

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06267

研究課題名（和文）ミクロ界面損傷を考慮したCFRP積層板の3次元非弾性損傷進展解析手法の開発と実証

研究課題名（英文）Development of a three-dimensional inelastic damage development analysis method for CFRP laminates considering microscopic interfacial damage

研究代表者

後藤 圭太 (GOTO, Keita)

名古屋大学・ナショナルコンポジットセンター・助教

研究者番号：00760935

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、CFRP製構造部材の損傷・破壊挙動を高精度に予測することを目標に、ミクロ界面の損傷進展挙動を考慮したCFRP積層板のマルチスケール非弾性損傷進展解析手法の構築を行った。均質化理論に連続体損傷力学を導入するとともに、損傷の影響を考慮した弾粘塑性構成式を提案することで、CFRP積層板のミクロ界面における損傷進展挙動と、マクロ力学特性の低下を関連付けて解析を実施した。

研究成果の概要（英文）：In this study, a multiscale inelastic damage development analysis method for CFRP laminates taking into account damage development behavior at microscopic interfaces was developed to evaluate failure or fracture of CFRP structures accurately. Continuum damage mechanics and an elasto-viscoplastic constitutive equation with a damage variable were introduced into the homogenization theory for time-dependent composites. Using the present analysis method, the damage development behavior at the microscopic interfaces and decrease of macroscopic mechanical properties of the CFRP laminates were analyzed simultaneously.

研究分野：計算固体力学

キーワード：機械材料・材料力学 複合材料・物性 計算固体力学 連続体損傷力学 マルチスケール解析 非弾性構成式

1. 研究開始当初の背景

近年、化石燃料の枯渇をはじめとするエネルギー問題や、地球温暖化などによる環境問題への関心の高まりから、世界的に低炭素社会の実現が急務となっており、我が国においても重要な科学技術政策に位置づけられている。これらの問題に対する有効な対応策の一つとしてエネルギー効率の向上が挙げられ、航空機や自動車等の輸送機器分野においては構造の軽量化が重要なテーマの一つとなっている。そのため、金属材料といった従来の構造材料と比較して軽量かつ高強度・高剛性な材料が必要とされており、その筆頭として樹脂母材を炭素繊維で強化した複合材料である炭素繊維強化プラスチック (carbon fiber-reinforced plastic: CFRP) が注目を集めている。航空機や自動車等における CFRP の適用範囲は加速度的に拡大しつつあることから、CFRP の力学特性を明らかにすることは、工学的に大きな意義を有しているといえる。

一方で、CFRP を構成する炭素繊維と樹脂母材は互いに異なる性質を有するため、これらを複合した CFRP の力学特性は非常に複雑なものとなる。さらに、CFRP は炭素繊維と樹脂母材からなる複雑なミクロ構造を有しているため、そのミクロ構造によっても力学特性が変化する。特に CFRP の損傷・破壊特性に着目すると、そのミクロ構造における炭素繊維/樹脂母材界面といった材料特性が急激に変化する境界 (ミクロ界面) 付近では、局所的なミクロ応力・ひずみの集中が生じやすく、これによりミクロ界面で発生した損傷が、CFRP のマクロな最終破壊を招く恐れがある。したがって、CFRP の構成材料やミクロ界面における損傷進展挙動が、CFRP のマクロ力学特性に与える影響を相互に関連付けてマルチスケールの評価を行うことは非常に有効であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、CFRP 製構造部材の損傷・破壊挙動を高精度に予測することを目標に、ミクロ界面の損傷進展挙動を考慮した CFRP 積層板のマルチスケール非弾性損傷進展解析手法の構築を目的とする。均質化理論に連続体損傷力学に基づく損傷表現を導入するとともに、損傷の影響を考慮した弾粘塑性構成式を提案することで、CFRP 積層板のミクロ界面における損傷進展挙動と、マクロ力学特性の低下を関連付けた解析を実施する。これにより、CFRP 積層板の特性解析を低コストで実施可能な手法を提案することで、CFRP 製構造部材の設計を効率化し、当該分野での我が国の国際競争力確保に資する。

3. 研究の方法

(1) まず、CFRP 積層板のマルチスケール損傷進展解析手法を構築する。CFRP 積層板のミクロ構造とマクロ力学特性を相互に関連付

けて解析が可能な均質化理論をベースに、組合せ応力状態における損傷発生の有無を決定する損傷判定則と、材料の損傷状態を荷重負担面積の減少によって表現する連続体損傷力学に基づく損傷表現を新規に導入する。これにより、CFRP 積層板のミクロ構造に発生・進展する損傷と、それにもなうマクロ力学特性の低下を同時に考慮することが可能となる。

(2) つづいて、樹脂母材の非弾性変形特性についても考慮するため、非弾性材料に対する損傷発展式を提案手法に導入する。従来の連続体損傷力学で用いられてきた弾塑性損傷発展式を基に、樹脂母材の力学特性における時間依存性についても考慮が可能な形式へと拡張するとともに、これを構成式に組み込むことで、損傷を考慮した弾粘塑性構成式の構築を試みる。

(3) さらに、樹脂母材および CFRP 積層板の材料試験を実施し、材料パラメータの同定を行う。得られた材料パラメータを用いて CFRP 積層板の損傷進展解析を実施し、解析結果と実験結果とを比較・検討することで、提案手法の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) まず、均質化理論に損傷判定則および損傷表現を導入することで、マルチスケール弾性損傷進展解析手法を構築した。損傷判定則とは、有限要素モデルの各要素について損傷発生の有無を決定するものである。一般に CFRP 積層板内部では、ミクロ構造の不均質性によって多軸応力状態となるため、各応力成分の相互作用を考慮可能な判定則が必要となる。このため、本研究では多軸応力状態における破壊則の一種である Hoffman 則を損傷判定則として用いた。Hoffman 則では、 F 値と呼ばれる材料強度に対する応力値の比を計算し、この F 値が 1 以上の場合に損傷が発生したと判定される。損傷判定則によって損傷と判定された要素に対しては、連続体損傷力学に基づく損傷表現によって要素剛性を低下させることで、擬似的に損傷を表現した。材料の損傷状態を表す損傷変数 D を用いると、損傷発生後の要素剛性 C_{ijkl} は、非損傷状態の要素剛性 C_{ijkl}^0 を用いて次のように表現される。

$$C_{ijkl} = (1 - D)C_{ijkl}^0 \quad (1)$$

なお、上式より要素が最終的に破断した場合を考えると損傷変数は $D=1$ となるが、本研究では数値解析への適用を考え、 $D=0.99$ を最大値とした。また、炭素繊維や繊維束のような異方性材料に対しては、各材料主軸系に対してそれぞれ損傷変数を考えるとともに、損傷発生後は損傷モードに対応する方向の要素剛性を選択的に低下させることで、損傷挙動の異方性についても考慮した。

上記で構築したマルチスケール弾性損傷進展解析手法を用いて、マクロスケールにおいて単軸および多軸負荷を受ける CFRP 積層

板および織物積層板の損傷進展解析を実施した。図1は、 $y_1 - y_2$ 面内において、 y_1 軸方向に引張負荷を、 y_2 軸方向に圧縮負荷を受ける平織積層板の、 y_1 軸方向における応力 - ひずみ関係を表している。解析の結果、引張ひずみに対する圧縮ひずみの割合に応じて、損傷発生後の応力 - ひずみ関係の傾向が変化の様子が確認できる。また、図2は引張ひずみ $E_{11} = 0.02$ における平織積層板内部の損傷要素の分布を表したものである。図中において黒色で示された領域が損傷と判定された要素であり、引張ひずみに対する圧縮ひずみの割合が $|\Delta E_{22} / \Delta E_{11}| = 0.9$ と大きい図2(B)は、図2(A)と比較して損傷が広範囲に分布していることがわかる。これは、図1における両者の応力 - ひずみ関係の傾向と一致しており、本手法の妥当性が伺える。

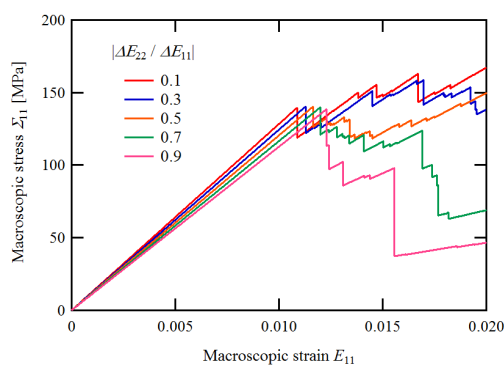


図1 面内引張 - 圧縮負荷を受ける平織積層板の応力 - ひずみ関係。

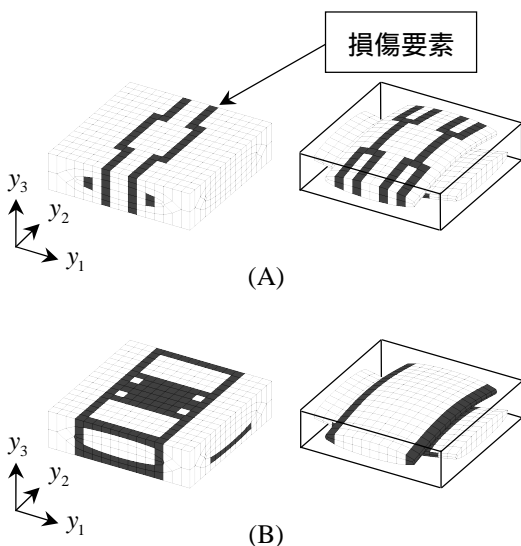


図2 $E_{11} = 0.02$ における損傷要素の分布；
(A) $|\Delta E_{22} / \Delta E_{11}| = 0.1$ および (B) 0.9.

(2) 上記(1)で構築した手法は弾性問題を対象としたものであった。一方、CFRP 積層板は樹脂母材の性質に起因して、負荷条件によっては顕著な非弾性特性を示すことがある。したがって、提案手法の高精度化を目的として、樹脂母材に対して損傷を考慮した弾粘塑性構成式の構築を行った。従来の連続体損傷力

学で用いられてきた弾塑性材料に対する損傷発展式を速度系へと拡張するとともに、これを弾粘塑性構成式に組み込むことで、以下に示す損傷を考慮した弾粘塑性構成式が得られる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = (1-D)C_{ijkl}^0(\dot{\epsilon}_{kl} - \beta_{kl}) - \frac{D}{1-D}\sigma_{ij} \quad (2)$$

ここで、 σ_{ij} および ϵ_{ij} はそれぞれ応力およびひずみ、 β_{ij} は粘塑性関数であり、 (\cdot) は時間に関する微分を表している。式(2)で与えられる構成式を弾粘塑性材料に対する均質化理論に組み込むことで、マルチスケール弾粘塑性損傷進展解析手法を構築することが可能である。

(3) エポキシ樹脂の弾粘塑性特性および損傷特性を同定するため、エポキシ樹脂試験片を用いて負荷 / 除荷を繰り返し与える単軸引張試験を実施した(図3)。損傷変数 D は相当塑性ひずみに依存して増加する関数と仮定し、応力 - ひずみ関係において除荷開始時および終了時の2点をつなぐ直線の傾きから損傷発展式を定めた。

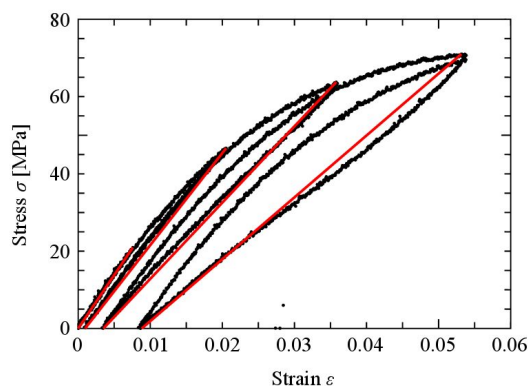


図3 エポキシ樹脂の応力 - ひずみ関係。

つづいて、エポキシ樹脂の弾粘塑性特性および損傷特性と、炭素繊維の弾性定数を用いて、一方向CFRP 積層板を模擬した弾粘塑性損傷進展解析を実施した。繊維体積率は56%とし、ミクロ構造における繊維配列のランダム性を考慮した解析モデルを使用した。

図4は、繊維直交方向負荷を受ける一方向CFRP 積層板の応力 - ひずみ関係を表している。この図より、引張ひずみ E_{11} が増加するにつれて徐々に塑性変形による非線形性が生じ、引張ひずみ $E_{11} = 0.012$ 付近で損傷の発生にともなう応力 - ひずみ関係の急激な低下が確認できる。図5は、この急激な応力 - ひずみ関係の低下が発生した直後の、解析モデルにおける損傷変数 D の分布を表したものである。なお、引張方向は図中の y_1 軸方向と一致しており、また赤色で示された領域は破断と判定された要素を示している。一般に繊維直交方向負荷を受ける一方向CFRP 積層板は、負荷方向に隣接する繊維間の樹脂においてS字型に発生し、それらが進展・結合することで積層板の最終的な破壊へと至るこ

とが知られている．図 5 においても同様な S 字型の損傷を確認することができ，本手法により得られた一方向 CFRP 積層板の損傷特性は妥当であるといえる．

以上より，本研究で構築したマルチスケール非弾性損傷進展解析手法を用いることで，ミクロ界面における損傷の発生・進展と，それともなう CFRP 積層板のマクロ力学特性の低下について，これらを互いに関連付けた高精度な解析が可能であることが明らかとなった．さらに本手法は均質化理論に基づいているため，構成材料の性質や，繊維含有率といったミクロ構造の変化についても，材料パラメータや解析モデルの修正で対応できることから，その特性が多岐に渡る CFRP 積層板の非弾性損傷特性評価を比較的 low コストで実施できる．したがって，当初の目的である，CFRP 積層板の損傷・破壊挙動を高精度かつ low コストに解析可能な手法が構築されたといえる．

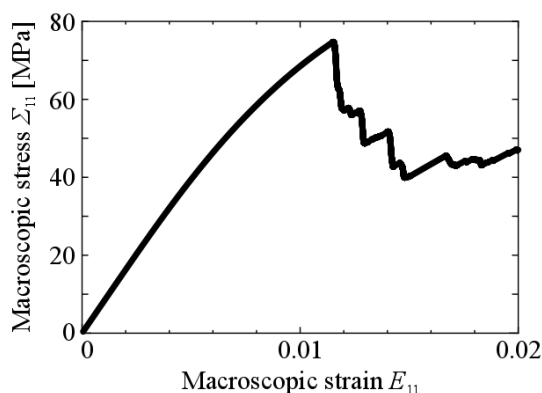


図 4 一方向 CFRP 積層板の応力 - ひずみ関係.

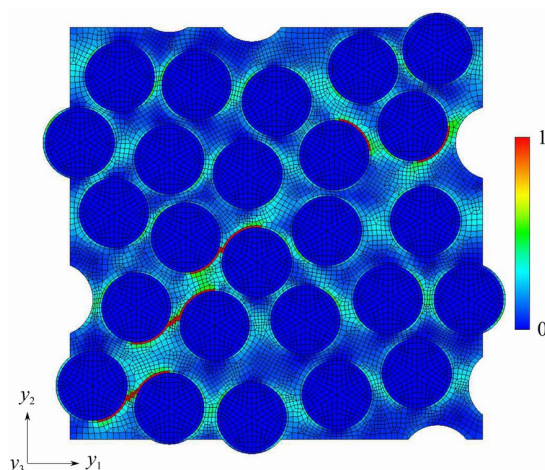


図 5 一方向 CFRP 積層板における損傷変数 D の分布 ($E_{11}=0.012$).

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

後藤圭太, 荒井政大, 西村正臣, 土肥一生, 引張 - 圧縮二軸応力試験による一方向 CFRP 積層板の強度評価, 日本複合材料学会誌, 査読有, Vol. 43, No. 2, 2017, pp. 48-57.

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscm/Matsuda, T., Goto, K., Ohno, N., Effects of fiber arrangement on negative Poisson's ratio of angle-ply CFRP laminates: Analysis based on a homogenization theory, Advanced Structured Materials, 査読有, Vol. 64, 2015, pp. 219-230.>

DOI: 10.1007/978-3-319-19440-0_10

〔学会発表〕(計 8 件)

富岡拓也, 野川直翔, 後藤圭太, 荒井政大, 松田哲也, 均質化理論に基づく平織積層板の二軸負荷損傷解析, 日本航空宇宙学会 第 53 回中部・関西支部合同秋期大会, 2016/11/26, 名城大学ナゴヤドーム前キャンパス (愛知県名古屋市).

後藤圭太, 土肥一生, 西村正臣, 荒井政大, 2 軸試験による一方向 CFRP 積層板の強度評価, 日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 2016/10/8-10, 神戸大学六甲台第二キャンパス (兵庫県神戸市).

富岡拓也, 野川直翔, 後藤圭太, 荒井政大, 松田哲也, 均質化法による平織積層板の損傷進展解析, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会, 2016/9/22-24, 名古屋大学東山キャンパス (愛知県名古屋市).

Goto, K., Tomioka, T., Arai, M., Matsuda, T., Damage development analysis under biaxial loading for plain-woven laminate composites based on homogenization theory, 2016 M&M International Symposium for Young Researchers, 2016/8/10-12, New York (U.S.A.).

他 4 件

〔その他〕

ホームページ等

<http://structure.nuae.nagoya-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

後藤 圭太 (GOTO, Keita)

名古屋大学・ナショナルコンポジットセンター・助教

研究者番号：00760935