする手法の確立を目標とする。図1に概略図を示す。荷重同定および動的応答の推定には、実験データより作成した荷重-センサ応答の関係である実験的変換行列を採用する。提案手法の妥当性は実験で検証する。

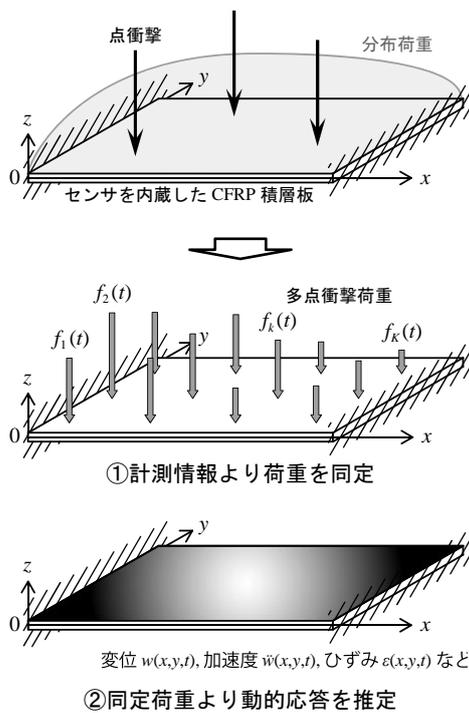


図1 荷重が作用するCFRP構造の動的応答推定

3. 研究の方法

(1) 実験的変換行列

構造物に荷重 $f(t)$ が作用したときのひずみ応答 $\epsilon(t)$ は次式で表される。

$$\{\epsilon\} = [G]\{f\}$$

ここで、 $\{\epsilon\}$ および $\{f\}$ は各サンプリング時間におけるひずみおよび荷重をそれぞれ成分に持つベクトルである。また、 $[G]$ は変換行列であり、文献①のように、打撃試験結果から実験的に作成できる。

本研究では、ひずみを計算する実験的変換行列を荷重同定で、面外変位を計算する実験的変換行列を動的応答推定で用いる。

(2) 構造物に作用する荷重の同定

構造物に作用している未知の荷重は、複数の位置に作用する多点衝撃荷重とみなして同定する。実験的変換行列から求まるひずみと計測ひずみとの誤差を最小化する次式を解くことで荷重同定を行う。

$$\min_{\{f\}} \|\{\epsilon\} - [G]\{f\}\|^2$$

(3) 同定荷重に基づく動的応答推定

面外変位を計算する実験的変換行列および同定した荷重履歴を用い、構造表面に設けた格子点の位置における面外変位を推定する。格子内の変位は、有限要素解析で用いられる9節点四辺形要素の形状関数による内挿で求める。また、Kirchhoffの平板理論に基づき、面内のひずみ成分 (ϵ_{xx} , ϵ_{yy}) を計算する。

(4) 実験による検証

本手法の妥当性を検証する実験で用いた装置の構成を図2に示す。試験片は、両端固定した積層構成 $[45/0/-45/90]_{4s}$ の CFRP 積層平板 (640mm × 200mm × 4mm) であり、二軸ひずみゲージが貼付されている。荷重はインパルスハンマ (小野測器 GK-3100, GK-4110G20) で作用させる。面外変位を計測するためにレーザ変位計 (キーエンス LK-H055) を用いる。計測情報はデータロガー (キーエンス NR-500, NR-HA08, NR-ST04) で収集し、パソコンで解析する。

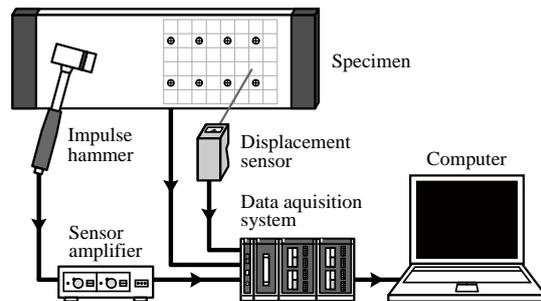


図2 実験システム

4. 研究成果

(1) 実験的変換行列を用いた面外変位の推定
 レーザ変位計を格子点の位置に配置して行った打撃試験の計測情報を用い、面外変位を計算する実験的変換行列を各格子点で作成した。続いて、格子内にレーザ変位計を配置して打撃試験を行い、計測荷重および予め作成しておいた各格子点における変換行列から本推定手法より格子内の面外変位を求め、実際に計測された面外変位と比較した。図3に結果の例を示す。図より、推定した面外変位は計測値とよく一致していることがわかる。本検討により、構造物に作用する荷重が把握できれば実験的変換行列を用いて動的応答を推定できることが確認された。

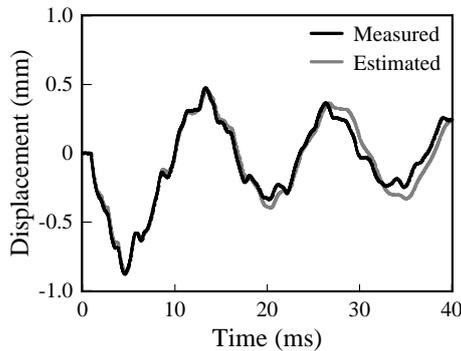


図3 面外変位の推定結果

(2) Kirchhoff の平板理論に基づくひずみの推定

面外変位分布の推定結果から Kirchhoff の平板理論に基づいて計算したひずみと、実際に打撃試験で二軸ひずみゲージから計測された値とを比較した。図4に結果の例を示す。図より、ひずみの計算値は計測値とよく一致していることがわかる。打撃位置、格子点間隔、内挿に用いる要素の次数などを変更して実験し、推定ひずみの精度を調査した。本検討により、面外変位分布を推定できれば、ひずみ分布も計算により求められることが示唆された。

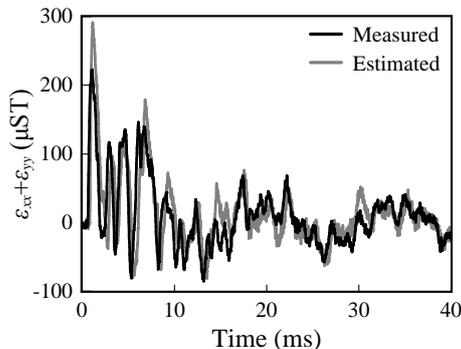


図4 面内ひずみの計算結果

(3) 実験的荷重同定法を用いたCFRP 構造物の動的応答の推定

提案手法の妥当性を実証するため、大型インパルスハンマによって打撃した CFRP 積層平板の動的応答を推定した。

実験的変換行列を用いた荷重同定の例を図5に示す。大型インパルスハンマによる荷重は直径 50mm の円の範囲内に作用し、それを 30mm 間隔の格子点上に作用する多点衝撃荷重として同定している。図では、荷重の作用範囲の周辺に位置する9点での同定荷重の総和を計測荷重と比較している。結果より、構造物に作用する分布荷重を多点衝撃荷重とみなしても良好な精度で同定できることが確認された。

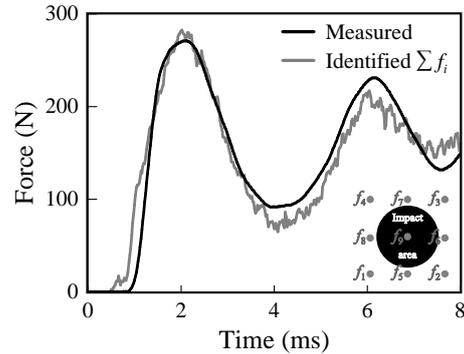


図5 荷重同定結果

続いて、同定荷重を用いて構造物の動的応答を推定した結果の例を図6に示す。予め作成しておいた各格子点での面外変位を計算する実験的変換行列および同定荷重より面外変位分布を推定し、Kirchhoff の平板理論に基づいてひずみ分布を計算した。

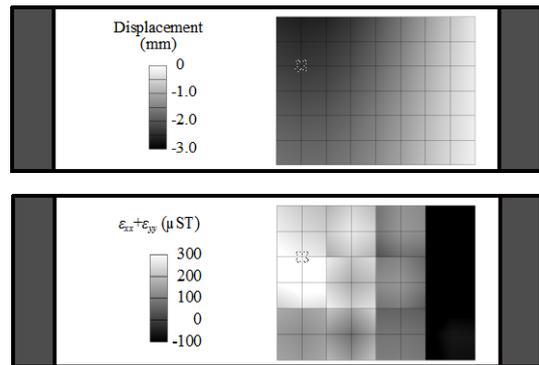


図6 動的応答推定結果

検証実験は打撃位置やインパルスハンマの先端チップの剛性なども変えて行い、提案手法の有用性を確認した。

実験データのみによって作成する変換行列を用いた本手法は、今回対象とした CFRP 積層平板のように単純な構造物だけでなく、実機体で用いられる補強板などにも容易に適用可能である。また、打撃試験時に3次元の振動を計測して各方向に対応した変換行

列を作成すれば、推定できる変位成分も追加される。加速度を計測すれば、加速度の推定も可能となる。本手法の確立およびさらなる発展により、高度な構造ヘルスマニタリング技術の開発に寄与できると考える。

<引用文献>

- ① 宮澤 英晃, 杉本 直, 胡 寧, 福永 久雄, CFRP 複合材構造の実験的衝撃荷重位置・履歴同定, 日本複合材料学会誌, Vol. 33, No. 3, 2007, pp. 87-94

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 跡部 哲士, 田中 大士, 胡 寧, 福永 久雄, アイソグリッド構造に作用する衝撃の位置・荷重履歴同定, 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, Vol. 64, No. 1, 2016, pp. 58-64
DOI:10.2322/jjsass.64.58
- ② 跡部 哲士, 村本 真人, 胡 寧, 福永 久雄, 放射音を用いたサンドイッチパネルの衝撃荷重同定および損傷モニタリング, 日本複合材料学会誌, 査読有, Vol. 41, No. 3, 2015, pp. 85-93
DOI:10.6089/jscm.41.85

[学会発表] (計4件)

- ① Satoshi ATOBE, Akari TSUJIYAMA, Ning HU, Hisao FUKUNAGA, Damage Monitoring of CFRP Sandwich Panels Based on Impact Force Identification, 17th US-Japan Conference on Composite Materials, 2016年8月2日, 北海道大学 (北海道札幌市)
- ② Satoshi ATOBE, Hiroshi TANAKA, Hisao FUKUNAGA, Impact Force Identification of Isogrid-Stiffened Panels Using Experimental Transfer Matrices, 10th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2015年9月3日, Stanford (United States of America)
- ③ 跡部 哲士, 春見 光揮, 福永 久雄, アイソグリッド構造の実験的衝撃荷重同定, 第57回 構造強度に関する講演会, 2015年8月6日, 岡山理科大学 (岡山県岡山市)
- ④ Satoshi ATOBE, Masato MURAMOTO, Hisao FUKUNAGA, Damage Monitoring of Sandwich Panels Based on Impact Force Identification Using Radiated Sounds, 20th International Conference on Composite Materials, 2015年7月23日, Copenhagen (Denmark)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

跡部 哲士 (ATOBE, Satoshi)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号: 40586468