

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03848

研究課題名(和文) 繊維強化複合材料の損傷を考慮した非線形力学モデル構築のための実験的評価手法の確立

研究課題名(英文) Development of experimental evaluation method for nonlinear mechanical modeling considering damage in fiber reinforced composites

研究代表者

荻原 慎二(Ogihara, Shinji)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：70266906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：CFRPアングルプライ積層板における、ひずみ速度の異なる単調引張試験、ひずみ漸増応力緩和試験、負荷除荷試験、負荷除荷サイクル中における応力緩和試験、定応力負荷除荷試験におけるラチェティング挙動について実験的評価を行い、過応力を用いた直交異方性粘塑性モデルを構築した。このモデルは、全応力を平衡応力と過応力に加算的に分解するもので、各応力に構成則を設定する。平衡応力にホフマンの弾塑性モデルを使用し、過応力にはひずみ速度への非線形な依存性を考慮できるものを使用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

連続繊維強化複合材料・構造の力学挙動モデル化については、微小弾性変形を仮定するものがほとんどで、塑性力学的研究は少なく、特に有限変形を考慮した粘塑性解析はほとんどなされていない。積層構造によっては、そのようなモデル化が必要であり、異方性を有する繊維強化複合材料・構造に対して、損傷を考慮した有限変形下での非線形力学モデルを構築しようとするところに本研究の学術的および社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Experimental evaluation of monotonic tension at different strain rates, stress relaxation test with increasing strain, loading-unloading test, stress relaxation test during loading-unloading process and ratcheting behavior during loading-unloading test at constant stress range are conducted. Based on the experimental results, orthotropic viscoplasticity model with overstress is developed. The model assumes additive decomposition of total stress into equilibrium stress and overstress and constitutive laws for each stress. Hoffman elastoplastic model is used for equilibrium stress and a model which considers nonlinear dependence on strain rate is used for overstress.

研究分野：機械材料・材料力学、複合材料工学、航空宇宙材料工学

キーワード：炭素繊維強化プラスチック 粘塑性 応力緩和 非弾性力学挙動 積層構造 損傷 ひずみ速度依存性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

連続繊維強化積層型複合材料は、一方向に連続繊維にて強化された層(プライ)を多方向に積層したものであり、各プライは繊維方向に高剛性・高強度であるが、それに直角な方向及び積層方向には剛性・強度は低い。繊維強度を十分に利用し、軽量かつ極めて高強度な構造設計を行う場合は、繊維の破断ひずみは小さい(炭素繊維の場合で2%弱程度)ことから、通常微小変形の範囲で線形弾性材料として設計される。一方、非主軸層(オフアクシスプライ)が主体の積層構造では、変形が大きく、複合材料に特有な損傷が発生し、材料は非弾性特性を有することが知られているものの、このような積層構造の力学挙動のモデル化は十分にはなされていない。

これまでオフアクシスプライの非弾性挙動について、異方性塑性体としてのモデル化の試みはいくつかあるもののほとんどは微小変形の範囲内である。有限変形を考慮したモデル化も少数ながら試みられているが、高精度の実験データを元にしたものはまだない。さらに、微小変形の範囲での損傷力学解析の研究はなされているものの、有限変形下での損傷の影響を考慮したものは応募者の知る限り皆無である。

斜交(アングルプライ)積層板においては、積層構成により、破断強度は15%を越えるものがあり、応力-ひずみ関係は特異な非線形挙動を示すことが知られてきている。このような力学挙動をモデル化できれば、例えばこの種の積層構造をエネルギー吸収部材に適用することが可能となり、この材料の用途拡大につながると考えられる。有限変形下における損傷を考慮した異方性非弾性材料挙動のモデル化のために実験結果の蓄積が望まれる状況である。

2. 研究の目的

上述のような背景にあり、連続繊維強化複合材料・構造の力学挙動モデル化については、微小弾性変形を仮定するものがほとんどで、塑性力学的研究は少なく、特に有限変形を考慮した粘塑性解析はほとんどなされていない。最近の実験が示す通り、積層構造によっては、そのようなモデル化が必要である。異方性を有する繊維強化複合材料・構造に対して、損傷を考慮した有限変形下での非線形力学モデルを構築することを本研究の目的とする。

また、積層構造は無限の組み合わせが考えられることから、実構造を設計する場合には効率的な設計手法が望まれる。そのためのモデル化を行うのみでなく、そのモデル化のための実験的評価手法の指針を得ることも視野に入れる。本研究により、実験的評価を基にした、損傷を考慮した有限変形下の非線形力学モデルが構築されれば、例えば衝撃吸収部材など、繊維強化複合材料の用途拡大につながるものと期待される。

3. 研究の方法

アングルプライ $[+0/-0]_s$ 積層板における $\theta = 45^\circ$ の場合を重点に置き、層厚の影響に特に着目しながら、応力-ひずみ関係(速度依存性を含む)、微視的損傷進展を定量化し、そのモデル化に着手する。ここで重要なのは、有限変形下における繊維方向の変化の影響を実験的に定量評価し、さらに、損傷発生・進展挙動を精度よく定量化することである。得られた実験データを基に、モデル化の検討を行いつつ、 $\theta = 45^\circ$ 以外の場合の実験を行い、モデルの妥当性の検討と高精度化を図る。最終的には、このようなモデル化に必要な実験的評価手法についての指針を得る。

4. 研究成果

図1にアングルプライ積層板における、ひずみ速度の異なる単調引張試験における応力-ひずみ曲線およびひずみ漸増応力緩和試験の結果を示す。単調引張試験においては、ひずみ速度依存性を示した。また、応力-ひずみ関係は顕著な非線形を示し、硬化曲線の傾きが小さくなった後、高ひずみ領域において傾きが大きくなるという挙動を示した。これは、変形による繊維の回転の影響によるものと考えられた。また、顕著な応力緩和挙動を示し、この材料の力学モデリングのためには粘性の影響を考慮に入れることが重要であることが示唆された。ひずみ漸増応力緩和試験を行うことにより、単調負荷における平衡応力の変化を評価可能であると考えられた。

図2にアングルプライ積層板において、負荷-除荷プロセス中に応力緩和試験を挿入した場合の試験結果を示す。まず、負荷-除荷試験を行うことにより、この材料の塑性挙動を考慮に入れることが重要であることがわかった。さらに、この実験の範囲では、負荷-除荷過程における同ひずみでの負荷過程と除荷過程における平衡応力に違いが見られることが示唆され、平衡応力にヒステリシスが見られることがわかった。この点は、更なる実験的検証が必要となるが、この材料の力学的挙動を理解する上で重要な視点である。

図3に本積層板の、定応力負荷-除荷試験における応力-ひずみ曲線を示す。本研究では、200サイクルまで計測を行ったが、著しいラチェッティング挙動を示した。図には100MPの結果を示すが、150MPa、200MPaにおいても同様の結果を得た。すなわち、繰り返し数が少ないうちは、ヒステリシスループの幅が大きく、ラチェッティングひずみの増加が早い。繰り返し数が増えるとヒステリシスループの幅は小さくなり、ラチェッティングひずみの増加速度は小さくなる。

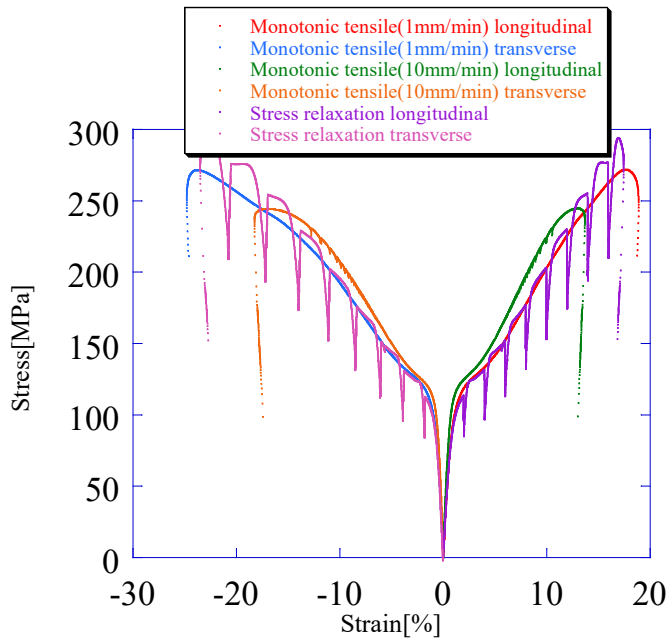


図1 アングルプライ積層板の単調引張，ひずみ漸増応力緩和試験における応力-ひずみ曲線

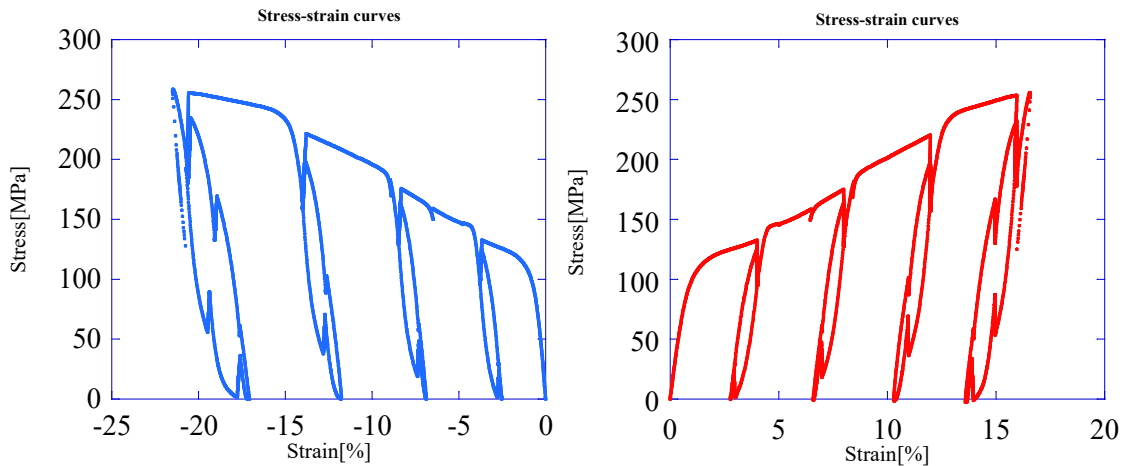


図2 アングルプライ積層板における負荷-除荷プロセスでの応力緩和挙動

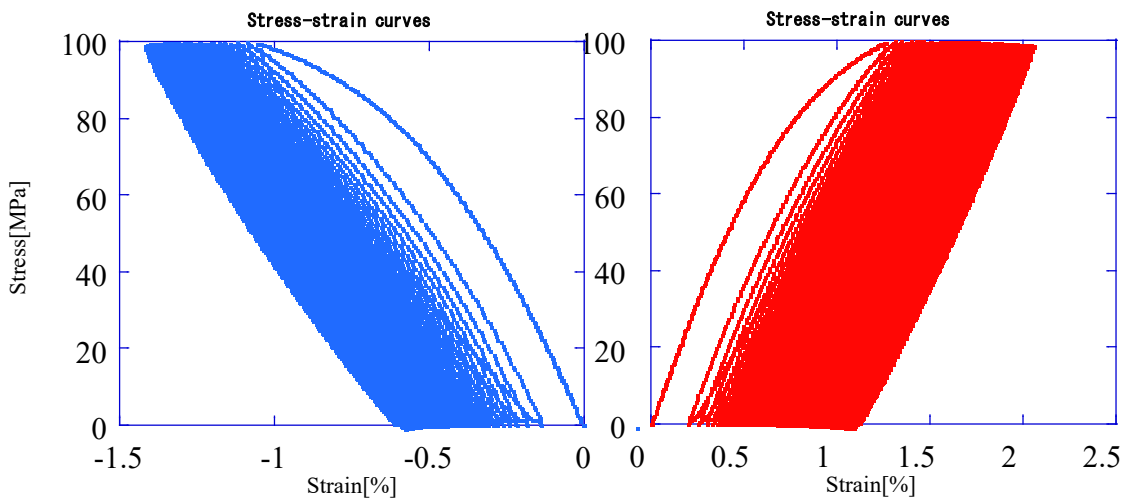


図3 アングルプライ積層板における定応力負荷-除荷試験におけるラチェッティング挙動

得られた応力-ひずみ挙動をモデル化するため，Lion¹⁾による過応力を用いた粘塑性モデルの構築を試みた．本研究では，平衡応力には，直交異方性材料の弾塑性モデルである Hoffman モデルを用いた．その結果実験で観察された主な特徴を再現できるモデルであることを示すことが

できた.

参考文献

1) A.Lion, A constitutive model for carbon black filled rubber: Experimental investigations and mathematical representation, Continuum Mech. Thermodyn., 8, 153-169, 1996

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. J. Mohammad FIKRY and Shinji OGIHARA	4. 巻 7
2. 論文標題 Damage behaviors in cross-ply cloth CFRP laminates cured at different temperatures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 20-00325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.20-00383	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 M. J. Mohammad Fikry and Shinji Ogihara
2. 発表標題 Variational Analysis of Laminates with Divided Regions in Longitudinal Direction
3. 学会等名 Joint Conference of 23rd International Conference on Composite Structures (ICCS23) & 6th International Conference on Mechanics of Composites (MECHCOMP6) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. J. Mohammad Fikry, Shinji Ogihara and Vladimir Vinogradov
2. 発表標題 Measurement of Residual Strains as a Parameter of Matrix Cracking in CFRP Laminates
3. 学会等名 The International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials & Processing (LEMP) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. J. Mohammad Fikry, Zulkifli Nur Atikah and Shinji Ogihara
2. 発表標題 Mechanical Properties and Damage Behavior of Angle-ply CFRP Laminates with Discontinuous Plies
3. 学会等名 International Conference on Fracture and Damage Mechanics (FDM) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荻原慎二, 板橋洋輔
2. 発表標題 纖維強化複合材料の非線形力学特性評価
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荻原慎二
2. 発表標題 纖維強化複合材料積層板の非線形力学挙動
3. 学会等名 日本機械学会第27回機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Ogihara
2. 発表標題 Evaluation of Nonlinear Mechanical Behavior in Fiber Reinforced Laminated Composites
3. 学会等名 44th International Conference and Exhibition on Advanced Ceramics and Composites (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荻原慎二
2. 発表標題 CFRPアングルプライ積層板の粘塑性力学挙動評価
3. 学会等名 日本機械学会第26回機械材料・材料加工技術講演会(山形大学(米沢))
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	ニューキャッスル大学			