

CFRTP の破壊メカニズムと補修性に関する研究

37-106341 田丸雅智
指導教員 高橋淳 教授

1. 序論

世界の運輸部門のエネルギー消費量と CO₂ 排出量を大幅に削減するために、石油需要の半分以上を占める自動車を軽量化することは極めて即効的で有効な手段であると考えられる。自動車の軽量化のために有力視されている材料は、比強度・比剛性に優れる CFRP (炭素繊維強化プラスチック) である。しかし現在、CFRP はコスト・量産性・リサイクル性に問題を抱えており、量産車への本格適用には至っていない。

本研究室では、上述の問題を解決する材料として迅速成形・リサイクルに優位性を持つ CFRTP (炭素繊維強化熱可塑性プラスチック) を研究対象として扱っている。そのなかでも、本研究は CFRTP 車の補修性を定量的に評価することを目的としたものであり、以下の流れで研究を行った。

- (1) CFRTP の破壊メカニズムの評価
- (2) 静的試験におけるリペアの評価
- (3) 動的試験におけるリペアの評価

本稿では、特に(1)と(2)に関する結果を記す。

2. 複合材料の破壊メカニズムと補修

複合材料の破壊は、「繊維の損傷」「繊維-樹脂間の剥離」という2つに大別することができる。

母材に熱硬化性樹脂を使用する CFRP は、繊維の損傷や層間剥離を伴いながら脆性的に破壊することが知られている[1]。その補修には、損傷箇所を除去した後補填材を接着剤で接着するスカーフリペアと呼ばれる方法が用いられることが多いが、コストや手間がかかり、高い技術力を要するリペア方法である[2]。

CFRP に対し、CFRTP は母材に熱可塑性樹脂を用いるため、その補修には熱溶解を利用する方法が示唆されている[3]。すなわち、繊維-樹脂間の剥離に対しては、加熱による再成形によって修復すること(熱リペア)が可能であると考えられ、繊維の損傷に対しては、損傷部位にパッチを熱融着させる方法(パッチリペア)が有効であると考えられる。これらのリペア方法は、損傷の状況によって使い分けていく必要があると考えられるが、そのためには、まずは CFRTP の破壊メカニズムを評価する必要がある。そこで、本研究ではリペアを行う事前段階として CFRTP の基礎的な破壊メカニズムの評価を行うこととし、その知見をもとにリペアに関する評価を行っていくこととしている。

3. 破壊メカニズムの評価

3.1 材料作成

本研究では、CFRTP について、炭素繊維を一方向に積層した UD (Uni-Directional carbon fiber reinforced thermoplastics) 試験片、及び巨視的に面内等方性を有する CTT (Chopped carbon fiber Tape reinforced Thermoplastics) 試験片を使用した (Fig.1)。それぞれの母材には、自動車への適用例が最も多い軽量かつ安価な PP (ポリプロピレン) を使用した。なお、本実験で使用した UD 試験片と CTT 試験片は、力学特性を向上させるために本研究室、及び東洋紡社、三菱レイヨン社が共同で開発を行った新しい材料である。本稿では、主に UD 試験片についての結果を記すこととする。

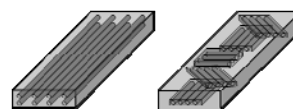


Fig.1 UD 試験片 (左), CTT 試験片 (右) の概念図

3.2 試験結果

最大応力直後、歪 2%、歪 3% について、それぞれ破壊の初期段階、中期段階、後期段階と定め、静的三点曲げ試験によって各材料の評価を行った。

Fig.2 は UD 試験片の応力-歪線図であり、グラフ中の番号 1 が最大応力直後 (歪 0.8%)、番号 2 が歪 2.0%、番号 3 が歪 3.0% まで破壊した試験片である。それぞれについて、損傷部を拡大し、試験片の横方向から X 線で観察した様子が Fig.3 である (上: 圧縮側、下: 引張側)。UD 試験片は圧縮側で生じる座屈によって破壊がはじまり、座屈領域が広がっていくことで延性的に破壊が進行し、最終的に圧縮側で繊維破断が生じて破壊していることが分かる。また、歪 2%、3% の X 線写真を比較すると、いずれの場合も厚さ方向への破壊の進展は試験片厚さのおよそ半分の地点で止まっていることも分かった。

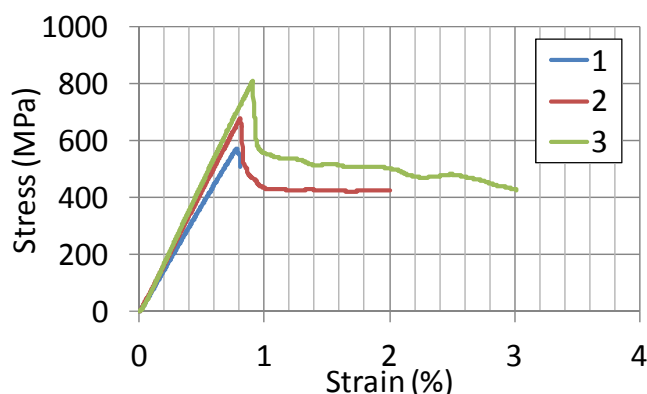


Fig.2 UD 試験片の応力-歪線図

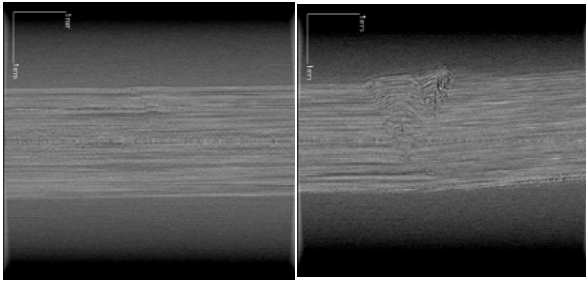


Fig.3 UD 試験片における最大応力直後 (左上), 歪 2% (右上), 歪 3% (下) の X 線写真

3.3 考察

繊維破断と層間剥離を伴いながら脆性的に破壊する CFRP に対し, CFRTP は破壊の初期段階では圧縮側で座屈が生じ, その後, 座屈領域の拡大および繊維-樹脂間の局所的な剥離によって延性的に破壊が進行し, 最終的に繊維破断によって破壊に至ることが明らかとなった. これによって, 破壊の各段階における CFRTP のリペア指針が示された. すなわち, 局所的な座屈に留まっている破壊の初期段階においては熱リペアが有効であり, 繊維に大きな損傷が生じる破壊の中期・後期段階においては圧縮側でのパッチリペアが有効であることが予測された.

本章で得た知見をもとに, 次章で実際にリペアに関する評価を行っていく.

4. リペアの評価

4.1 リペア完了の判断基準

リペア完了の判断基準は, Steel 車でリペアが頻繁に行われている, 主に曲げを受けるボンネットやドアなどの部材を参考に, 「フレッシュ材と同等の曲げ剛性を回復すること」とした. また, 第 2 の基準として曲げ強度の回復率に関する評価も行ったが, 本稿においては曲げ剛性に着目した結果のみを記す.

4.2 リペア方法

本研究では熱溶解を利用するリペアに着目し, 特に低コストで容易な熱リペア, 及びパッチリペアによってリペアを行った (Fig.4). 前章での知見をもとに, 破壊の初期段階においては熱リペア, 破壊の中期・後期段階についてはパッチリペアを行うこととする. なお, 本稿では破壊の中期・後期段階におけるパッチリペアに関する結果のみを記す.

パッチリペアを行う際, 最も重要な項目のひとつが, 最適なパッチの形状である [4]. そこで本章では, パッチの厚さが曲げ剛性に及ぼす影響を次節で理論

的に評価した後, 実際に実験を行うことによって考察を進めることとする.

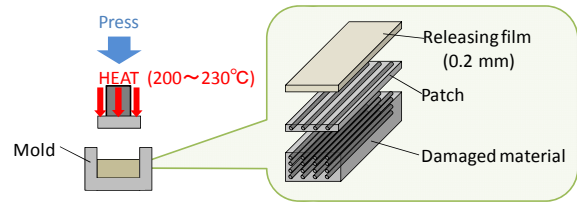


Fig.4 補修方法の概念図 (パッチリペア)

4.3 パッチリペアの理論的評価

前章で破壊メカニズムを評価した結果から, CFRTP の破壊の中期・後期段階では, 圧縮側で試験片厚さのおよそ半分まで破壊が進行していることが分かった. この領域は, 熱によって形状は回復するものの, 荷重を受け持つ繊維の損傷により, 再び曲げを受けた際はあたかも樹脂層になってしまったかのような挙動を示すと考えられる. そこで, 本研究では Fig.5 のように損傷領域と非損傷領域を設定し, 損傷領域における板厚の半分までの領域を樹脂層と仮定することで理論式を導出する. なお, このときの試験片の全体図を表したものが Fig.6 である.

リペア材を, Fig.7 のように力学特性の異なる 3 つの領域をもつ試験片とみなすと, 片持梁における簡易加算法を用いることで, リペア材の曲げ剛性 EI に関する以下の式が導出される.

$$\frac{1}{EI} = \frac{8}{(2L_4)^3} \left\{ \begin{aligned} & \frac{L_1}{E_1 I_1} (L_1^2 + 3L_1(L_2 + L_3) + 3(L_2 + L_3)^2) \\ & + \frac{L_2}{E_2 I_2} (L_2^2 + 3L_2 L_3 + 3L_3^2) + \frac{L_3^3}{E_3 I_3} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで, 式(1)中の損傷領域の曲げ剛性 $E_1 I_1$ について, Fig.8 のようにパッチ層, 樹脂層, コンポジット層を設定し, パッチ厚さを t , フレッシュ材の厚さを h , 幅を b , 下面から中立軸までの距離を n とすると, 以下の式を得る.

$$E_1 I_1 = \frac{b(h+t)^3}{12} \times \left[4 \times \left\{ \begin{aligned} & \frac{\left(\frac{h}{2} - n\right)^3 + n^3}{(h+t)^3} \times E_c + \frac{(h-n)^3 - \left(\frac{h}{2} - n\right)^3}{(h+t)^3} \times E_r \\ & + \frac{(h+t-n)^3 - (h-n)^3}{(h+t)^3} \times E_p \end{aligned} \right\} \right] \quad (2)$$

以上より, 事前実験から得た以下の値を代入することで, リペア材の曲げ剛性の回復率に関する理論値を得る (Fig.9). これにより, UD 試験片においてフレッシュ材と同等の曲げ剛性を回復するには, 理論的に 0.1 mm 以上のパッチ厚さが必要であることが明らかとなった.

h : 2 mm, L_1 : 1.5 mm, L_2 : 13.5 mm, L_3 : 15 mm,
 L_4 : 30 mm, E_2, E_3, E_c, E_r : 90 GPa, E_r : 2 GPa
 E_p : 90 GPa

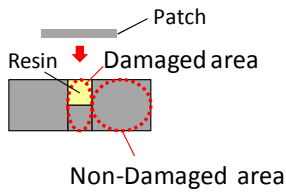


Fig.5 損傷部の拡大図

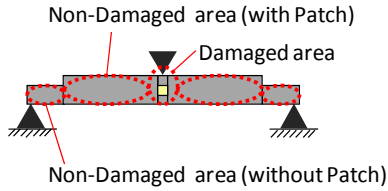


Fig.6 リペア材の全体図

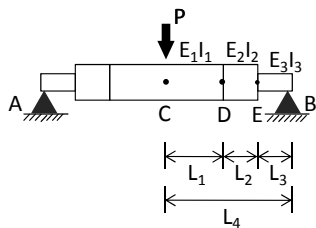


Fig.7 3つの領域をもつ両端支持梁

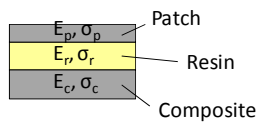


Fig.8 損傷領域の拡大図

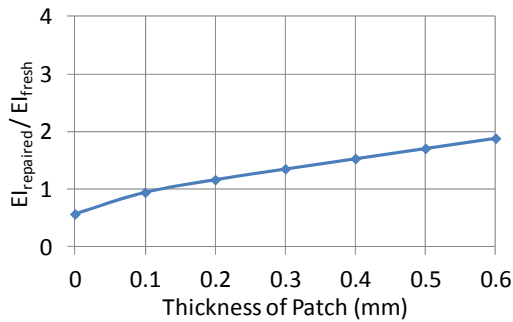


Fig.9 UD 試験片の曲げ剛性回復率 (理論値)

4.4 リペア結果

前節での理論的評価をもとに、損傷材に0~6枚(0~約0.6mm)のパッチを貼ることでリペアの評価を行っていく。なお、パッチにはUDプリプレグテープを使用した。

Fig.10は、破壊の中期段階において熱リペアを行った場合の荷重-たわみ線図であり、Fig.11は同損傷材をパッチ3枚でリペアした場合の荷重-たわみ線図である。回復率の低い熱リペアに対し、パッチリペアではフレッシュ材と同等の曲げ剛性が回復していることが分かる。Fig.12に、パッチ3枚でリペアしたときの様子をX線装置で観察した結果を示す。

Fig.13は、破壊の中期段階の損傷材においてパッチ

を0~6枚(0~約0.6mm)貼った場合、及び後期段階の損傷材においてパッチを0,3枚(0,約0.3mm)貼った場合の曲げ剛性の回復率を示したグラフである。これより、パッチ厚さと曲げ剛性の回復率には比例関係が見られ、曲げ剛性がフレッシュ材と同等まで回復するためには0.2~0.3mm以上のパッチ厚さが必要であることが分かる。また、破壊の後期段階においても、中期段階と同様のリペア結果が得られることが分かった。なお、曲げ剛性については、荷重-たわみ線図上の弾性領域のうちで直線部分の傾きを採用し算出している。

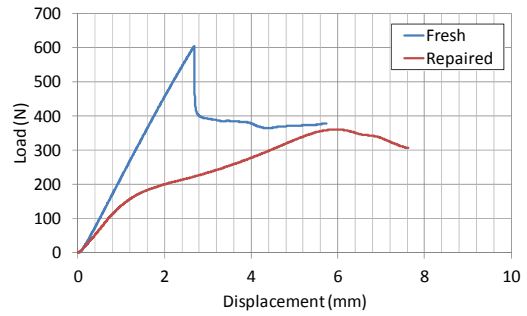


Fig.10 UD 試験片の熱リペア

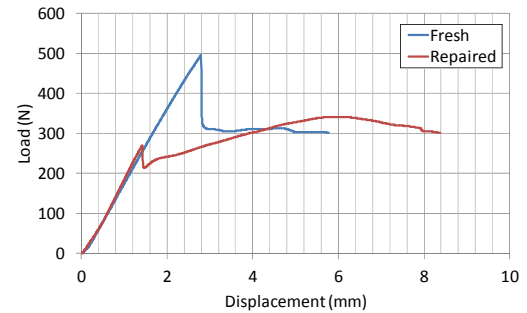


Fig.11 UD 試験片のパッチリペア (パッチ3枚)

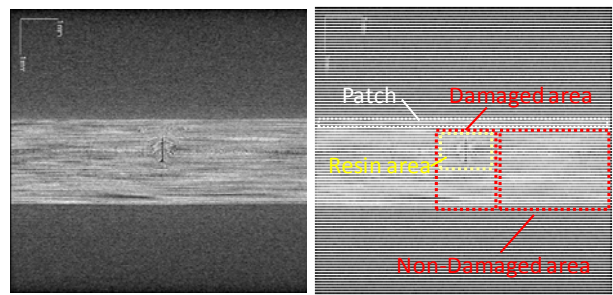


Fig.12 UD 試験片のパッチリペア後の様子 (左) と各領域 (右)

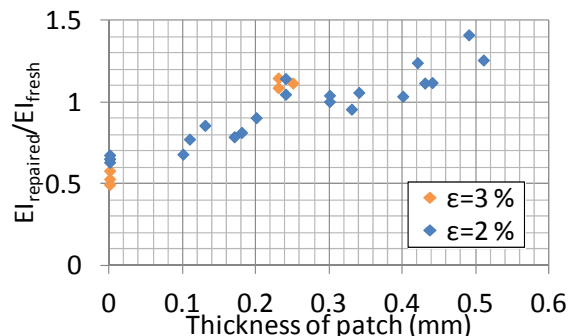


Fig.13 UD 試験片の曲げ剛性回復率 (実験値)

4.5 考察

UD 試験片においてフレッシュ材と同等の曲げ剛性を回復するためには、理論上はパッチ厚さが 0.1 mm 以上であればよいとされていたが、実際には 0.2 ~ 0.3 mm 以上の厚さが必要であることが分かった。Fig.14 は、Fig.9 の理論値と Fig.13 の実験値とを比較したグラフであるが、Fig.14 から実験値が理論値よりも小さくなっていることが分かる。これは、パッチの縦弾性率がフレッシュ材全体での曲げ弾性率 (90 GPa) よりも低くなっていることに起因していると考えられる。実際に、パッチの縦弾性率を仮に理論値として採用した値の 3 分の 1 (30 GPa) とし て計算しなおしたグラフは、実験結果の傾向とよく一致していることが分かる (Fig.14)。

パッチの縦弾性率がフレッシュ材全体での曲げ弾性率よりも小さくなっている原因としては、複合材料における引張側と圧縮側での力学特性の違いが関係していると考えられる。すなわち、引張に強いが圧縮にあまり強くない繊維の特徴から、複合材料では圧縮側の縦弾性率が引張側の値よりも小さくなっていることが分かっており [5]、これによって本実験においても圧縮側の最外層にあるパッチの縦弾性率がフレッシュ材全体での曲げ弾性率よりも小さくなっていたことと理解される。

以上、修正を加えた理論式から、本条件下の UD 試験片においては、フレッシュ材と同等の曲げ剛性を回復するには 0.3 mm 以上のパッチ厚さが必要であることが分かった。

また、破壊の後期段階においても中期段階の結果と同等のリペア結果を得た。このことは、破壊の中期～後期段階では、破壊の段階に関わらず同じ厚さのパッチによって同等の結果が得られることを示している。すなわち、実際の現場でパッチリペアを行う際には X 線などで破壊の状態を精査する必要はなく、大まかな永久変形の程度さえ分かれば破壊の段階によらず同じパッチ厚さでリペアでき、さらに、それによって安定したリペア結果が得られることが明らかになった。これは、現場でのリペアを考えた際に非常に有利な特性であり、これによって CFRTP は優れた補修性をもつ材料であることが示された。

なお、CTT 試験片における理論値、及び破壊の中期段階の損傷材を 0, 2 枚のパッチでリペアした結果を示したものが Fig.15 であるが、CTT 試験片においても UD 試験片と同じ理論が適用できることが明らかとなった。

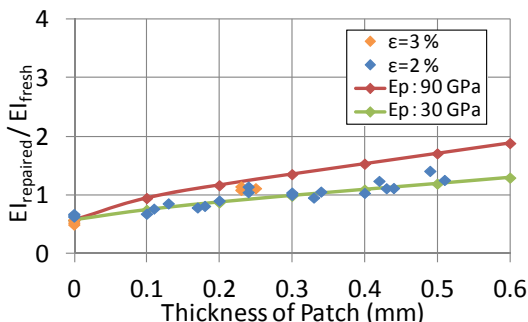


Fig.14 UD 試験片の曲げ剛性回復率 (実験値・理論値)

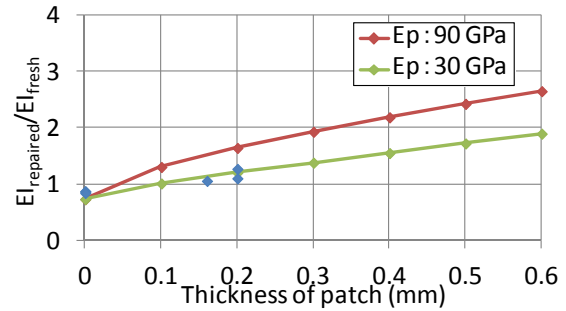


Fig.15 CTT 試験片の曲げ剛性回復率 (実験値・理論値)

5. 結論

本研究では、CFRTP の基礎的な破壊メカニズム、及び補修性に関する評価を行い、以下に示す結論が得られた。

- (1) CFRTP は圧縮側での座屈によって破壊が始まり、局所的な繊維-樹脂間の剥離、及び繊維切断を伴いながら延性的に破壊する。これによって、高いエネルギー吸収能力を発現する。
- (2) CFRTP のパッチリペアにおいてリペアを評価するためのモデルを構築し、理論的にリペア結果を予測できるようになった。また、破壊の段階に関わらず同じパッチ厚さで同じリペア結果が得られることが分かり、これによって CFRTP の高い補修性が示された。

謝辞

本研究は経済産業省-NEDO プロジェクト「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」(平成 20~24 年)の一環として行われたものであり、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- [1] W. J. Cantwell and J. Morton, "Detection of impact damage in CFRP laminates", Composite Structures, 1985, vol. 3, pp.241-257.
- [2] Louis C. Dorworth, Ginger L. Gardiner, Greg M. Mellema, Essentials of ADVANCED COMPOSITE FABRICATION & REPAIR, ASA-COMPOSITE, 2009
- [3] Xinran Xiao, Suong V. Boa and Kenneth N. Street, Repair of Thermoplastic Resin Composites by Fusion Bonding, Composites Bonding, ASTM STP 1227, 1994
- [4] F. Z. Hu, C. Soutis, Strength prediction of patch-repaired CFRP laminates loaded in compression, Composites Science and Technology 60, pp1103-1114, 2000
- [5] L. A. CARLSSON, R. B. PIPES 著・福田博, 高雄善裕, 影山和郎 訳, 高性能複合材料の実験的評価, 古今書院, 1990