

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：54101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14850

研究課題名(和文)4次元ピンポイント渦電流法によるCFRTPの剥離修復とその溶融メカニズムの解明

研究課題名(英文)Delamination repair of CFRTP using 4D pinpoint eddy current method and elucidation of its melting mechanism

研究代表者

板谷 年也(TOSHIYA, ITAYA)

鈴鹿工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：00650425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、新たに開発した4次元ピンポイント渦電流法を用いて熱可塑性炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRTP)の欠陥を修復し、実用面で十分な強度を得ることができることを定量的に示すことを目的とした。はじめに、本渦電流法を用いて立体形状のCFRTPに対して、狙いを定めた箇所の溶融を確認した。次に、落球衝撃試験によって発生させた層間剥離を加熱加圧融着し、融着により引張り強さが回復することを示した。CFRTPの繊維破断やペレット部のクラックなどや離部分以外を溶融しすぎると逆に強度低下を招くことがわかった。加えて、CFRTPの内部状態をX線CTで調査し、加熱時間の影響による空隙の分布を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱可塑性炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRTP)は、単工程で最終形状へ成形加工するため複雑形状品に対応できる。CFRTP成形品として、自動車車体や小型風力ブレードに利用されており、2次元でなく実用的に3次元のCFRTPの剥離修復の技術開発が期待されている。現在、複雑形状のCFRTPの剥離修復まで適用可能な技術は実用化されておらず、本技術を高度化することで、ピンポイントかつ立体形状のCFRTPの剥離修復まで適用可能であることを示した。そして、CFRTPに発生した剥離を事前に修復することで、力学的強度低下を防ぎ安全性の維持やCFRTP品の再利用といった長寿命化に寄与できる。

研究成果の概要(英文)：This study shows that it is possible to repair defects in thermoplastic carbon fiber reinforced plastic (CFRTP) using the newly developed four-dimensional pinpoint eddy current method and obtain sufficient strength in practical use. First, using this eddy current method, it was confirmed that the three-dimensional CFRTP was melted at the targeted location. Next, it was shown that the delamination generated by the falling ball impact test was fused under heat and pressure, and the tensile strength was restored by the fusion. It was found that if the fibers of CFRTP were broken, cracks in the pellets were formed, or the parts other than the separated parts were melted too much, the strength would decrease. In addition, the internal state of CFRTP was investigated by X-ray CT, and the distribution of voids due to the influence of heating time was clarified.

研究分野：非破壊検査

キーワード：CFRTP 渦電流 層間剥離 欠陥修復

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) の剥離修復を目的に、四次元ピンポイント渦電流法を用いての欠陥修復技術の開発とその溶融メカニズムを解明する。CFRTP は成形時間が短い、リサイクル可能という利点から需要が急成長している。運用中において、外部から衝撃を受けた場合、積層間で樹脂および繊維界面の剥離が生じ、それにより力学的強度が低下することが知られている。CFRTP 成形品として、自動車車体や航空機に利用されており、2次元でなく実用的に3次元のCFRTPの剥離修復の技術開発が期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、CFRTP の剥離修復を目的に、四次元ピンポイント渦電流法を用いて CFRTP の欠陥修復技術の開発とその溶融メカニズムを解明する。具体的には、3次元形状のCFRTPに対してコイルの形状や大きさを合わせた上で、コイルの励磁周波数および励磁時間を変化させ、縦・横・深さ・時間の4次元の渦電流をCFRTPに作用させ、ピンポイントかつ複雑形状のCFRTPまで溶融可能とする。本渦電流法を用いてCFRTPの剥離を修復し、実用面で十分な強度を得ることができることを定量的に示す。そのために、溶融メカニズムを解明し、剥離修復時の最適な融着条件を明らかにする。

3. 研究の方法

3 - 1 CFRTP の誘導加熱実験

電動式射出成形機 (東芝機械、EC100SX -2A) を用いて、ハット型 CFRTP と呼ばれる3次元形状のCFRTPをハイブリッド成形した。CFRTPシートは4層から成る積層板で融点は260、CFRTPペレットの融点は290である。

図1に製作した3次元形状であるハット型CFRTPを示す。このハット型CFRTPに対して提案する方形コイルを用いた4次元ピンポイント渦電流法を適用し、融点まで誘導加熱させCFRTPの溶融の観察を行う。

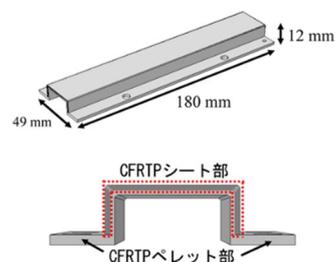


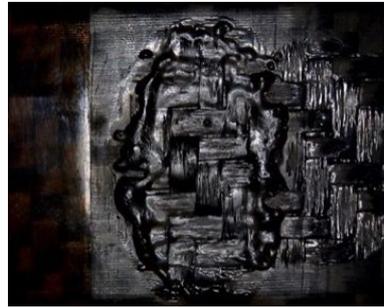
図1 製作したハット型CFRTP

誘導加熱コイルは、耐熱性を考慮しガラス繊維耐熱板を切削加工し、高耐熱エナメル線を巻いて方形コイルを製作した。誘導加熱コイルをハット型CFRTPの上部に配置する。誘導加熱コイルを汎用の高周波電源 (ナビオ、IH-1M) に接続し、ハット型CFRTPを加熱する。K型熱電対を取り付けたデータロガー (グラフテック midi LOGGER GL900) でCFRTP表面の温度を測定した。コイルの電流は、クランプオンプローブ (日置、3273-50) で測定した。誘導加熱時間を30、60、90、120、150秒と変化させ、CFRTP表面をデジタルマイクロスコープ (キーエンス、VH-5500) を用いて観察を行なった。溶融面積は、溶融部の縦と横の長さを計測アプリケーション (キーエンス、VH-H1M5) で測定し、楕円公式を用いて求めた。観察時の倍率は50倍である。

表1に各加熱時間におけるCFRTP表面の溶融の有無とその面積を示す。図2に誘導加熱前と180秒加熱後のCFRTPの表面観察の結果を示す。30秒では、溶融を確認できなかった。60秒で溶融を確認し、加熱時間の経過と共に溶融面積は大きくなった。150秒で342に達し、CFRTPの融点以上の加熱を確認した。

表1 各加熱時間におけるCFRTPの溶融

| 加熱時間 [s] | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 |
|----------------------------|----|----|-----|-----|-----|
| 溶融 有無 | 無 | 有 | 有 | 有 | 有 |
| 溶融面積 [mm ²] | 0 | 50 | 154 | 179 | 254 |



誘導加熱前
誘導加熱 150 秒後
図 2 デジタルマイクロスコープによる CFRTF の表面観察

3 - 2 CFRTF の融着実験

落球衝撃試験機（安田精機製作所、落球衝撃試験機）を用いて、ハット型 CFRTF に層間剥離を発生させる。図 3 に落球試験方法を示す。ハット型 CFRTF を治具で固定し、マグネットホルダーに保持した鉄球を CFRTF の中央上部から落下させる。鉄球の重さは 500g とし、高さ 75cm、100cm とした。融着時の加圧力が小さすぎると融着できず、加圧力が大きすぎると強度が低下してしまう。そのため、融着に最適な加圧力と時間を調査する。

落球衝撃試験を行った CFRTF を誘導加熱によって、CFRTF を融点以上に加熱する。溶融した CFRTF をニュートンプレス（三床インダストリー、NT-100H）によって加圧し、融着する。図 4 に誘導加熱後の加圧の方法を示す。誘導加熱実験の結果から、加熱時間は 150 秒とした。加圧力は 2MPa、4MPa、8MPa とした。

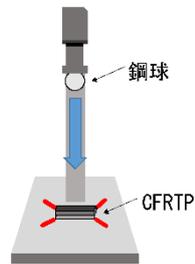


図 3 落球衝撃試験方法

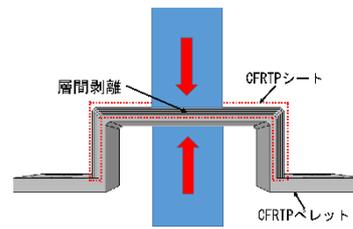


図 4 誘導加熱後の融着方法

3 - 3 CFRTF の引張試験による強度評価

ハット型 CFRTF を CRRTF 用ジグソーで短冊状に切断し、両端にタブをボンド（コニシ、ボンド E250）で接着した。万能試験機（島津製作所、AG-100kNplus）を用いて、JIS K 7164 に準じて引張試験を行なった。ハイブリッド成形用樹脂（LANXESS Durethan TP037-001 901510 PA66-CF 引張破壊強さ 200MPa）と連続繊維熱可塑性材料（TEPEX dynalite 201-C200(x)/45% 引張強さ 785MPa）の製品データシート値および落球衝撃試験を行っていない CFRTF 試験片の引張強さから CFRTF の剥離修復について評価する。

落球衝撃試験を行っていない CFRTF 試験片の引張強さは、335 MPa であった。図 5 に高さ 75 cm の落球衝撃試験の場合の融着ありとなしの CFRTF の引張強さを示す。全ての試験片において、落球部分で破断した。融着ありの方が CFRTF の融着なしの CFRTF より引張り強さが大きい。また、融着時の加圧力が大きい方が、引張り強さが大きくなる。

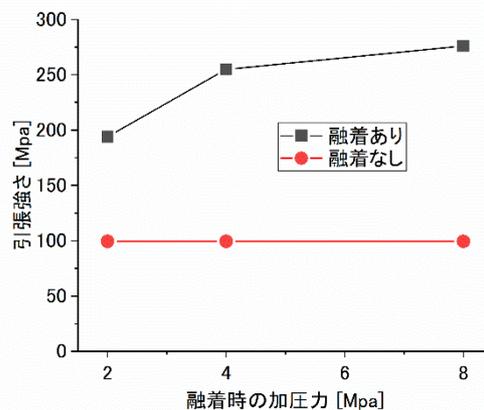


図 5 高さ 75 cm の落球衝撃試験の場合の CFRTF の引張強さ

図6に高さ100 cmの落球衝撃試験の場合の融着ありとなしのCFRTPの引張強さを示す。融着時の加圧力2 MPaにおいて、引張り強さが小さくなっている。4 MPa、8 MPaにおいて、高さ75 cmの落球衝撃試験の場合と同様に引張り強さが大きくなっている。

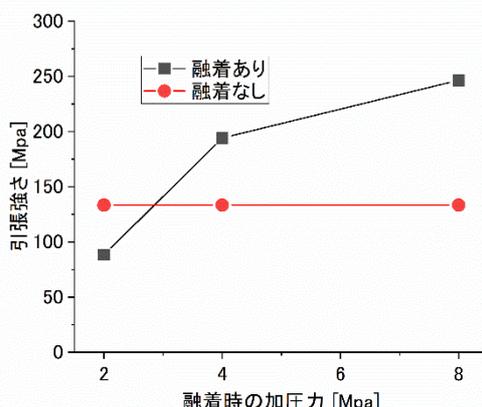


図6 高さ100 cmの落球衝撃試験の場合のCFRTPの引張強さ

高さ100 cmの落球衝撃試験の場合の融着時の加圧力2 MPaにおいて、引張り強さが小さくなった理由について、加熱溶融から融着作業までの時間や短冊状への加工時の寸法の影響などが考えられる。

剥離修復について、衝撃試験後に融着のみで完全に引張り強さを回復させることは難しいため、融着による引張り強さの回復を検討する。まず、落球衝撃試験を行っていないCFRTP試験片と融着なしの場合の試験片を比較すると、落球衝撃により引張り強さが50%以下まで低下している。これはCFRTPの層間剥離およびペレット部のクラックが原因と考えられる。融着ありの場合は、高さ75cmの落球衝撃試験で融着時の加圧力4 MPa、8 MPaにおいて70~80%まで引張強さが回復している。また、高さ100cmの落球衝撃試験で融着時の加圧力4MPa、8 MPaにおいても60~70%まで引張り強さが回復している。

以上より、本手法による融着条件で一定の割合でCFRTPの引張り強さの回復を確認できた。

3 - 4 X線CTによるCFRTPの内部観察

図8にX線CTでのCFRTPの撮影方法を示す。X線CTは、マイクロフォーカスX線CTシステム(島津製作所、inspeXio SMX-225CT FPD HR Plus)を用いた。このシステムはマイクロフォーカスX線発生装置とX線検出器の間で回転する検査対象物ワークのX線投影画像をコンピュータ処理することで、検査対象物内部を3次元で観察する装置である。回転テーブルでCFRTPを回転させながら断画面図や3次元画像、透視画像を記録することができる。CFRTPを回転テーブルの上に置き、X線発生装置から放出されるX線をCFRTPに当てX線検出器でX線を読み取りCFRTPの内部を観察する。詳細な条件として、スライス範囲(0.05 mm)、総スライス数(676枚)、画像サイズ(1024×1024)として観察を行う。図9にCFRTPの断面画像を示す。

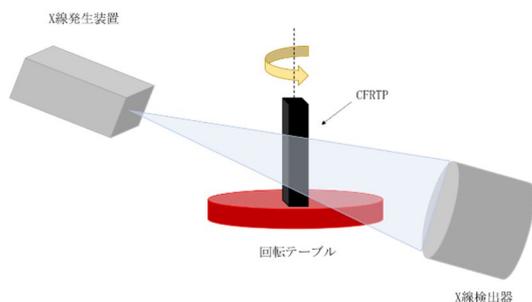


図8 X線CTでのCFRTPの撮影方法

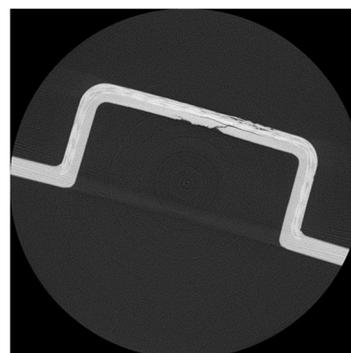
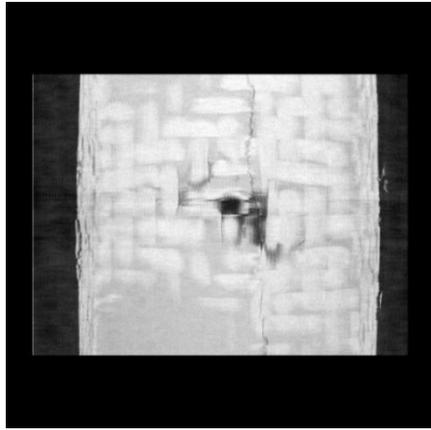


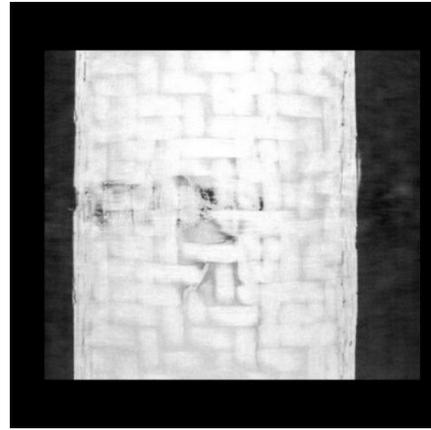
図9 CFRTPの断面画像

落球衝撃条件を変えて、落球衝撃試験のみの場合と加熱加圧融着実験後の内部観察を行った。CFRTPを0.05 mmの間隔でスライスした画層について、CFRTP表面から0.15mmの画像で比較を行った。落球衝撃条件および加熱加圧融着条件は、3 - 1および3 - 2と同様である。

図10に落球衝撃の高さ100cmで2kgの鉄球を落とした場合のX線CTによるCFRT内部観察画像を示す。加熱時間は150秒で、加圧力は8MPaである。



加熱加圧融着前



加熱加圧融着後

図 1 0 X 線 CT による CFRTP 内部観察画像

落球衝撃試験のみの加熱加圧融着前と加熱加圧融着後を比較すると、融着後は、剥離部分の空隙の減少を確認できる。しかしながら、別の落球衝撃試験下において、加熱によって剥離部分以外に気泡が広がる場合もあった。

4 . 研究成果

4次元ピンポイント渦電流法を用いて、狙いを定めた箇所の CFRTP の溶融を確認した。さらに、融着時の加圧力 2 MPa、4 MPa において、融着により引張り強さが大きくなること示した。この融着条件化で CFRTP の剥離修復できたと考える。落球衝撃試験で CFRTP の繊維破断やペレット部のクラックなど融着では修復が難しい場合や離部分以外が溶融しすぎる場合は逆に強度低下を招くことがわかった。以上より、本手法により誘導加熱温度と加熱箇所を制御することにより、CFRTP の剥離修復の可能性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 板谷年也、西川真子、山中祐弥、橋本良介 |
| 2. 発表標題 4次元ピンポイント渦電流法による熱可塑性 CFRP の剥離修復とその融着条件の最適化に関する研究 |
| 3. 学会等名 計測自動制御学会中部支部 教育工学研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuya Yamanaka , Mako Nishikawa , Kazuki Hara , Ryota Shimizu , Toshiya Itaya |
| 2. 発表標題 Development of repair technology for CFRTP delamination by a four-dimensional pinpoint eddy current method |
| 3. 学会等名 国際会議4th STI-Gigaku 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kazuki HARA , Ryota SHIMIZU , Ryosuke HASHIMOTO , Toshiya ITAYA |
| 2. 発表標題 Study on melting mechanism of CFRTP by induction heating simulation |
| 3. 学会等名 国際会議4th STI-Gigaku 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|