

CFRP 部材の接合における継手形状の検討

石川和昌^{*1}、河田圭一^{*1}、天野和男^{*2}

Butt Joint for Joining of CFRP Composite

Kazumasa ISHIKAWA^{*1}, Keiichi KAWATA^{*1} and Kazuo AMANO^{*2}Research and Development Division, AITEC^{*1}, Industrial Technology Division, AITEC^{*2}

レーザ加工によってモザイク継手を施した CFRP 試験片の引張試験を行い、継手形状と継手の接合強度の関係について検討した結果、モザイク継手の形状や個数を制御することで接合強度の向上が可能となることがわかった。また、加工方法による CFRP 部材への影響を検討するため、中心部にレーザ加工及び切削加工によって穴加工を施した CFRP 試験片を用いて引張試験、平面曲げ疲れ試験を行い、レーザ加工品と切削加工品の引張強度と疲労寿命に差はないことを確認した。

1. はじめに

航空機や自動車部品等において、燃費向上や CO₂ ガス排出量削減のため、軽量・高強度材料である CFRP 部材が幅広く採用されるようになってきている。CFRP 製品の生産においては、製品サイズに合わせた成形機が必要となり大型部品の生産には専用設備が欠かせない。また CFRP 部品の切削加工においては、工具摩耗が激しく、高価なダイヤモンド工具が多数必要となり製品が高価となっている。今後は、大型の CFRP 部品作製のための高効率な接合技術の開発や、レーザ加工機を用いた低コストかつ高精度・高速加工技術の開発などが期待される。

本研究では、CFRP の接合技術の開発を目的として、レーザ加工によりモザイク継手を施した CFRP 試験片を作製して引張試験を行い、継手形状と接合強度の関係について検討した。また、レーザ加工が CFRP 部材へ及ぼす影響の有無を調査するため、中央部にレーザ加工、ドリル加工により穴加工を施した CFRP 試験片を作製して引張試験、平面曲げ疲れ試験を行い、レーザ加工品と切削加工品の引張強度と疲労寿命を確認した。

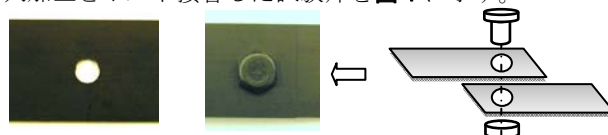
2. 実験方法

2.1 接合強度の検討

2.1.1 ボルト接合による接合強度

CFRP をボルトで接合したときの接合強度を確認するため、未加工の試験片、中心部に $\phi 6\text{mm}$ 穴加工を施した試験片、端部から 10mm 位置に $\phi 6\text{mm}$ 穴加工を施し、M6 ボルトにて接合した試験片を作製して引張試験を行い破断時の最大荷重を確認した。引張試験は島津製作所

製精密万能試験機オートグラフ AG-IS 100kN を用いて行った（以後の引張試験も本試験機を使用）。試験片は東レトレカ熱硬化性 CFRP を使用し、幅 25mm、厚さ 0.8mm の試験片に加工を施した。CFRP の仕様は T300（織物プリプレグ、0.24mm/層×3 層）、T700（一方向プリプレグ、0.18mm/層×5 層、0/90/0/90/0）、T800（一方向プリプレグ、0.2mm/層×4 層、0/90/0/90）である。穴加工とボルト接合した試験片を図 1 に示す。

図 1 引張試験片（左： $\phi 6\text{mm}$ 穴 右：ボルト接合）

2.1.2 モザイク継手による接合強度

モザイク継手の形状と接合強度の関係を調べるため、各種の継手形状を作製して引張試験を行った。試験片は 2.1.1 と同じ CFRP（T800）を使用した。レーザ加工により一枚の試験片を継手形状に切断して、切り離した試験片をかみ合わせて接合した。継手部の両端長さ、中央長さ、継手個数、継手長さ、継手段数を変更して継手形状の検討を行った。引張試験中に継手部が離れることを防ぐため、幅 25mm、深さ 0.5mm の溝のある拘束治具を用いて引張試験を行った。（図 2 参照）

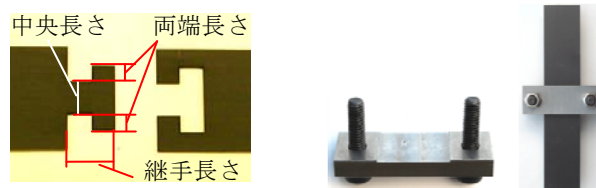


図 2 継手形状と引張試験治具

^{*1} 基盤技術部（現工業技術部 自動車・機械技術室） ^{*2} 工業技術部 加工技術室（現工業技術部 金属材料室）

①中央長さ、両端長さの変更

継手がかみ合う両端部の長さを 4mm（片側 2mm）、継手中央部の長さを 4、8、12mm とした試験片と継手中央部の長さを 4mm、継手がかみ合う両端部の長さを 4、8、12mm とした試験片を作製し、引張試験を行った。**図 3**に継手形状を示す。

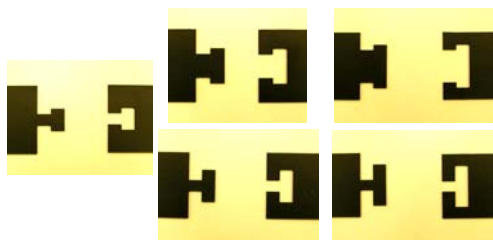


図 3 中央長さ、両端長さを変更した継手

②継手個数の変更

継手個数 1～6、8、12 個の試験片を作製し、引張試験を行った。**図 4**に継手形状を示す。



図 4 個数を変更した継手（左から 4、6、12 個）

③継手長さ、継手段数の変更

継手個数 4 個、長手方向長さを 10mm、20mm、30mm とした引張試験を行った。また、長手方向長さを 20mm、継手個数 4、6 個、段数を 1～4 段として引張試験を行った。**図 5**に継手形状を示す。

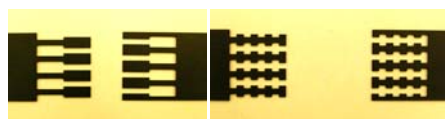


図 5 長さ、段数を変更した継手
（左：20mm 右：20mm、4 段）

④形状の改良

継手段数が多くなるように継手長さ 20mm、継手個数 4 個、継手段数 4 個の継手形状を**図 6**のように改良して引張試験を行った。

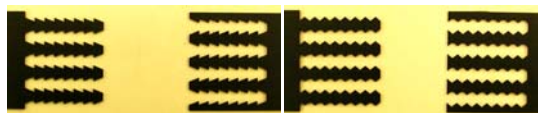


図 6 継手の改良（左：改良 1 右：改良 2）

2.2 加工方法の影響

2.2.1 引張試験

試験片は CFRP（T300、T700、T800）を使用し、幅 25mm、厚さ 1.2mm（2.1.1 で使用した CFRP より 2 層

厚い仕様）の試験片中心にレーザ加工及びマシニングセンタとダイヤモンドドリルを用いた自動加工によって $\phi 6$ mm 穴加工を施して引張試験を行った。

2.2.2 平面曲げ疲れ試験

試験片は CFRP（T300）を使用し、長さ 90mm、幅 50mm、厚さ 1.2mm の試験片中央位置に幅方向へ 3 個の $\phi 6$ mm 穴加工を施した。穴加工はレーザ加工、マシニングセンタとダイヤモンドドリルを用いた自動加工、ボール盤とダイヤモンドドリルを用いた手動加工により行った。島津製作所製万能疲れ試験機 UF-15 形を用いて負荷応力 180～324MPa（引張強さの 49～89%相当）として試験を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 接合強度の検討

3.1.1 ボルト接合による接合強度

各試験片の引張試験結果を**図 7**に、試験後のボルト接合部の観察画像を**図 8**に示す。 $\phi 6$ mm の穴加工により最大荷重は 47～61%まで低下した。 $\phi 6$ mm の穴加工によって試験片の幅が 25mm から 19mm に減少したと考ええると、最大荷重は 76%程度と考えられる。しかし、47～61%まで低下していることから、中心部に穴があることで荷重の加わり方が変わり破断し易くなったと推定される。また、M6 ボルトによる接合では本来の CFRP の最大荷重の 7～12%まで低下した。このときボルトから加わる荷重により、ボルト穴から試験片端面方向へ CFRP がスライドするように破壊していた。本試験片ではボルト穴と端面までの距離が小さいため、荷重を受ける部位が少なくなり、ボルト接合での最大荷重は大幅に低下したと考えられる。

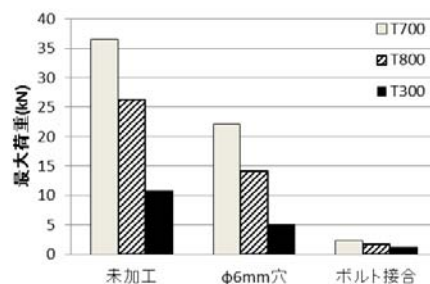


図 7 引張試験結果



図 8 ボルト接合部

3.1.2 モザイク継手による接合強度

①中央長さ、両端長さの変更

試験結果を図 9 に示す。中央部の長さと両端部の長さを変えたときの最大荷重の差はあまり見られなかった。試験後の試験片の観察画像を図 10 に示す。図からどの試験片も継手がかみ合う部位である両端部が破壊していることがわかる。そのため、両端部が破壊するときの荷重が最大荷重となっており、差は見られなかったと考えられる。中央部は試験片の端面から端面まで炭素繊維が繋がっているため引張強度が強いのに対して、両端部は試験片の端面から繋がっている炭素繊維がなく、中央部の両端に切り残された状態である。そのため強度が小さいと考えられる。また、両端部の長さを変えても継手がかみ合う部位の根元から破壊しており、両端部の長さを単純に長くしても最大荷重に寄与しないことがわかった。

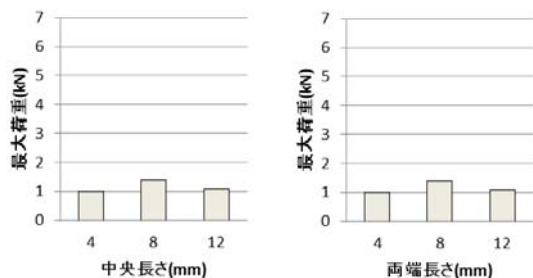


図 9 各部長さとの最大荷重



図 10 試験後の継手

左：4・4mm 中上：8・4mm 右上：12・4mm
中下：4・8mm 右下：4・12mm

②継手個数の変更

試験結果を図 11 に示す。継手の個数が増えると最大荷重は大きくなったが、8 個以上ではあまり変化がなかった。試験後の試験片の観察画像を図 12 に示す。図から継手がかみ合う部位である両端部が破壊していることがわかる。継手個数が増えることで両端部に加わる荷重が分散され、両端部の破壊が抑制されることにより、最大荷重が上昇したと考えられる。しかし、継手個数 8 個以上では中央長さが小さくなるため、継手一つあたりの耐荷重が小さくなり、最大荷重が上昇しなかったと考えられる。

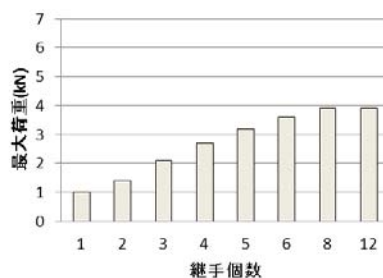


図 11 継手個数と最大荷重



図 12 試験後の継手（左から 4、6、12 個）

③継手長さ、段数の変更

継手長さを変更したときの試験結果を図 13 に示す。継手長さを 10mm から 20mm に変えると最大荷重は大きくなったが 30mm ではあまり変化しなかった。この結果から継手の幅や形状に対して最適な継手長さがあると考えられる。継手段数を変更したときの試験結果を図 14 に示す。継手の段数が増えると最大荷重は大きくなった。試験後の試験片の観察画像を図 15 に示す。図からこれまでの試験片と同様に継手がかみ合う部位である両端部が破壊していることがわかる。継手長さは 20mm で一定であるが、継手段数が増えると両端部に加わる荷重が分散され両端部の破壊が抑制されて、最大荷重が上昇したと考えられる。継手個数も 4 個より 6 個の方が最大荷重は大きくなっており、両端部に加わる荷重を分散させることが最大荷重の上昇に寄与すると考えられる。

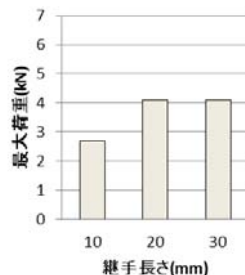


図 13 継手長さとの最大荷重

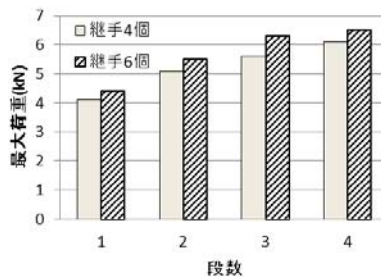


図 14 継手段数と最大荷重



図 15 試験後の継手

(左：20mm、4 個、4 段 右：20mm、6 個、4 段)

④形状の改良

試験結果を図 16 に示す。継手の改良により最大荷重は少し大きくなったが大きな改善効果は見られなかった。試験後の試験片の観察画像を図 17 に示す。図から改良品は継手がかみ合う部位は破壊せず、炭素繊維が繋がっている継手本体の根元から破壊していることがわかった。これまでの継手形状では継手がかみ合う部位が破壊していたが、継手の形状や個数を制御して継手に加わる荷重を分散させることで、ある荷重までは破壊しない継手を作製することがわかった。また、炭素繊維の繋がっている継手本体が破壊したことから、改良品の形状は継手の太さにおける CFRP 本来の強度に近い引張強度があると考えられる。この結果から継手のかみ合う部位は破壊しない程度に小さい形状とし、継手本体部を大きくすることで接合強度を最大にできると考えられる。

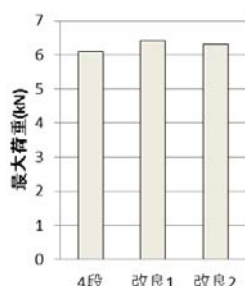


図 16 継手改良と最大荷重



図 17 試験後の継手

(左：改良 1 右：改良 2)

3.2 加工方法の影響

3.2.1 引張試験

試験結果を図 18 に示す。レーザ加工とドリル加工により穴加工を行った各 CFRP 試験片の引張強度に差は見られなかった。加工方法の違いによる引張強度への影響はないと考えられる。

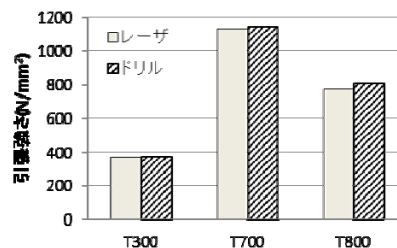


図 18 引張試験結果

3.2.2 平面曲げ疲れ試験

試験結果を図 19 に示す。レーザを用いた穴加工試験片とマシニングセンタを用いた穴加工試験片の負荷応力に対する繰返し数は同程度であった。このことから CFRP の加工において、レーザ加工品はマシニングセンタを用いたドリル加工品と同等の疲労寿命であることがわかった。これに対してボール盤を用いて手動で穴加工した試験片では、負荷応力に対する繰返し数が小さくなっており、疲労寿命が小さくなった。手動加工では穴の加工精度や位置精度が悪く、疲労寿命が小さくなったと考えられる。

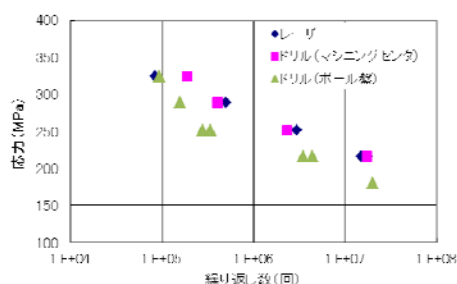


図 19 平面曲げ疲れ試験結果

4. 結び

レーザ加工によりモザイク継手を施した CFRP 試験片を作製して引張試験を行い、継手形状と接合強度の関係について検討した結果、継手の形状や個数を制御して継手がかみ合う部位に加わる荷重を分散させることで接合強度を大きくすることがわかった。また、加工方法の違いが CFRP 部材へ及ぼす影響を調査するため、中央部にレーザ加工、ドリル加工により穴加工を施した CFRP 試験片を作製して引張試験、平面曲げ疲れ試験を行った結果、レーザ加工品と切削加工品の引張強度と疲労寿命に差は見られなかった。

付記

本研究内容は、国の平成 21・22 年度戦略的基盤技術高度化支援事業（CFRP 複合材料部材の新レーザ溶接技術の開発）による委託研究の成果である。