

衝撃パンチング穿孔を有する CFRP 積層板の インピーダンスモニタリングによる引張損傷挙動の解明

Damage process monitoring of impact punched CFRP laminates during tensile loading using electrical impedance

香川大学 創造工学部 創造工学科 先端材料科学領域 准教授 松田伸也
Area in Advanced Materials Science, Faculty of Engineering and Design,
Department of Engineering and Design, Kagawa University, Shinya Matsuda

要旨

高比強度な CFRP は、自動車など大量生産向け構造部材として適用が拡大している。一般に、CFRP 構造部材はニアネットシェイプで成形されるが、様々なサイズや形状の穴あけやトリミングなどの 2 次加工が要求される。本研究では、高い引張強度を有しつつも生産性に優れている落錘衝撃荷重によるパンチ加工をターゲットに、加工品位と引張強度との相関を明らかにするため、電気インピーダンスによる引張試験中の損傷挙動を明らかにすることを目的とした。その結果、準静的荷重による加工と比較して、高周波側のインピーダンスは、高いひずみが生じたときインピーダンスが変化した。したがって、引張試験中に層間はく離のような樹脂損傷の発生が抑制された品位であることが示唆された。

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、高比強度を有するためにレジャー用品や大型高压タンク・風力発電のようなエネルギー分野市場に加えて、自動車など大量生産向けの構造部材として適用が拡大している。2030 年には CFRP の世界全体の市場規模は約 5 兆円程度、年間約 50 万トンの需要見込みであり、CFRP 利用による自動車の軽量化は、低燃費・CO₂削減ができるため持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals : SDGs) に貢献できる。

一般に、CFRP 構造部材はニアネットシェイプで成形されるが、様々なサイズや形状の穴あけやトリミングなどの追加工 (2 次加工) が要求される。大量生産に対応した生産性向上のためには、短時間での加工が要求される。加工法として、ドリル加工やフライス加工のような一般的な除去加工法が挙げられる。これら加工法は、品質要求が高い場合、CFRP は難加工材であるため工具を頻繁に交換しなければならず加工中の時間ロスにつながる。他方で、アブレッシブウォータージェットやレーザー加工は、1 つのユニットで様々な形状に加工でき、難加工にも対応できるが、複数の部品加工では、時間のロスが生じる。

パンチ加工やシャー切断のようなせん断荷重を利用した機械的な加工 (せん断加工) は、生産性やコスト面で優れており、加工時間の短縮には有力である。金属材料のせん断加工は「塑性変形を利用した加工」であるが、CFRP では、「複雑な変形・損傷・破壊プロセスを利用した加工」となるため、CFRP 特有のせん断加工法を確立する必要がある。既往の研究において、CFRP 積層板のパンチ加工品位に及ぼすクリアランス (上刃と下刃の水平距離) [1]、刃の形状や加工中の被加工物の温度[2, 3]、加工メカニズム[4]が調査されている。落錘衝撃 (Drop Weight Impact : DWI) 荷重を援用したパンチ加工した穿孔は、準静的 (Quasi-Static : QS) 荷重により加工した穿孔と比較して優れた加工品位を有し、高い有孔引張強度を示すことが明らかとなった[5]。すなわち、DWI 荷重によるパンチ加工は生産性を向上させる観点からも有力である。しかし、加工品位と引張強度との相関については十分に明らかにされていない。このことを明らかにすれば、DWI 荷重を援用したせん断加工の有効性を示すことができる。そこで本研究では、加工品位と有孔引張強度との関係を紐づける損傷挙動について、有孔引張 (Open Hole Tensile : OHT) 試験中の損傷挙動を電気インピーダンスによる

モニタリング観察を通じて明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 QS および DWI によるパンチ加工

試験片として、一方向 CFRP プリプレグ (T700SC/#2592, $V_f=0.67$, 厚さ 0.14mm, 東レ) から直交積層板 $[0^\circ_2/90^\circ_2]_s$ を成形した。積層板からダイヤモンドカッターを用いて長さ 200 mm および幅 $w=36$ mm (厚さ $t=1.1$ mm) に切出して OHT 試験片とした。QS 加工では、試験片を固定した治具 (ダイ $\phi 10.1$) を変位制御式万能試験機に設置した。クロスヘッドに取り付けたパンチ ($\phi 10$, 刃先角ゼロ) を速度 1.0 mm/min で下方へ移動させて穿孔を加工した。DWI 加工は、QS 加工と同様の治具を使用し、パンチに錘を自由落下させることで加工した。落錘条件は、文献[5]を参考に位置エネルギー $E=15$ J (錘の重さ $m=4.0$ kg, 落錘の高さ $h=0.25$ m) とした。QS および DWI 加工ともにクリアランスは 0.05mm である。以後、QS および DWI 加工した穿孔 (PPH : Punched Piercing Hole) を QS-および DWI-PPH と称する。

2.2 OHT 試験片と電極

Fig.1 に OHT 試験片を示す。QS-および DWI-PPH を有する試験片に対して、チャック部にエポキシ樹脂系接着剤を用いて GFRP タブを貼り付けた。その後、試験片の側面に対してサンドペーパーを用いて研磨した。また、試験片表面の一部を研磨後、パンチ挿入側の表面に導電性ペースト (ドータイド D-500, 藤倉化成) を塗布し、穿孔とタブの間にひずみゲージを貼り付けた。

Fig.2 に OHT 試験中の QS-PPH 試験片の in-situ 観察結果を示す。図中の数字は、OHT 応力であり、引張荷重を断面積 (wt) で除算して評価した。本研究では、加工品位と損傷挙動との関係を明らかにすることが目的のため、穿孔周り両面をはさむように電極を設置することが理想である。しかし加工品位によっては、穿孔周りには繊維と樹脂の間の損傷であるスプリッティング発生の可能性がある。スプリッティングが発生すれば、設置した電極の損傷が懸念される。ゆえに、Fig.1 のように穿孔と電極との間は距離をとって設置した。

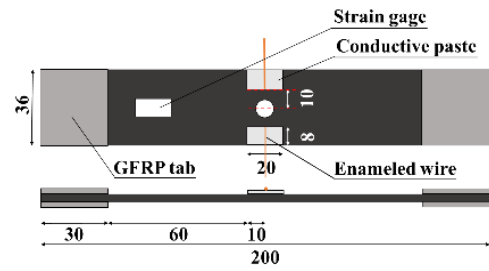


Fig.1 Schematic of the OHT specimen for electrical impedance measurement.

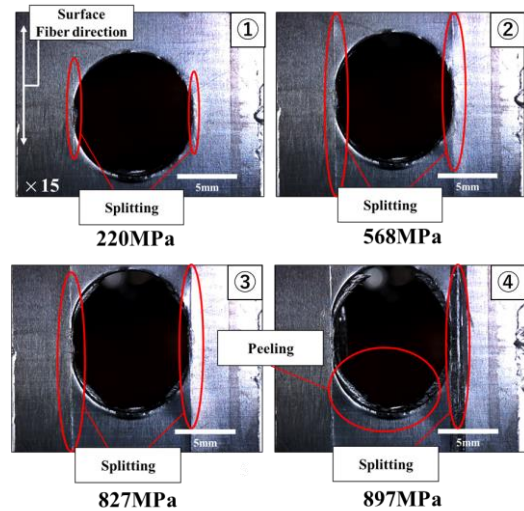


Fig.2 Cumulative damage around a specimen with QS-PPH during OHT test.

2.3 CFRP のための等価回路モデル

CFRP を構成する繊維と樹脂は、それぞれ導電体および誘電体である。CFRP 内の繊維体積含有率を V_f とすると、樹脂の体積含有率 V_m は $1-V_f$ と表せられる。すなわち、 $V_f + V_m=1$ が成立する複合材料と単純化できる。CFRP は、繊維の電気伝導方向依存性を考慮しなければ、抵抗 R とキャパシタンス C の並列からなる RC 等価回路モデルを仮定することができ、このときのインピーダンス Z は次式で与えられる。

$$Z = \frac{R}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \quad (1)$$

ここで、 ω は周波数である。ゆえに、低周波では、 $Z=R$ 、高周波では、 $Z=1/(\omega C)$ と近似できる。すなわち、低周波では、導電体である繊維の変形や破断

の変化に応じて変化し、高周波では、層間はく離のような誘電体である樹脂の変形や損傷に応じて変化する。

2.4 OHT 試験と電気インピーダンス測定

Fig.3 に電気インピーダンス測定のための OHT 試験の模式図を示す。OHT 試験片を先に述べた万能試験機に取り付け、室温下でクロスヘッド速度 0.5 mm/min にて OHT 試験を行った。引張荷重を与えている間、LCR メータ (IM3536, HIOKI) を用いて 1 kHz および 100 kHz の周波数において電気インピーダンス Z および位相角 θ をそれぞれ測定した。また、データロガーによって OHT 試験中の引張荷重およびひずみを測定した。測定したインピーダンス Z を変化率 $\Delta Z = \Delta Z (= Z - Z_0) / Z_0$ に変換し、時間微分 $\Delta Z / \Delta t$ として評価した。ここで Z_0 は引張試験前のインピーダンスであり、 $\Delta t = 3\text{s}$ として算出した。

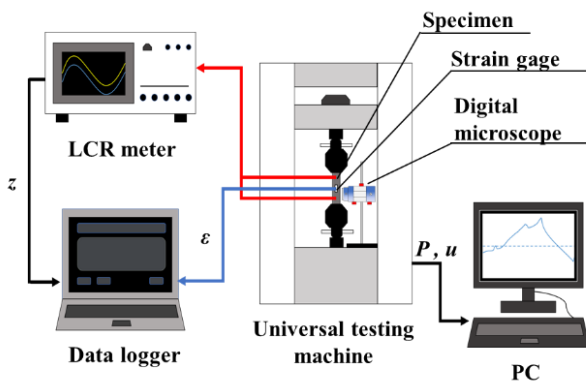


Fig.3 Schematic of the OHT test for sensing the electrical impedance during tensile loading.

3. 実験結果および考察

3.1 パンチ加工による累積損傷

Fig.4 に QS-PPH の断面観察結果を示す。断面は、穿孔の中心を通る二つの断面（試験片表面の繊維方向に対して並行 (#1) および垂直 (#2) 方向) に試験片を切断して得た。加工面は、せん断特有の不連続な加工面を呈しており、異方性に起因するため加工面の性状はそれぞれ異なっていた。また、緩やかなダレ変形が観察され、第 2/3 層間では、加工面から約 700 μm の長さのはく離が発生していた。

Fig.5 に DWI-PPH の断面観察を示す。QS-PPH と比較して、ほぼ同等長さの第 2/3 層間のはく離が発生しているが、加工面は明らかに平滑な加工面を呈しており、中間層では繊維の局所的なダレ変形が観察された。なお、#2 の上層では樹脂割れが発生しているが、これはパンチ引き抜き中、偶発的に発生した。既往の研究[5]において、QS 荷重下では、加工速度は累積損傷に影響を与えないが、DWI 荷重下では、衝撃によるせん断領域の局所化により、累積損傷が異なった結果、引張強度が上昇することが明らかにされている。以上のことから、QS および DWI 荷重下でのパンチ加工は、それぞれ異なる累積損傷を与える。

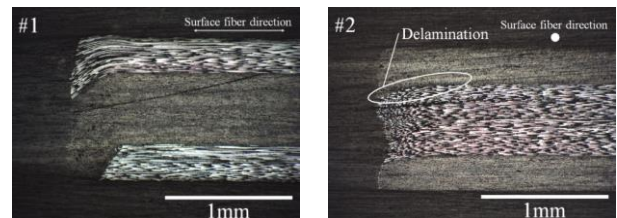


Fig.4 Images of cross-sections #1 and #2 of a QS-PPH specimen.

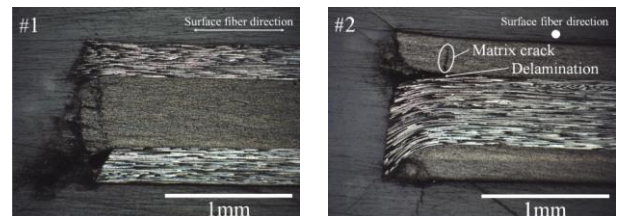


Fig.5 Images of cross-sections #1 and #2 of a DWI-PPH specimen.

3.2 OHT 試験中のインピーダンス挙動

Fig.6 および 7 に QS-および DWI-PPH 試験片の OHT 試験中のインピーダンス変化率 $\Delta Z / \Delta t$ / 位相角 θ —ひずみ ϵ 曲線をそれぞれ示す。以下に QS-および DWI-PPH 試験片に対するインピーダンス応答をそれぞれ示す。

QS-PPH : 100 kHz のインピーダンス応答に対して、約 2000 $\mu\epsilon$ のひずみが生じたとき、 $\Delta Z / \Delta t$ は増加、 θ は負の値を維持したまま、わずかに変化した。これは、加工により発生した層間のはく離の拡大や、それに伴う穿孔周りのスプリッティングのような樹脂に関する損傷が起こり、見かけの誘電率 (C

成分)が変化したためと推察される。一方、1 kHzでは、約 4000 $\mu\epsilon$ のひずみが生じたとき $\Delta\bar{Z}/\Delta t$ は増加したが、 θ は試験開始から終わりまでほぼ 0° の値を維持した。これは、繊維の破断が起こり、見かけの抵抗率 (R 成分) が変化したためと推察される。したがって、QS-PPH 試験片の OHT 試験中では、繊維の損傷より樹脂損傷が優先して発生している。

DWI-PPH : 100 kHz のインピーダンス応答に対して、約 3500 $\mu\epsilon$ のひずみが生じたとき、 $\Delta\bar{Z}/\Delta t$ は増加、 θ は負の値を維持したまま、わずかに変化した。一方、1 kHz では、約 2000 $\mu\epsilon$ のひずみが生じたとき、 $\Delta\bar{Z}/\Delta t$ は増加したが、 θ はほぼ 0° の値を維持した。したがって、QS-PPH 試験片で論じたことを踏まえると、DWI-PPH 試験片では、樹脂に起因した損傷より繊維の損傷が優先的に発生していると推察される。

これらの原因として、QS-PPH および DWI-PPH では、第 2/3 層間に発生したはく離長さはほぼ同等であったため、加工面の性状や中間層のダレ変形が OHT 試験中の累積損傷に対する電気インピーダンス応答を支配していると考えられる。特に DWI-PPH 試験片では、中間層の繊維が局所的に変形しており、これが穿孔周りの応力集中を変化させているためと推察される。

4. まとめ

本研究では、準静的 (QS) および落錘衝撃 (DWI) 荷重を利用してパンチ加工を施した CFRP 積層板に対して、有孔引張 (OHT) 試験中の電気インピーダンス測定を通じて、損傷挙動を調査した。その結果、周波数を可変することで繊維および樹脂それぞれの損傷挙動をモニタリングできることが示唆された。また、DWI 試験片は QS 試験片と比較して、OHT 試験中は樹脂の損傷が抑制されていることが明らかとなり、このことが高い OHT 強度を示したことが示唆された。

謝 辞

本研究は、公益財団法人京都技術科学センター研究開発助成を受けた。ここに謝意を表す。

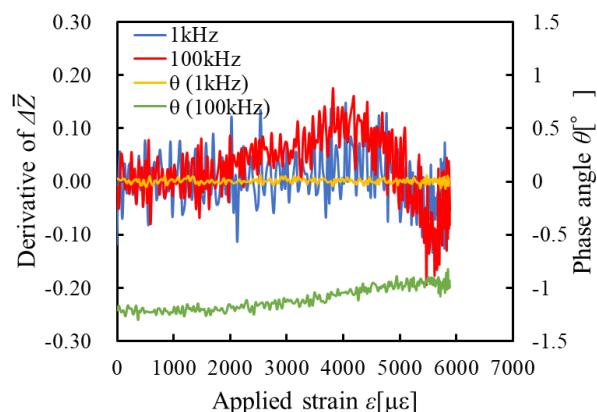


Fig.6 Mechanical strain and electrical impedance response of the CFRP laminates with QS-PPH during tensile loading.

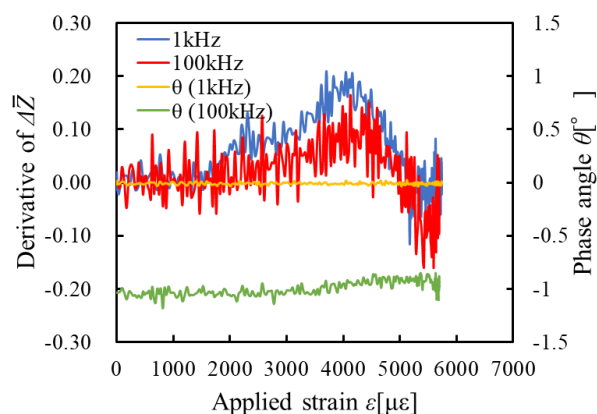


Fig.7 Mechanical strain and electrical impedance response of the CFRP laminates with DWI-PPH during tensile loading.

参考文献

- [1] K. Ogi, Proc. ACCM-8, 2 (2012), 1132-1135.
- [2] S. Ueshiba, K. Ogi, Y. Shigematsu, K. Sato, Key Eng. Mater., 656-657 (2015), 185-190.
- [3] 黄木景二, 矢代茂樹, 松田伸也, 強化プラスチック, 62(3) (2016), 84-87.
- [4] 松田伸也, 黄木景二, 矢代茂樹, 日本複合材料学会誌, 42, 1 (2016), 13-22.
- [5] S. Matsuda, K. Mabe, K. Ogi, S. Yashiro, Y. Kakudo, J. Compos. Mater., 55, 28 (2021), 4111-4124.

研究成果発表

1. 松田伸也, 村松星彦, 矢代茂樹, 黄木景二, パンチおよびドリル穿孔を有する CFRP 積層板の有孔圧縮強度および破壊形態, 日本複合材料学会誌, 49 号, 2 巻, pp.48-56, (2023.3).
2. 林幸宗, 松田伸也, パンチング穿孔を有する CFRP 積層板の引張荷重に対するインピーダンスモニタリング, 日本材料学会第 72 期学術講演会 (2023.5).