

CFRP 積層板のパンチプレス加工に及ぼす マイナスクリアランス効果の解明

香川大学 工学部 材料創造工学科（現在 創造工学部 創造工学科）
講師 松田 伸也

（平成 29 年度 奨励研究助成 A（若手研究者）AF-2017039）

キーワード：せん断変形，層間はく離，クリアランス

1. 研究の目的と背景

1.1 社会的背景と課題

炭素繊維強化プラスチック複合材料（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastics）は、高比強度、高比剛性のような優れた特性を有する。そのため、燃費向上を目的とした軽量化・高効率のために自動車のボンネット、ルーフなど薄板部材のような大量生産部品への適用が拡大している。構造部材を生産するためには、製造工程において穴あけやトリミングのような除去加工（2次加工）が要求される。現在ではドリル加工やレーザー加工、ウォータージェット加工が主流である。ドリル加工はポピュラーな加工法であるが、丸い穴開けに限定される。またダイヤモンドツールなど特殊で高価な工具を用い、かつ摩耗によるドリル交換やメンテナンスを行いながら低速で加工しなければならない。レーザー加工は、様々な異種形状への穴加工もできるが、加工部位が多いと工具などの移動や入れ替えのために時間のロスが生じる。ウォータージェット加工では高品位が得られるが、加工速度が遅く加工できる形状に制限がある。製品を量産化する上では高速かつ精密加工が要求されるため、これらの加工はいずれも加工コストや設備費、タクトタイムの観点から量産化には不向きである。そのため CFRP 製品の量産化・低コスト化を促進するためには短時間で安価な除去加工技術を確立する必要がある。

課題を解決するために、せん断を利用した機械加工がどのような異方性を有する CFRP に対しても適用できれば、CFRP に特化した設備を必要とせず、金属材料と同様に金型などの変更のみによって加工できるため、大幅なタクトタイムの短縮やコスト削減が期待できる。複雑な変形・損傷・破壊プロセスを示す異方性 CFRP に対して適した刃（パンチ刃）やクリアランス、ワーク温度などの加工条件を最適化する必要がある。一方で、一方ブリブプレグからなる熱硬化性 CFRP 積層板は低層間じん性であるとともに顕著な異方性を示すため、加工の難易度は最も高い。加工難易度の高い材料に対して成功すれば、それ以外の材料に対しても高品位が得られる。

1.2 目的

これまで CFRP 積層板に対するパンチプレス穿孔加工が行われ、刃（パンチ刃）やクリアランス、ワーク温度

などの加工条件が加工品位に及ぼす影響は明らかにされてきた。その中でクリアランスに注目すると、小さいクリアランスは高い加工品位を与えることが明らかにされている¹⁾。その一方で、金属加工においても高い加工品位を得るためにはクリアランスを小さくすることが有効である²⁾。そのため、パンチをダイに嵌合させて分離する制約をはずし、精密加工のためにファインランキング加工にマイナスのクリアランスを併用したパンチプレス加工^{2,3)}が行われている。そこで、一方向 CFRP から成形した異方性が顕著な CFRP 積層板に対して、マイナスクリアランスによるパンチプレス加工を試みた。その結果、マイナスクリアランスでも、パンチプレスによって一度で打抜くことが可能であることがわかった。さらにバリが除去されており、高い品位であった。しかしながら穿孔内部の加工品位や加工プロセスは明らかにできていない。

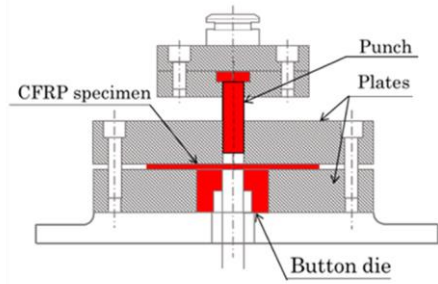
本研究では、実験を通して系統的にマイナスクリアランスでの加工品位や加工プロセスを解明することを目的とした。はじめに、プラスからマイナスまでクリアランスを変換してパンチ穿孔加工を実施し、加工品位を評価した。次にパンチ加工中を観察して実験的に加工プロセスを調査した。

2. 実験方法

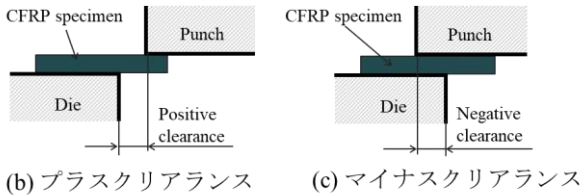
汎用グレードのプリプレグ（T700SC（炭素繊維）/#2592（エポキシ樹脂）、繊維体積含有率 $V_f = 0.6$ 、東レ製）を直交積層（ $[0^\circ/90^\circ]_s$ ）して真空中で加熱・加圧成形した。その後、ダイヤモンドカッターを用いて正方形のワーク（ $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ）へ切り出して試験片とした。このとき厚さ t は 1.1mm である。

図 1 にパンチ加工治具とクリアランスの模式図を示す。図 1 (a) に示すように、ワークをボタンダイ（穴直径 $D = 10.1\text{mm}$, 9.9mm , SKD11 材）とカバープレート（パンチ通し穴直径 $= 10.5\text{mm}$ ）ではさみ、ボルトで固定した。ワークを固定した治具を変位制御式万能試験機（容量 100kN ）に固定し、室温で試験機のクロスヘッドに固定したパンチを下方に変位させることで穿孔を加工した。パンチは、直径 $d = 10\text{mm}$ 、刃先角ゼロの平刃（SKD11 材）を用いた。このときクリアランス $C = (D - d)/2 = 0.05\text{mm}$ および -0.05mm （図 1 (b), (c)）であり、クロスヘッ

ド速度は 1mm/min に固定した。以後、+C および -C と称する。試験後、デジタルマイクロスコップおよび軟 X 線装置により穿孔外観および内部損傷（加工による欠落部や層間はく離）を非破壊的に観察した。さらに穿孔の加工面および内部損傷状態を調査するために、穴の中心を通る二つの断面（ワーク表面の繊維方向に対して平行および垂直な方向、以後、断面 1 および 2 と称する）にワークをダイヤモンドカッターで切断し、断面を研磨後、走査型電子顕微鏡（SEM）で観察した。



(a) パンチ加工治具



(b) プラスクリアランス

(c) マイナスクリアランス

図 1 パンチ加工治具とクリアランスの模式図

3. 研究成果

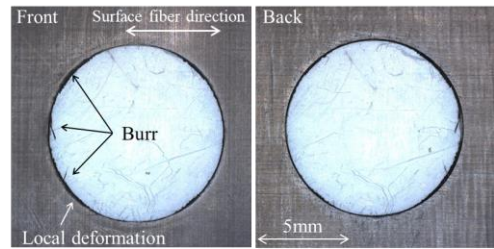
3.1 加工品位

図 2 にパンチプレス加工後の穿孔の表面および裏面の写真を示す。+C にて加工した場合、穿孔周りに炭素繊維を除去できず、わずかなバリが残存していた。また表面の穿孔周りには局所的な変形が生じていた。一方、-C にて加工した場合、穿孔周りにバリは観察されなかった。穿孔周りには局所的な変形が生じており、+C の場合と比較して変形量は大きかった。

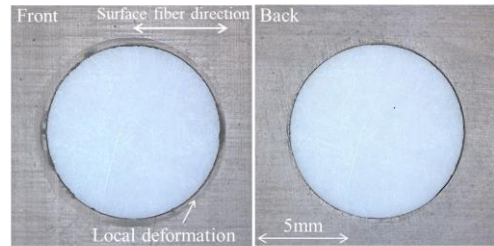
図 3 に +C にて加工した穿孔の断面写真を示す。加工面は、いずれの断面においても凹凸を呈しており、明らかな加工面品位の異方性が観察された。中間層では、樹脂割れ（図 3 (a)）が観察された。また、断面 2 の 0°/90° 層間にはそれぞれはく離発生していた（図 3 (b)）。

図 4 に -C にて加工した穿孔の断面写真を示す。+C の加工と比較して、加工面は凹凸を呈しているものの比較的平滑な面を呈していた。断面 1 では特に平滑に加工されていた。中間層の樹脂割れ量は少ない（図 3 (a)）が、断面 1 および 2 とともに 0°/90° 層間にはく離がそれぞれ発生していた。図 2 および 3 でそれぞれ示した断面 2 における 0°/90° 層間で観察されたはく離長さを測定した。層間はく離長さは SEM 像からソフトを用いて測定した。+C および -C の加工によって発生した層間はく離の長

さは、平均して 0.368mm および 0.483mm であり、-C での加工では、層間はく離は長くなる結果を得た。

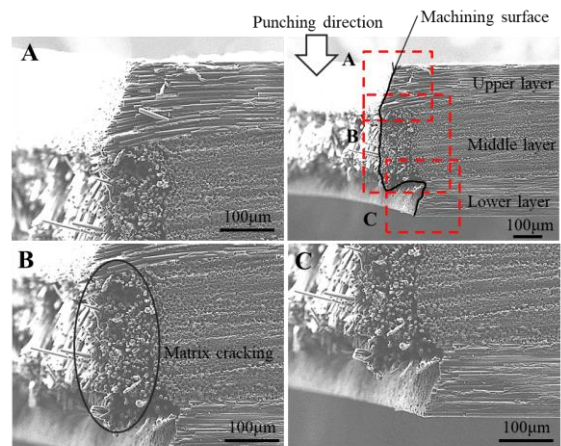


(a) プラスクリアランス

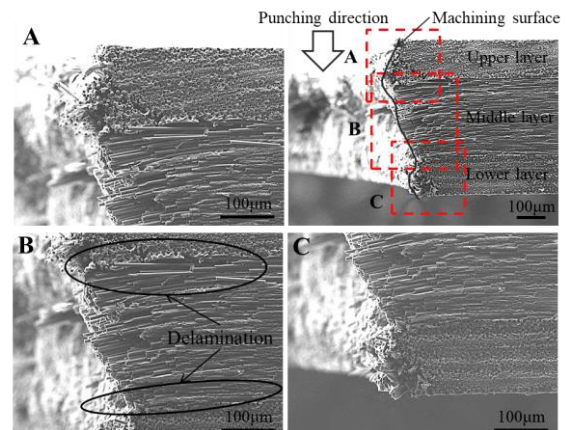


(b) マイナスクリアランス

図 2 パンチ加工後の穿孔表面と裏面の観察

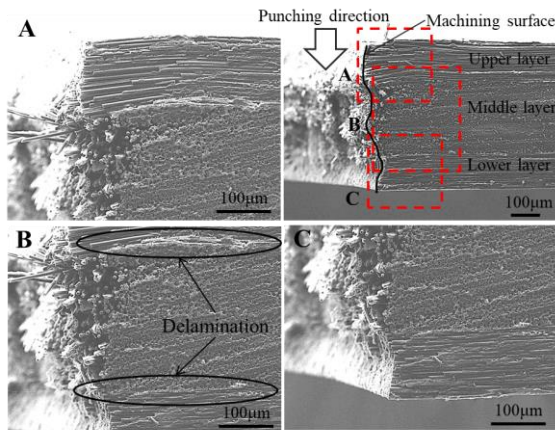


(a) 断面1（表面繊維に対して平行な穿孔断面）

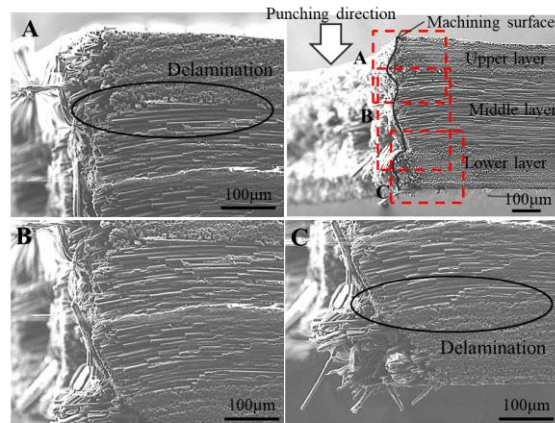


(b) 断面2（表面繊維に対して垂直な穿孔断面）

図 3 +C でのパンチ加工後の穿孔断面観察



(a) 断面1 (表面繊維に対して平行な穿孔断面)



(b) 断面2 (表面繊維に対して垂直な穿孔断面)

図4 -Cでのパンチ加工後の穿孔断面観察

図5に軟X線観察結果を示す。矢印で示す穿孔周りの黒色の領域は、加工によって生じた加工面の欠落部や層間はく離に相当する。+Cでの加工の場合、穿孔周り全周に渡って損傷領域が観察された。一方、-Cでの加工の場合、表面繊維に対して垂直および平行方向付近において損傷領域が主に観察された。これは図4と対応させると層間はく離領域と考えられる。+Cと-Cにおける損傷領域の投影面積はそれぞれ9.74mm²および6.55mm²であり、マイナスクリアランス加工では約33%の損傷面積が低下した。

以上の結果より、マイナスクリアランスでは、特定の方向にやや長い層間はく離は生じるが、加工面は平滑であり、穿孔周りの損傷量は低減させることができる。

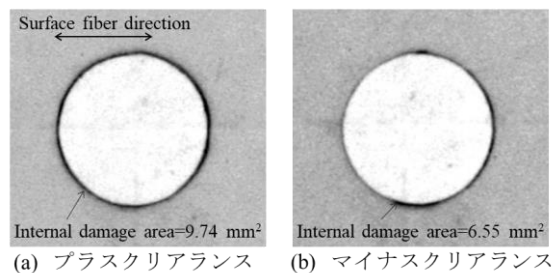
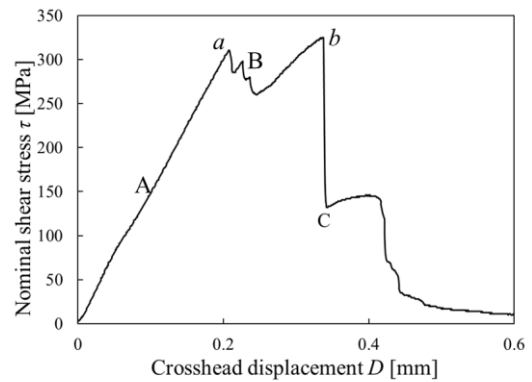


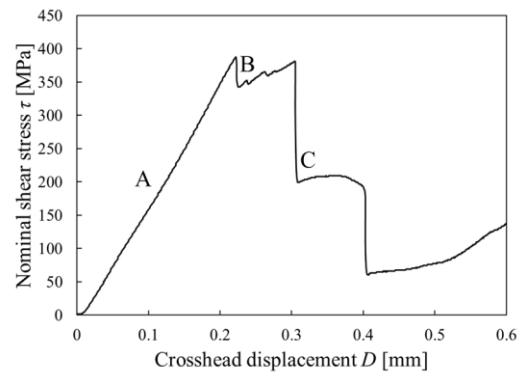
図5 穿孔の軟X線観察

3・2 加工中のせん断応力-変位線図

図6に+Cおよび-Cでの穿孔加工中に得られた公称せん断応力-クロスヘッド変位線図をそれぞれ示す。公称せん断応力は、パンチ荷重 F を加工面積 πr^2 で除いて算出した。+Cの場合(図6(a))、公称せん断応力は、変位の増加に伴って線形的に増加した。最大値(点a)に到達後、不連続に低下するが、また増加して再び最大値(点b)に到達した。その後、公称せん断応力は、不連続に低下した。このとき、点aおよびbの公称せん断応力はほぼ等しく、公称せん断応力は325MPaであった。一方、-Cの場合(図6(b))、+Cの線図とほぼ同じ挙動を示した。しかしながら、最大公称せん断応力は、387MPaであり、高い値を示した。線図の挙動はほぼ類似しているが、最大公称せん断応力の違いは、積層板の中の加工損傷挙動の違いに起因していると考えられる。



(a) プラスクリアランス



(b) マイナスクリアランス

図6 パンチ加工中の公称せん断応力とクロスヘッド変位線図

3・3 加工中の損傷挙動

3・3・1 プラスクリアランス

図7に+Cでの加工中の各断面写真を示す。図6(a)に示した各公称せん断応力(点A~C)までパンチプレスした後は加工を中断し、断面1および2へ切断して得た写真である。点Aでは、上下層の繊維破断や樹脂割れによるき裂が観察された。点Bでは、上下層の繊維や樹脂がほぼ完全に切断されており、中間層はせん断変形していた。点Cでは、中間層のせん断変形がさらに大きく

なり、樹脂割れや繊維破断が発生していた。このとき、上層の0°/90°層間にはく離が発生していた。

以上の観察結果より、公称せん断応力が線形的に増加する領域では、上下層の繊維切断や樹脂割れによるき裂進展が進む。1度目の最大公称せん断応力を迎えた後は、上下層の繊維や樹脂切断が起こり、2度目の最大公称せん断応力を迎えたとき、中間層の繊維破断が起こるとともに樹脂割れが発生し、上層の層間にはく離が中間層のせん断変形に伴う曲げによって発生する。

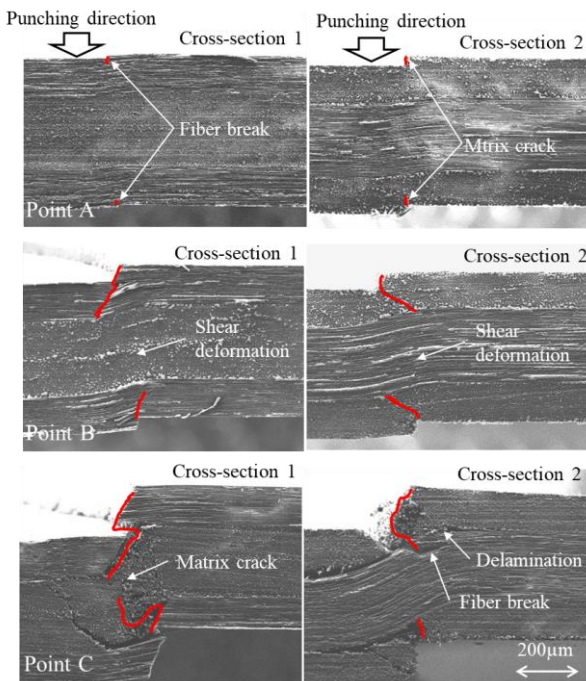


図7 +Cでのパンチ加工挙動

3・3・2 マイナスクリアランス

図8に-Cでの加工中の各断面写真を示す。図6(b)に示した各公称せん断応力(点A~C)までパンチプレスした後は加工を中断し、断面1および2へ切断して得た写真である。点Aでは、上下層の繊維破断や樹脂割れによるき裂が観察された。点Bでは、上下層の繊維や樹脂が完全に切断されていた。+Cの場合と比較して、中間層はクリアランス部において局部的にせん断変形しており、上層の0°/90°層間にはく離が発生していた。点Cでは、中間層の樹脂がほぼ切断され、繊維破断が発生するとともに大きくせん断変形していた。このとき、上層の0°/90°層間にはく離はさらに進展するとともに、下層の0°/90°層間にもはく離が発生していた。

以上の観察結果より、公称せん断応力が線形的に増加する領域では、+Cの場合と同様に、上下層の繊維切断や樹脂割れによるき裂進展が進む。1度目の最大公称せん断応力を迎えた後は、上下層の繊維や樹脂切断が起こるとともに上層の0°/90°層間にはく離が発生する。2度目の最大公称せん断応力を迎えたとき、中間層の繊維破

断が起こるとともに樹脂が切断するとともに、上層の層間にはく離が中間層のせん断変形に伴ってさらに進展する。

以上の結果より、マイナスクリアランスでの加工では、プラスクリアランスでの加工と比較して、高いせん断応力が発生するため、局所的な高いせん断応力によって加工面がより平滑になる。一方で、せん断応力は共役性のため、パンチプレス方向に対して垂直方向にもせん断応力が作用する。ゆえに1度目の最大公称せん断応力を迎えたとき、上層の0°/90°層間にはく離を発生させると考えられる。さらに局所的なせん断変形によって加工されるため、断面2の方向では、顕著に層間にはく離を招くと考えられる。

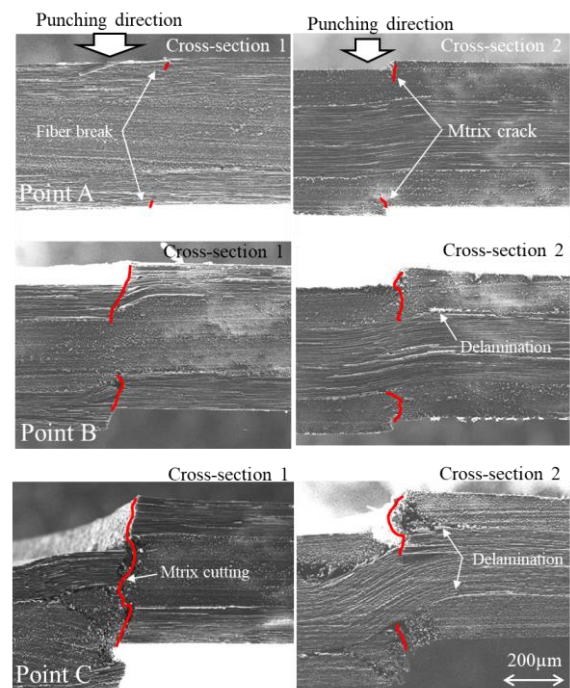


図8 -Cでのパンチ加工挙動

4. 結び

本研究では、直交CFRP積層板に対してプラスからマイナスまでクリアランスを可変してパンチ穿孔加工を実施した。その結果、マイナスクリアランスは、プラスクリアランスと比較して平滑な加工面が得られるとともに穿孔周りの損傷量を低減できることが明らかとなった。ただし、上層繊維方向と垂直な面では、層間にはく離が発生しやすいことが明らかとなった。これは、マイナスクリアランスによって起こる局所的なせん断変形に起因している。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天田財団平成29年度奨励研究助成A(若手研究者)(AF-2017039)の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 松田伸也・黄木景二・矢代茂樹：炭素繊維および繊維複合材料における分析試験, 評価解析に関する最新事例集, (2019) 450-462, 技術情報協会
- 2) 広田健治:負のクリアランスによる精密せん断加工, 塑性と加工, Vol.55, No.638 (2014), 185-189
- 3) Y. Suzuki・T. Shiratori・M. Yang・M. Murakawa : Elucidation of shearing mechanism of finish-type FB and extrusion-type FB for thin foil of JIS SUS304 by numerical and EBSD analyses, Materials, Vol.12, (2019), Article number 2143
- 4) W.F. Fan・F. Li : Study on Blanking Force of Fine-Blanking with Negative Clearance and Common Blanking for AISI-1045 through Simulation and Experiment Methods, Materials Science Forum, Volumes 704-705 (2012), 1175-1179
- 5) 松田伸也・黄木景二・矢代茂樹：熱硬化性 CFRP 積層板のパンチプレス加工による穿孔の特徴と加工品質, 日本複合材料学会誌, Vol.42, No.1 (2016), 13-22