

修士論文

超音波振動打ち抜き加工が CFRP 板の 機械的性質に及ぼす影響

指導教員 中西 栄徳 准教授

令和 2 年度

三重大学 大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

山本 和哉

目次

1 緒言	1
2 CFRP の加工法	2
2.1 炭素繊維	2
2.2 母材となる樹脂	4
2.3 CFRP の切削加工	6
2.4 超音波振動打ち抜き加工	8
3 CFRP 板の超音波振動打ち抜き加工実験	13
3.1 実験目的と条件	13
3.2 CFRTP 板の実験結果と考察	14
3.3 CFRTS 板の実験結果と考察	18
4 CFRP の接合	21
4.1 CFRP の機械的接合	21
4.2 機械的接合部の破壊モード	22
5 加工穴にピン負荷をかける引張試験	23
5.1 実験目的	23
5.2 試験片寸法	23
5.3 試験方法	25
5.4 CFRTP 板引張試験の実験結果と考察	27
5.4.1 荷重-ストローク線図と破壊過程	27
5.4.2 加工穴の強度	30
5.5 CFRTS 板引張試験の実験結果と考察	33
5.5.1 荷重-ストローク線図と破壊過程	33
5.5.2 加工穴の強度	36
6 結言	38
参考文献	39
謝辞	40

1 緒言

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics :炭素繊維強化プラスチック)は炭素繊維を強化素材として用いたプラスチック複合材料であり、軽量で比強度が高いという特徴がある。金属の代替材料として注目を集めており、低燃費化、軽量化を目的として航空機を中心に利用が進んでいる。環境問題に高い意識を持つ EU では 2021 年までに自動車の CO₂ 排出量を 1km 走行当たり平均 95g 以下に抑えることを目標にしており、規制値を超えた場合は各自動車メーカーにペナルティーがある。そのため、近年では自動車のボディに採用しようとする研究開発が活発に進められている¹⁾。

CFRP を用いて構造体を構築する場合、ボルト接合などの機械的接合が多用されており、穴あけ加工が必要になる。現在、CFRP の穴あけ加工法としてドリル加工が最も一般的であるが、層間剥離や切屑の粉塵化、工具摩耗といった問題がある。また、近年では AWJ(アブレイシブ・ウォータージェット)も普及してきているが、水に濡れるために乾燥工程が必要であること、装置の構造上、部品形状に制約があるという問題がある。他にはレーザー加工があるが、加工面への熱影響を減らすための加工時間増加が問題となる²⁾。

本研究室では、これらの問題を解決する加工法として内側に切れ刃を備えた円筒形状工具を超音波振動させることで打ち抜きを行う加工法を開発した³⁾。炭素繊維に対しては高速で振動させた鋭利な刃によって切断が可能である。樹脂に対しては超音波振動による摩擦熱で局所的かつ急速に軟化させることができる。また、加工時に粉塵は発生せず、切屑は一つの塊として排出される。

本研究ではこの加工法を用いて、超音波振動子の出力の強さと工具の送り速度の 2 種類のパラメータを変化させて加工実験をし、断面を観察することによって適切な加工条件の検討を行った。さらに、加工穴にピン負荷をかける引張試験を行い、打ち抜き加工が CFRP 板の機械的性質に及ぼす影響をドリルでの加工穴と比較することにより調査した。

2 CFRP の加工法

2.1 炭素繊維

CFRP の強化材料である炭素繊維は 19 世紀末にエジソンが、木綿や竹の繊維を炭素化して白熱電灯用のフィラメントに用いたことが始まりとされている。その後の 20 世紀半ばアメリカで軍事、宇宙開発のため、本格的な研究開発が始まっている。

炭素繊維は鉄と比較して比重 1/4，比強度 10 倍で軽くて強いという特性がある。また，ほぼ炭素繊維からできているため，熱伝導率が高い，電気伝導性，耐熱性が高いといった特性も有している⁴⁾。ただ，炭素繊維一本の直径は 5~15 μm と細く，せん断には弱いため，超音波カッターで切断可能である。超音波カッター(本多電子株式会社製 USW-335Ti)で切断した炭素繊維の走査型電子顕微鏡(SEM)の画像を図 2.1 に示す。超音波カッターは定格出力 30W，発信周波数 22kHz で，炭素繊維は 3000 本で 1 束の引張強度 3.53GPa の PAN 系炭素繊維であり，綺麗に切断されていることが分かる。また，切断荷重は 5kN であり，容易に切断できている。

本研究の加工法ではこのことを利用して，鋭利な刃を有する円筒形状工具を超音波振動させることにより炭素繊維を切断できると考える(図 2.2)。

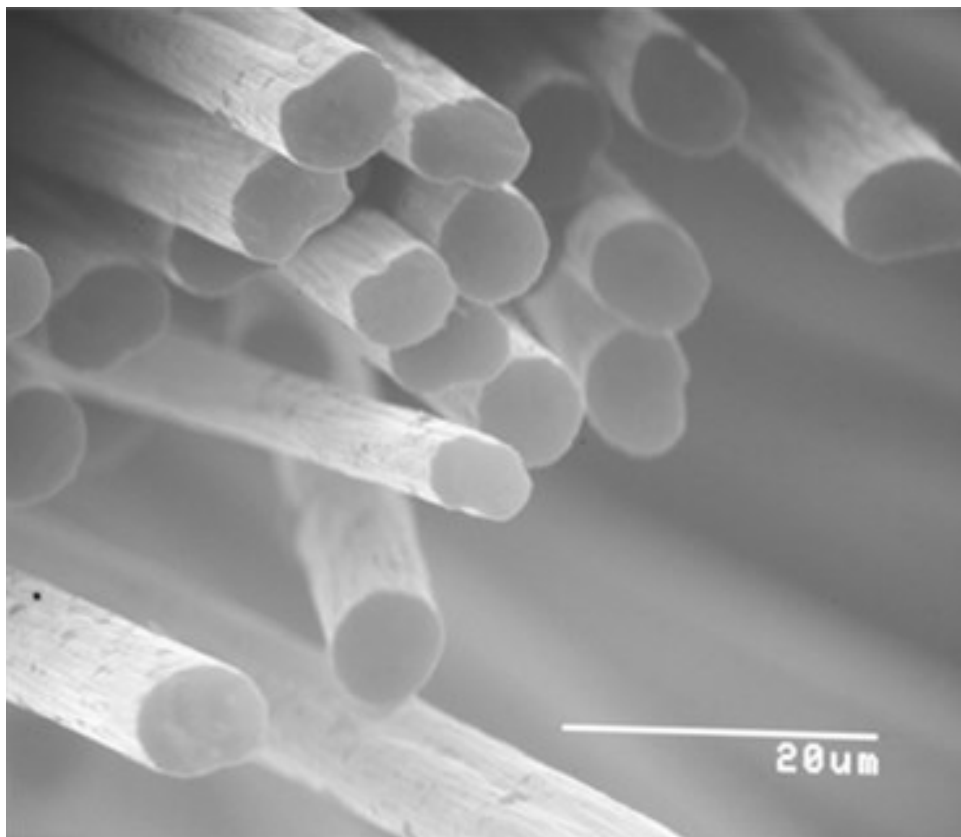


Fig.2.1 SEM image of machined surface with ultrasonic cutting in a carbon fiber

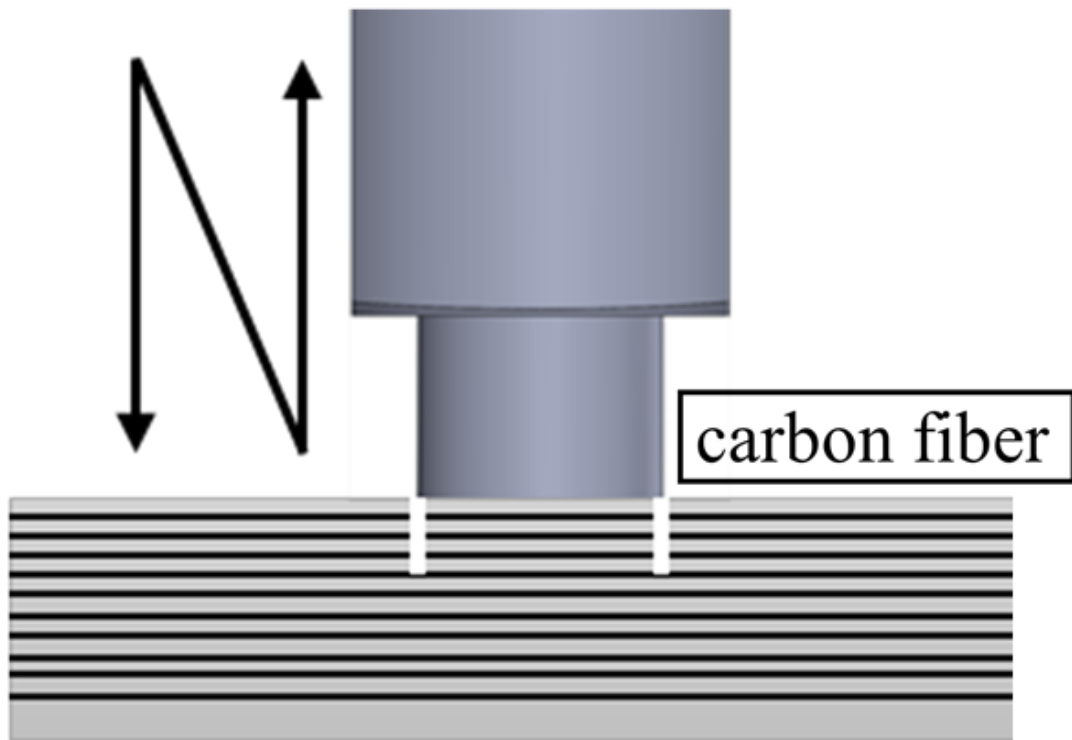


Fig. 2.2 Cutting by sharp blade

2.2 母材となる樹脂

CFRPには母材として熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂が用いられる。熱可塑性樹脂を母材とするCFRPはCFRTP(Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic :炭素繊維強化熱可塑性プラスチック)と呼ばれ、成形時間が短いこと、リサイクルが可能といった特徴がある。母材には主にポリカーボネート(PC)樹脂が用いられ、耐熱温度は120℃～130℃であり、この温度を超えると軟化する。その後、温度が低下すると硬化する。

熱硬化性樹脂を母材とするCFRPはCFRTS(Carbon Fiber Reinforced Thermosets :炭素繊維強化熱硬化性プラスチック)と呼ばれ、CFRTPと比べて機械的強度に優れ、耐熱温度も高い。母材には主にエポキシ(EP)樹脂が用いられ、耐熱温度は180～200℃であり、この温度に達すると脆性化し劣化破壊される⁵⁾。

本研究の加工法ではこの耐熱温度(表 2.1)に着目し、工具を超音波振動させることによって発生する摩擦熱により樹脂を局所的かつ急速に軟化または劣化させる。熱を与えながら加工を進めることにより容易に穴あけができると考える(図 2.3)。

Table. 2.1 Heat resistant temperature of resin

	Heat resistant temperature
PC	120～130[°C]
EP	180～200[°C]

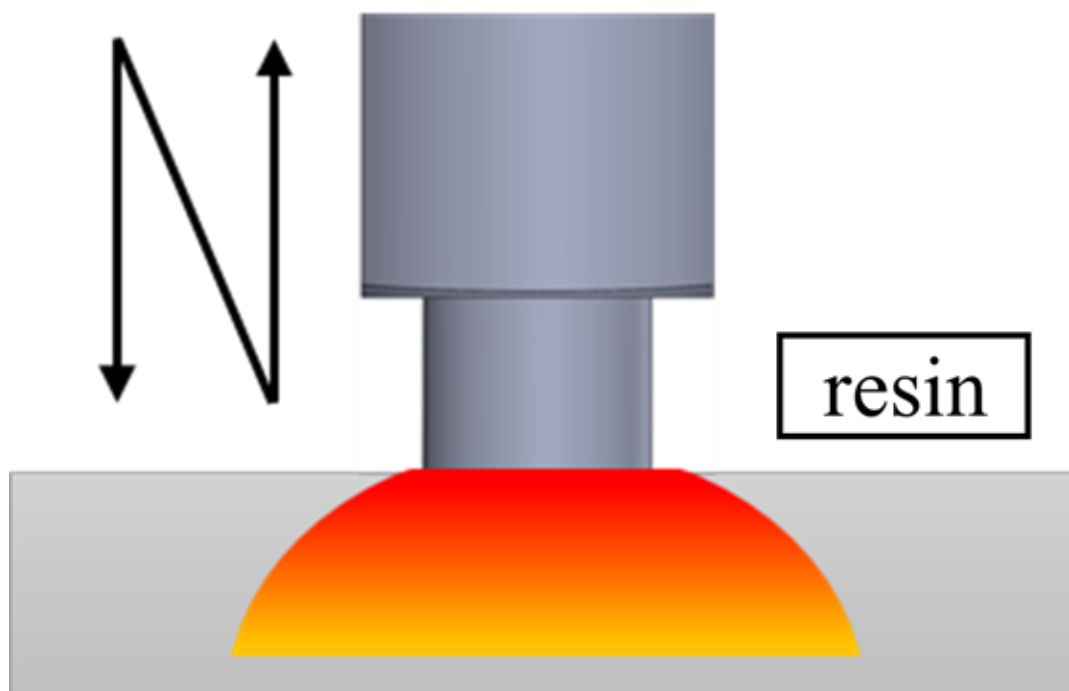


Fig. 2.3 Soften by frictional heat

2.3 CFRP の切削加工

CFRP を構成している炭素繊維と樹脂は機械的性質が著しく異なる材料であることから、CFRP 積層体は炭素繊維の方向に依存する異方性と異質性を内在する難削材である。CFRP の切削加工に発生する品質上の不具合は、炭素繊維の方向と切れ刃の作用方向に起因するものであり、層間剥離(デラミネーション)といわれる積層された炭素繊維が穴の入口、出口やトリミング時の端面で剥離する現象である。また、CFRP の切削加工中に出る炭素繊維の粉末は研磨材のような作用をして工具摩耗を発生させる。さらに、粉塵爆発を誘発する危険性や作業人や生産設備に悪影響を及ぼす⁵⁾。

CFRP の穴あけ加工として一般的なものはドリル加工である。しかし、ドリルの先端角が大きく材料加工面に対して垂直な方向に切削力がかかるため、入口と出口に層間剥離やアンカット(未切断の繊維)が起きやすい⁶⁾。ドリル加工を行った CFRTP 板(母材 PC 樹脂)の表面の写真を図 2.4、断面の走査型電子顕微鏡 SEM(株式会社日立ハイテクノロジーズ製 S-4300)画像を図 2.5 に示す。層間剥離やアンカットが発生していることが分かる。

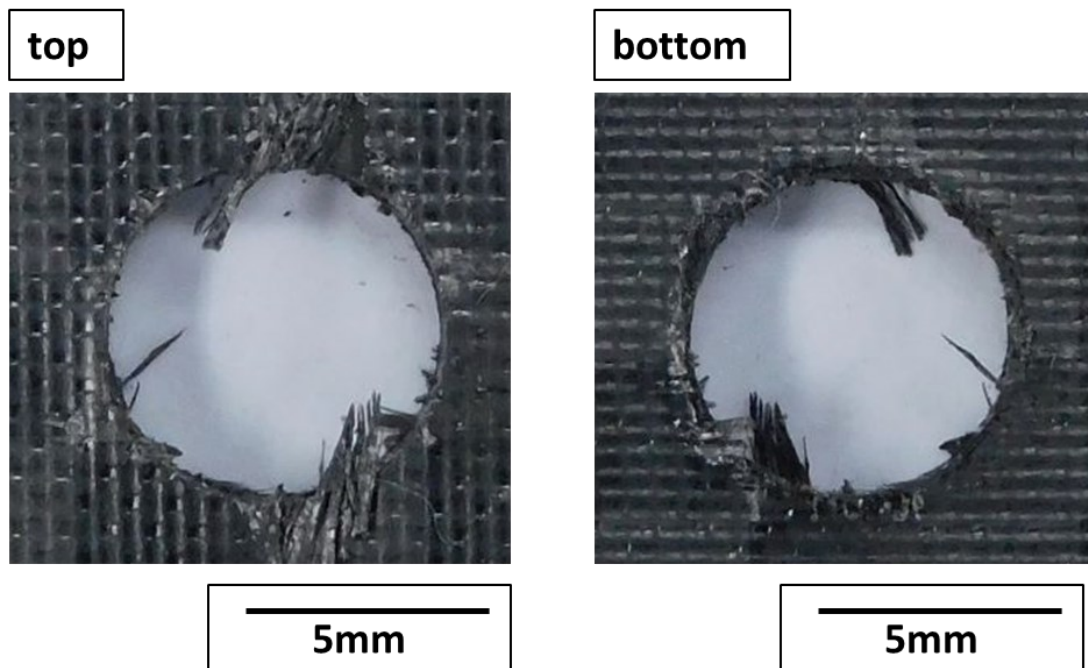


Fig. 2.4 Drilling hole surface

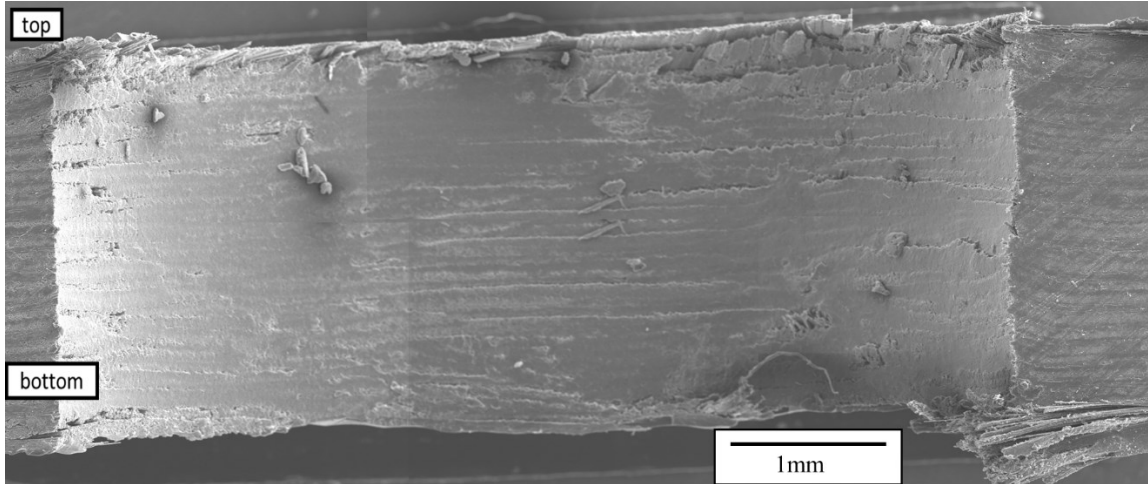


Fig. 2.5 SEM image of drilling hole wall

2.4 超音波振動打ち抜き加工

本研究で使用する加工法では中空の円筒内側に角度をつけることで鋭利な切れ刃を備えた状態になる工具を用いる。この鋭利な切れ刃は図 2.6 に示すように被削材と接触する角度が小さくなっており、垂直な方向に作用する切削力を低減させることができる。これによって層間剝離が発生しにくくなる。さらに、ドリル加工では図 2.7 に示すように斜線部すべてを加工するため粉塵が発生するが、打ち抜き加工では工具の円周部のみを加工するため粉塵は発生しない。切屑は一つの塊として排出されるのみである。

超音波振動打ち抜き加工の装置の外観を図 2.8 に示す。被削材となる CFRP 板はテーブル上に当て板と共に固定されている。当て板には、工具は欠けないが加工力が逃げない程度の硬さを考慮してテフロンプレートを使用した。図 2.9 に示す円筒形状工具は SK95 製で外径 6.5mm、内径 5.5mm、刃付け角 15° である。この工具を取り付ける超音波振動子(株式会社ソノテック製 SF-3110)は出力 500W、発信周波数 20kHz である。電動シリンダ(オリエンタルモーター株式会社製 EAC6-05-ARMAD-3)によってロードセル(株式会社共和電業製 LMA-A-500N)を介して下からテーブルを一定速度で円筒形状工具に押し当てることで加工を行う。被削材を完全に切り終わるようにシリンダを工具が当て板の約 0.5mm まで食い込ませ停止させる。その後、シリンダを下降させて、テーブルも追従して下降する。

テーブルを下降させる際、超音波振動をかけながら工具を抜くのか、振動を停止させて抜くのかを検討する予備実験を行った。被削材は PC 樹脂のみの板であり、加工断面を SEM で図 2.10 のように観察した。超音波振動をかけたまま抜いた加工の SEM 画像を図 2.11 に、超音波振動を停止させて抜いた加工の SEM 図を図 2.12 に示す。超音波振動をかけたまま抜いた加工の場合、樹脂は過剰な熱により完全に熔融し、引き抜かれる工具に付着して入口側が盛り上がってしまった。加工断面は工具を停止させて抜いた場合の方が比較的なめらかであった。以上の結果から、加工入口と断面が荒れることを防ぐため、超音波振動を停止させて工具を抜くこととした。

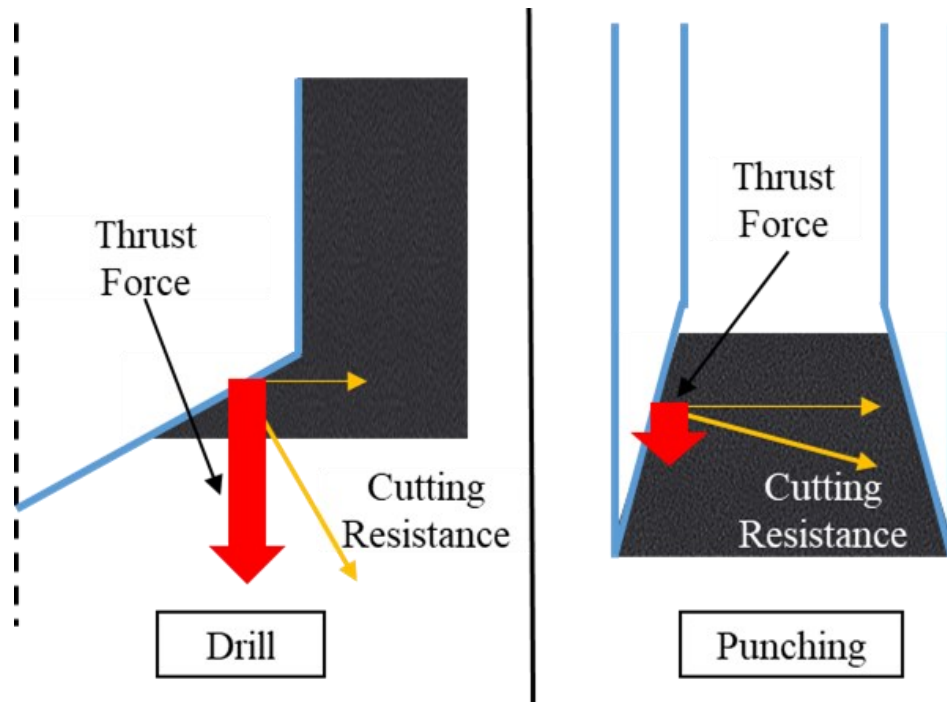


Fig. 2.6 Comparison of machining state of drill and machining state of punching

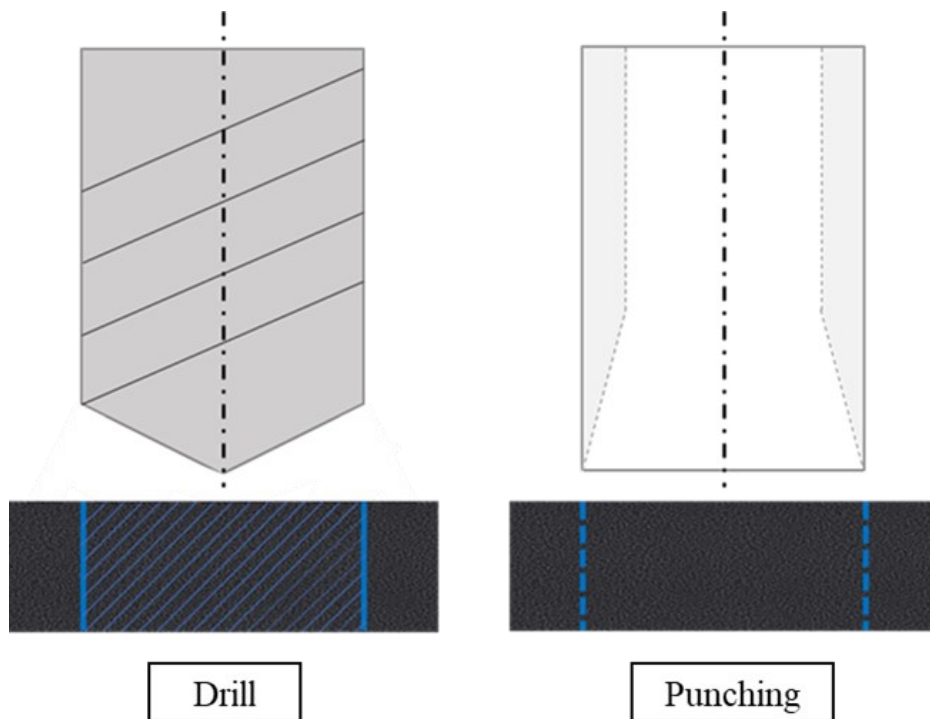


Fig. 2.7 Comparison of machined part of drill and machined part of punching

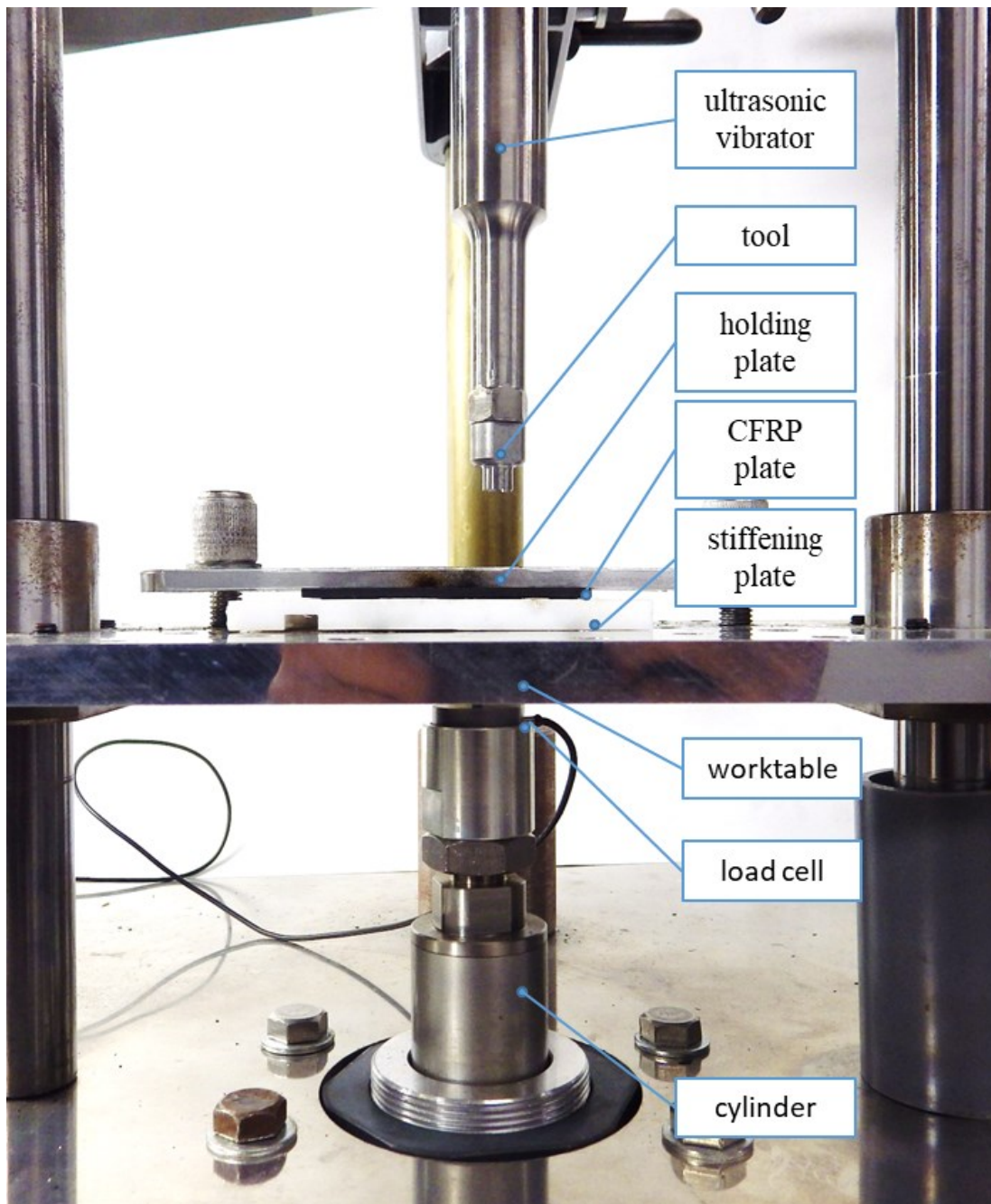


Fig. 2.8 Experimental apparatus

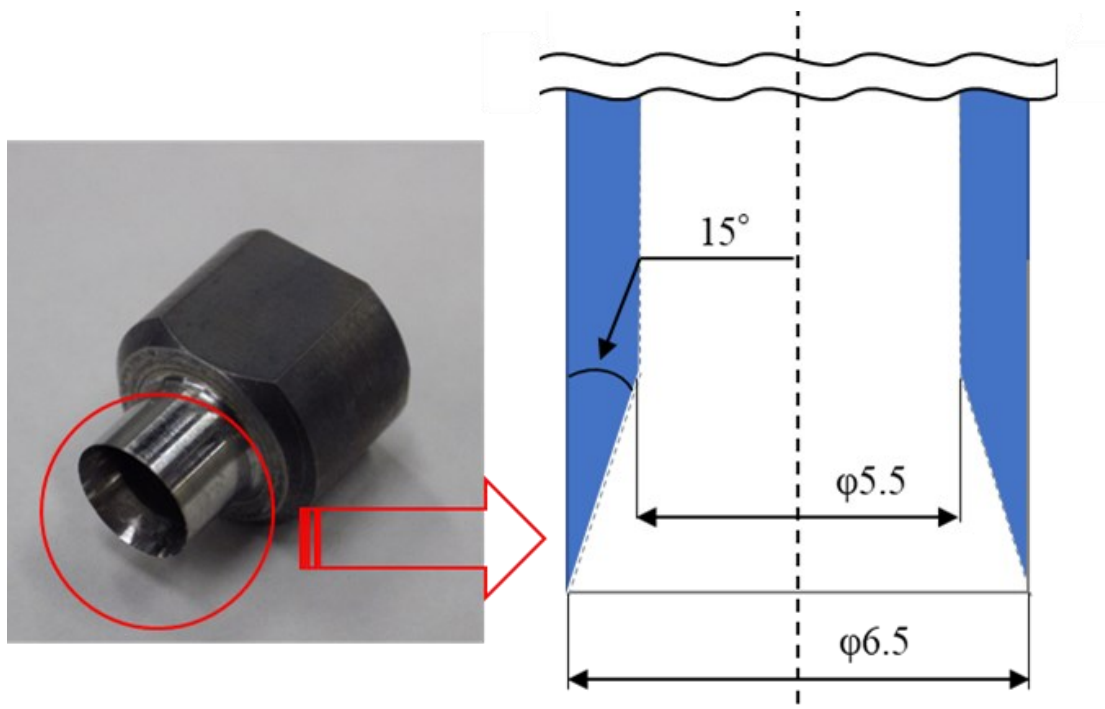


Fig. 2.9 Tool shape

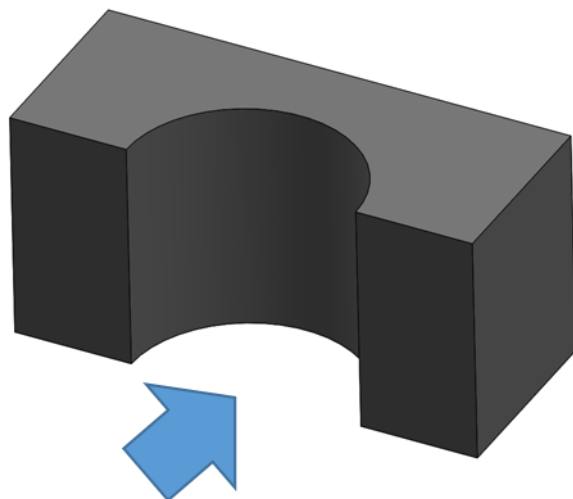


Fig. 2.10 Observation with SEM

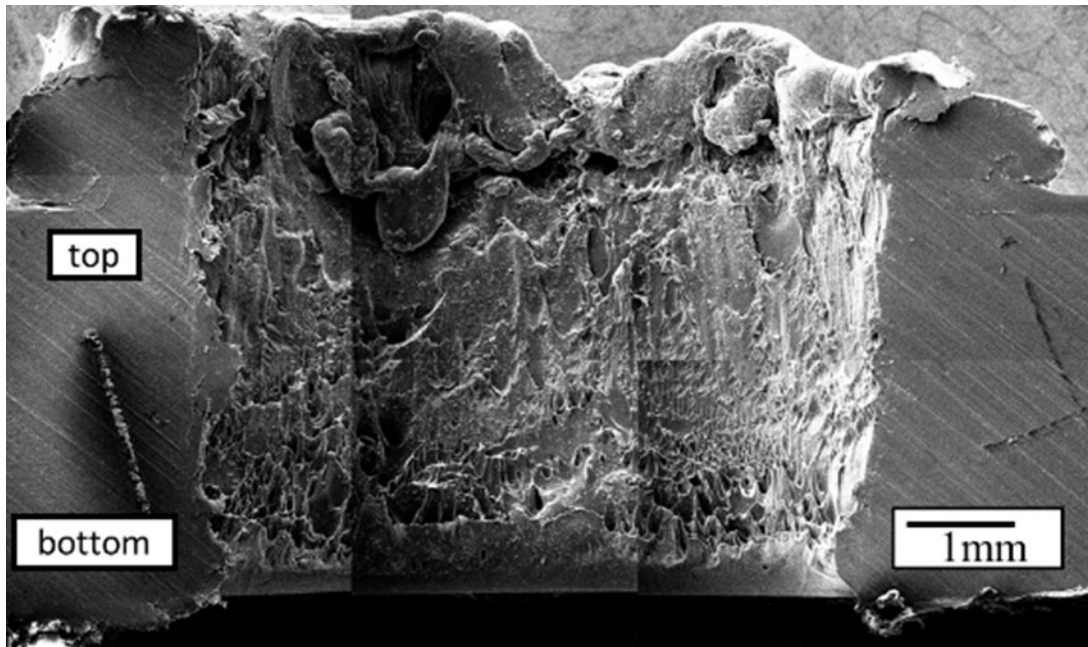


Fig. 2.11 SEM image of machined hole wall (vibration when removing the tool)

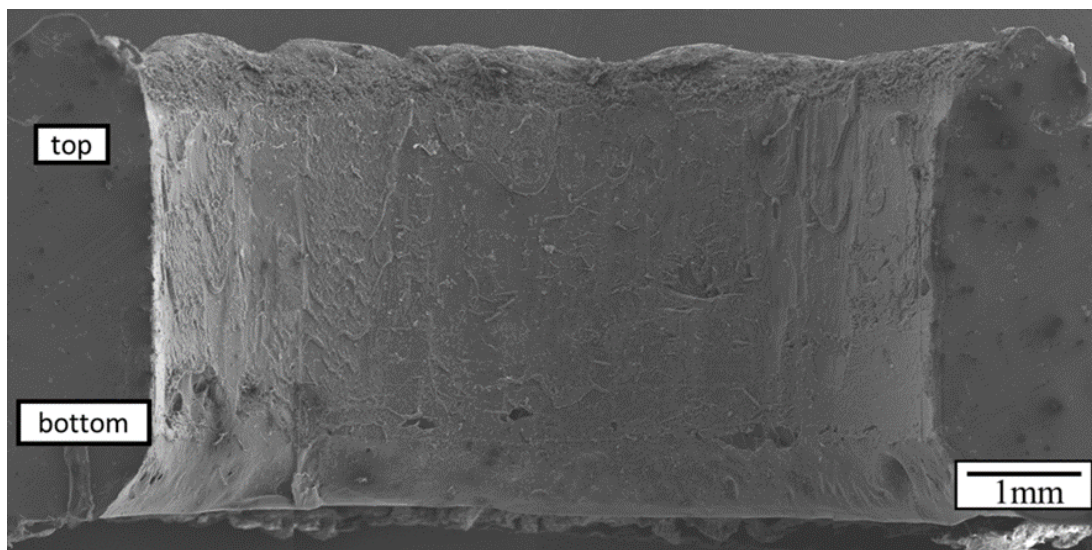


Fig. 2.12 SEM image of machined hole wall (no vibration when removing the tool)

3 CFRP 板の超音波振動打ち抜き加工実験

3.1 実験目的と条件

本研究では打ち抜き加工時の円筒形状工具に被削材を押し当てる速度を加工速度と呼ぶ。超音波振動出力と加工速度の 2 つのパラメータを設定し、これらを変更して加工実験を行う。加工後の壁面を SEM で観察することにより加工条件による加工品質の差異を調査し、適切な加工条件を検討した。

超音波振動出力は 150W, 200W, 300W, 400W, 500W の 5 段階, 加工速度は 0.50mm/s, 1.00mm/s, 1.50mm/s の 3 段階で計 15 パターンの条件で加工実験を行った。図 3.1 に被削材の試験片を示す。板厚 2mm の PC 樹脂を母材とする CFRTP 板と, 板厚 1.75mm の EP 樹脂を母材とする CFRTPS 板を用いた。

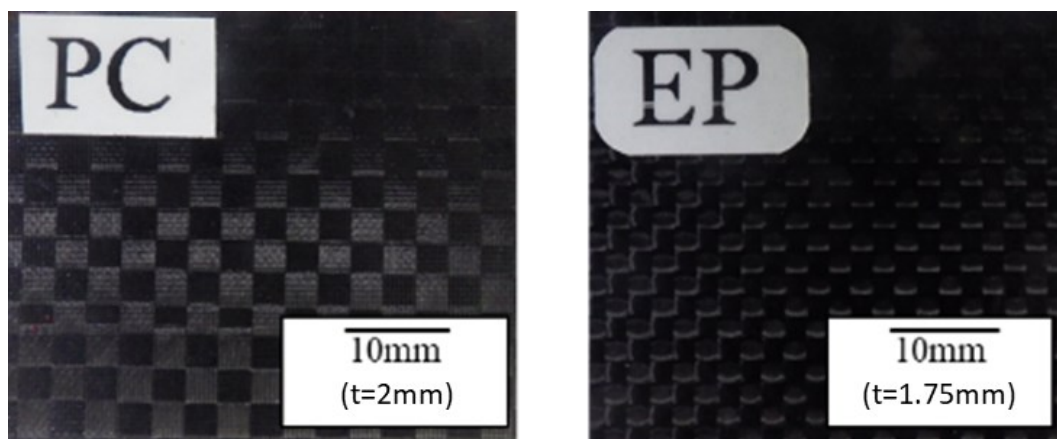


Fig. 3.1 Test pieces

3.2 CFRTP 板の実験結果と考察

母材 PC 樹脂の CFRTP 板を打ち抜き加工し SEM で観察を行った。超音波振動出力が 150W の場合の加工速度 0.50mm/s, 1.00mm/s, 1.50mm/s, 超音波振動の出力が 200W の場合の加工速度 1.50mm/s では加工に必要な熱が発生せず, 工具に過負荷がかかり加工不可であった。以下, 加工条件を[超音波振動の出力, 加工速度]と記す。加工断面が滑らかで品質が良好であった[200W, 1.00mm/s]の断面の SEM 画像を図 3.2 に示す。加工断面が荒れた[500W, 0.5mm/s]の断面の SEM 画像を図 3.3 に示す。[200W, 1.00mm/s]では, PC 樹脂の耐熱温度程度の熱が発生し, 樹脂を軟化させながら加工ができていることが分かる。そのため加工入口部の盛り上がりがなく, なめらかな加工断面が得られた。超音波振動の出力が 300W 以上になると過剰な熱が発生し図 3.3 で示したような荒れた断面となってしまう。これは PC 樹脂の耐熱温度, さらに融点を越えたため, 樹脂が熔融してしまい層に空間ができてしまったためである。このような欠損は接合部の応力集中によって破損が進行して破壊に至ってしまうため, この加工法における過剰な熱の発生は許容できないものになる。

図 3.4 と図 3.5 にそれぞれ[200W, 1.00mm/s], [500W, 0.5mm/s]で加工した際の加工入口と加工出口の表面を示す。どちらも炭素繊維がきれいに切断できているためバリやアンカットがなく穴あけができている。ただし, [200W, 1.00mm/s]に比べて[500W, 0.5mm/s]は加工出口面の白濁が目立っていた。このことから過剰な熱は断面だけでなく加工表面にも影響を及ぼしていることが分かる。図 3.6 に加工の際に発生した切屑を示したが, 1 つの塊として排出された。

以上の結果より, CFRTP 板の打ち抜き加工では, 適切な熱で樹脂を軟化させながら加工を進めることで品質の良い加工穴が得られる。本研究の装置での適切な条件は [200W,1.00mm/s]であった。

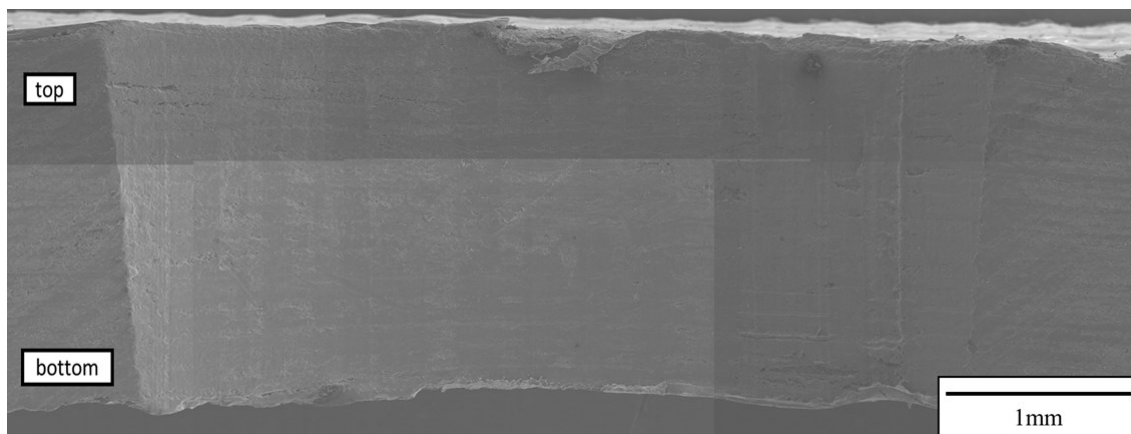


Fig. 3.2 SEM image of machined hole wall [200W,1.00mm/s]

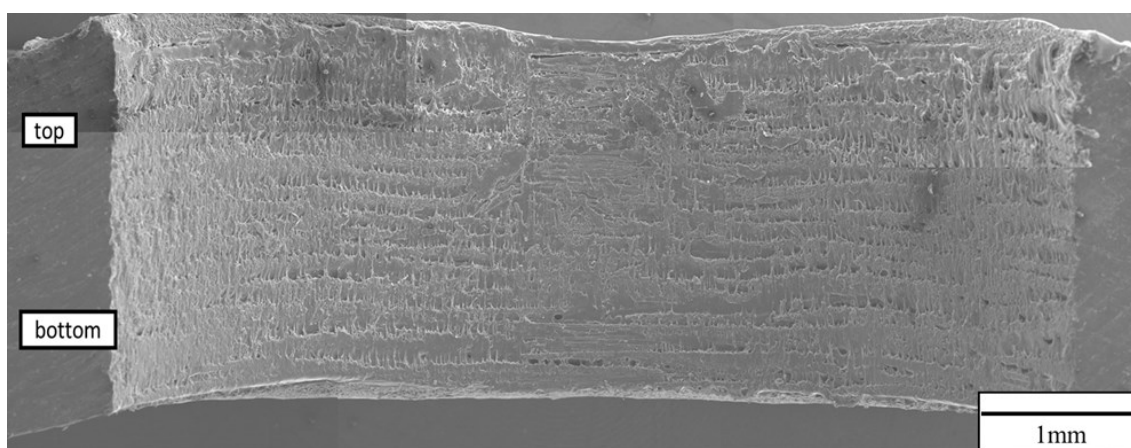


Fig. 3.3 SEM image of machined hole wall [500W,0.50mm/s]

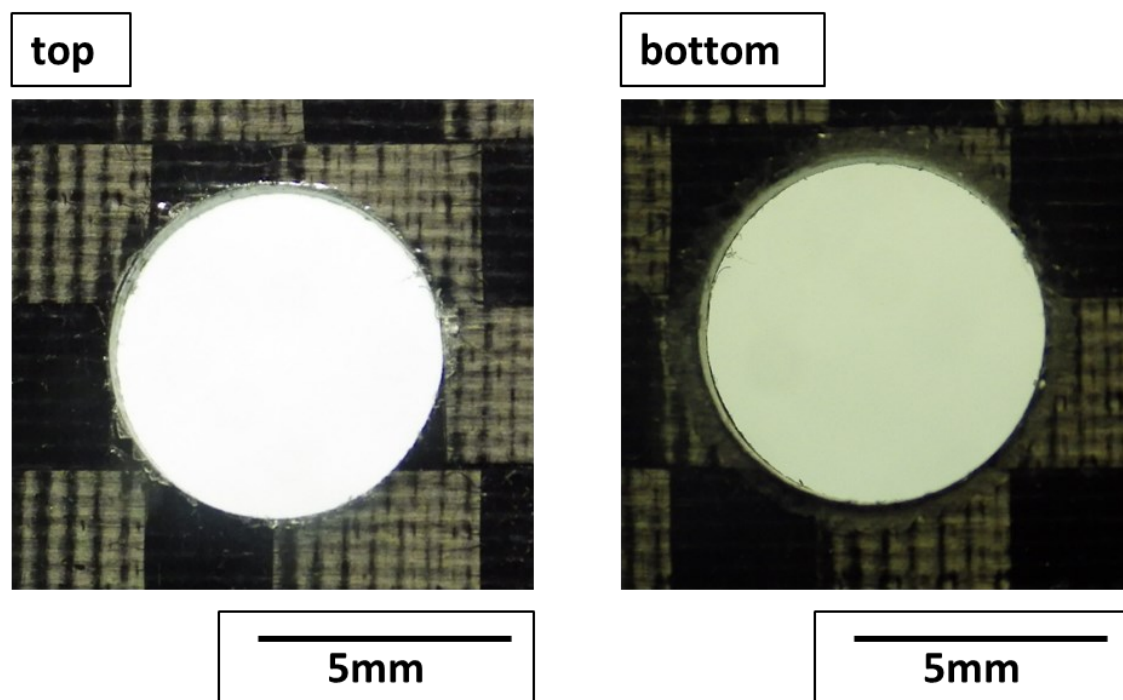


Fig. 3.4 Machined hole surface[200W,1.00mm/s]

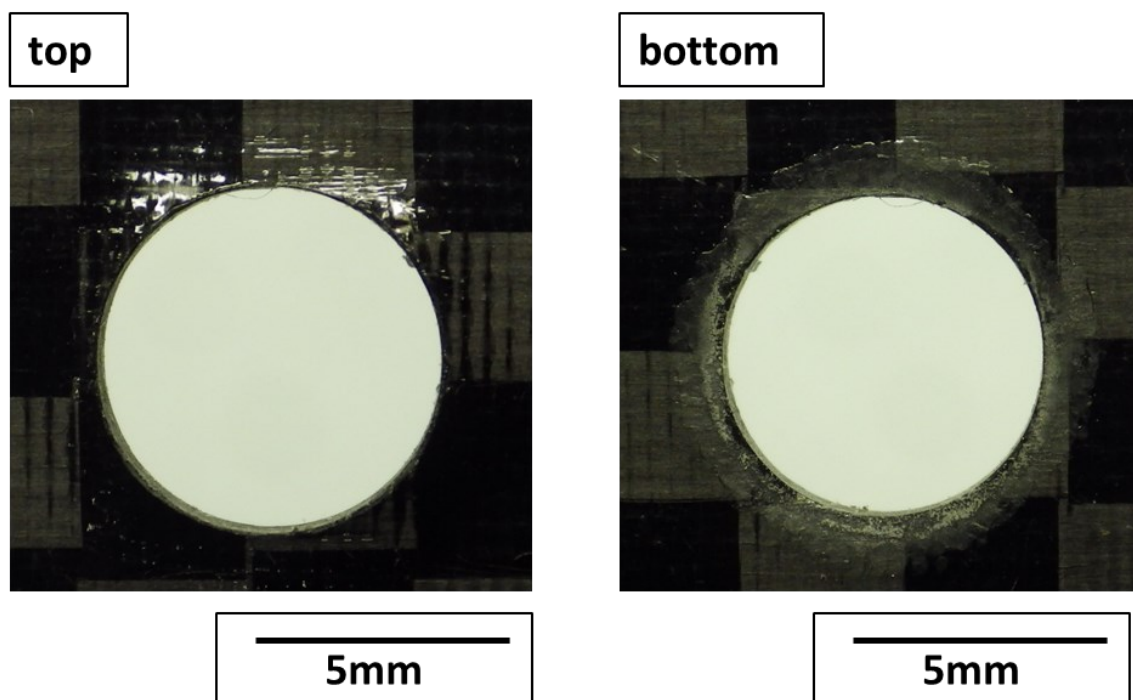


Fig. 3.5 Machined hole surface[500W,0.50mm/s]



Fig. 3.6 Machining waste (CFRTP plate)

3.3 CFRTS 板の実験結果と考察

CFRTP 板と同様に母材 EP 樹脂の CFRTS 板を打ち抜き加工し SEM で観察を行った。CFRTS 板は計 15 パターンの条件の内、[500W,0.5mm/s]の高出力、低速度のみ加工が可能であった。この時の加工断面の SEM 画像を図 3.7 に示す。CFRTP 板の加工断面と比較して、樹脂の溶着が見られず、なめらかな加工断面であった。これは EP 樹脂が熱硬化性樹脂で耐熱温度を超えると劣化するためである。そのほかの条件では EP 樹脂を劣化させるほどの熱が発生せず、樹脂の劣化が工具の押し込みに追いつかなかったため、超音波振動子に過負荷がかかり加工不可であった。

図 3.8 に[500W, 0.5mm/s]で加工した際の加工入口と加工出口の表面を示す。出口側の一部に焦げが見られるもののバリやアンカットがなく穴あけができています。また、図 3.9 に示すように CFRTP 板同様、切屑は一つの塊として排出された。

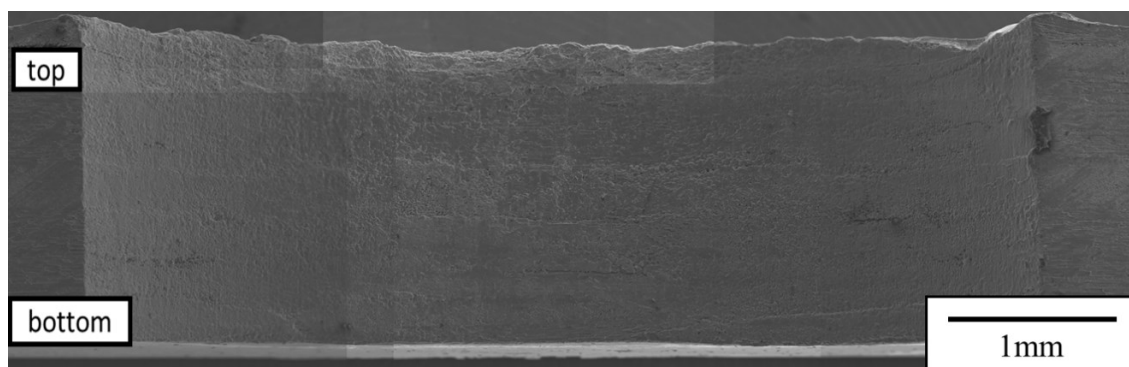


Fig. 3.7 SEM image of machined hole wall [500W,0.50mm/s]

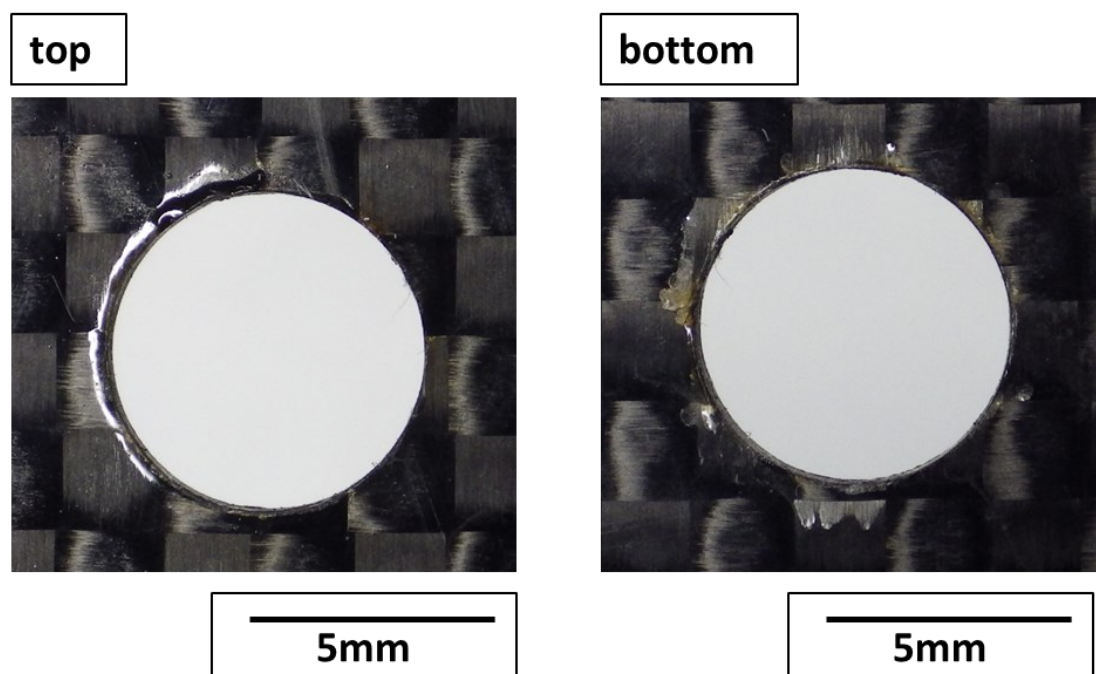


Fig. 3.8 Machined hole surface[500W,0.50mm/s]



Fig. 3.9 Machining waste (CFRTS plate)

4 CFRP の接合

4.1 CFRP の機械的接合

CFRP による構造体の構築には、一体成形を適用することが可能で金属材料を用いるときよりも工程が簡素化される。ただし、構造体全体を一体成形で作ることは難しい。例えば、航空機の製造では胴体や主翼、中央翼など、機体をいくつかの部品に分割して、それぞれを一体成形で製造する。その後、それぞれ製造された部品を機械的接合か接着接合により接合する。自動車の組み立てには溶接がよく用いられているが、CFRP の構造体には溶接を用いることができない。このように、CFRP には接合が必要であり、接合方法として接着剤を用いる接着接合と、ボルトなどを用いる機械的接合がある。

接着接合には、重量の増加が接着層の増加分だけで微量、接着のための機械加工が不要であり高強度が維持できるといった特徴がある。しかし、接着面の表面処理は必要、検査や修理が困難であるといった問題がある。

機械的接合は接着接合に比べて、接合強度のばらつきが少ない、引きはがしに対する抵抗力が大きい、検査や分解、組み立てが容易であるといった点で優れている。このことから CFRP の構造体には機械的接合が多用されている。ただし、穴をあけることによってそこに応力集中が起きること、繊維切断による強度低下があるといった問題点がある。また、複合材特有の破壊特性や異方性のため、既存の金属材料の機械的接合よりも設計に注意が必要である⁷⁾。機械的接合の強度は面圧強度 σ_b で評価され、次式(4.1)で算出される⁸⁾。

$$\sigma_b = P_{max}/Dt \quad (4.1)$$

ここで、 P_{max} は最大引張荷重、 D は穴直径、 t は板厚である。また、穴直径と板厚の積を穴投影面積という。面圧強度は最大引張荷重を穴投影面積で除した値ともいえる。

CFRP の面圧強度を評価するために、JIS K 7080¹⁹⁹¹ で標準試験方法が規定されている⁹⁾。この中で試験片表面を拘束せずに、最大荷重から面圧強度を評価する簡便な試験法(B)法も規定化されている。

4.2 機械的接合部の破壊モード

機械的接合において、荷重は接手を伝わり、一方の構造体からもう一方の構造体に伝わる。接合部周辺には応力集中が発生し、これが CFRP や接手の強度を超えると破壊が起きる。機械的接合部の破壊には主に 4 つの破壊モードがあり、これを図 4.1 に示す。せん断破壊(shear-out)は加工穴の両端からせん断により発生し、荷重方向に進展する。引張破壊(net-tension)は荷重方向と垂直な方向に破面が入り破壊する。面圧破壊(bearing)は継手との接触部が圧壊する。き裂引張破壊(cleavage)は荷重方向の端部から発生する引き裂き破壊である¹⁰⁾。

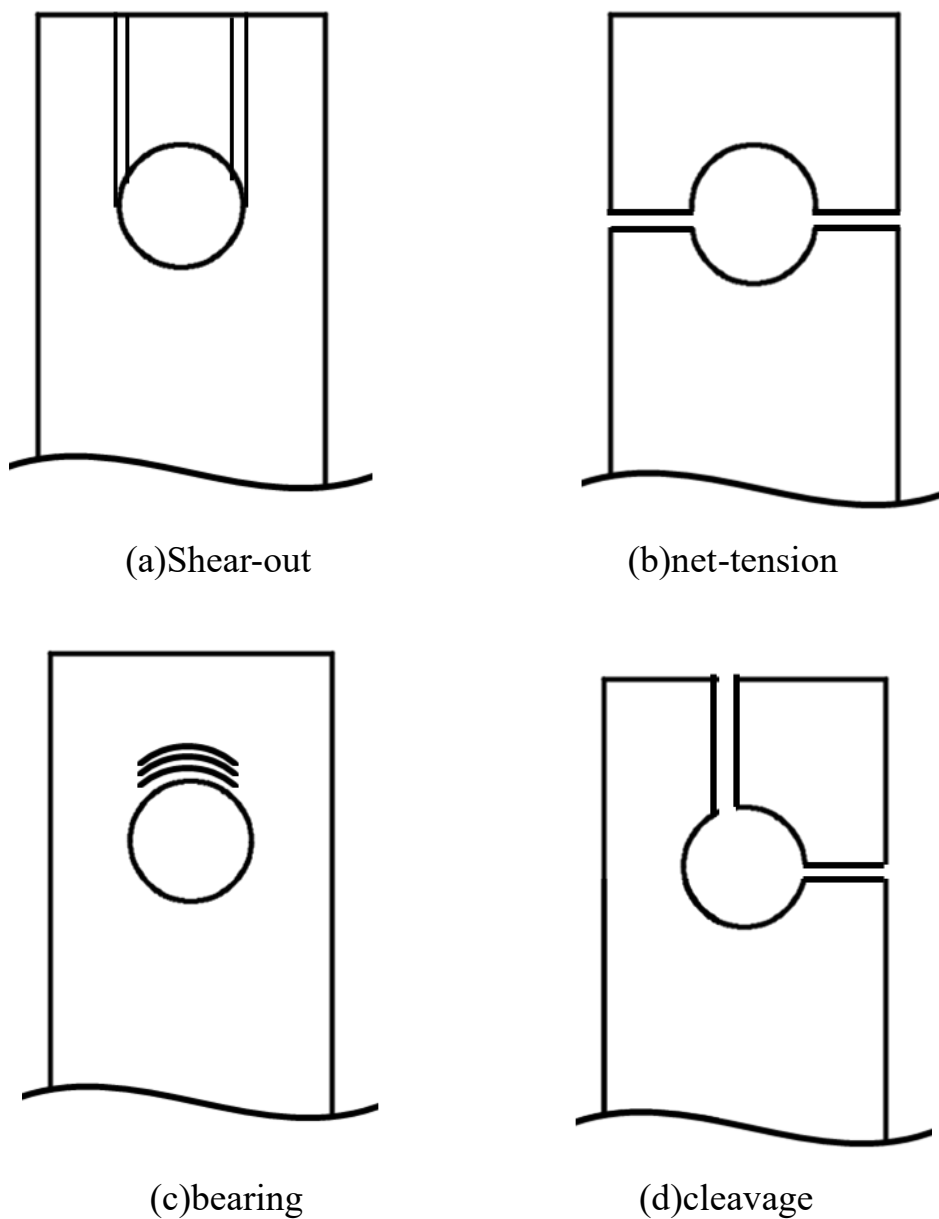


Fig. 4.1 Destruction mode of mechanical joining

5 加工穴にピン負荷をかける引張試験

5.1 実験目的

本研究で用いている超音波振動打ち抜き加工は従来にない加工法である。そのため、超音波振動と摩擦熱が CFRP 板の加工穴の機械的性質に及ぼす影響を検討する必要があると考えた。そこで加工穴に面外拘束のないピン負荷をかける引張試験を行うことにした。この引張試験を打ち抜き加工であけた加工穴とドリル加工であけた加工穴に対して行い、荷重とストローク変位を計測して比較する。これによって超音波振動が強度低下などの悪影響を及ぼさないかを調査した。

5.2 試験片寸法

CFRTP 板と CFRTS 板に対して引張試験を行った。CFRTP 板は母材が PC(ポリカーボネート)樹脂で板厚は 2.2mm, CFRTS 板は EP(エポキシ)樹脂で板厚は 1.75mm である。CFRTP 板, CFRTS 板ともに図 5.1 のような試験片を用いた。試験片寸法は、試験片全長 60mm, 試験片幅 15mm, 穴の直径 6.5mm, 穴中心から試験片端部までの距離 10mm, 二つの穴の中心間距離 40mm である。この寸法に CFRP 板を切り出し、打ち抜き加工法で穴をあけた試験片とドリルで穴をあけた試験片を準備した。CFRTP 板の打ち抜き加工は加工実験で適切な条件と結論付けた[200W,1.00mm/s]で加工を行った。また, CFRTS 板の打ち抜きの条件は[500W, 0.5mm/s]である。ドリル加工穴にはドリル径 6.5mm の難削材用のドリルを用いて加工した。

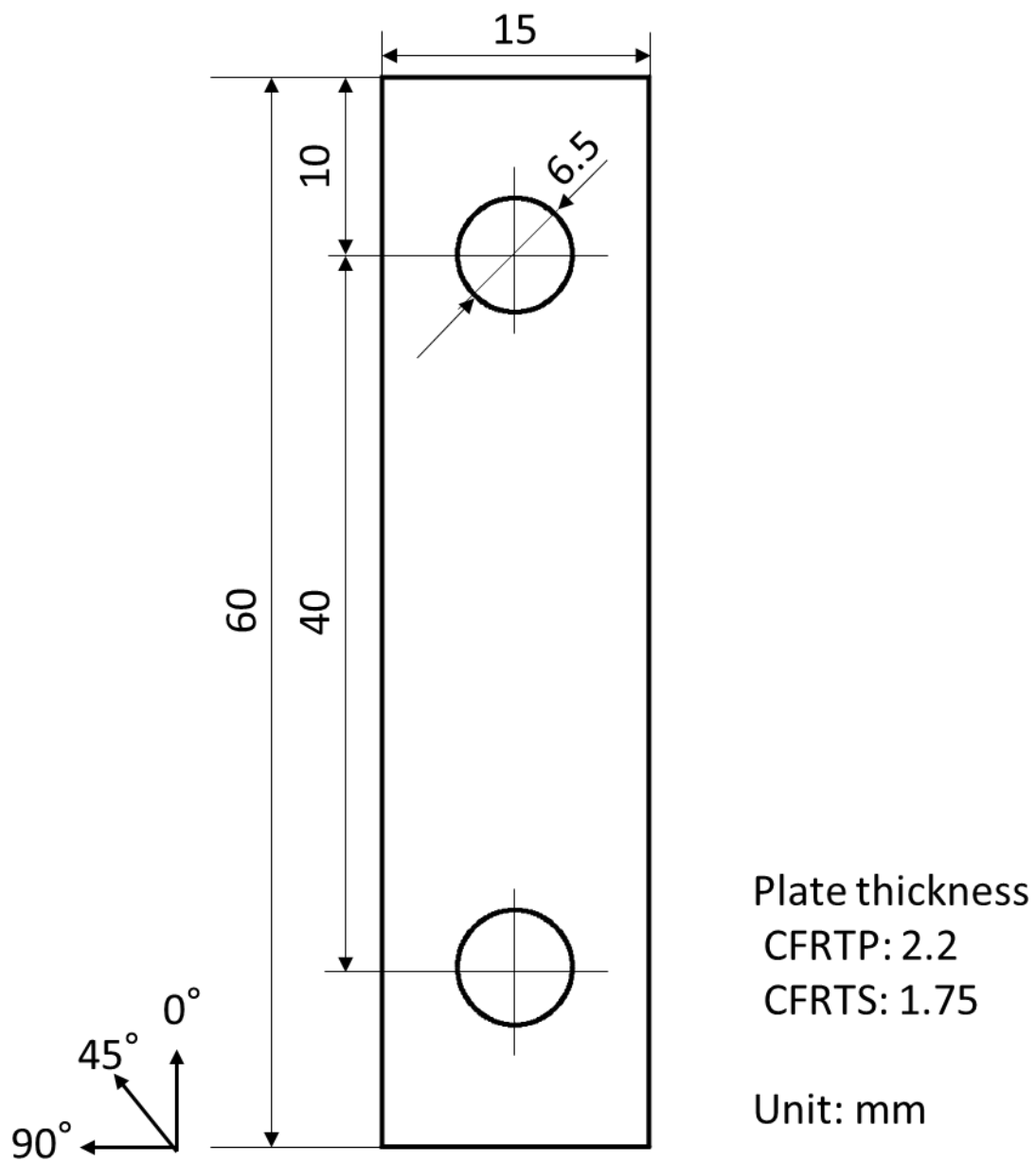


Fig. 5.1 Test piece shape

5.3 試験方法

図 5.2 の引張試験機(株式会社島津製作所 AG-10TC 複合式特型)に図 5.3 のように治具と試験片を取り付け, CFRP 板の加工穴に面外拘束のないピン負荷をかける引張試験を行った. 試験片上側の加工穴には直径 6mm の負荷用のピンを用い, 奥行き方向に試験片が滑るのを防ぐために締め付けない程度に板材のカバーを取り付けた. また, 試験片下側はボルトを用いて固定し, 試験片上側の加工穴のみに引張負荷がかかるようにした. クロスヘッドスピードは 1.00mm/min で, 室温環境で引張試験を行い, 試験片破壊までの引張荷重とストロークの変位を計測し, 破壊の進行過程を撮影した.



Fig. 5.2 Tensile tester

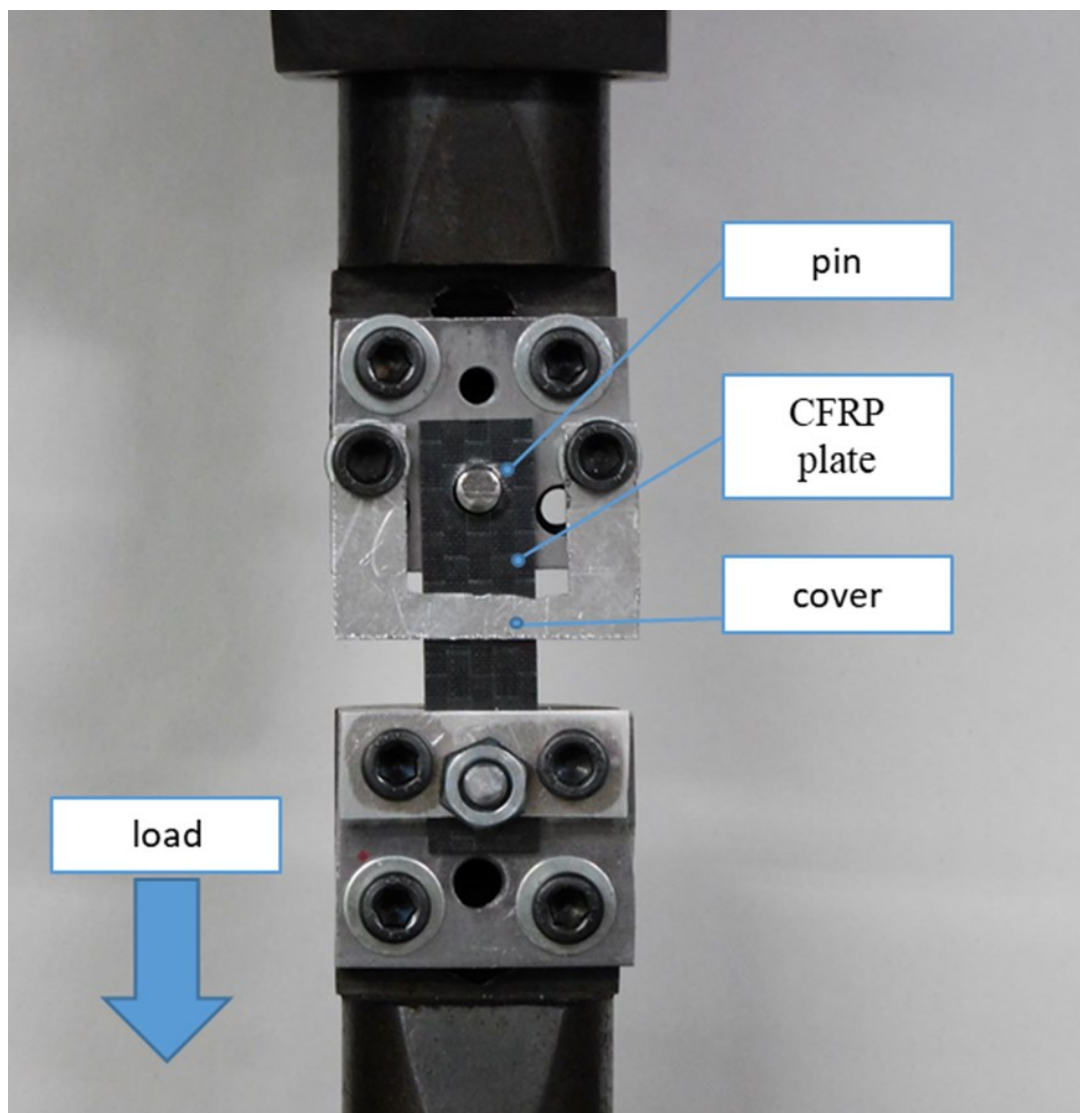


Fig. 5.3 Test piece fixing unit

5.4 CFRTP 板引張試験の実験結果と考察

5.4.1 荷重-ストローク線図と破壊過程

打ち抜き加工穴の試験片とドリル加工穴の試験片に対して引張試験をそれぞれ 2 回行った。打ち抜き加工穴の引張試験から得られた荷重-ストローク線図を図 5.4 に、ドリル加工穴の引張試験から得られた荷重-ストローク線図を図 5.5 に示す。打ち抜き加工穴の試験片の 1 回目を U_1 、2 回目を U_2 、ドリル加工穴の試験片の 1 回目を D_1 、2 回目を D_2 と呼ぶこととする。どちらの加工法でも荷重-ストローク線図は、まず、荷重は線形に近い形で増加し、ある値に達した後、荷重が低下した。そして、ほぼ一定の荷重を保った後に大きく低下している。このような荷重推移になったのは、母材に用いている PC 樹脂が鋼材に似た降伏現象を生じるという力学的特性が影響していると考えられる¹¹⁾。

U_1 の破壊の進行を図 5.6 に示す。図 5.6 の(a)はストローク 0mm で試験開始時の状態、(b)はストローク 2.75mm で最初の荷重のピーク時の状態、(c)はストローク 7.54mm で大幅な荷重の低下後の状態を示している(図 5.4 の(a), (b), (c)に対応)。(b)の時にピン上部に亀裂が入り、面圧破壊が起きている。このため、荷重が低下したと考えられる。(c)の時にはピキッという音が鳴り、完全に破断しており、層間剥離が起き、内部の層で引張破壊が起きていることが分かる。

U_1 と同様に D_1 の破壊の進行を図 5.7 に示す。図 5.7 の(a)はストローク 0mm で試験開始時の状態、(b)はストローク 2.79mm で最初の荷重のピーク後の状態、(c)はストローク 7.15mm で大幅な荷重の低下後の状態を示している(図 5.5 の(a), (b), (c)に対応)。(b)の時に面圧破壊、(c)の時には破断しており、層間剥離、内部の層の引張破壊を確認できる。

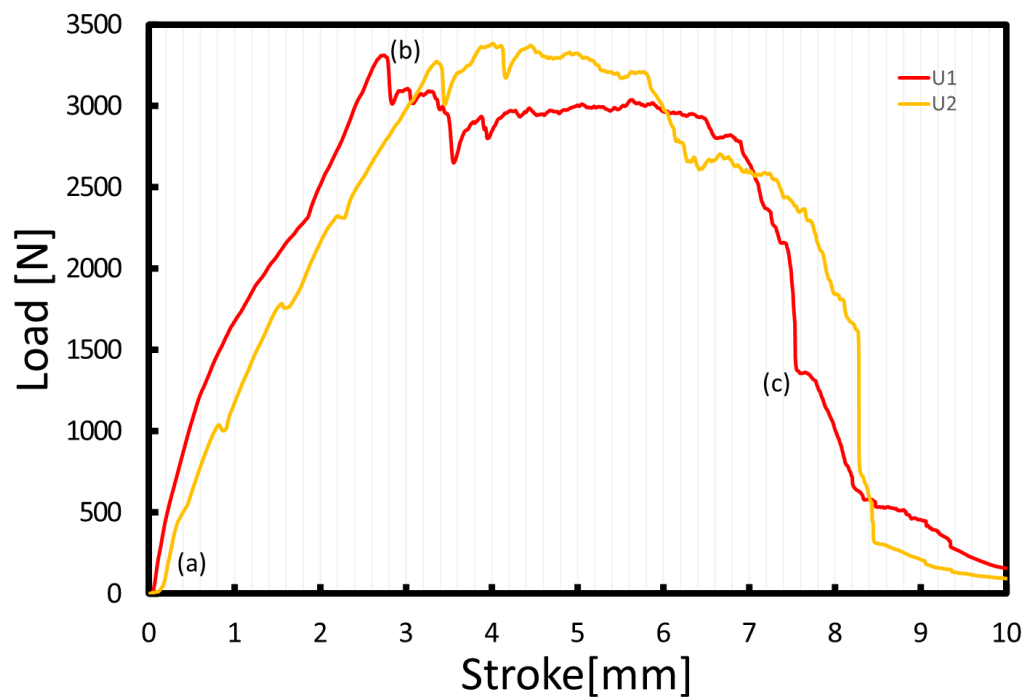


Fig. 5.4 Load-stroke diagram for U_1, U_2 (CFRTP)

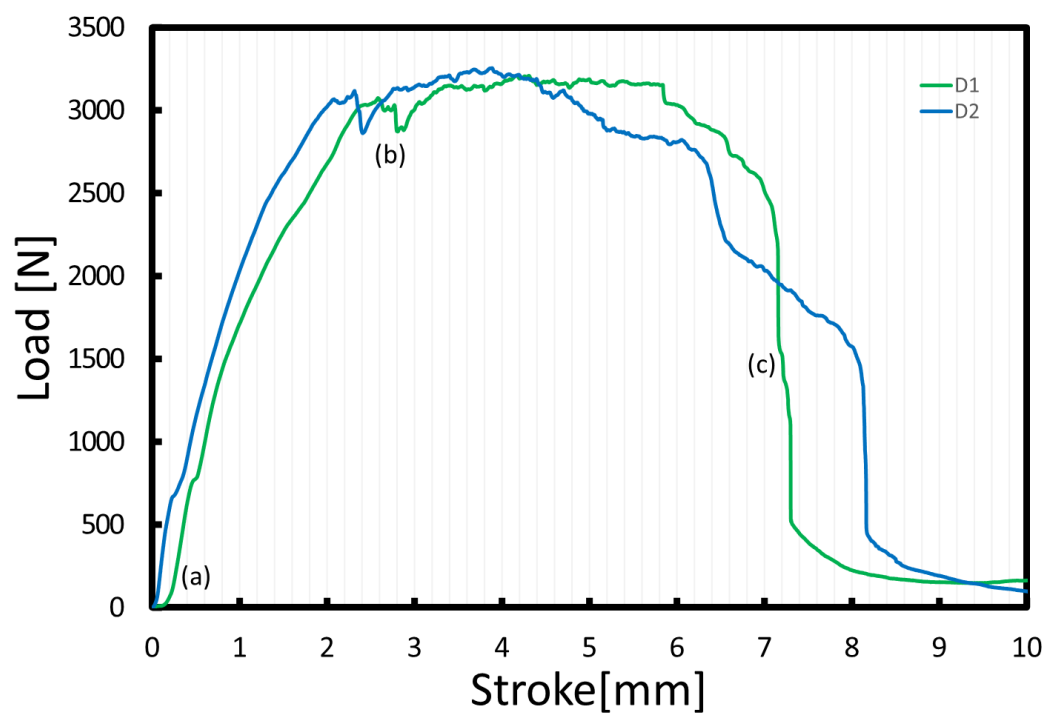


Fig. 5.5 Load-stroke diagram for D_1, D_2 (CFRTP)

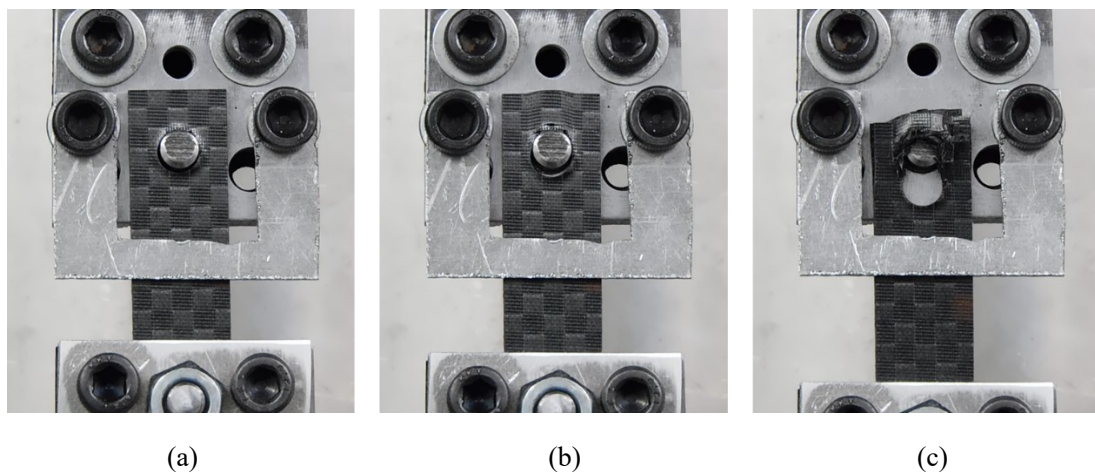


Fig. 5.6 U_1 destruction process(CFRTP)

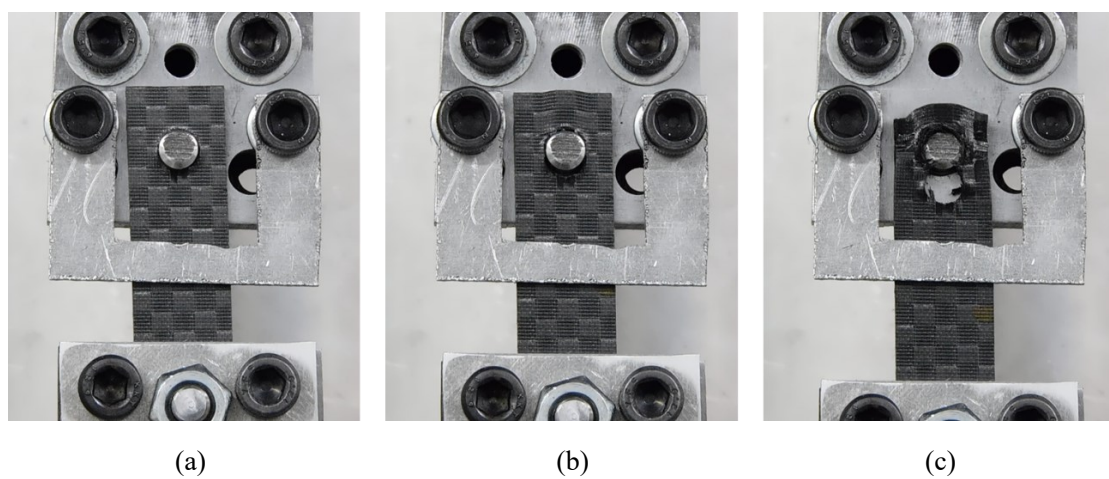


Fig. 5.7 D_1 destruction process(CFRTP)

5.4.2 加工穴の強度

加工穴の面圧強度を算出する場合、最大引張荷重を用いる。しかし、今回の引張試験で得られた荷重-ストローク線図で荷重が最初のピークに達するときに面圧破壊が起きていることが分かったため降伏点のように扱う。よって、ピーク時の荷重に対応した面圧強度も算出する。最初の荷重のピークに対応した面圧強度 σ_{yi} は式(5.1)で算出され、最大荷重に対応した面圧強度 σ_{max} は式(5.2)で算出される¹²⁾。

$$\sigma_{yi} = P_{yi}/Dt \quad (5.1)$$

$$\sigma_{max} = P_{max}/Dt \quad (5.2)$$

ここで、 P_{yi} は最初のピークに対応した荷重、 P_{max} は最大荷重、 D は穴直径で 6.5mm、 t は板厚で 2.2mm である。

図 5.8 に U_1 、 U_2 、 D_1 、 D_2 、すべての荷重-ストローク線図をまとめたものを示す。また、表 5.1 に U_1 、 U_2 、 D_1 、 D_2 のピーク荷重と最大荷重をまとめたものを示す。面圧強度を算出する際に用いる荷重はそれぞれ実験を 2 回行って得られた荷重の平均値とする。

まず、最初の荷重のピークに対応した面圧強度 σ_{yi} を算出する。打ち抜き加工穴の面圧強度 σ_{yi} は 230MPa、ドリル加工穴の面圧強度 σ_{yi} は 216MPa であった。打ち抜き加工穴の方が 6.3%高いという結果になった。

次に、最大荷重に対応した面圧強度 σ_{max} を算出する。打ち抜き加工穴の面圧強度 σ_{max} は 234MPa、ドリル加工穴の面圧強度 σ_{max} は 226MPa であった。打ち抜き加工穴の方が 3.6%高いという結果になった。

どちらの面圧強度で評価しても、わずかではあるが打ち抜き加工穴の方が、強度が高かった。ドリル加工穴の強度が低かった原因としてピーク荷重に達する前に内部で損傷が発生しているのではないかと考えた。これを確認するため引張試験を行った際に、ピーク荷重に達する前のストローク変位 1.00mm で試験を止め除荷した試験片をつくり、図 5.9 に示すように、この試験片の加工穴の上部を 0° 方向に切断し、断面を SEM で観察した。図 5.10 に打ち抜き加工穴の試験片とドリル加工穴の試験片の断面の SEM 画像を示す。ドリル加工穴の試験片の断面にはストローク 1.00mm 時点ですでに層間剥離が起きている。加工時の層間剥離によって強度が出ない層ができてしまい面圧強度が低下したと考えられる。ドリル加工の加工穴の粗さが面圧強度の低下につながっていることが分かった。

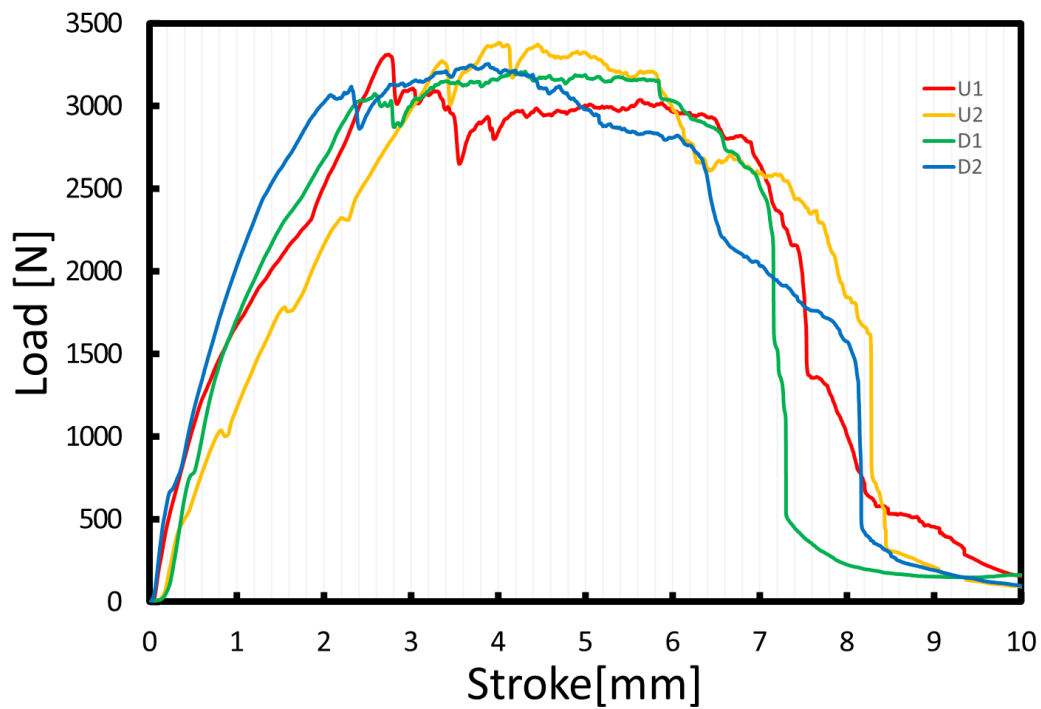


Fig. 5.8 Load-stroke diagram for U_1, U_2, D_1, D_2 (CFRTP)

Table. 5.1 Tensile load P_{yi}, P_{max} (CFRTP)

	P_{yi} [N]	P_{max} [N]
U_1	3311	3311
U_2	3272	3383
U average	3292	3347
D_1	3074	3208
D_2	3117	3254
D average	3096	3231

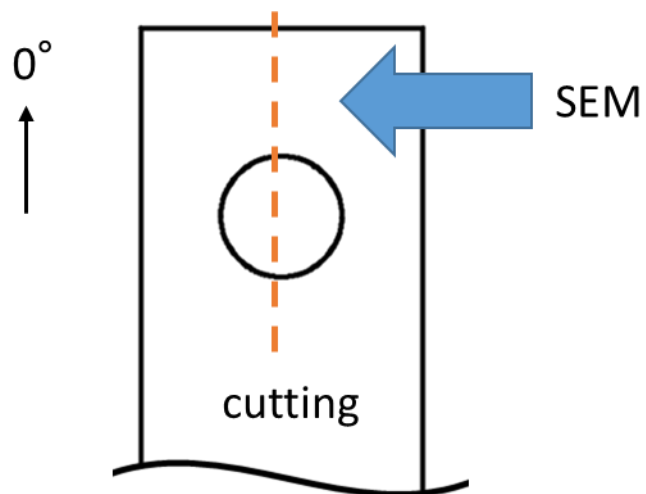
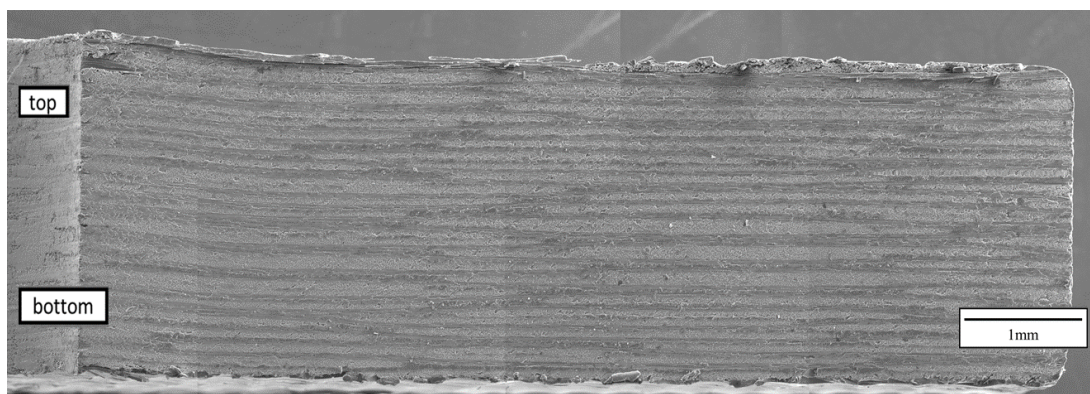
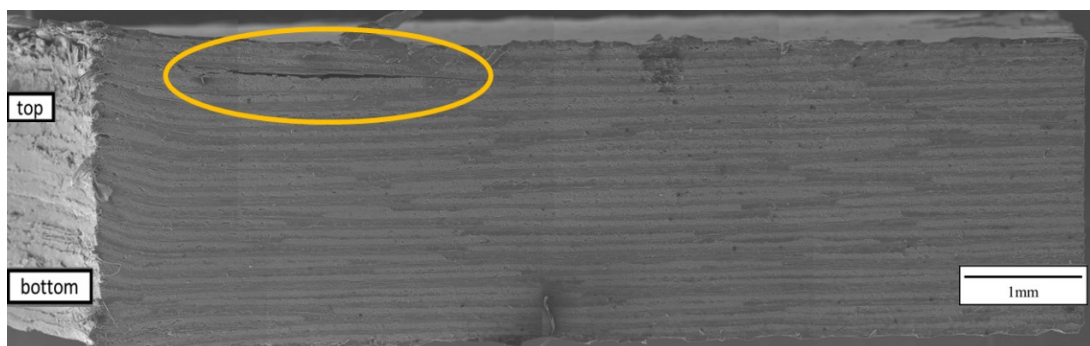


Fig. 5.9 Observation with SEM



Punching



Drilling

Fig. 5.10 SEM image of cutting wall(CFRTP)

5.5 CFRTS 板引張試験の実験結果と考察

5.5.1 荷重-ストローク線図と破壊過程

CFRTP 板と同様に引張試験をそれぞれ 2 回行った。打ち抜き加工穴の引張試験から得られた荷重-ストローク線図を図 5.11 に、ドリル加工穴の引張試験から得られた荷重-ストローク線図を図 5.12 に示す。CFRTP 板の実験同様、 U_1 、 U_2 、 D_1 、 D_2 と呼ぶ。どちらの加工法でも荷重-ストローク線図は、まず荷重は線形に近い形で増加し、ある値に達した後、少し伸び、その後、一気に低下した。CFRTP 板に比べると伸びが小さかった。このような荷重推移になったのは、母材に用いている EP 樹脂の特性が脆性的であるということが影響していると考えられる。

U_1 の破壊の進行を図 5.13 に示す。図 5.13 の(a)はストローク 0mm で試験開始時の状態、(b)はストローク 2.33mm で最大荷重時の状態、(c)はストローク 2.70mm で大幅な荷重の低下後の状態を示している(図 5.11 の(a), (b), (c)に対応)。(b)の時に加工穴両端から荷重方向にせん断破壊が起きている。(c)の時には内部の層で引張破壊が起き破断した。

U_1 と同様に D_1 の破壊の進行を図 5.14 に示す。図 5.14 の(a)はストローク 0mm で試験開始時の状態、(b)はストローク 1.69mm で最大荷重時の状態、(c)はストローク 2.00mm で大幅な荷重の低下後の状態を示している(図 5.12 の(a), (b), (c)に対応)。(b)の時にせん断破壊、(c)の時には破断しており、内部の層の引張破壊を確認できる。

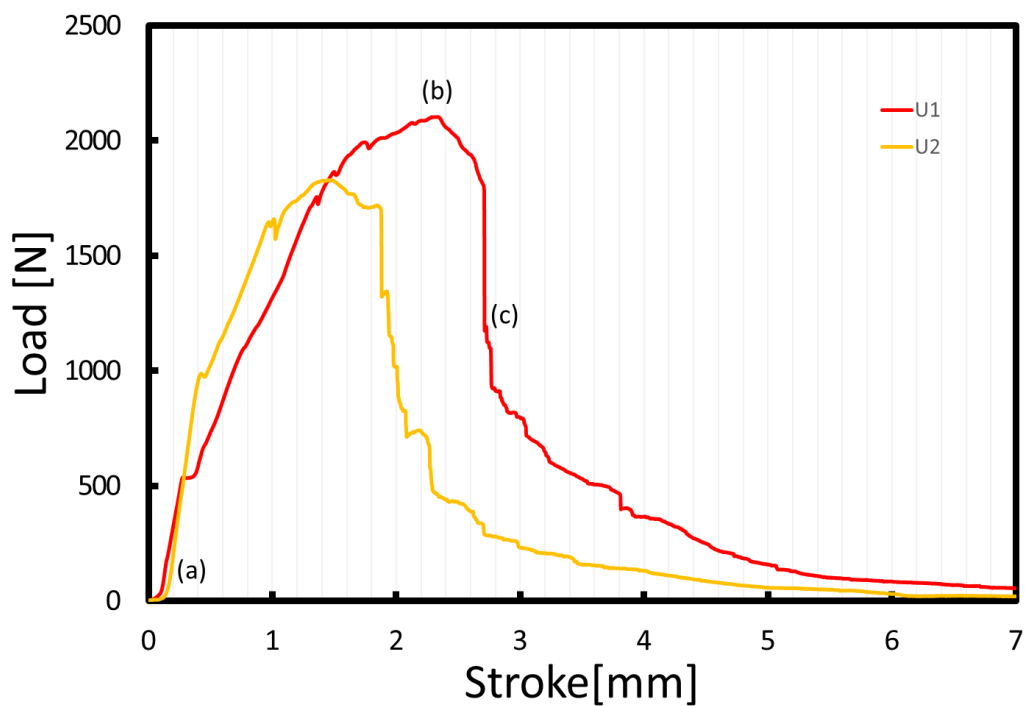


Fig. 5.11 Load-stroke diagram for U_1, U_2 (CFRTS)

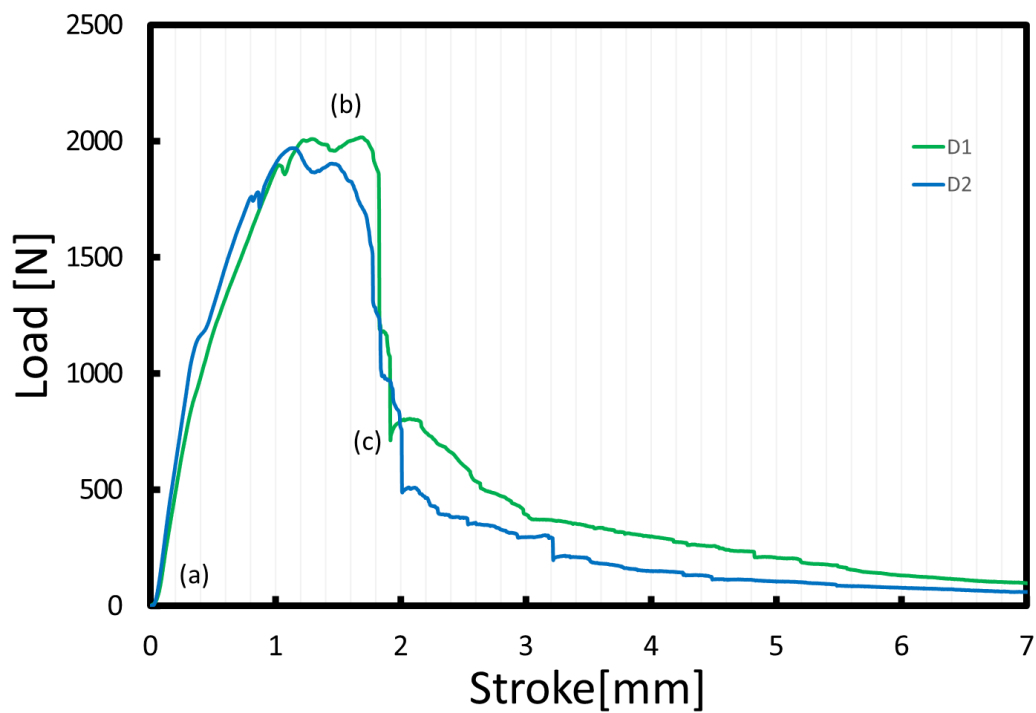


Fig. 5.12 Load-stroke diagram for D_1, D_2 (CFRTS)

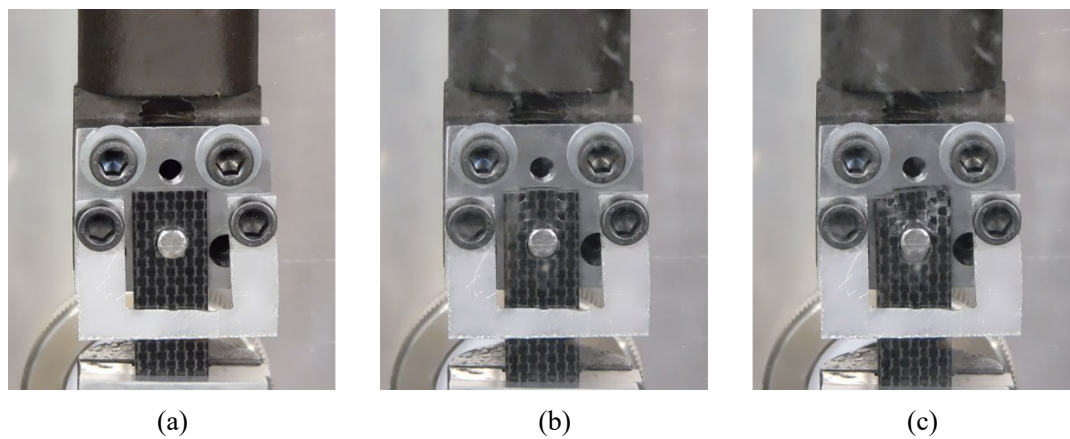


Fig. 5.13 U_1 destruction process(CFRTS)

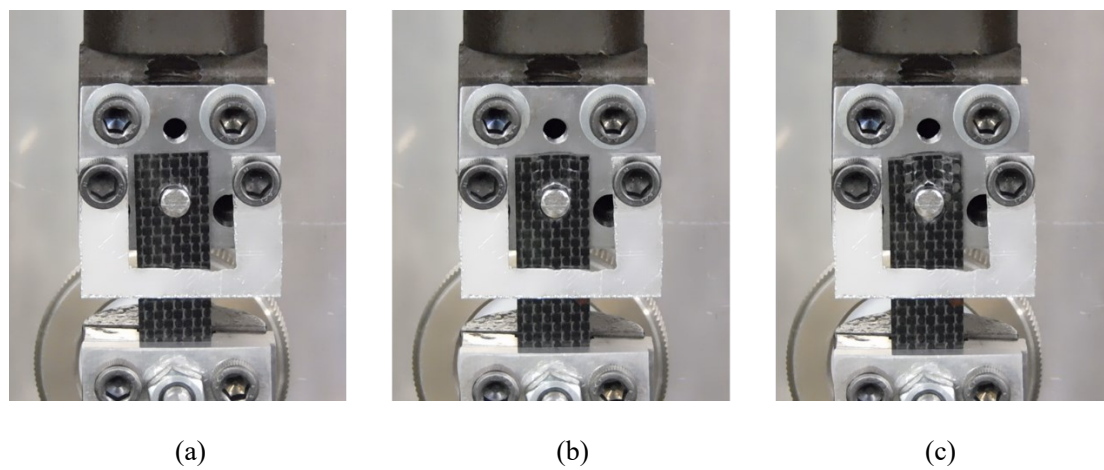


Fig. 5.14 D_1 destruction process(CFRTS)

5.5.2 加工穴の強度

CFRTS 板については、最大引張荷重を用いて、面圧強度 σ_{max} のみを算出して評価する。算出方法は CFRTP 板の場合と同様である。ただし、板厚 t は 1.75mm。図 5.15 に U₁, U₂, D₁, D₂, すべての荷重-ストローク線図をまとめたものを示す。また、表 5.2 に U₁, U₂, D₁, D₂ の最大荷重をまとめたものを示す。

最大荷重に対応した面圧強度 σ_{max} を算出する。打ち抜き加工穴の面圧強度 σ_{max} は 173MPa, ドリル加工穴の面圧強度 σ_{max} は 175MPa であった。打ち抜き加工穴の方が 1.3%低いという結果になった。打ち抜き加工穴の面圧強度が下回ったが、ドリル加工穴と比較して著しく低下することはなかった。このことから超音波振動打ち抜き加工は CFRTS 板の強度に対して悪影響を及ぼすわけではないことが分かった。

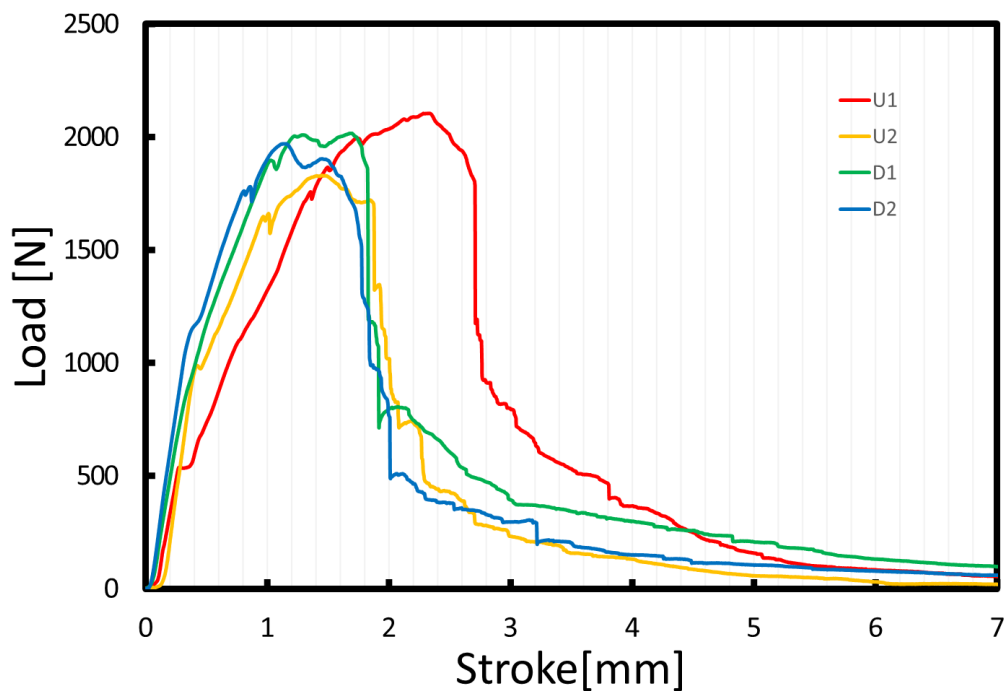


Fig. 5.15 Load-stroke diagram for U₁,U₂,D₁,D₂(CFRTS)

Table. 5.2 Tensile load P_{max} (CFRTS)

	P_{max} [N]
U ₁	2105
U ₂	1830
U average	1968
D ₁	2016
D ₂	1970
D average	1993

6 結言

本研究では超音波振動打ち抜き加工装置を用いて、CFRTP 板と CFRTS 板に対して穴あけ加工実験を行った。さらに加工穴に対しピン負荷をかける引張試験を行った。打ち抜き加工実験から以下の知見(1)~(2)が得られた。引張試験からは以下の知見(3)~(4)が得られた。本研究全体を通して以下の知見(5)が得られた。

- (1) CFRTP 板の打ち抜き加工では、適切な熱で樹脂を軟化させながら加工を進めることで品質の良い加工穴を得られる。
- (2) CFRTS 板の打ち抜き加工では、EP 樹脂を劣化破壊させるための熱が大きく、高出力、低速度の条件のみで加工可能であった。
- (3) CFRTP 板の引張試験では、打ち抜き加工穴の面圧強度の方が高いということが分かった。ドリル加工穴の面圧強度が低下したことから、加工時の層間剝離などは加工穴の面圧強度の低下を引き起こすことが確認できた。
- (4) CFRTS 板の引張試験では、打ち抜き加工穴の面圧強度の方がわずかに下回った。ただし、ドリル加工穴と比較して強度が著しく低下するわけではないことが分かった。
- (5) 超音波振動打ち抜き加工はドリル加工と比較して、粉塵を発生させず、面圧強度を著しく低下することなく、加工品質の良い穴をあけることが可能な加工法である。

参考文献

- 1) 小松隆： 「CFRPによる自動車軽量化設計入門」，日刊工業新聞，(2017)
- 2) 深川仁： 「ものづくりを変える新素材“CFRP”について」，岐阜大学 複合材料研究センター，(2012)
- 3) 田中佑樹：「熱硬化性および熱可塑性 CFRP 板の超音波振動打ち抜き加工」，三重大学大学院工学研究科 博士前期課程 機械工学専攻 平成 30 年度修士論文
- 4) 寺田幸平： 「炭素繊維強化熱可塑性プラスチック」，精密工学会誌，VoL81，No6，(2015)
- 5) 柳下福蔵： 「CFRP の切削加工」，日刊工業新聞社，(2014)
- 6) 有澤秀彰，赤間知，二井谷春彦： 「炭素繊維複合材（CFRP）の高能率加工技術」，技術論文，三菱重工技報，Vol.49，No.3，(2012)
- 7) 大谷杉郎： 「つくる立場から見た複合材入門」，裳華房，(1995)
- 8) 林毅： 「複合材料工学」，日科技連出版社，(1982)
- 9) JIS K 7080，炭素繊維強化プラスチックの面圧強さ試験方法，日本工業規格，(1991)
- 10) 邊吾一，石川隆司： 「先進複合材料工学」，培風館，(2005)
- 11) 大柳康： 「エンジニアリングプラスチック-その特性と成形加工-」，森北出版，(1987)
- 12) 毎熊宏則 久保村健二： 「ピン負荷を受ける CFRP 積層板の力学的挙動および面圧強さの支配因子について」，J. Soc. Mat. Sci, Japan, Vol.41, No.466, pp.1114-1120, (1992)

謝辞

本論文の作成にあたり，終始適切な助言を賜り，また丁寧に指導して下さった 中西 栄徳 准教授に深く感謝いたします。本研究を遂行するにあたり，多数のご助言を賜りました 高橋 裕 教授に深く感謝いたします。本論文をご査読頂きました 川上 博士 准教授に御礼申し上げます。そして，実験治具の作成，実験の遂行に際して多くのご協力を頂きました 中川 浩希 技術職員ならびに集積加工システム研究室の皆様方に深く感謝いたします。

最後に，幾多のご協力をいただきながら，ここにご氏名を掲載できなかった方々に対し，その失礼を御詫びすると共に，謹んで御礼申し上げます。