

自己感知・自己修復可能なCFRTPスマート・ストリンガーの提案

学生証番号 47-136056 氏名 久木田 泰記
 (指導教員 小笠原 俊夫 教授)

Key Words : CFRP , Self-Healing , Stringer , Electrical Heating , Thermoplastic

1. 緒言

炭素繊維複合材料(CFRP)はその高比強度・高比剛性、耐腐食性が故に、金属の代替材料として航空宇宙分野を中心に利用が拡大している。その反面、複雑な損傷形態を有することが開発当初から問題視されている。

近年、航空機運用時の複合材構造の健全性を保証する技術として、光ファイバセンサを用いた構造ヘルスマニタリング(SHM)技術の研究が活発になされている。光ファイバセンサを材料内部に神経系のように張り巡らせることで、材料自体が損傷を感じられるような知的複合材料の実現が提案されている¹⁾。

また、自己修復(セルフヒーリング)可能な知的複合材料に関する研究も最近盛んに行われている。現在マイクロカプセル、キャピラリ、修復可能ポリマーの3つが自己修復方法として主流である²⁾。各々が利点と欠点を有しており、実用化に向けてはコストや信頼性の面からも時間がかかる。そこで、センシング技術とヒーリング技術を融合させることで、既存のヒーリング手法では実現できないメリットを有した新たな手法の提案を行う。そして、実際の部材への応用の可能性まで検討する。

2. 補強平板のスマート・ストリンガー

損傷が起こりやすく、かつ壊れると危険性の高い構造の一つに補強平板におけるストリンガー端部が挙げられる³⁾。中でも翼の根元部は、修理のための解体にも時間がかかるため、SHM及び自己修復が最も効果的な部位と考えられる。そこで本研究では、熱可塑性樹脂を用いた自己感知・自己修復可能なスマート・ストリンガーを提案する。

熱可塑性CFRP(CFRTP)に電極と光ファイバセンサを埋め込んだストリンガーを作成する(Fig.1)。剥離を感知すると(Fig.2-a)、電極から炭素繊維に直接通電することで、ジュール熱により剥離面のみを発熱させる(Fig.2-b)。そして剥離が融着することで強度の回復を図る(Fig.2-c)。

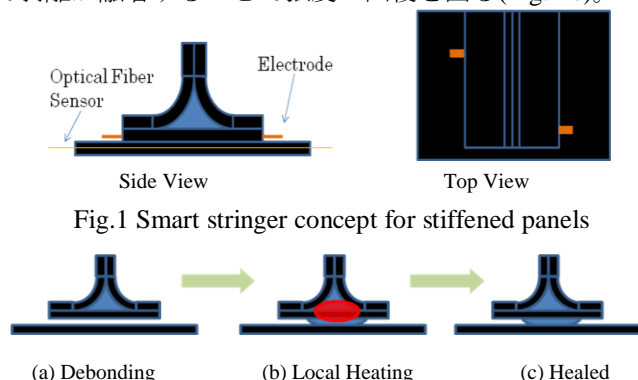


Fig.2 Self-healing method using electrical heating

3. 無加圧での剥離の融着

CF/PA6プリプレグ(サカイオーベックス製)を一方向に24枚積層後([0]₂₄)、0.5MPa、240°Cで5分間加熱し、冷却過程における結晶化温度付近(210°C)で加圧(5MPa)して積層板を成形する。寸法はASTMの規格に合わせ、長さ155mm、幅20mm、板厚3.0mmとする。双片持ち梁(DCB)試験を用いて、外力をかけずに熱のみでの修復の度合いを半定量的に評価する。具体的には、Fig.3-a)に示すように、初期亀裂点Bから点Dまで亀裂を進展させる。その後オープン中で所定の温度に加熱し、亀裂が再融着した点をCとする。再びDまで進展させ、式(1)に示すように、健全材の靱性 $G_{I, virgin}$ の平均値と修復後の靱性 $G_{I, healed}$ の比をヒーリング率 η と定義し、評価する。

$$\eta = \frac{G_{I, healed} [J/m^2]}{G_{I, virgin, ave} [J/m^2]} \quad (1)$$

修復限界である点Cでのヒーリング率を η_C 、亀裂先端である点Dでのヒーリング率を η_D とする(Fig.3-b)。また、修復限界を評価するために、距離的なヒーリング率 ξ を式(2)のように定義し、評価の対象とする。

$$\xi = \frac{CD \text{間距離} [mm]}{BD \text{間距離} [mm]} \quad (2)$$

ヒーリング条件として、圧力、最高温度、最高温度保持時間、冷却速度をパラメータにとり、各条件におけるヒーリング率の算出を行った。Fig.4に各条件における η_D と ξ を示す。加圧すれば100%の修復が可能であるが、無加圧の場合でも部分的な修復が可能であることが分かる。ヒーリングには240°C以上の温度が必要であり、225°C以下では熔融もできなかった。修復可能な面積は最高温度保持時間及び冷却速度に依存する。最高温度保持時間が長すぎると η_D は低下するが、 ξ は時間が長い方が大きくなる。ただし、この方法ではオープンで全体を外部から加熱するため、試験片表面の樹脂枯れや変形が生じている。このため、実際には必要箇所(剥離部)のみを加熱することが必要となる。

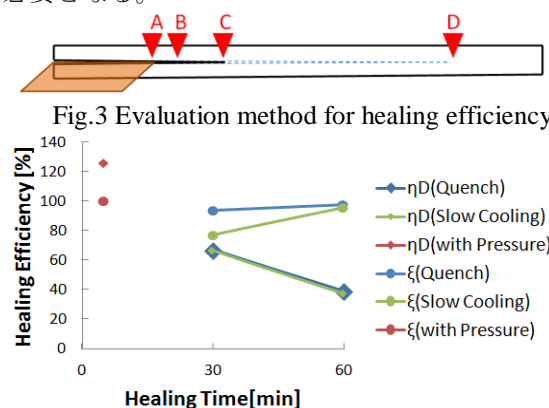


Fig.4 Healing efficiency(η_D and ξ) vs. Healing Conditions

4. ジュール熱による局所加熱

長さ155mm、幅20mm、厚さ0.8mmのDCB試験片を用いて直接通電による局所加熱試験を実施した。試験片の積層構成は[0/F0°/0]sであり、成形方法は第3章と統一している。ここでF0°層とは、Fig.5に示すように、厚さ0.1mmの銅箔と0°方向のCF/PA6プリプレグが混在している機能層のことを指す。機能層として埋め込んだ銅電極から電流制御で炭素繊維に直接通電し、昇温過程及び温度分布を熱電対とサーモカメラ(測定上限270°C)で観察した。温度分布をFig.6(a)に示す。約1分間の通電で電極間のみがPA6の融点(225°C)以上に達し、2分間で剥離が部分的に修復できることが確認された。

また有限要素法(FEM)に基づく熱-電気連成解析によって、電極を埋め込んだDCB試験片を通電加熱した際の経過時間に対する各要素の温度と電位を計算した。計算には数値解析ソフトABAQUS6.12を用いた。Fig.6(a)と同条件で計算された温度分布の計算結果をFig.6(b)に示す。温度、電位ともに概ね良い対応が得られることが分かった。

本提案の手法では、剥離部近傍を熔融するまで加熱し、一方でその他の部分の温度は熔融温度以下とする必要がある。そこで、試験片板厚、電極配置、通電パターンを変えることで、剥離面近傍のみを熔融する条件について検討した。その結果、電極配置や積層構成等によってヒーリング可能な面積及び到達温度を変化させられる。また発熱量には電極配置よりも板厚の方が大きな影響を与えることが分かった。さらに板厚を分厚くし、高電流を投入すれば、厚さ方向にも温度分布を生じさせることができる。即ち、試験片表面を熔融せずに、剥離面のみを熔融し融着できる可能性が数値計算によって示された。

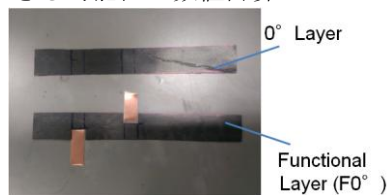


Fig.5 Functional Layer

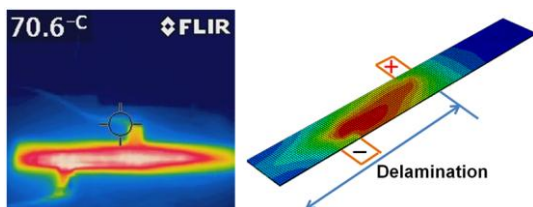


Fig.6 Experiment and Simulation of [0/F0°/0]s Specimen

5. ジュール熱で剥離面のみを熔融させた場合の修復率

解析から電源装置の限界である1.4Aの投入電流量では厚さ方向に温度分布を生じさせることができないことが分かっている。そこで、実験的に絶縁層(GFR層)を導入し、電気で剥離面のみを熔融した場合のヒーリング率を算出した。

Fig.7、Fig.8に、積層構成[0/F0°/GFR/0₃₂]sのDCB試験片に1.4Aを10分間投入してヒーリングした際の η とX線CT画像を示す。無加圧かつ短時間で、形状を崩さずに複数回の修復が可能であり、初期亀裂以降の位置では70~86%の高いヒーリング効果が得られることが実証された。

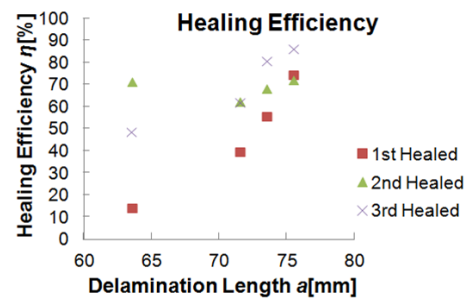


Fig.7 Healing Efficiency of [0/F0°/GFR/0₃₂]s Specimen

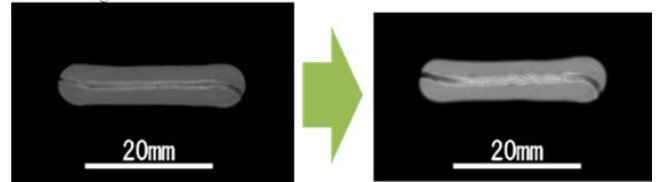


Fig.8 CT Scanning Image of [0/F0°/GFR/0₃₂]s Specimen

6. スtringerへの応用

本提案手法を第2章で示したように、Stringerに適用した場合の解析を行った。Stringerモデルはスキン及びStringerはクロスプライ[0₄/90₄]sで構成されており、両者の層間には長手方向に2/3の位置まで剥離が進展している。剥離部付近に機能層が埋め込んであり、第4章同様電極部に電流を投入した。1.3Aを5分間投入した際には、Fig.9に示すように剥離面のみを熔融することができていることが分かる。また、投入電流量を大きくすれば、表面を常温に保ったまま修復でき、電極を複数埋め込めば、面内の死角をなくせることを示すことができた。

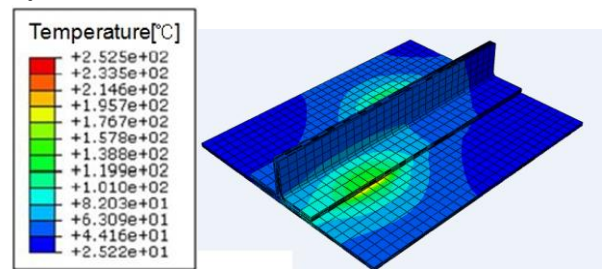


Fig.9 FEM Analysis of the Smart Stringer

7. 結言

ジュール熱を用いた内部加熱でCFRTPの母材を熔融することで、外力をかけずに形状を保持したままDCB試験片の層間剥離を修復できることを実験的に示した。FEMによる熱-電気連成解析を実施したところ、DCB試験片やStringerにおいて、試験片厚さ、電極の配置、投入電流量、通電時間等を制御することによって、複合材構造の形状を保持したまま剥離部のみを融着させ、強度を回復させられる可能性を示すことができた。以上より、既存の修復方法に対して本提案手法の優位性を示すことができた。

8. 参考文献

- [1] Minakuchi S., Takeda N. et al., Composites :Part A 42 (2011), 669-676.
- [2] Self-healing Materials: Recent Development and Application, Polymers vol.62, July 2013.
- [3] Emile Greenhalgh et al., Composites: Part A 35 (2004), 1447-1458.