

氏 名 原 栄一

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1325 号

学位授与の日付 平成 22 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 炭素繊維強化プラスチック複合材料の
面外引張試験方法の研究

論文審査委員 主 査 教授 小松 敬治
准教授 後藤 健
教授 邊 吾一（日本大学）
准教授 横関 智弘（東京大学）

論文内容の要旨

1章・・・緒論

先進複合材料,特に炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は,比強度と比剛性に優れ,航空宇宙分野において一次構造部材に使用されるなど構造軽量化に重要な材料であるとともに,近年では車両メーカーを含めた一般産業界においても軽量化による燃費低減の観点から環境に配慮した材料として適用されるなど,新しい用途が広がってきている.しかしながら,複合材料は材料の構成(マトリックス,繊維強化材,繊維とマトリックスの界面),強化形態(一方向強化,多方向強化,織物強化,3次元強化)など,一般的な金属等とは異なった複雑な特性支配因子を有している.

近年,CFRPは民間航空機の一次構造部材などの厚肉構造にも使用されるようになり,繊維方向と垂直な板厚方向(面外方向)の力学特性に関しても標準的な試験法を確立する必要性が指摘されるようになってきた.2008年には,ASTM(American Society for Testing and Materials)により試験法が規格化された(ASIM D 7291)が,この方法は標準試験法として採用するには課題点があることが,出願者らの予備検討で明らかにされた.そこで本研究では,現行の面外力学特性試験法の強度評価試験法と弾性率評価試験法課題点を明確にし,それらの課題を解決する方法を提案することを目的とした.

2章・・・面外引張強度取得試験法について

ASTMの規格の面外引張強度試験法(ASIM D 7291)は,円柱形状試験片を専用治具(鋼製のEnd tab)に接着して厚さ方向に引張荷重を加える方法である.しかし,この方法では,被検部に一様な引張応力を形成することは困難であり,

- (1) 負荷される体積が供試体寸法により変化し,破断基準強度が変化する
- (2) 局所的な応力集中が発生し応力集中部からの破壊が発生する
- (3) 一軸負荷にもかかわらず,多軸応力が発生する

など,材料物性を決定する方法としては好ましくない状況が生じる.この結果,この方法で得られる見かけの面外引張強度は,寸法形状によって大きく変化する.

これの問題点を克服するために,本研究では,Weibull統計と有効体積および多軸応力に対する破壊則を導入してその有効性を実証した.

(1) 面外引張強度の試験片の寸法・形状による変化を,有限要素解析と実験結果から取得したWeibull統計を組み合わせることにより定量化した.

(2) 局所的な応力集中を有限要素解析により求め,この結果にWeibull統計の有効体積を導入することにより,様々な形状の供試体の面外引張強度が推定可能であることを示した.

(3) 面外引張試験で生じる多軸応力の影響が,簡単な破損則を用いることにより定量化できることを示した.

3章・・・面外弾性率取得試験法

ASTIM D 7291では,積層構成を指定せず,板厚6mm以上直径20mm~28mmの円柱形状供試体を用い,円周側面の板厚中心位置にゲージ長1.5mmの歪みゲージを貼り付けることを規定している.また,歪みゲージの貼付位置に関しては,ゲージが2枚の時には供試体外周角の任意の180°毎に,3枚の時には供試体外周の任意の120°毎に貼付することを推奨している.しかし,積層CFRPは一般に異方性が顕著であり,円柱形状供試体の測定位置(外周の角度)によって歪み量に変化し,ASTIM D 7291で規定された計測位置だけでは正確な弾性率の測定ができないことが想定された.その上,面外引張試験では,弾性率とポアソン比の異なる鋼製End tabや接着層と歪み測定位置とが近接することが避

けがたいために、供試体板厚によっては、歪みの計測値に大きな誤差が含まれることが想定された。面外弾性率を計測する試験方法を最適なものに近づけるために、本研究では供試体板厚やプライ一層の厚さ、積層構成、歪みゲージの貼付位置および歪みゲージ長の5つの因子が面外弾性率の計測に及ぼす効果を検討した。

異方性の強い一方向強化材複合材では、一様に引張荷重を負荷しても、ゲージ長・測定位置によって歪みが大きく変化することを示し、その変化が現れる機構を明らかにした。また多方向積層複合材の代表的な積層構成である擬似等方材では、歪みゲージ長・ラミナの板厚・測定位置によって計測される歪みに、大きな変化が現れることを明らかにした。これらの結果を踏まえて、CFRP積層材の面外弾性率を取得に当たり、箔歪みゲージを使用する際の指針を提案した。

4章・・・新規の強度取得試験法の開発について

2章で検討した強度試験法は厚板のCFRP板から円柱形状やくびれ円柱形状の供試体を切りだし、これを専用治具に接着して治具を介して直接面外方向に負荷させる方式である。この試験法の課題を2章では実験と有限要素解析を組み合わせることで解決した。しかしながら、円柱形状やくびれ円柱形状は加工が困難であり、試験自体も軸合わせに高精度が要求されるなど、より簡敏な方法の開発が求められていた。このような要求に応えるため、本章では簡易な強度を提案した。即ち、より簡単に切削加工ができる短冊形試験片を用い、面外方向の引張負荷が発生するような曲げ荷重をかけて破壊させる方法である。この方法を用いることで、既述の直接負荷法の専用治具や接着の工程が不要になるため、高精度な破壊試験が簡易に実施できることを実証した。

5章・・・結論

本研究の成果をとりまとめ、残された課題や将来展望を述べた。

博士論文の審査結果の要旨

先進複合材料,特に炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、比強度と比剛性に優れ、構造軽量化に重要な材料である。近年 CFRP は民間航空機の一次構造部材などの厚肉構造にも使用されるようになり、繊維方向と垂直な板厚方向 (面外方向) の力学特性に関しても標準的な試験法を確立する必要性が指摘されるようになってきた。2008 年には,ASTM(American Society for Testing and Materials)により面外方向の強度・弾性率の取得方法が規格化された (ASTM D 7291) が、この試験法は標準的な試験法として採用するには課題点があることが、出願者らの予備検討で明らかにされた。そこで本博士論文では、現行の ASTM D 7291 に関する課題点を明確にするとともに、それらの課題を解決する方法を提案することを目的とした検討を行った。

本博士論文の第 1 章では、本研究の背景や面外特性取得に係わる課題及び本研究の目的を示した。

第 2 章では ASTM D 7291 の面外引張強度取得試験法に関する課題を明らかにした後、課題を克服する方法を検討した。ASTM D 7291 の方法では、1) 被検部に一樣な引張応力を形成することは困難であり、局所的な応力集中が発生し応力集中部からの破壊が発生する、2) 一軸一樣負荷にもかかわらず多軸応力が発生する、3) 負荷体積が供試体寸法により変化し破断基準強度が負荷体積とともに変化するなど、材料物性を決定する方法としては好ましくない状況が生じる。この結果、この方法で得られる面外引張強度は、寸法形状によって大きく変化する。この課題点を克服するために、本研究では Weibull 統計と有効体積および多軸応力に対する破壊則を導入したモデルを提案し、ASTM D 7291 の方法に基づき様々な形状の供試体で得られた面外引張強度が、均一応力場における強度に換算可能であることを示した。

第 3 章では面外弾性率の取得方法に関する検討を行った。ASTM D 7291 では、積層構成を指定せず、板厚 6mm 以上直径 20mm~28mm の円柱形状供試体を用い、円周側面の板厚中心位置にゲージ長 1.5mm の歪みゲージを貼り付けることを規定している。歪みゲージの貼付位置に関しては、ゲージが 2 枚の時には供試体外周角の任意の 180°毎に、3 枚の時には供試体外周の任意の 120°毎に貼付することを推奨している。しかし、積層 CFRP は一般に異方性が顕著であり、円柱形状供試体の測定位置 (外周の角度) によって歪み量が変化し、ASTM D 7291 で規定された計測位置だけでは正確な弾性率の測定が困難であることが想定された。その上この試験方法では、弾性率とポアソン比の異なる鋼製 End tab や接着層と歪み測定位置とが近接することが避けがたいために、供試体板厚によっては歪みの計測値に大きな誤差が含まれることが想定された。そこで、面外弾性率の計測方法を最適化するために、本研究では供試体板厚やプライー層の厚さ、積層構成、歪みゲージの貼付位置および歪みゲージ長の 5 つの因子が面外弾性率の計測に及ぼす効果を検討した。その結果、異方性が強いときには、一樣負荷をしても、ゲージ長・測定位置によって得られる歪みが大きく変化することを示し、その変化が現れる機構を明らかにした。また多方向積層複合材では、歪みゲージ長・ラミナの板厚・測定位置によって計測される歪みに大きな変化が現れることを明らかにし、この結果を踏まえて、CFRP 積層材の面外弾性率取得に当たり、箔歪みゲージを使用する際の指針を提案した。

第 4 章では新たな面外試験方法を提案した。ASTM D 7291 の方法では、試験片の加工にお金と時間がかかり軸合わせに高精度が要求され、また 2 章で詳述したように、結果をまとめるには有限要素解析を含む複雑なデータ処理が必要であるなど、より簡敏な方法の開発が求められていた。この要求に応えるため、より簡単に加工できる短冊形試験片を用いた曲げ試験法を検討した。この結果、曲げ試験法を用いることで、ASTM D 7291 の方法に比べて破壊試験が簡易に実施でき、さらに得られた結果も第 2 章の方法に比べて高精度であることを実証した。この試験法は、JIS や ISO へ新規試験法として提案すべく準備作業が進められている。

最後の第 5 章では、本研究で得られた結論結果をまとめ、残された課題や将来展望を述べた。

以上、本研究は膨大な試験結果と有限要素法による解析により裏付けられた考察がなされており、優れた新規試験法の提案も含み、実用的に高い独創性を有するものである。この内容は査読付き論文（日本語1編，英語（査読中）2編）と国際学会発表4件で発表されている。これらの結果を踏まえ、本審査委員会は、本申請論文が博士学位論文としての価値が十分あるものと判断した。