

CFRPラティス構造リブ部の微視的構造を考慮した有限要素解析

学生証番号 47126056 氏名 伊井 慎悟
(指導教員 小笠原 俊夫 教授)

Keywords: CFRP, Finite element analysis, Modeling, Digital image correlation, Lattice structure

1. 序論

CFRPは航空宇宙分野において重要な材料であるが製造コストの高さが問題となっている。製造の低コスト化の手段としてオートクレーブを用いない製造法が知られているが、この方法ではCFRPを成形する際に与える圧力が低く、内部に予期できないボイドや繊維のよれなどの微視的な欠陥が生じる可能性がある。CFRP構造に関する従来の研究ではそれらの微視的欠陥が物性に与える影響は十分に考慮されてこなかった。そこで本研究は、ラティス構造を例に取りX線CTを用いることでそのリブ内部の微視的欠陥を考慮した有限要素モデルを作製する手法を構築することを目的とする。また、そのモデルを用いた有限要素解析と試験の結果を比較し手法の妥当性を検証する。なお、ラティス構造は炭素繊維を一方方向に並べた複合材リブが格子状に配置された、繊維方向の高い比強度・比剛性を活かした構造である。低コスト製造法が利用できるため、ロケットと衛星を接続するアダプタなどへの利用が期待されている。

2. 微視的欠陥を含むリブのモデル化と4点曲げ解析

2-1 モデル化手法の概要(図1)

まず、ラティス円筒構造から長さ64mmの17本のリブを切り出した(図2)。この円筒構造は炭素繊維束を樹脂に浸しながら溝のある円筒に巻き付け真空圧で硬化して製造される。繊維束間のボイドや巻きつけ時の繊維よれが予想され、それらを有限要素モデルに反映する必要がある。17本の試験片のうち3本(TP1, 2, 3と呼ぶ)を選択し、これらの試験片の微視的欠陥を考慮した有限要素モデルを作製した。リブと同寸法の直方体を用意し、それを六面体要素に分割し有限要素モデルとした(2-2)。全ての要素に材料情報を与える必要があるが、その情報は切り出した試験片のボイドや繊維よれを反映したものでなければならない。そこでX線CTによって試験片の断層画像を撮影し(2-2)、画像の輝度値に関する情報から1要素ごとに弾性マトリクス(2-3)と繊維方向(2-4)を定義した。それらの材料情報を入力した有限要素モデルを用い4点曲げ解析を実施し(2-5)、試験片のたわみと荷重の関係式から曲げ弾性率を計算した。

2-2 有限要素モデルの準備とX線CT撮影

まず、直方体の有限要素モデルを用意しそれを縦48要素、横64要素、高さ14要素の六面体要素に分割した(図3)。微視的構造を考慮した有限要素モデルを作るためには試験片内部を観察する必要があるため、X線CTによりリブの断層画像を撮影し、それを用いて各要素における構成方程式 $\{\sigma\}=[D]\{\varepsilon\}$ の弾性マトリクス $[D]$ と繊維方向を計算した。試験片の全領域で撮影することが望ましいが、断層画像の取得には長時間を要するので試験片を左端(横幅20要素)、中央(横幅24要素)、右端(横幅20要素)にわけ、図3の白色で示される横幅4要素を代表部とし断層画像を取得した。残りの領域はそれぞれの代表部と同じ弾性マトリクスと繊維方向分布を持つと仮定した。図3の点線で囲まれた位置での断層画像を図4に示す。撮影にはXradia MicroXCT-200を用い、撮影時の線源の管電圧は22kV、管電流は200 μ Aであった。1pixelの解像度は3.83 μ mとした。図4の黒色で示される1辺64pixel(約245 μ m)の正方形が1要素の大きさである。1要素のz方向長さは206pixel(約789 μ m)となっている。

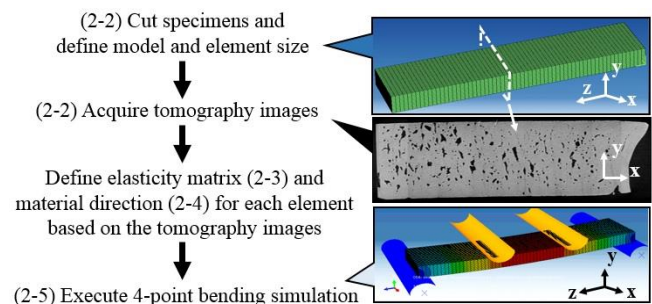


図1 Overview of the proposed methodology

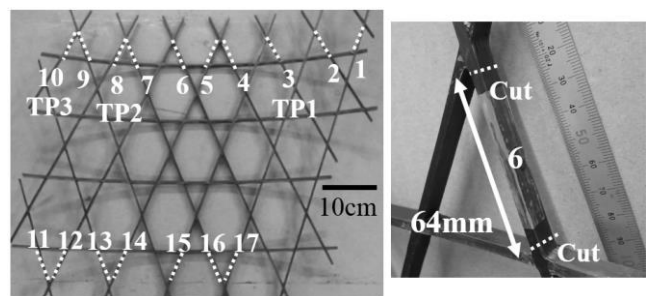


図2 Specimen locations in lattice cylinder

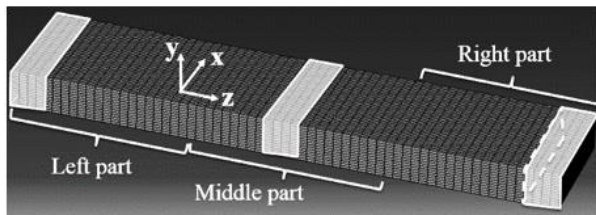


図3 Finite element model and tomography locations

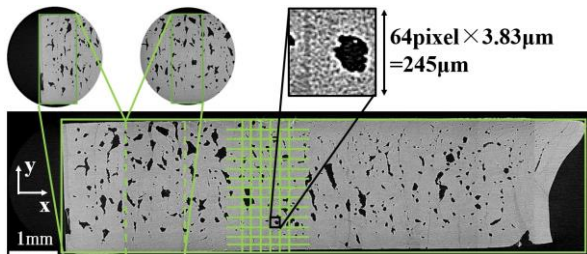


図4 Tomography image of the right part

2-3 弾性マトリクス[D]の計算

1要素内では同じxy断面が続き試験片は直交異方性であると仮定する。1要素をCFRPとみなしHalpin-Tsaiの式[1]から[D]の成分を計算した。Halpin-Tsaiの式では繊維と樹脂が占める割合 V_f , V_m が必要である。まずX線CTで撮影した画像を二値化しポイドに相当する黒い画素数を数え、ポイドが占める割合 V_p を計算した。 V_f と V_m については、輝度値で両者を区別するのはこの解像度では難しいため、試験片の断面研磨画像から V_f の平均値を取得し全要素に適用する手法、1要素内の画素の輝度値平均と V_f の関係式を導き要素ごとに V_f を定義する手法の2つを用いた。前者の手法では試験片6のxy断面を研磨し顕微鏡で観察することで V_f を算出した。後者の方法では断面研磨画像のポイドを除いた領域内の輝度値の平均を計算し、同じ位置での断面研磨画像と比較することで輝度値平均との関係式を得た。画像の二値化や V_f の計算は自作したプログラムにより行い、Abaqusによる解析では計算された[D]をユーザーサブルーチンumatで読み込ませた。

2-4 繊維方向の計算

各要素の繊維方向は、画像相関法(Digital Image Correlation, DIC)により計算した。DICでは2枚の画像を比較して注目した領域の移動ベクトルを計算することができ、CFRPの隣り合う断面研磨画像を用いると画像間の繊維方向とその分布を3次元的に取得することができる[2]。1要素内では繊維方向が一定であると仮定し、Strain Master 8.1.2を用いて計算した。解析ではユーザーサブルーチンorientにその計算結果を読み込ませ要素ごとに繊維方向を与えた。

2-5 解析条件と解析結果

Abqaus 6.13を用いて4点曲げ解析を行った。圧子と支点は解析的剛体表面を用いて表現し、圧子間距離は支点間距離 L の1/3とした。圧子にy方向負の変位を与えたときの荷重 P を用いて曲げ弾性率を計算した。

解析の様子と得られた曲げ弾性率を図5に示す。

3. 試験との比較と考察

試験片6と9を除く15本の試験片を用い4点曲げ試験を実施した。試験方法・TP1~3の最下点のたわみと荷重の関係を表したグラフ・曲げ弾性率を図6にまとめる。TP1とTP3では解析結果と試験結果は良く一致しており、提案した有限要素解析モデル作製手法により曲げ弾性率を1%以内の誤差で予測できた。TP2の解析結果が試験より小さくなった要因の1つとしては繊維よれの過剰評価が挙げられ、撮影位置の増加で対処できる。また、試験片ごとに断面画像の明るさが異なっていた可能性も挙げられる。これはX線CTに特有の問題であり試験片と同様のX線吸収率を持つ物質を継ぎ足すことで対処できる。

4. 結論

X線CTによる断面画像をもとにラティス構造リブ部の微視的欠陥を考慮した有限要素モデルを作製する手法を構築した。また、TP1とTP3では有限要素解析と試験の結果がほぼ一致したことから手法の妥当性を示すことができた。一致しなかったTP2の結果からは手法の改善点を見出すことができた。

参考文献

- [1] J. C. Halpin et al., *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, 16, 5, pp. 344-352 (1976)
 [2] Akinori Yoshimura et al., *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, 40, 4, pp. 146-152 (2014)

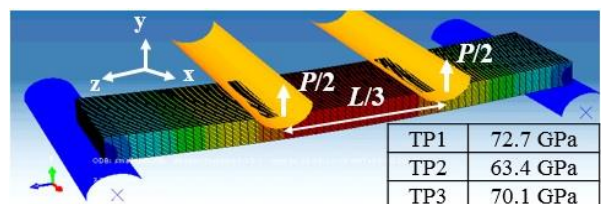


図5 Four-point bending simulation and its result

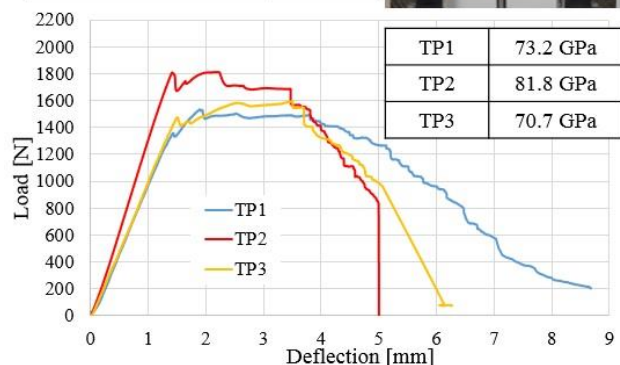
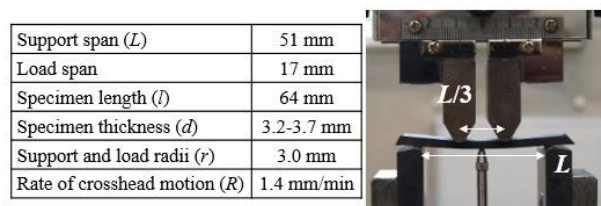


図6 Four-point bending test and its result