

放射光 X 線 CT を用いた CFRP 積層板の静的曲げ負荷中に
生じる損傷挙動の評価
Evaluation of Damage Behavior of CFRP Laminates under Static Bending
Loads Using Synchrotron Radiation X-ray CT

鶴田 秀樹, 禹 明勲, 榊原 洋平, 高梨 正祐
Hideki Tsuruta, Myunghun Woo, Yohei Sakakibara, Masahiro Takanashi

株式会社 IHI
IHI Coporation,

CFRP 積層板の静的曲げ負荷中に生じる損傷過程を放射光 X 線 CT によりその場観察することで、マトリクスクラックおよび層間剥離の定量データを取得するとともに、FEM 解析の損傷モデルの妥当性を検証することが目的である。各変位レベルに対応したマトリクスクラックおよび層間剥離の発生・進展の観察結果が得られ、静的曲げ負荷中の CFRP 損傷過程のその場観察に成功した。今後、各変位レベルにおけるき裂密度やき裂長さを定量的に評価し、FEM 解析結果と比較・検証を行う。

キーワード： CFRP, マトリクスクラック, 層間剥離, マイクロ CT, ナノ CT, in-situ 観察

背景と研究目的：

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics：CFRP）の強みは軽量かつ高強度な点にある。CFRP の密度は約 1.8 g/cm^3 であり、アルミの密度 2.7 g/cm^3 と比較して有意に軽く、その上で強度および弾性率に優れている。

CFRP の損傷過程は、繊維と樹脂の界面での剥離から始まり、界面剥離の連鎖によるトランスバースクラックが形成され、最終的に層間剥離へと進むことが知られている。CFRP 構造部材の強度評価を行う上で、面外方向から CFRP 積層板に荷重が作用する曲げ負荷モードは重要であり、積層構成に応じた損傷過程を詳細に分析し、FEM 解析に損傷観察結果をフィードバックすることで FEM 解析の精度向上が期待される。

CFRP の損傷過程を非破壊で観察する方法として、放射光 X 線 CT 法が用いられる。その多くは単軸引張/圧縮試験中の観察結果であり^[1]、曲げ負荷モードでの観察例は少ない。これは、一般的な曲げ試験では、治具に X 線ビームが遮られるため CT 観察が困難であることに起因する。

本研究では、熱硬化性 CFRP 積層板に関して、静的曲げ荷重下におけるマトリクスクラックおよび層間剥離の定量データを取得するとともに、FEM 解析の損傷モデルの妥当性を検証することを目的とする。そのため、単軸負荷下で CFRP 試験片に曲げモーメントを付与できる小型試験機を設計・試作し、放射光 X 線 CT 法と組み合わせて CFRP 損傷過程を連続的に観察した。

実験：

供試材は熱硬化性 CFRP である。層ごとに繊維方向を変えた基本的な積層構成の CFRP 積層板を製作した。図 1 に CFRP 試験片の設計図面を示す。最小断面部が幅 1mm、厚さ 0.75 mm 程度となるようにダンベル型の微小試験片を作製した。

小型試験機を用いた静的曲げ負荷と、放射光 X 線 CT 観察を交互に繰り返すことで、マトリクスクラックならびに層間剥離の発生・進展挙動を観察した。静的曲げ試験に関しては、CFRP 試験片を試験機軸心から偏心させて固定し、軸力を付与することで試験片に曲げモーメントを与えた。各負荷レベルで変位を保持し、BL20XU のマイクロ CT モードおよび、ナノ CT モードで X 線 CT 観察を実施した。

X 線 CT による測定条件は、X 線エネルギー：30 keV、露光時間：30 msec、CFRP 試験片とディテクター間の距離：60 mm である。試験片サイズが観察視野に収まらないため、オフセット CT モードで計測することにより視野を拡張した。試験片が 360°回転する間に 1800 枚の X 線透過像を

取得した。本測定条件を用いることで、X線CT観察により得られた画像解像度は、マイクロCTモードでは $0.495\ \mu\text{m}/\text{pix}$ 、ナノCTモードでは $0.0325\ \mu\text{m}/\text{pix}$ となった。

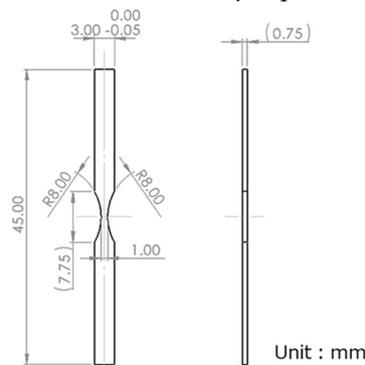


図1 ダンベル型試験片 (単位 :mm)

結果および考察：

図2に各変位レベルにおいて得られたマイクロCTモードでのX線CT断層像を示す。最初に曲げの引張側である2層目においてマトリクスクラックが発生し、それらが層間に到達することで層間剥離の起点となっている。さらに、層間剥離が進展することで最終破断に至ることが観察された。以上より、静的曲げ負荷中のCFRP損傷過程のその場観察に成功し、各変位レベルでの損傷量の定量評価が可能になった。

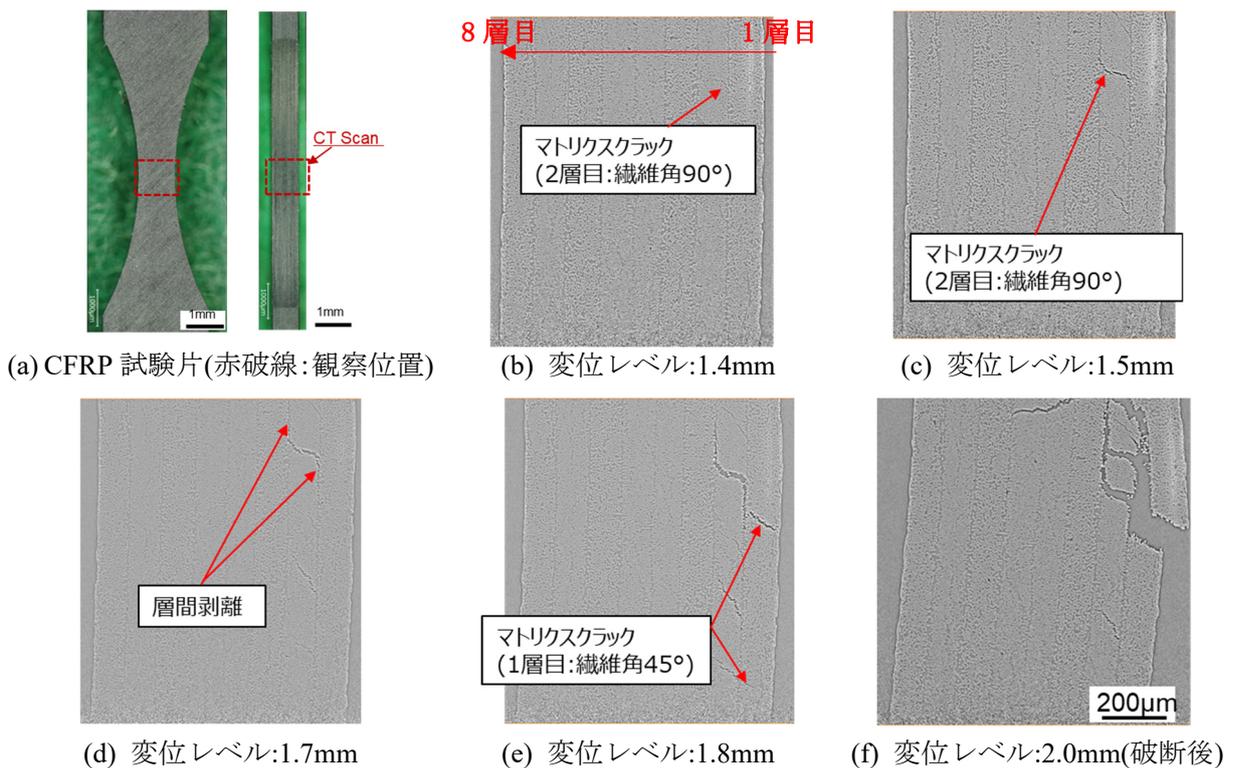


図2 X線CT観察結果

今後の課題：

各変位レベルでのき裂密度やき裂長さを定量的に評価し、FEM解析結果と比較・検証する。

参考文献：

- [1] N. Pournoori, et al. In situ damage characterization of CFRP under compression using high-speed optical, infrared and synchrotron X-ray phase-contrast imaging. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2023; 175: 107766.