

平成 30 年 9 月 7 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06607

研究課題名(和文) 切り欠きを有する炭素繊維強化複合材料積層板の圧縮強度発現メカニズム

研究課題名(英文) Mechanism of Compressive strength of carbon fiber composite laminates with a notch

研究代表者

末益 博志 (SUEMASU, Hiroshi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：20134661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：炭素繊維強化複合材料(CFRP)積層板の圧縮強度発現の物理的根拠解明のために応力集中部からの圧縮破壊に着目し、理論・数値解析および実験を通して研究を進めた。

理論解析においては、複素応力関数法に基づいて、楕円孔周辺の変位場及び応力場の数学解を得た。有限要素法によりせん断不安定問題を解析し、構造的に不安定になることを示すことができた。楕円孔および片側切り欠きを有する試験片の実験を行い、破壊の様相と応力集中の関係を明らかにした。数値解と定性的に一致したが、絶対値では若干の差があり、今後の課題と考える

研究成果の概要(英文)：Theoretical, Analytical and experimental studies were done to understand possible mechanisms of practical compressive strength of carbon fiber reinforced composite (CFRP) laminates. The theoretical solution is derived to see the stress and displacement field based on the complex stress function method. Finite element analysis considering the damage accumulation and non-elastic constitutive relation was performed. Specimens having an elliptical hole or edge notch were tested to evaluate the effect of the stress concentration and dimensions of notch edge radius on the compressive strength.

研究分野：材料力学・複合材料工学

キーワード：炭素繊維強化複合材料 圧縮 積層板 強度 せん断不安定

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化複合材料構造は、高比強度・高比剛性という特徴を生かして、航空宇宙構造物だけでなく様々な産業分野において、軽量化による燃費削減による省エネ手段としてだけでなく、機械構造物の根本的な性能向上に資する材料として注目されている。これまでの熱硬化性樹脂を用いたものからさらに大量生産に適すると考えられる熱可塑性樹脂を用いたものの開発も進んでいる。しかし CFRP は不均質で異方性を持つ材料なので、強化形態などにより強度や剛性などの基本特性が変化し、また多数の破壊機構を持つ材料なので寸法や積層条件等により破壊形態が大きく異なる可能性がある。そのため強度を予測することが非常に困難である。この中で圧縮強度に関しては未解明な部分が多く、とくに、切り欠き応力集中部における特性の把握が非常に困難である。設計のために有孔板による引張や圧縮試験が一般的に行われ、特性の評価がなされているが、有孔板の強度値は孔径等の寸法や積層構成等で大きく変動するため、1 種類の試験片データでは材料性能は比較できても、設計で必要とされているデータの範囲をカバーできない。

2. 研究の目的

本研究では、未知の要素の多い圧縮強度発現理由を理論的にとらえ、定式化して示すことである。これまで一方向強化材料の圧縮破壊現象に関して繊維の圧縮不安定を基本に解析的研究が提案され進められてきているが、本研究は、それらの成果を生かして、一様でない応力状態に繊維座屈理論を拡張していくことが目的である。

3. 研究の方法

(1)理論

図 1 のような、一様な引っ張り応力 σ_∞ が

作用している楕円孔を有する直交異方性板に生じる応力分布を導いた。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 - \mu_2} \sigma_\infty \operatorname{Re} \left[\frac{\mu_1}{\eta_1 \zeta_1} - \frac{\mu_2}{\eta_2 \zeta_2} \right] \\ \sigma_y &= \sigma_\infty \left\{ 1 - \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} \operatorname{Re} \left[\frac{\mu_2}{\eta_1 \zeta_1} - \frac{\mu_1}{\eta_2 \zeta_2} \right] \right\} \\ \tau_{xy} &= -\frac{\mu_1 \mu_2 a}{\mu_1 - \mu_2} \sigma_\infty \operatorname{Im} \left[\frac{1}{\eta_1 \zeta_1} - \frac{1}{\eta_2 \zeta_2} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} \eta_i &= \frac{\sqrt{z_i^2 - a^2 + \mu_i^2 b^2}}{a}, \quad \zeta_i = \frac{z_i + a \eta_i}{a + \mu_i b} \\ \mu_1^2, \mu_2^2 &= \frac{E_L}{2G_{LT}} - \nu_{TL} \\ &\pm \sqrt{\left(\frac{E_L}{2G_{LT}} - \nu_{TL} \right)^2 - \frac{E_L}{E_T}} \end{aligned} \quad (2)$$

この応力分布を用いて応力集中部の局部座屈強度を推測することができる。

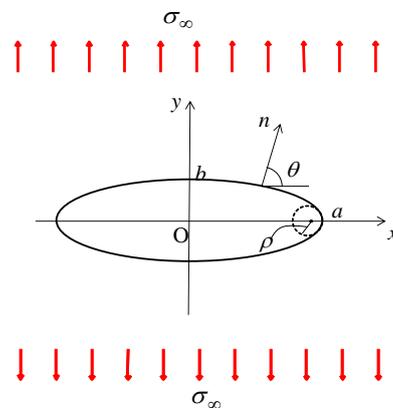


図 1 無限板中の楕円と応力集中

(2) 実験

擬似等方積層板をおよび一方向強化積層板より、楕円形切り欠きおよび片側切り欠きを有する試験片を作製した。応力集中係数を変化させるためにアスペクト比の異なる楕円孔や切り欠き底の半径の異なる片側切り欠きを導入した。

(3) 有限要素解析

各基礎試験用試験片に対応した有限要素モデルに関して応力解析を行った。寸法効果

を明確にするため層間に塑性変形を考慮したモデルや層間剥離の進展の考察のために仮想クラック閉口法を用いた解析を行った。切り欠き底での局所座屈および座屈後挙動を知るために固有値解析および非線形解析を実施した。

4. 研究成果

切り欠きを有する試験片に関し、応力集中係数と圧縮強度の関係を考察した。図2に楕円の軸長と初期損傷応力と最終強度をプロットした。応力集中係数の大きく切り欠き近傍の小さい領域で高い応力分布を有する試験片から応力集中係数を小さくしていき、極限として一様圧縮の平板まで初期損傷から最終破壊までの関係を物理的に説明できることが分かる。

図3に損傷発生時の公称応力 σ_i および破壊時の公称応力 σ_f と楕円孔荷重方向軸の長さ b の関係を示す。 σ_i および σ_f は、(T800H/#3633, T800S/#3900-2B)ともに楕円孔径 b に対し同程度の値であったが b が大きくなるにつれて大きくなる。 b が小さいほど孔縁での応力集中が大きくなるため、低い荷重で繊維方向圧縮強度を超え、初期損傷が生じる。また、 b が大きくなるにつれて、最終破壊応力と初期損傷発生応力が近づいていくという結果になった。また初期損傷発生時の荷重から有限要素解析の応力値を用いて推定される 0° 層の最大応力と孔径の関係を図3に示した。応力集中係数が大きいほど損傷が生じる局所的な応力が大きいことが示された。

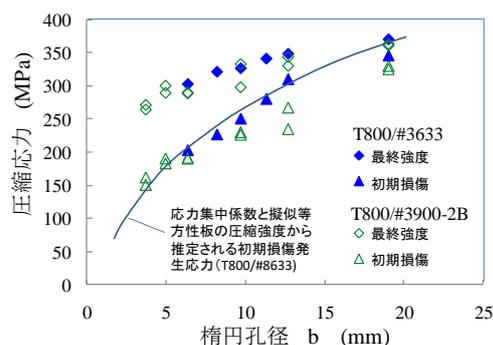


図2 楕円孔径 b と積層板の破壊強度及び初期損傷発生応力の関係

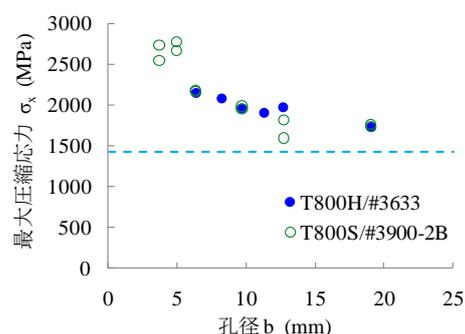


図3 初期損傷発生時の 0° 層の最大応力

24kNの荷重で中断したT800H/#3633の円孔($b=6.35\text{mm}$)の試験片の層内の損傷の様子である。円孔表面近くでの損傷は、実験中に外部から観察した損傷である。この損傷から内部に進展するが内部に進むに従い徐々に細くなっている。孔表面近くではこの面内方向に繊維がキンクするが内部に進展している損傷は、板厚方向に繊維が倒れる傾向がある。損傷の状況から 0° 層の損傷は安定的に成長するか、応力集中が大きい場合、ある程度不安定に進展するとしても、一気に最終破壊に至るほど不安定に成長することはないと考えられる。この結果は最終強度が初期の応力集中状態ではなく、損傷が発生した状態での強度を示していることになり、強度予測に対する重要な知見が得られた。



図4 T800H/#3633の0°層のSection-A顕微鏡写真(24kN)

図5は、円孔の応力集中が最も大きくなる部分ではなく、円孔からずれた場所で0°層に損傷が発生したものである。この点では損傷や初期不整がなくてもせん断ひずみが大きくなる。トランスバースクラックは、始めの0°層損傷に起因して発生したと考えられる。

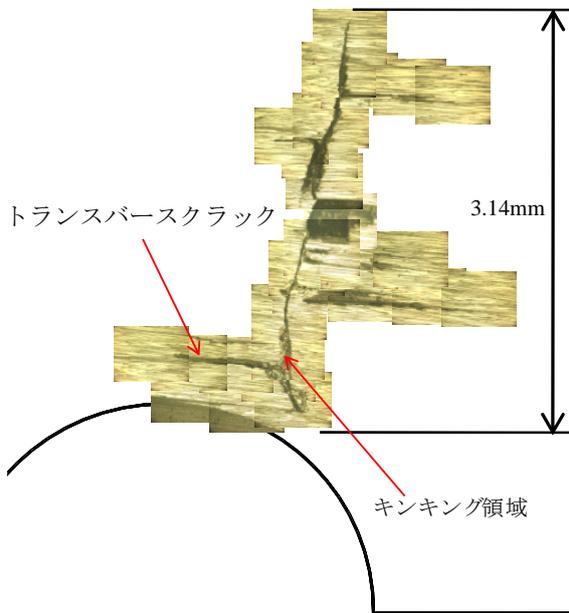


図5 T800H/#3633の0°層の顕微鏡写真(23kN 6層目)

図6は、荷重に平行な断面で、圧縮損傷部とそれに起因して起きた層間剥離が観察される。

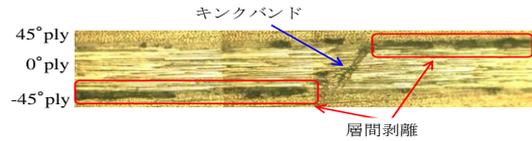


図6 T800H/#3633の円孔部のSection-C断面

有限要素解析は市販のソフト (abaqus) を用いて行った。解析で用いた有限要素分割図を図7に示す。様々な状況を考慮して数値解を求めた。その一例として荷重が同じでも寸法が大きくなると層間の塑性ひずみが大きくなり層間剥離が発生しやすくなることを示した結果が図8である。

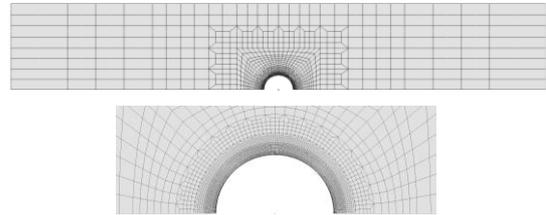


図7 有限要素分割

表1 材料の物性値

	E_L (GPa)	E_T (GPa)	G_{LT} (GPa)	G_{TT} (GPa)	ν_{LT}	ν_{TT}
T800H#3633	148	9.56	4.55	3.17	0.3	0.49
T800S#3900-2B	142	7.79	3.99	3.17	0.34	0.49

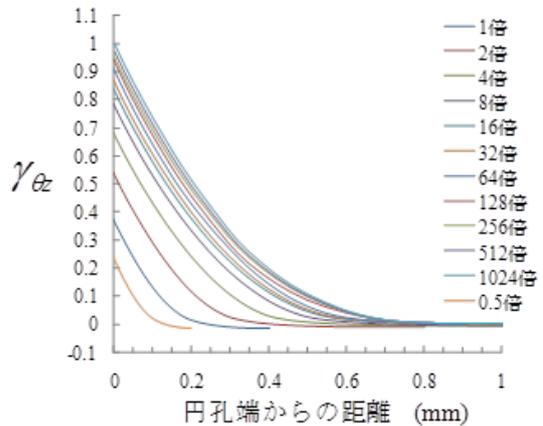


図8 樹脂層の塑性変形を考慮して得られた半径方向のせん断ひずみ分布と寸法の関係

結論

本研究課題の研究を通して繊維強化複合材料の圧縮強度発現に関する多くの有意義な知見が得られた

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) 末益、森本、山本、バイパスカとベアリング力を同時に受けるCFRP積層板のファスナー継手の破壊挙動、日本複合材料学会誌、印刷中、(査読あり)
- (2) 末益、松尾、ランダム配向不連続繊維強化複合材料の弾性率の確率特性と体積効果、日本複合材料学会誌、印刷中、(査読あり)。
- (3) 末益、横荷重を受ける多重層間剥離を有する軸対称積層板の層間剥離進展に関する解析的研究、日本複合材料学会誌、43, 2 (2017), 58-64、(査読あり)
- (4) H. Suemasu, Analytical Approaches to Compression after Impact (CAI) Behavior of Carbon Fiber Reinforced Composite Materials, Advanced Composite Materials, 2015, (査読あり)

[学会発表] (計 8 件)

- (1) 末益博志、複合材料積層板の衝撃損傷と圧縮強度劣化 (CAI)、JCCM9, 同志社大学, 2018 年 3 月, 同志社大学(特別講演)
- (2) H Suemasu, Analytical study on impact damage of composite laminates, 15th European-Japanese Meeting on Composite Materials, Imperial College London, UK, September, 2017.
- (3) H Suemasu, Analytical study on instability of multiple delaminations of axisymmetric composite laminates subjected to transverse loading, SEA-J CCM 9, 2017 年 8 月
- (4) 家永、上法、末益、切り欠きを有する炭素繊維強化複合材料積層板の圧縮破壊メカニズム、JCCM 8, 2017 年 3 月。
- (5) 高井、末益、市来、CFRP積層板の衝撃損傷発生および進展メカニズム、JCCM 8, 2017 年 3 月
- (6) 山本、末益、森本、バイパスカとベアリ

ング力を受けるCFRP積層板のファスナー継手の破壊挙動に関する研究、JCCM 8, 東京大学, 2017 年 3 月

- (7) H Suemasu, Evaluation of Impact Damage in Circular Laminates Subjected to a Transverse Load, 17th European Conference on Composite Materials, Munich, Germany, 26-30 June 2016.
- (8) 末益、長嶋、市来、複合材料積層板の衝撃損傷に関する解析的研究、飛行機シンポジウム、富山、10月、2015.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
末益 博志 (SUEMASU, Hiroshi) (上智大学・理工学部・教授)
研究者番号：20134661
- (2) 研究分担者
長嶋 利夫 (NAGASHIMA, Toshio) (上智大学・理工学部・教授)
研究者番号：10338436