

ISSN 0919-6676  
CODEN: SFHPFE

# 試験研究報告

平成23年度

福島県ハイテクプラザ

# CFRPの穴加工における工具・加工条件の検討

## Investigations on tools and processing condition for CFRP by drilling

技術開発部生産・加工科 夏井憲司 吉田智 斎藤俊郎 山口泰寿

軽くて高強度であるという特性から燃費向上を目的として航空機や自動車に使用されるようになった CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の穴加工実験を行い、加工穴の品質、加工欠陥および工具摩耗の評価を行った。その結果、CFRP の穴加工を行う際に工具、加工条件を決定するための基礎データを収集することができた。

Key words: CFRP、穴加工、工具寿命、加工欠陥

### 1. 緒言

近年、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)は、軽くて高強度であるという特性から燃費向上を目的として、航空機や自動車などに使用されるようになってきた。

CFRP の接合には主にリベットやボルトが用いられるため穴加工が必要になるが、CFRP の穴加工においては、バリ、層間剥離(デラミネーション)や繊維切れ残りなどの加工欠陥および著しい工具摩耗の発生などの問題が多数ある。

そのため、各工具メーカーでは形状や表面処理方法を改良し、工具摩耗、加工欠陥対策を施した専用ドリル(特殊形状超硬ドリル、ダイヤモンドコーティングドリル(以下は、ダイヤモンドコートドリルとする。)、PCDドリルなど)を販売している。

そこで本研究では、特徴的な CFRP 専用ドリルを用いて穴加工実験を行い、発生する加工欠陥や工具摩耗を調べて、工具を選定するために必要な基礎データを収集した。併せて、CFRP の穴加工に関する周辺技術の検討も行ったので、その結果を報告する。

### 2. 実験方法

#### 2. 1. 使用ドリルおよび加工条件

今回、実験に使用したドリルとその加工条件を図 1 に示す。本研究では、4 種類のドリルを使用した。ドリル A は、先端がロウソクのような形をした特殊形状超硬合金ドリルで、切れ刃の先端が鎌の様に尖っており、炭素繊維の切れ残りを抑制する形状になっている。ドリル B は、ダイヤモンドコーティングを施した超硬合金ドリルで、ドリルの先端角が切れ刃の途中で変化するダブルアングル形状をしており、切削時のスラスト力を小さくし、デラミネーションの発生を抑制することができる。ドリル C は、直溝のダイヤモンドコーティング超硬ドリルで、こちらもデラミネーションを防止するために、ドリル先端角が切れ刃の途中で変化する形状となっている。ドリル D は、CFRP 専用ドリルとの違いを比較するために金属加工用ドリルを選定した。

切削条件は、切削速度、送り量とも工具メーカーの推奨する値を用いた単純貫通穴加工とした。ただし、

金属加工用ドリルは工具メーカーで CFRP に対しての推奨切削条件を定めていなかったため、他の CFRP 専用超硬ドリルを参考に切削条件を決定した。

また、実験に使用した工具の径は、航空機の製造において最も多く用いられている直径 6.35mm に、市販されているものの中で最も近いものとした。

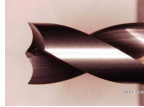
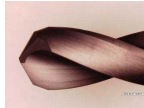
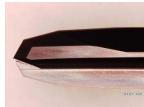

	形状	切削速度 (m/min)	送り量 (mm/rev)
ドリルA 特殊形状超硬 (φ6.5mm)		102.1	0.06
ドリルB ダイヤモンドコート (φ6.35mm)		99.7	0.06
ドリルC ダイヤモンドコート(直溝) (φ6.375mm)		60.1	0.06
ドリルD 金属加工用 (φ6.4mm)		60.3	0.06

図1 使用ドリルおよび加工条件

#### 2. 2. 被削材および実験装置

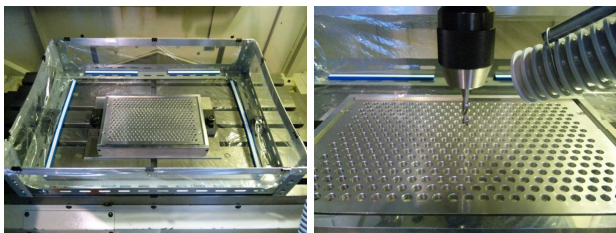
実験に使用した被削材を図 2 に示す。被削材には、炭素繊維を一方方向に引きそろえて樹脂を含浸、半硬化させた UD プリプレグシートといわれるものを、繊維方向を 45° または 90° 回転させながら 16 枚積層し、オートクレーブで成形した CFRP を使用した。



図2 実験で使用したCFRP

実験装置には、マシニングセンタ(三菱重工業(株)製 M-V5B)を使用した。CFRP の切りくずは、加工機の精度を低下させたり、作業者の健康被害の原因となったりするため、切りくずの飛散を防止する囲いをステージ上に取り付け、主軸脇に取り付けた集塵機の吸引口から切りくずを吸引しながら実験を行った。

また、囲いの中に CFRP を固定するための治具と切削力による被削材の変形を防止するためのバックアップボードを取り付けた。バックアップボードには、ドリル径より直径が 1.5mm 程度大きい下穴が開いており、その上に CFRP を固定し、下穴の開いている位置で穴加工を行った。今回、作製した治具を図 3 に示す。



(左:切りくず飛散防用囲い 右:バックアップボード)  
図3 作製した治具

### 2. 3. 評価方法

今回の実験では、測定顕微鏡((株)ニコン製 MM-40)を用いて加工穴数が 10、20、30、50、70、100、150、200、250、300 に達するごとに、それ以降は 100 穴ごとにドリル逃げ面の観察を行った。逃げ面の摩耗量が 100 $\mu$ m に達した場合や加工穴数が 1000 穴に達した場合は、実験を終了した。

実験終了後は、デジタルマイクロスコープ((株)ハイロックス製 KH-7700)による工具摩耗状況の観察、実体顕微鏡(オリンパス(株)製 SZX12)による CFRP 加工穴の観察、三次元測定機(カールツァイス(株)製 UPMC550)による加工穴径の測定、真円度測定機((株)東京精密製 ROND COM60A)による加工穴の真円度測定を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1. 切りくず処理



図4 穴加工の様子

図 4 に、加工実験の様子を示す。使用するドリルにより、切りくずの形状は変化した。ドリル A,B,D の穴加工では、比較的大きな粒状の切りくずとなったため、集塵機で吸引することができたが、ドリル C の穴加工では、粉状の切りくずが加工穴の周りに固まっ

て発生したため、集塵機で吸引することができず、穴加工後に切りくずの吸引のみを別途行う必要があった。しかし、今回行った実験の全ての加工条件では、ドリルの回転により切りくずが巻き上げられて囲いの外に飛散するといった現象は発生しなかった。

て発生したため、集塵機で吸引することができず、穴加工後に切りくずの吸引のみを別途行う必要があった。しかし、今回行った実験の全ての加工条件では、ドリルの回転により切りくずが巻き上げられて囲いの外に飛散するといった現象は発生しなかった。

### 3. 2. 工具の摩耗状態

図 5 にデジタルマイクロスコープで撮影したドリル切れ刃の新品時と実験終了後の観察画像を示す。ドリル A は、加工穴数が増えるとドリル外周部の先端が丸まっていくだけで逃げ面に摩耗はあまり進行しなかった。実験終了の条件ではないが、400 穴加工したところで、摩耗により外周部先端に鋭さがなくなったため実験を終了した。

ドリル B,C は、加工穴数が 1000 に達したため実験を終了した。工具の摩耗幅はいずれも 40 ~ 50 $\mu$  程度であった。

ドリル D については、100 穴加工したところで摩耗量が 100 $\mu$ m に達したため、実験を終了した。

	切れ刃 (新品)	切れ刃 (実験終了後)	加工穴数
ドリルA			400
ドリルB			1000
ドリルC			1000
ドリルD			100

図5 各ドリルの観察画像

### 3. 3. 加工穴の品質

実体顕微鏡で撮影した加工穴の観察画像を図 6 に示す。今回発生した加工欠陥のうち、加工穴の内側にかかるように炭素繊維が残っていた場合を繊維切れ残り、加工穴の内側にはかからない極短い炭素繊維の切れ残り樹脂の盛り上がりバリとした。

ドリル A では、始めは入口、出口側ともバリや繊維切れ残りもない良好な穴品質だったが、30 穴程度より出口側で一部炭素繊維の切れ残りが見られるようになった。それ以降は、実験を終了した 400 穴まで、切れ残った繊維量に多少の増加は見られたが同じような品質の加工穴となった。

ドリル B は、1 穴目から入口側にバリと出口側に炭素繊維の切れ残りが見られた。出口側の切れ残った繊維

維の量は、450 穴程度まで増加していったが、その後は実験を終了した 1,000 穴までほぼ一定となった。















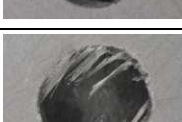
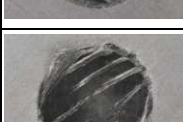
		1穴目	31穴目	状態
ドリル A	入口側			良好
	出口側			一部繊維の切れ残り
		1穴目	451穴目	状態
ドリル B	入口側			バリあり
	出口側			繊維切れ残りあり
		1穴目	160穴目	状態
ドリル C	入口側			繊維切れ残りあり
	出口側			繊維切れ残りあり
		1穴目	100穴目	状態
ドリル D	入口側			バリあり
	出口側			繊維切れ残りあり

図6 加工穴観察画像

ドリル C についても、1 穴目から出口側に炭素繊維の切れ残りが見られた。切れ残った繊維の量は、加工穴数が増えると共に増加していったが 160 穴程度とドリル B に比べ早い段階で一定となった。また、加工穴数の増加に合わせて、入口側でも短い繊維の切れ残りが発生するようになった。

ドリル D については、1 穴目から入口側にはバリが出口側には繊維の切れ残りが発生した。実験を終了した 100 穴まで穴品質に大きな変化はなかった。

今回の実験で、ドリル A ~ D で開けた加工穴には、目視で確認できるような表層のデラミネーションは発生しなかった。しかし、CFRP 板厚中央の層間に目視では確認できないようなデラミネーションが発生している可能性はあるため、そのようなデラミネーションを評価する方法を、今後検討する必要があると考えられる。

### 3. 4. 加工穴の形状精度

図 7 に加工穴数に対する穴径誤差の推移を示す。ここに示す穴径誤差は、三次元測定機で測定した加工穴の直径から測定顕微鏡で測定したドリル径の実測値を引いたものである。

ドリル A の加工穴の直径は、ほぼ一定となったが、それ以外のドリル B ~ D については、加工穴数が増えると穴径は減少する結果となった。

切削による穴加工をする場合、切削力により弾性変形していたものが、加工後にもとに戻り穴径が小さくなるスプリングバックという現象が発生する。実験の前後でドリル径に変化は見られなかったため、この結果は、摩耗により切れ味が落ち、被削材を切るのではなく押し広げる作用が強くなり、スプリングバック量が増加したためだと考えられる。

特にドリル B,C は、デラミネーションを防止するため、先端角が切れ刃の途中で変化する形状をしており、穴を押し広げながら加工する。そのため、通常のドリルよりもスプリングバックを発生しやすく、加工穴数の増加に伴い穴径が減少する傾向を顕著に示したものである。

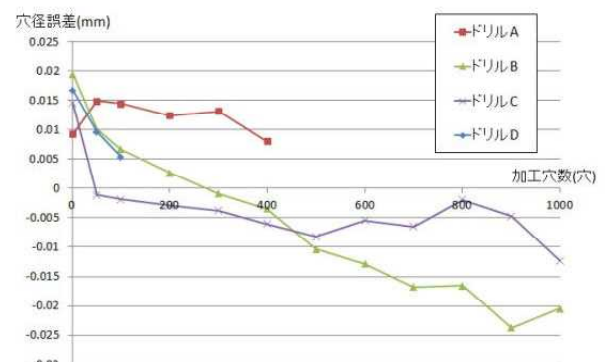


図7 穴径誤差の推移

加工穴数に対する真円度の推移を図 8 に示す。全てのドリルの加工穴で、加工穴数の増加に伴い真円度は悪化する傾向を示した。

ただし、ドリル C の加工穴については、真円度は 40 $\mu$ m 程度まで悪化したのちほぼ一定となった。この結果は、ドリル C の形状に起因すると考えられる。通常のねじれドリルであると加工穴の内径部を切削するのは、切れ刃の最外周部の 1 箇所であるのに対し、ドリル C は直溝であるため、加工穴の内径部を切削



することのできる切れ刃は先端を除いた溝長すべてに存在する。そのため、先端側の切れ刃が摩耗したとしても、シャンク側の摩耗していない切れ刃で切削することができたため、真円度の値が安定したと考えられる。

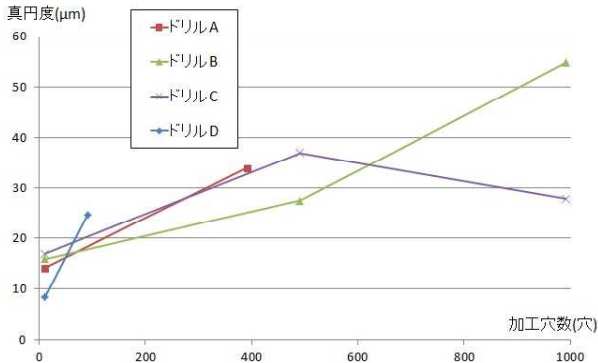


図8 真円度の推移

#### 4. 結言

CFRP 専用ドリルを用いて、UD プリプレグより製作した CFRP の穴加工実験を行い工具・加工条件を選定するための基礎データの収集を行ったところ、以下のことがわかった。

- (1)ドリル A (特殊形状超硬ドリル) は、炭素繊維の切れ残りが発生しにくく、比較的良好な穴品質を得ることができる。工具摩耗についても、ダイヤモンドドリルに及ばないまでも、金属用ドリルよりは摩耗の進行は遅かった。
- (2)ドリル B (ダイヤモンドドリル) は、工具摩耗量は一番小さかったが、コーティングの膜厚により切れ刃の鋭利さが損なわれているため、炭素繊維の切れ残りが発生しやすかった。
- (3)ドリル C (直溝のダイヤモンドドリル) は、ドリル B と同じく工具摩耗量は小さかったが、炭素繊維の切れ残りが発生しやすかった。しかし、穴品質は、加工穴数の増加に伴いある程度悪化するとその後は安定することを確認した。
- (4)集塵機や切りくず飛散防止用の囲いなどを使用すれば、テーブル外への切りくずの飛散はほとんどないと思われる。
- (5)デラミネーションが、CFRP 板厚中央で発生した場合、目視や顕微鏡観察では確認することができないため、他の確認方法の検討が必要となる。

今回は、バックアップボードを用いて被削材のたわみを取り除いた状態で実験を行ったが、実際の製造の現場ではバックアップボードは使用されていないことが多い。バックアップボードを使用しない場合、被削材にたわみや貫通時の振動が発生するようになり、工

具摩耗や加工欠陥にも影響することが考えられるため、バックアップボードを使用しない場合についても実験を行う必要があると考えられる。

また、今後は、今回は検討することができなかったデラミネーションの評価方法の検討やクロスプリプレグより製造した CFRP を用いて、切削速度や送り量などの加工条件を変えた場合、加工欠陥や工具摩耗にどのような影響を及ぼすかの調査に取り組む予定である。