

修士論文

CFRP 加工穴周辺性状がピン式引張試験中 の破壊進展挙動に及ぼす影響

指導教員 中西 栄徳 准教授

令和 5 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

大島颯真

目次

1 緒言	1
2 試験装置	2
3 試験片	5
3.1 試験片寸法決定	6
4 CFRTP 板の引張試験	7
4.1 試験目的	7
4.1 試験方法	8
4.3 試験結果	9
4.4 試験結果考察	13
4.5 追加試験結果	15
4.5.1 試験方法	15
4.5.2 試験結果	15
4.5.3 考察	21
5 結言	25
参考文献	26
謝辞	27

1 緒言

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics :炭素繊維強化プラスチック)は,当初釣り竿やテニスラケット,ゴルフクラブのシャフトなどのスポーツ用品を中心に商品化されていたが,軽量化のメリットを航空機の構造材料に生かしたいという航空業界の強いニーズに対して素材メーカーの普段の研究開発が進められ航空機の構造材料への採用を可能にした.1995年に就航したボーイング 777の垂直尾翼,水平尾翼に使用され,層間腐食もないというメンテナンス性のメリットが認知され,航空機の構造材料として広く使用されるようになった.今や,ボーイング 787では重量比で約50%がCFRPで製造されるまでに普及した.CFRPを用いることで大幅な軽量化が図られ,燃費が約20%改善しただけでなく,与圧や湿度を従来よりも高く設定することが可能になるという客室快適性も向上している.

航空機や自動車をCFRPで製造する際,成形された状態で使用されることは少なく,CFRPの部材締結用に穴あけ加工は必須となり,CFRPの穴あけ加工の作業が頻繁に行われているのが現状である.¹⁾²⁾

CFRPは繊維方向によって機械的性質に著しい異方性を持ち,それが加工後の形状や寸法精度に影響を与えるため,高精度の加工が非常に難しい材料である.加工が難しい材料であるため,CFRPの穴あけ加工には主にドリル加工,アグレッシブウォータージェット(AWJ)加工,レーザー加工などが研究,実用化されている.³⁾上記のように,様々な穴あけ加工がおこなわれているため,CFRPの機械的接合部に関して先行研究がなされている.⁴⁾⁵⁾しかし,締結部周辺に関する機械的性質についての研究は少なく,試験片寸法による接合部周辺の破壊モードの変化や,板厚低減のための繊維方向の最適化といった加工穴の精度は考慮されていない.そのため,加工穴品質つまり加工穴周辺性状が強度・破壊形態に与える影響については明らかになっていない.

そこで,試験片両端部に新品と摩耗したドリルで穴あけ加工した加工穴周辺性状の異なる試験片を製作し,加工穴にピンを差して引張試験を行った.また,上側のピンのみで破壊が生じるように上下のピン周りに取り付けた当て板の下側のみを強く締め付け,ピン直上の詳細観察を行った.そして得られた強度や破壊進展挙動を比較することで,関係性を明らかにすることが目的である.

2 試験装置

ピン式引張試験を行うために試験機を製作した。この装置を用いて、加工穴周辺性状と強度・破壊進展挙動の関係性を得るための試験を行う。

減速機付き DC モーター SS40E4-L2-300-DC100V(澤村電機工業株式会社製)を動力源として、スクリージャッキ JA025UCL100SK(株式会社マキシコー製)で図 1 のように板を押し上げることで引張試験を行える機構となっている。ストロークは想定している試験片の場合 40 mm である。また、最大荷重は 19800 N まで可能となっている。

変位の測定装置としてポテンシオメーターの LP-100FJ(緑測器製)を用いた。荷重の測定装置としてロードセルの DYLF-102(Shanghai qiyi electrical & mechanical equipment co. ltd 製)を用いた。実際に完成した装置を図 2 に示した。

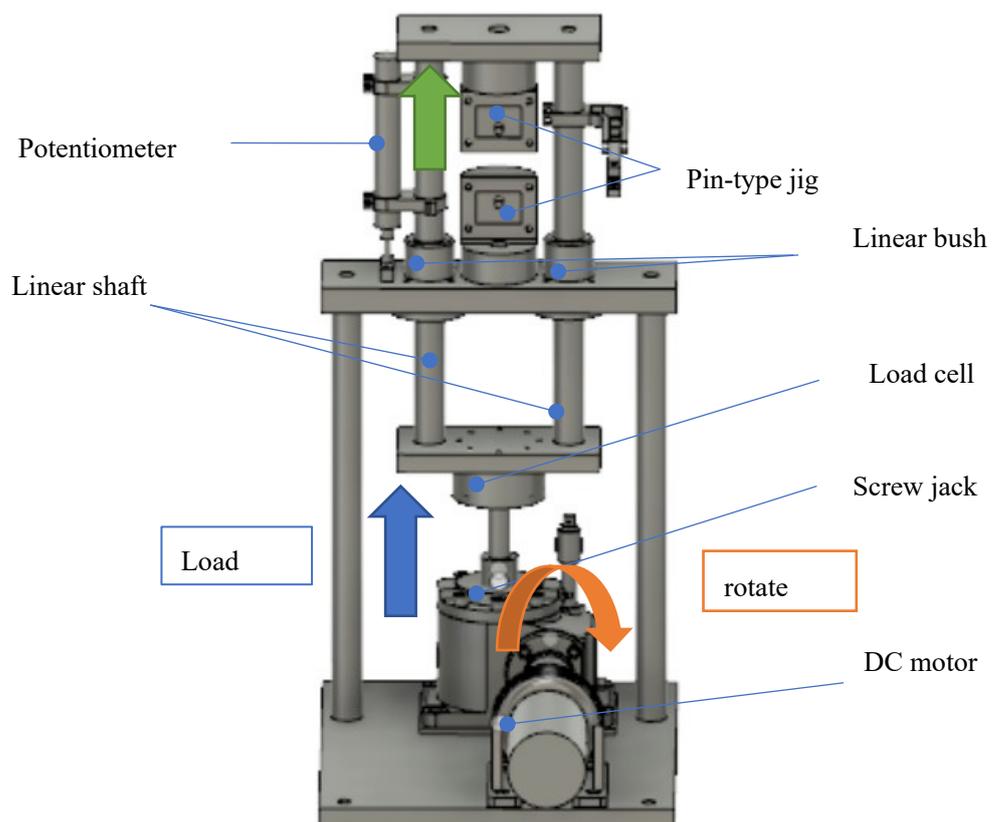


Fig.1 Principle of operation

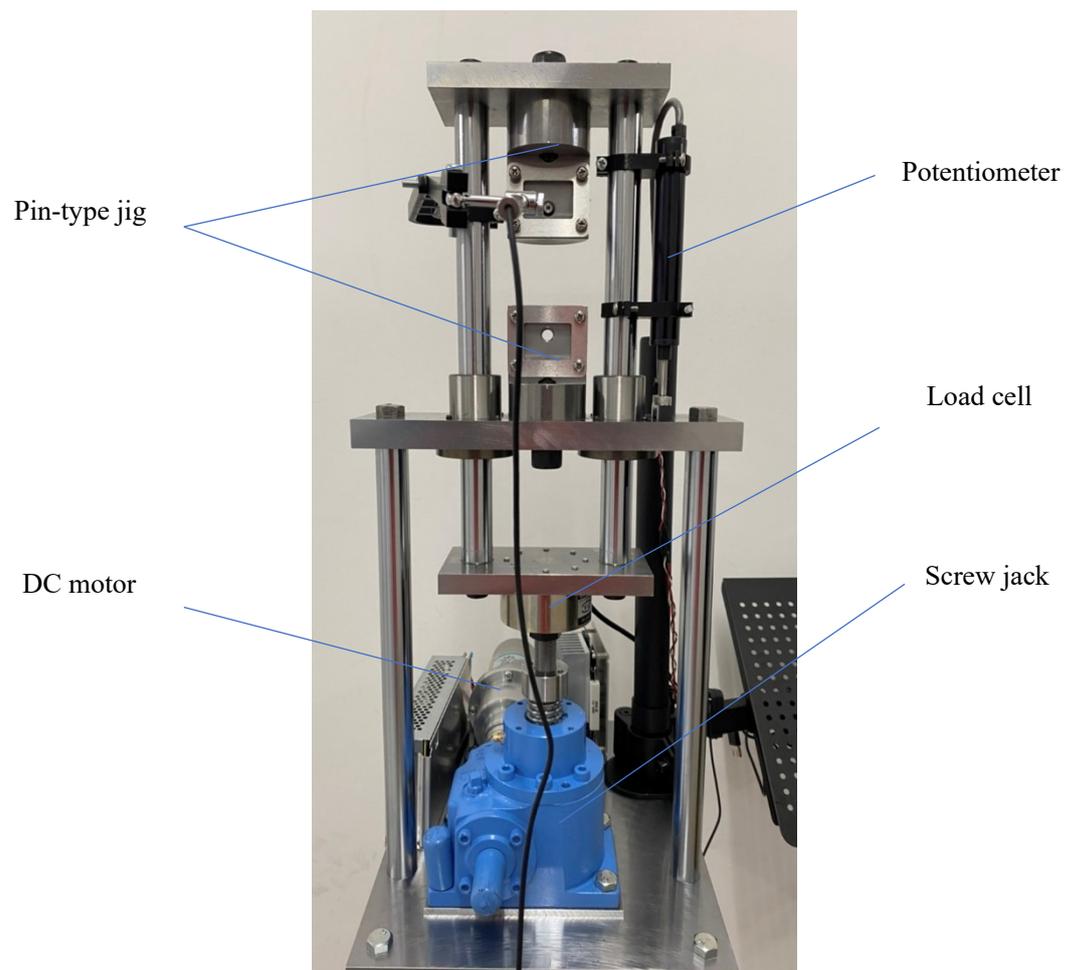


Fig.2 Tensile testing machine

3 試験片⁶⁾

CFRP 積層材のボルト接合継手における主要な破壊モードはそれぞれ面圧破壊モード (bearing failure mode),せん断破壊モード (shear-out failure mode),引張破壊モード (net-tension failure mode)があるとされている。これらの破壊モードは,ボルト孔径 d と板縁距離 (ボルト孔中心から板端までの距離) e の比率 e/d ,及びボルト孔径 d と板幅 w の比率 w/d に応じて変化する。 e/d , w/d が十分に大きい場合,図 3(a)のように面圧破壊モードが起こり,破棄挙動が安定となる。一方, e/d が小さい場合は図 3(b)に示すせん断破壊モードに, w/d が小さい場合は図 3(c)に示す引張破壊モードになるが,このとき破壊挙動は不安定となる。一般に面圧破壊モードが望ましく,せん断及び引張破壊モードは避けるべきだとされている。⁶⁾ピン負荷を受ける CFRP 積層板の面圧破壊モードとなる条件は $w/d \geq 4, e/d \geq 3$ となっている。⁶⁾

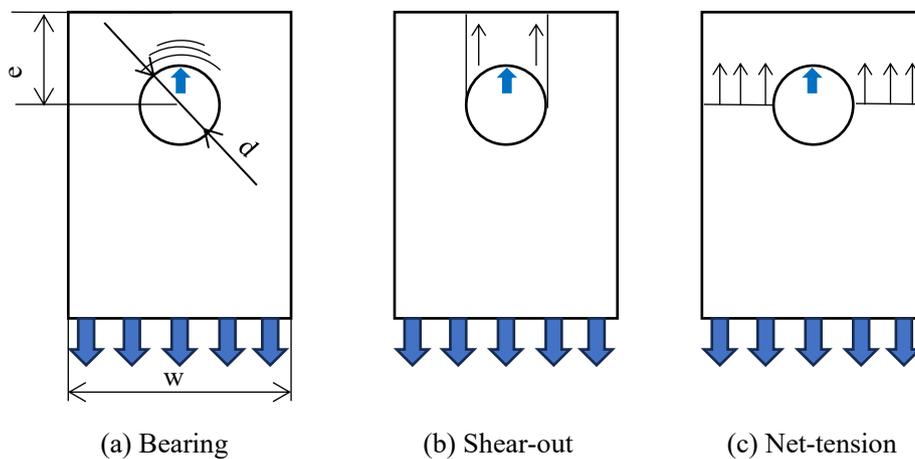


Fig.3 Typical failure modes of mechanically fastening joints.

3.1 試験片寸法決定

本試験を行うにあたって、試験片の寸法による強度や破壊形態に影響を与えてはならない。そのため、破壊モードが一定となる面圧破壊のみが生じる試験片にする必要がある。以上のことから下記のせん断破壊モードと引張破壊モードにならない条件を満たし、

$$e/d=25/6.5=3.84\dots$$

$$w/d=30/6.5=4.61\dots$$

図4のように試験片を決定した。

また、用いる試験片の母材はPC(ポリカーボネート)樹脂で統一した。

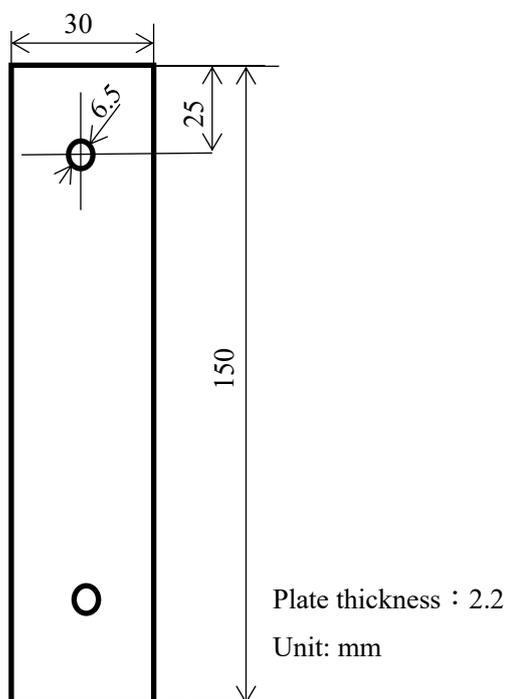


Fig.4 CFRP-test

4 CFRTP 板の引張試験

4.1 試験目的

本試験は、今後加工穴の評価を行うにあたって加工穴周辺性状の強度や破壊進展挙動の関係性を明らかにすることが目的である。

先述したように、CFRP のピン負荷時の破壊形態が一般的に面圧破壊、引張破壊、せん断破壊の3つがあるとされている。破壊が不安定になってしまう条件があり、

$$\begin{aligned} \text{せん断破壊起こらない条件は} & \quad \frac{e}{d} \geq 3 \\ \text{引張破壊が起こらない条件は} & \quad \frac{W}{d} \geq 4 \end{aligned}$$

とされている。

これら2つの破壊が起きない条件の中で、加工穴周辺性状の観察を行い、破壊進展挙動や強度との比較を行う。

4.1 試験方法

図5のような治具に試験片を取り付け、面外拘束のない引張試験を行った。ピンの直径は6.5mmで奥行き方向に試験片が動くのを防ぐために締め付けないように当て板を取り付けた。また、試験片下側のみ当て板の締め付けを強くすることで、上側のピンでのみ破壊するようにした。上側のピンのみを上昇させることで、引張破壊を行った。

本試験での試験片は、面圧破壊が生じる想定で設定されているため、ピン直上部分にカメラを設置し、観察を行った。

試験片の穴あけ加工を施す際に、新品のドリルと摩耗したドリルを用いることで、異なる性状の加工穴を用意した。これにより、加工穴性状が強度や破壊に及ぼす影響を比較することが狙いである。

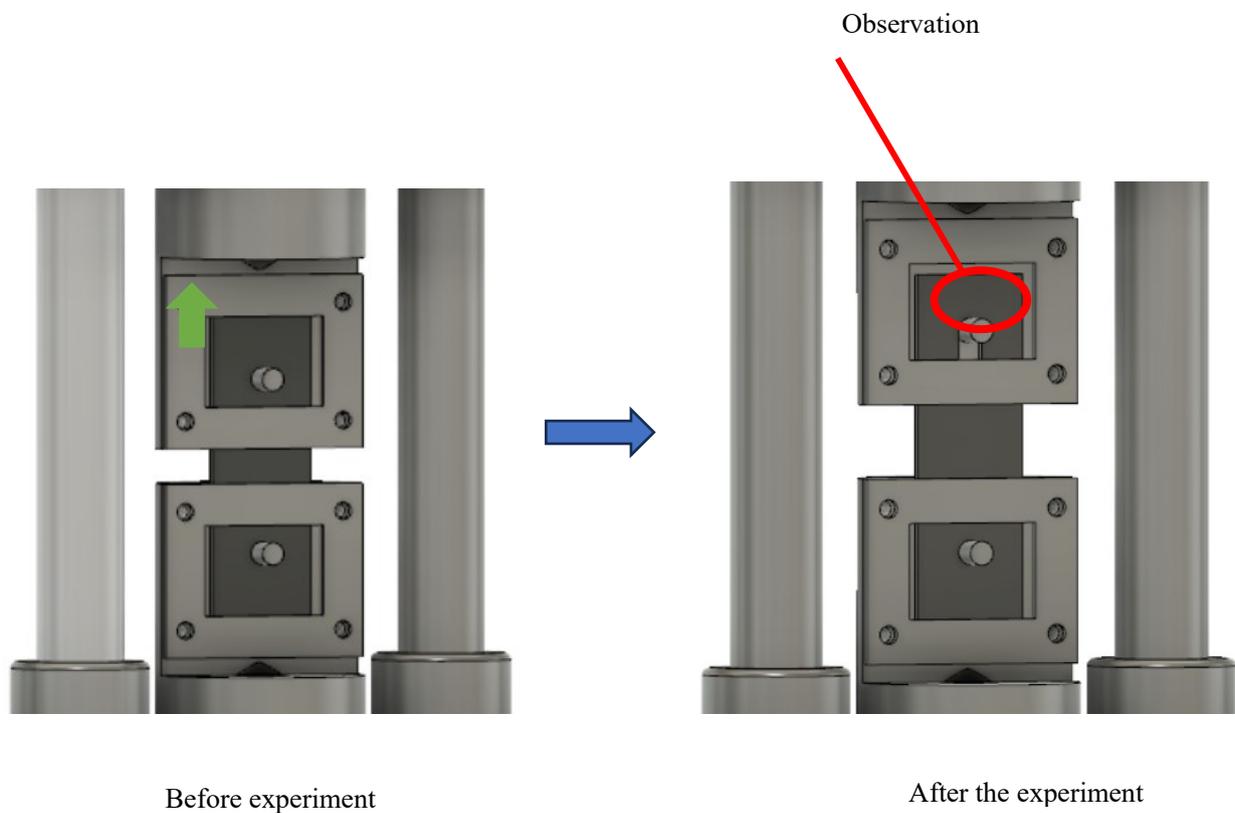
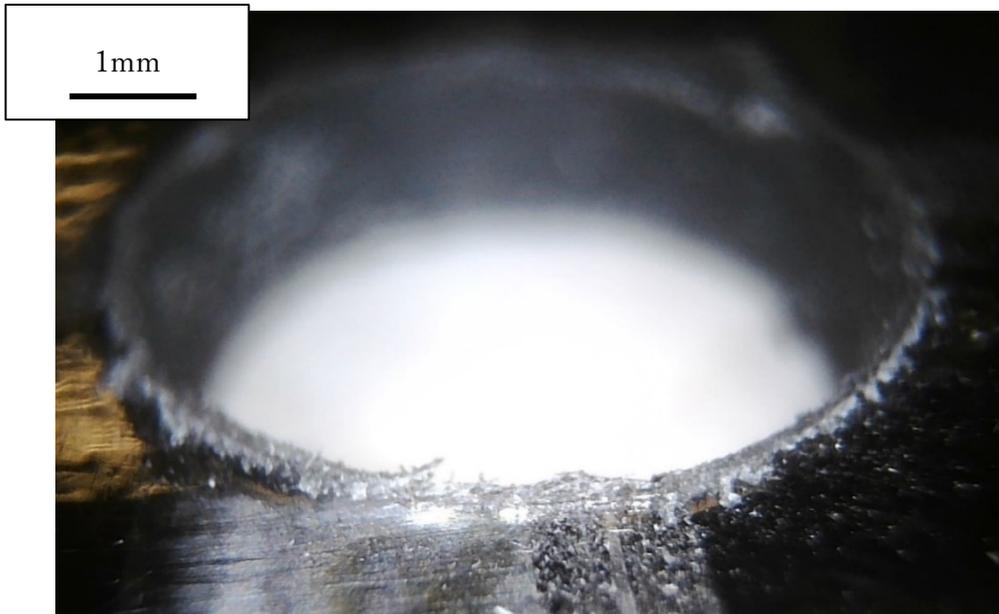


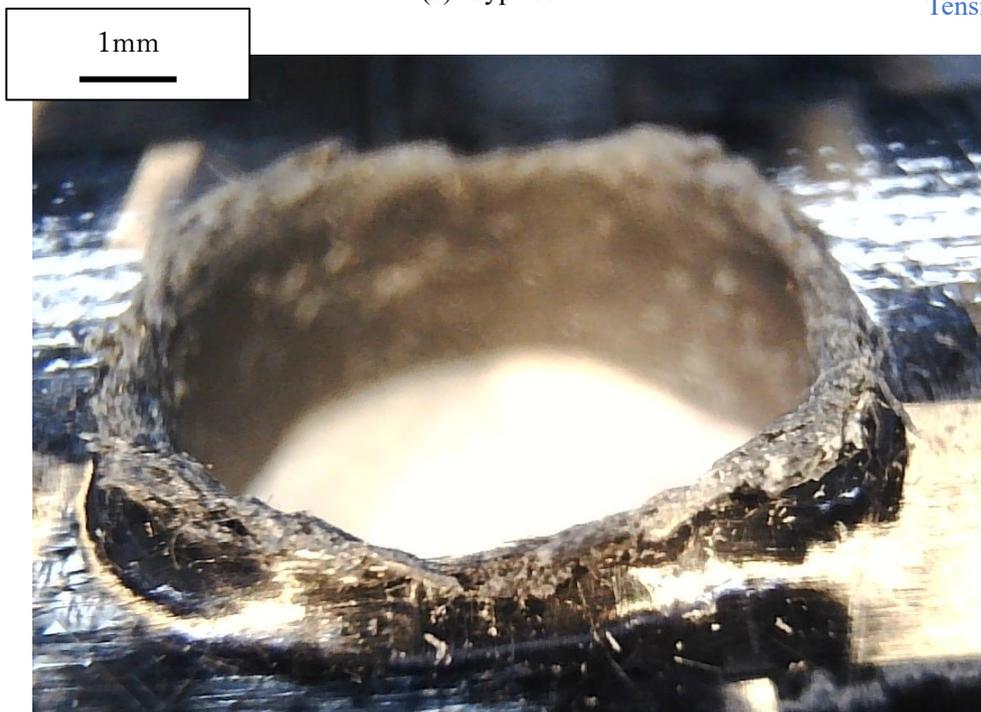
Fig.5 Tensile test

4.3 試験結果

摩耗度の異なるドリルを用いて加工した試験片を用いて引張試験を行った結果、2種類の破壊進展挙動と荷重変位線図が得られた。それぞれ代表的なものを Type-A, Type-B とする。図 6 に引張前の加工穴の様子を示す。Type-A はエッジ部分にバリが確認できるが、エッジ部分近傍には加工影響は確認できなかった。Type-B は加工穴エッジ部分にバリがあり、層間剥離が起きていることが確認できる。それぞれの荷重変位線図を図 7 に示す。Type-A は約 4500 N まで荷重が上がった後、3000 N まで低下し、3000 N から 3500 N ほどで引張試験が進行していった。変位約 19.5 mm の場所で CFRP が破断し、荷重が大幅に低下した。Type-B は約 3000 N まで上昇した後に、約 3000 N~約 3500 N で引張試験が進行した。変位約 19.5 mm の場所で荷重が大幅に低下した。強度に違いが見られたのが変位 0~約 2 mm の部分のみであるため、その箇所について観察したものを図 8 に示す。Type-A は引張開始から(a)にかけてピン直上の樹脂が耐えている様子が確認できた。その後、ピン直上で面圧破壊を起こし、荷重が低下した後に、ピン直上を割っていくように破壊が進行していった。Type-B はピン直上の樹脂が耐える様子は確認できず、(b)から Type-A 同様割っていくように破壊が進行していった。

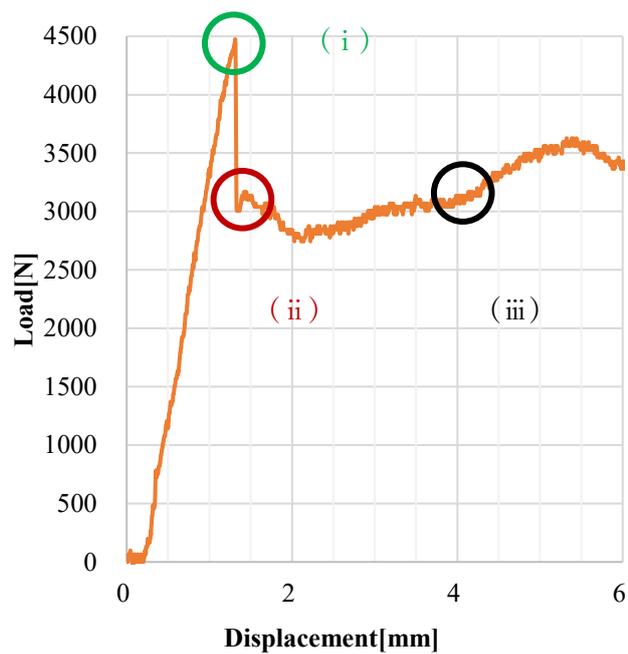
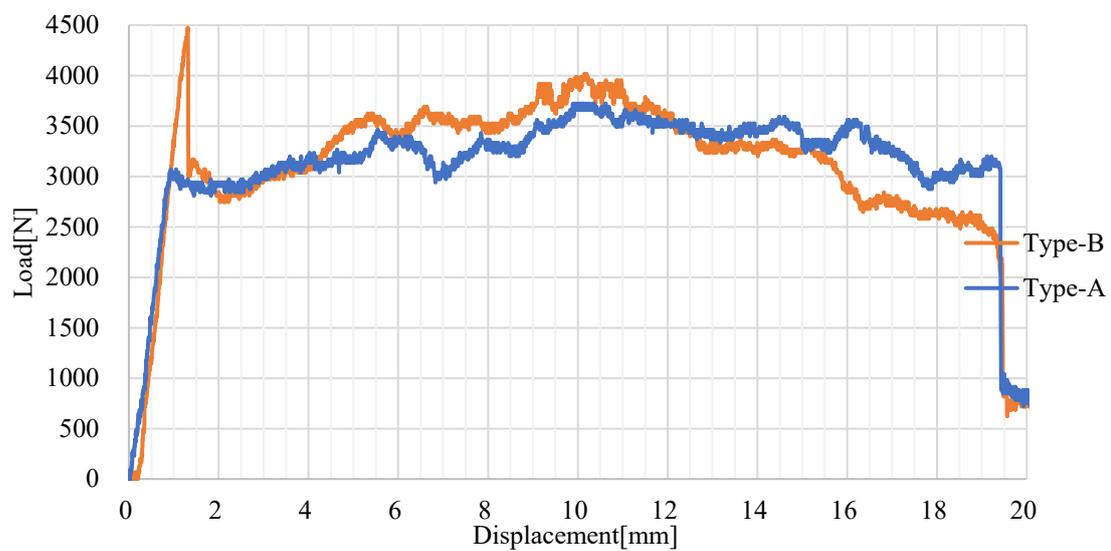


(a) Type-A

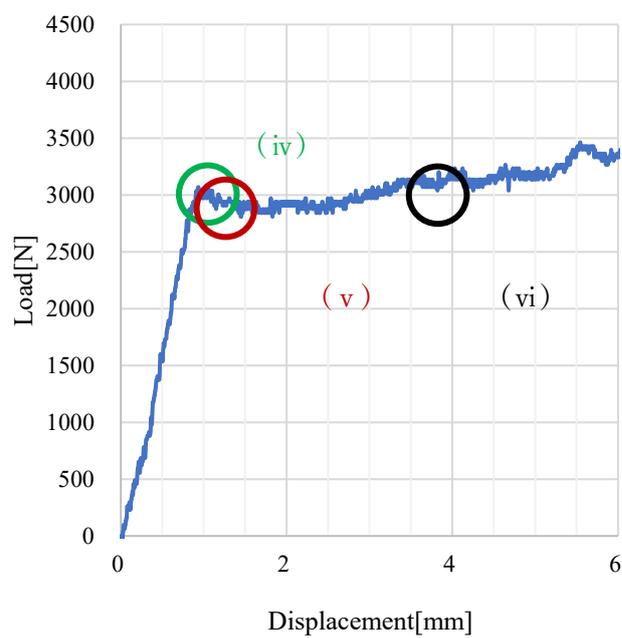


(b) Type-B

Fig.6 Around the processing hole

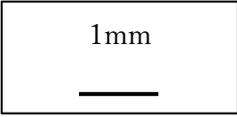


(a) Type-A



(b) Type-B

Fig.7 Load-displacement curve



(i)



(iv)



(ii)



(v)



(iii)

(a) Type-A



(vi)

(b) Type-B

Fig.8 Fracture Morphology around a Machined hole

4.4 試験結果考察

試験を通して、図9に示すような2種類の破壊形態が得られたため、加工穴の性状によって、強度や破壊進展挙動に影響を及ぼすこと可能性があることが分かった。Type-Aの破壊は、CFRPが開始から(a)の破断に至るまでの間に材料が引張方向に押し上げられている様子が確認できる。また、(b)点で荷重が急激に低下することが確認されたが、(c)(f)点付近でのピン直上を裂いていく際にかかる荷重と酷似していたことから、材料として目指す破壊形態はType-Aだと考える。

Type-A、Type-Bのピン直上を割いていく際の破壊形態は同じであると考えられる。これは、ドリル加工の場合、(a)と(d)の破壊以降、加工穴の精度が影響していないからではないかと考える。

加工穴性状が強度・破壊形態に影響を及ぼす可能性があることが分かったが、具体的に影響を及ぼす原因というものは分かっていない。そのため、破壊形態と強度に差が生じた箇所では引張試験を終了し、加工穴壁面の観察を行った。

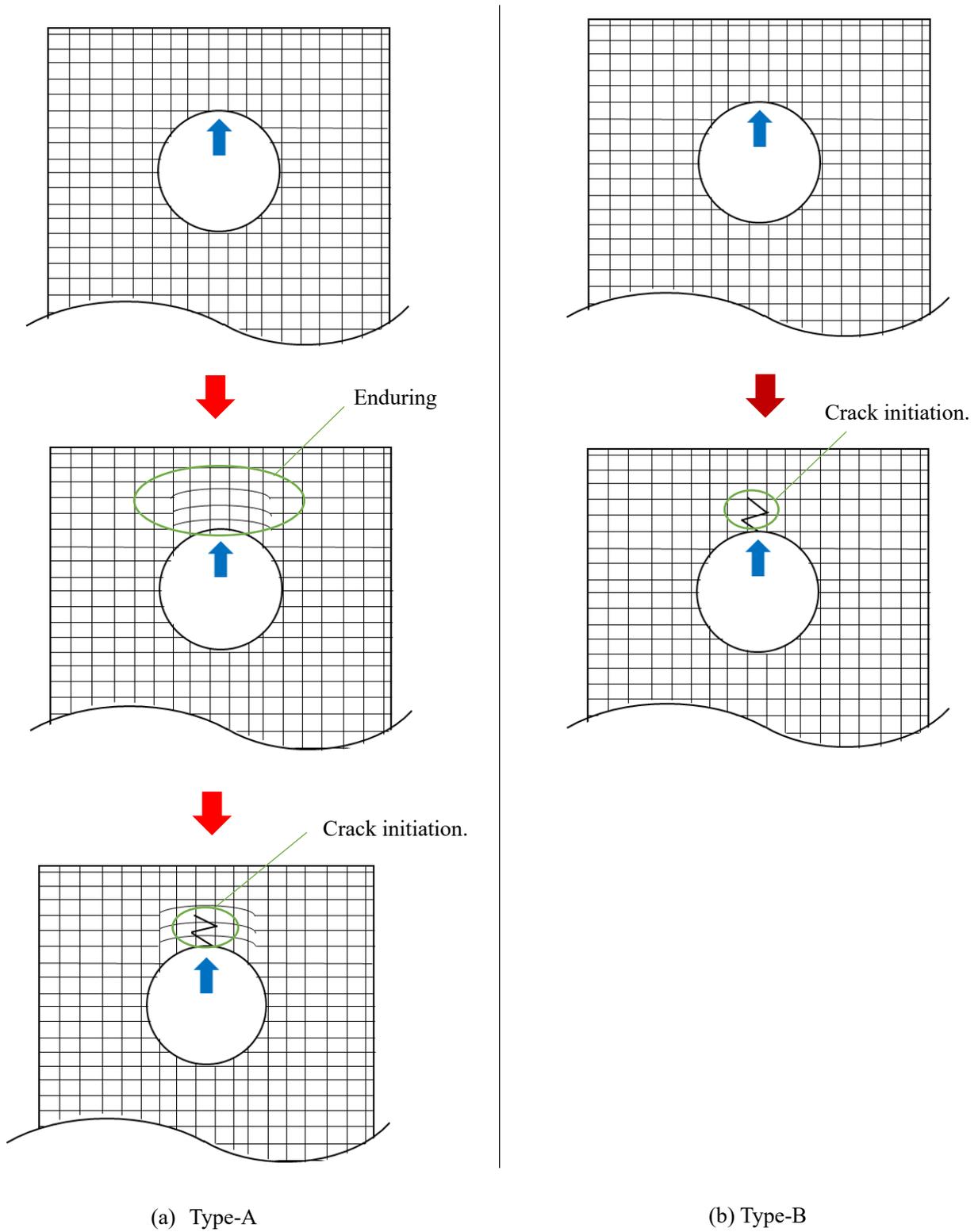


Fig.9 Fracture Morphology around a Machined hole

4.5 追加試験結果

4.5.1 試験方法

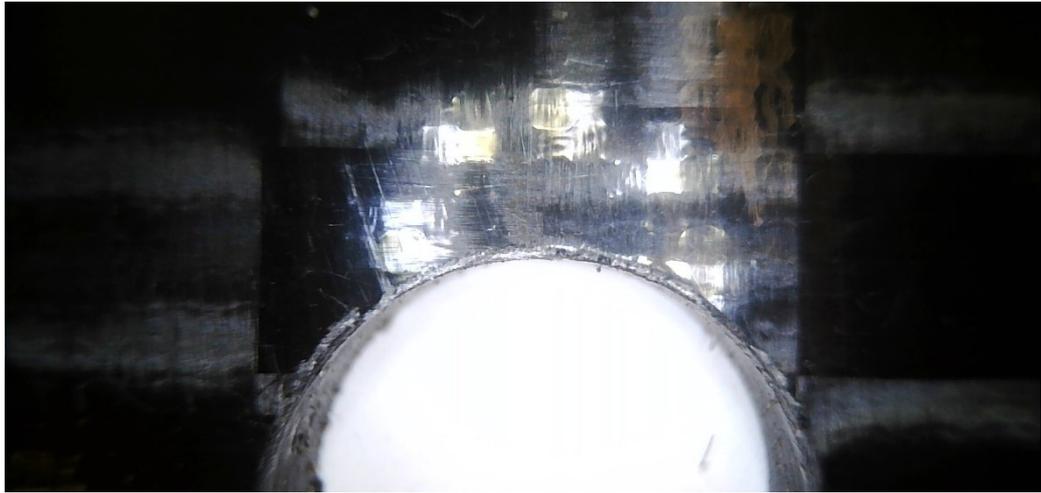
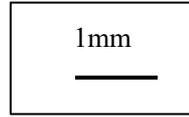
先述したように加工穴周辺性状によって異なる破壊が生じた.そのため,それぞれの破壊が生じた瞬間にピンの変位を止め,引張試験前の加工穴性状の観察データと荷重変位線図・破壊進展挙動との比較を行う.

その後,加工穴壁面の詳細観察を行い,引張試験前の加工穴性状との比較することで違いを生む原因について考察する.

4.5.2 試験結果

図1のType-AとType-Bの破壊形態が得られた試験片で比較を行う.それぞれの試験片をType-I type-IIとする.引張前の加工穴の様子を図10に示す.また,得られた荷重変位線図を11に,各点での破壊を図12に示す.Type-Iは,(a)から(b)にかけて材料が引張方向に押し上げられていく様子が確認できた.その後,ピン直上で破断し,荷重が低下した.その地点で引張試験を終了した.Type-IIは,(d)から(e)にかけてピン直上で樹脂が押し上げられる様子は確認されなかった.その後,(e)から裂けるように破壊が進行し,(f)にて試験を終了した.

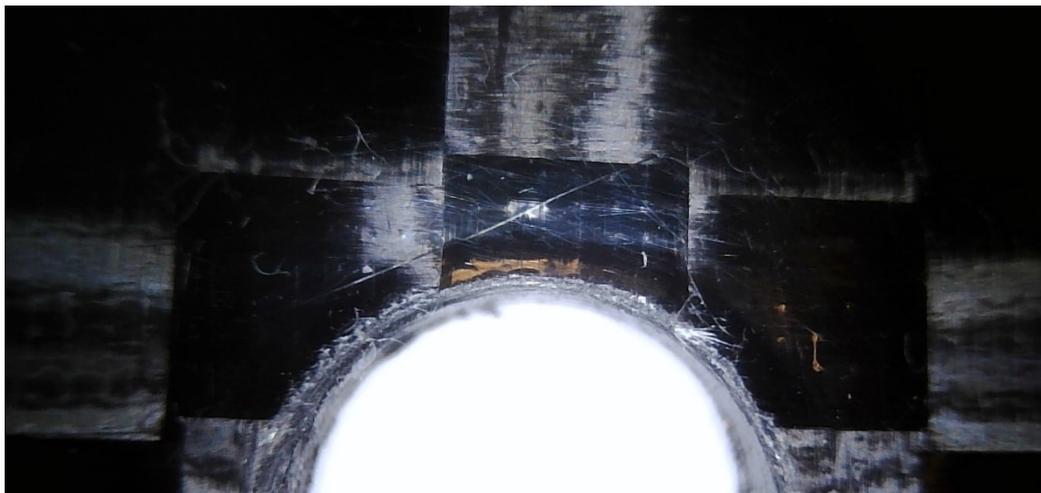
破壊が終了した後に,CFRP試験片を図13のように切断し,デジタルマイクロスコープを用いて観察した.図14の加工穴壁面を観察したことにより,Type-A, Type-B どちらの破壊形態においてもピン直上の加工穴エッジ部から破壊が始まっていることが確認できた.また,図15に引張方向の逆から撮影したものを添付した.



(a) Type-I.

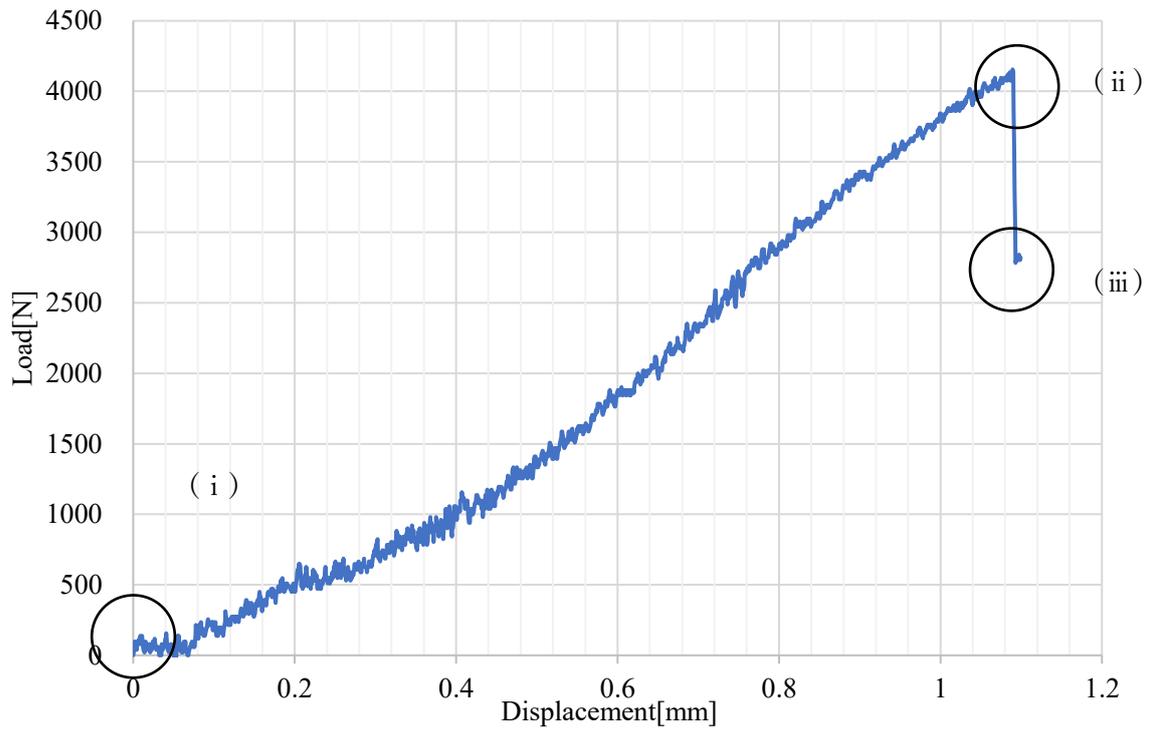


Tensile direction

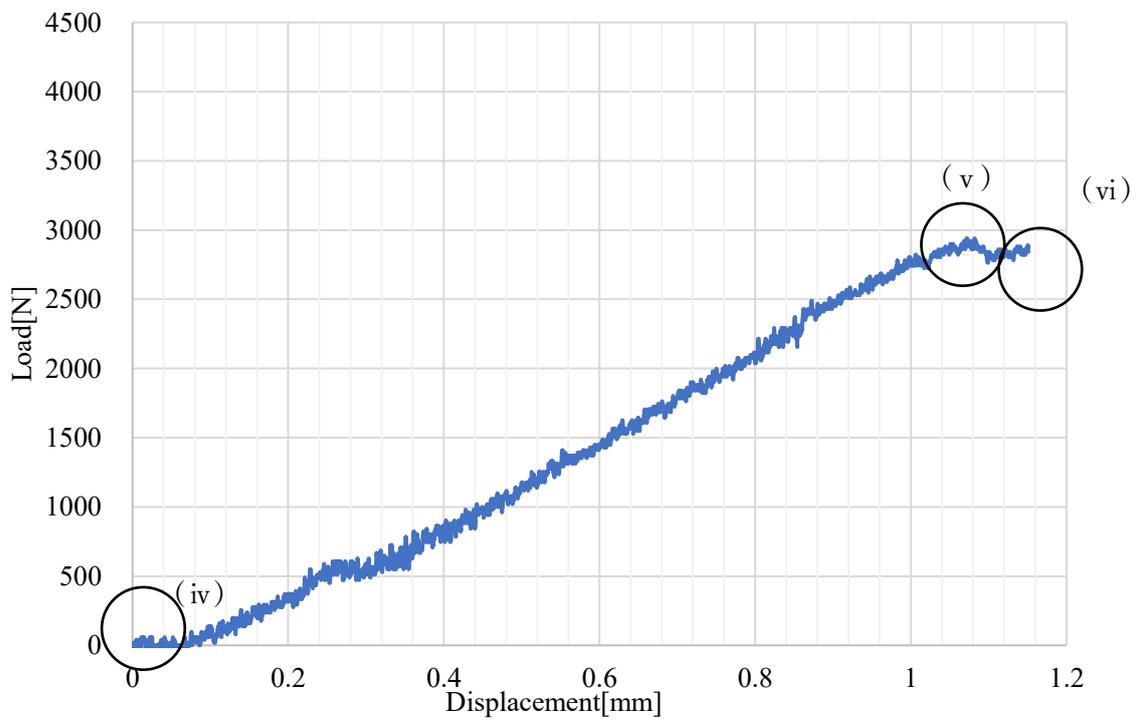


(b) Type-II

Fig.10 Around the processing hole



Type-I



Type-II.

Fig.11 Load-displacement curve

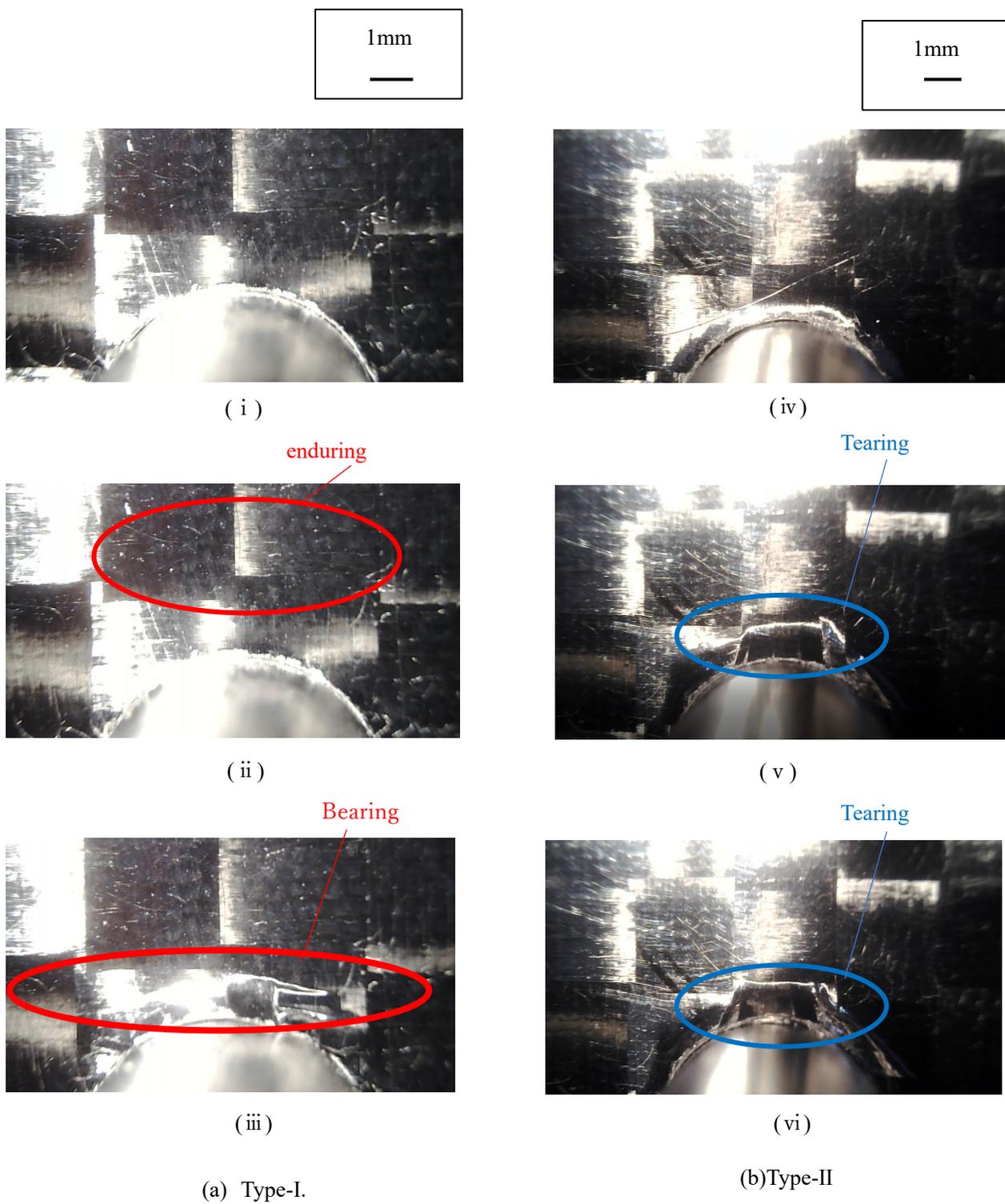


Fig.12 Fracture Morphology around a Machined hole

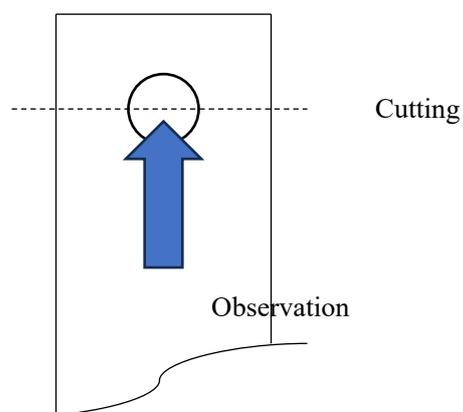
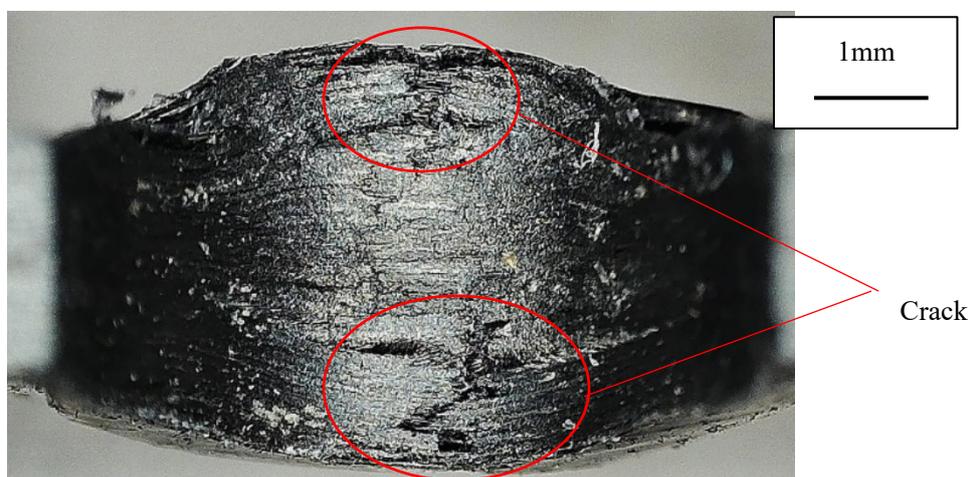
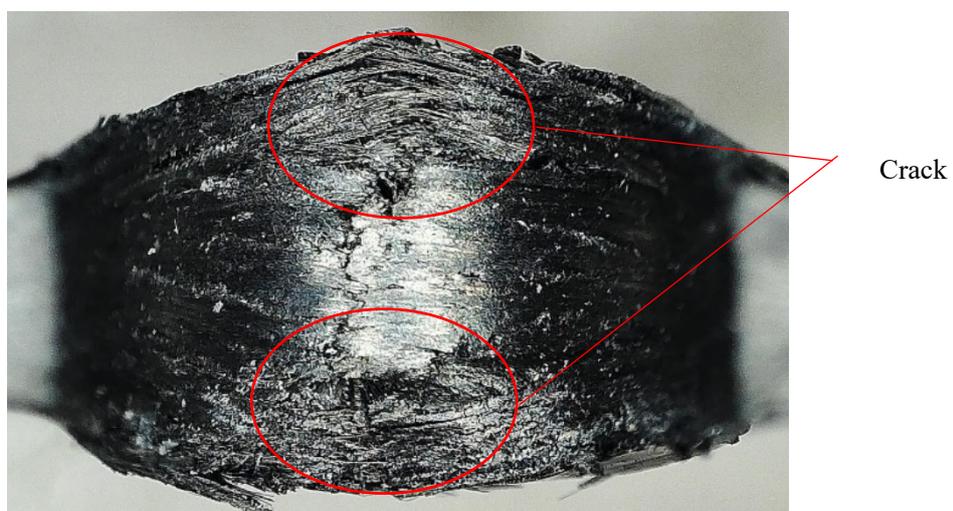


Fig.13 Direction of observation of machined hole wall surface

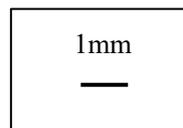


(a) Type-I.



(b) Type-II

Fig.14 Processed hole wall surface.



(a) Type-I.



(a) Type-II.

Fig.15 After destruction of CFRP

4.5.3 考察

加工穴壁面を観察したところ、Type-A と Type-B どちらの破壊に関しても加工穴エッジ部近傍に多数のクラックが生じていた。そのため、破壊は、加工穴エッジ部から始まっていると考える。そのため、加工穴エッジ部近傍の壁面が強度・破壊形態に与える影響が大きいと考えられる。

図 17 に Type-1、Type-2 の加工穴性状を示す。Type-2 のエッジ部近傍には、乖離のようなものが生じている様子が確認できたが、Type-1 には確認できなかった。また、図 18 のように Type-A と Type-B のそれぞれの破壊が生じた際の加工穴性状を観察したところ、エッジ部近傍に層間剥離が生じている場合、Type-B になりやすいという傾向が得られた。

次に、エッジ部に剥離が生じていない加工穴の性状と壁面を図 19 に示し、エッジ部に剥離が生じているものを図 20 に示した。エッジ部に剥離が生じている加工穴の壁面を観察したところ、エッジ部近傍壁面に層間剥離が生じていることが確認された。先述したように、加工穴エッジ部近傍壁面が強度や破壊形態に影響を及ぼすと考えている。そのため、図 18 のようにエッジ部に剥離がある場合、Type-B のような破壊が生じる傾向があったのだと考える。

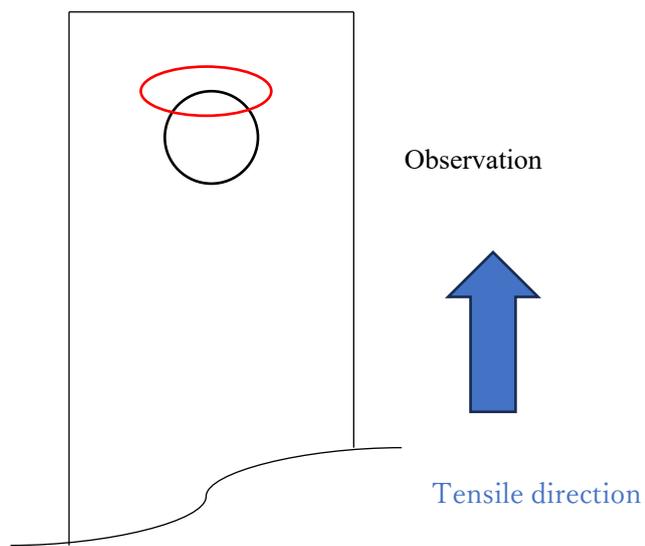


Fig.16 Observation Location

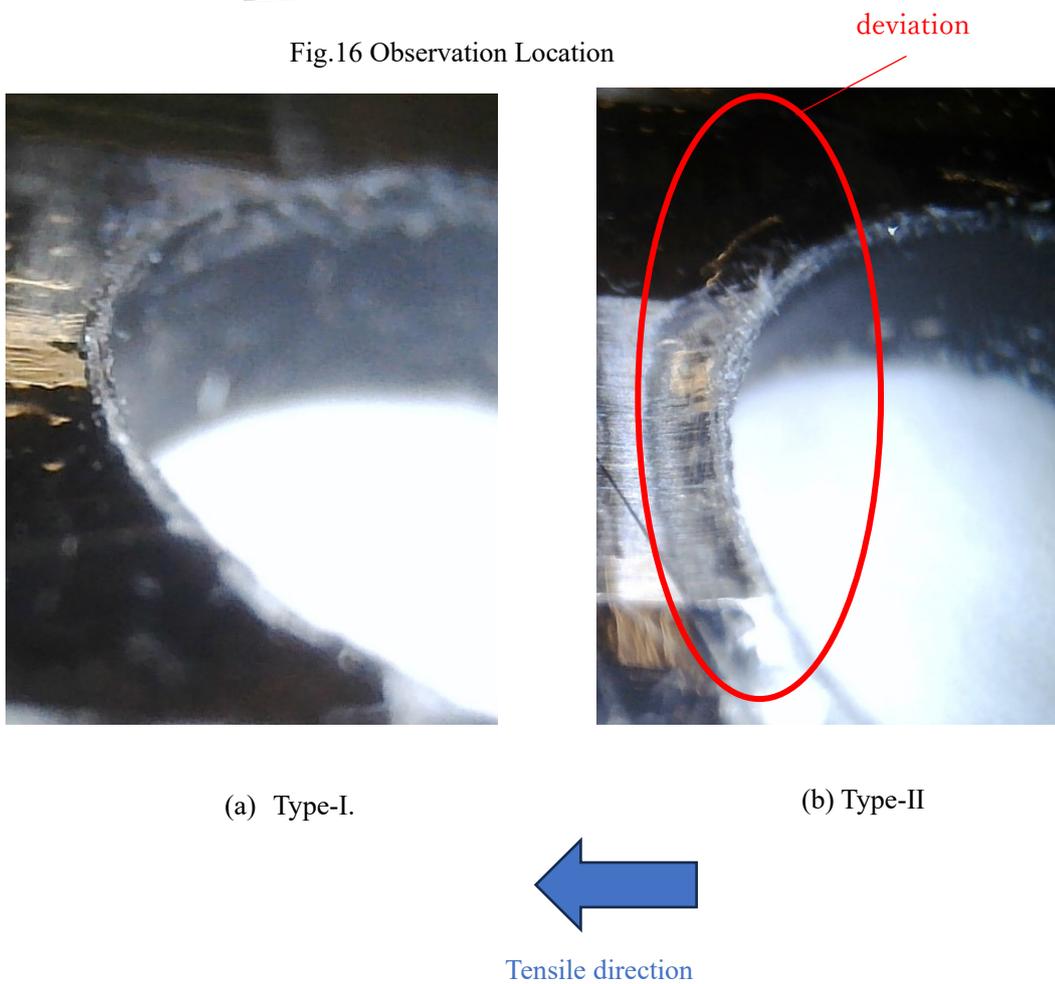
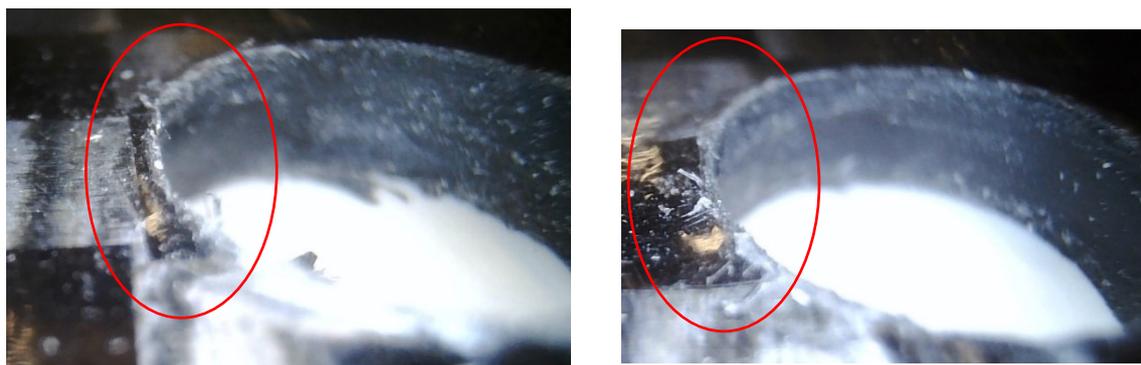
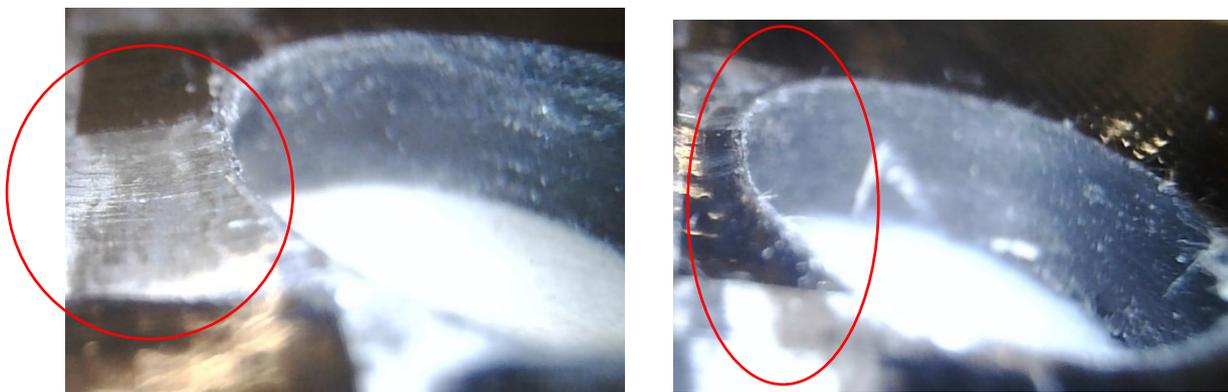


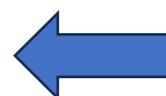
Fig.17 Around the processing hole



(a) Type-A



(b) Type-B



Tensile direction

Fig.18 Around the processing hole

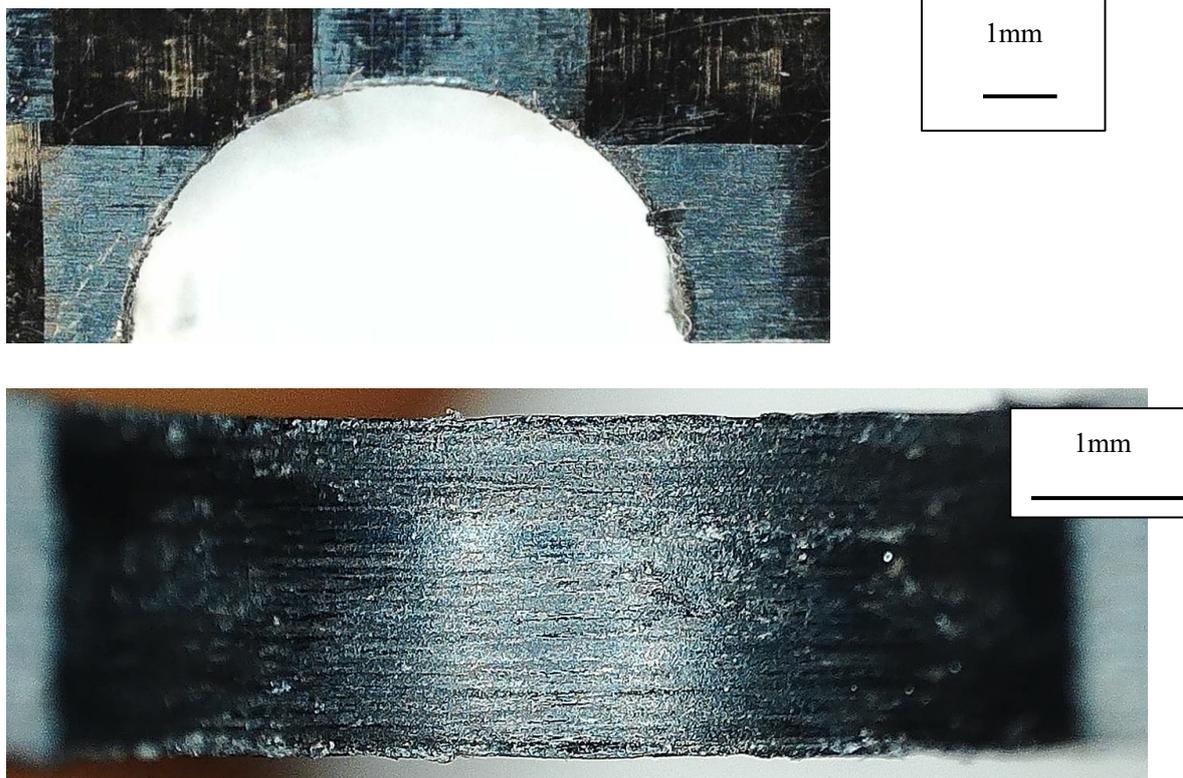


Fig.19 Processed hole wall surface.



Fig.20 Processed hole with delamination at the edge.

5 結言

本研究では試作したピン式引張試験機を用いて,新品のドリルと摩耗したドリルで加工穴性状の異なる試験片を作成し,加工穴に対しピン負荷をかける引張試験を行った.引張試験から以下の知見 1)が得られた.壁面観察から以下の知見 2)~3)が得られた.

- 1) 新品のドリルで穴あけをした試験片で引張試験を行ったところ,荷重線図に鋭いピークが表れた.対して,摩耗したドリルで穴あけをした試験片の場合,負荷直後はピークが表れず,荷重が一定となった.
- 2) 試験後の壁面観察から,加工穴エッジ部近傍に複数の大きなクラックが生じていたため,加工穴エッジ部から破壊が進行したと考える.
- 3) 加工穴入口出口で破壊が生じていた.また,図 20 のように加工穴エッジ部近傍に層間剥離が生じている場合,Type-B になりやすいという傾向が得られた.そのため,加工穴エッジ部近傍の壁面が強度や破壊進展挙動に影響を及ぼしている可能性がある.

参考文献

- 1) 柳下 福蔵 『CFRP の切削加工』
日刊工業新聞社 2014
- 2) 平松 徹 『炭素繊維の本』
日刊工業新聞社 2012
- 3) 山崎 剛史・関 紀旺 『超音波振動援用研削による CFRP の高精度穴あけ加工』
砥粒加工工学会誌 vol.59 No.12 2015
- 4) 深川 仁・清水 啓裕・西川 幸佑・廣垣俊樹 『ブラストによる航空機用 CFRP への
小径孔加工 —エロージョン摩耗による加工メカニズムの解明—』
- 5) 藤井 俊史・中島 和夫・岩崎 康彦・森 直樹・日下 貴之『C-R ステアリング補
強層による CFRP ボルト接合継手の高強度化』日本複合材料学会誌 vol45No.5 2019
- 6) 灘部 岳晃・西川 雅章・水口 周・中村 達也・武田 辰雄『CFRP ボルト接合部の
面圧破壊に影響する繊維キック損傷のモデリング』日本複合材料学会誌 vol37No.5 2011

謝辞

本論文の作成にあたり,終始適切な助言を賜り,また丁寧な指導して下さいました 中西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,幅広い分野からの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.