

2024 年度 不規則構造を有する繊維強化複合材料・構造
の局所損傷／強度特性の解明に関する研究
補助事業 報告書

2025 年 5 月

東京理科大学創域理工学部機械航空宇宙工学科

荻原 慎二

この報告書は、競輪の補助金により作成しました。



<http://hojo.keirin-autorace.or.jp/>

目次

第1章 緒言	1
1-1 炭素繊維強化プラスチック	1
1-2 CFRP 積層板を用いた複雑な構造物成形	1
1-3 繊維不連続部を有する CFRP 積層板についてのこれまでの研究	2
1-4 オートクレーブ成形法	3
1-5 引張試験	4
1-6 4点曲げ試験	5
1-7 研究目的	5
第2章 実験方法	5
2-1 試験片	5
2-1-1 材料	5
2-1-2 試験片寸法, 繊維不連続部の条件	6
2-1-3 試験片断面の研磨	7
2-2 CFRP 積層板の成形	8
2-3 引張試験	9
2-3-1 強度評価	10
2-3-2 ヤング率の導出	10
2-4 4点曲げ試験	10
2-4-1 強度評価	11
2-4-2 曲げ弾性率の導出	11
第3章 実験結果及び考察	14
3-1 引張試験	14
3-1-1 強度評価	15
3-1-2 ヤング率による力学的特性評価	21
3-2 4点曲げ試験	29
3-2-1 強度評価	30
3-2-2 曲げ弾性率による力学的特性評価	37
第4章 結言	39
参考文献	41

第1章 緒言

1-1 炭素繊維強化プラスチック

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) とは、プラスチック (樹脂) を母材として炭素繊維を強化材として加えた複合材料を指す。この CFRP はプラスチックの軽量かつ成形自由度が高いという特徴に加え、繊維の持つ高剛性、高強度な側面を合わせ持つ材料である、特に強化材が炭素繊維であるため、導電性、耐熱性、X 線透過性といった特徴も兼ね揃えており、軽量化・省エネ化などが期待されている。また、これらの特徴から航空機や自動車、医療機器、スポーツ用品など幅広い用途で用いられている。

その一方で、CFRP はオートクレーブ成形法と呼ばれる、強化材となる炭素繊維に樹脂が含まれたプリプレグと呼ばれるシート状の中間材料を用いて、真空下で加熱、加圧をすることで樹脂を硬化させる方法により成形されているため、一般的に積層方向の引張強度が低いという特徴を持つ。

1-2 CFRP 積層板を用いた複雑な構造物成形

CFRP 積層板を用いて航空機のフレームなど大規模・複雑な構造物を成形する際、小さなプリプレグやシール状のプリプレグを複数用いて、三次元形状をトレースする手法が主に利用される。この時、プリプレグ間では局所的に炭素繊維が途切れ、樹脂の硬化で接合された樹脂のみの部分 (以後、樹脂リッチと呼ぶ。) が生じる。強化材である炭素繊維が不連続となった樹脂リッチは、樹脂のみの強度となるため強度が低下し、材料が変化するため応力集中が発生する。この炭素繊維の不連続部について、力学的特性や損傷挙動を解明することは、大規模・複雑な構造物成形に不可欠である。

1-3 繊維不連続部を有する CFRP 積層板についてのこれまでの研究

1-2 で述べた通り、繊維不連続部を有する CFRP 積層板の力学的特性や損傷挙動の評価は大きな意義があり、これまでも様々な研究が行われてきた。

特に、内部に繊維不連続部を有した一方向 CFRP 積層板に関する研究が行われており、繊維不連続部付近で発生する損傷の実験による評価と、解析による損傷発生応力の予測が行われた (Nakatani et al., 2011), (中谷他, 2013)。また、材料を層間破壊靱性の高いプリプレグとすることで繊維不連続部を有していても層間はく離発生応力が向上したことも報告された (永田他, 2015)。

さらに、内部の繊維不連続部の厚さや間隔を変化させることで CFRP 積層板の力学的特性や損傷発生応力にどのような影響を及ぼすかを引張試験と簡単な解析モデルにより評価した研究もされた (中谷他, 2015)。ここでは、クラック発生応力について、繊維不連続部の間隔が長い条件の方が高くなり、繊維不連続部の厚さが大きい条件の方が低くなることが示され、その原因を応力分布の解析によって明らかにした。

図 1-1 は、その解析モデルを示し、図 1-2 は、繊維不連続部の間隔が短い条件、図 1-3 は、繊維不連続部の間隔が長い条件についての、正規化された応力と繊維不連続部の中心からの距離との関係を表したグラフである。ここで、黒破線は繊維不連続部と CFRP との界面の変位を表している。この結果から、図 1-2 より、繊維不連続部の積層数が多い（繊維不連続部の厚さが大きい）条件ほど界面に分布する応力が大きく、図 1-2 と図 1-3 を全体的に比較することで、間隔が短い条件の方が界面に分布する応力が大きいことが分かる。

このように、繊維不連続部を内部に一つ有する CFRP 積層板の力学的特性や損傷挙動の評価は、これまでの研究でも進められており、繊維不連続部の状態の変化による評価も行われてきた。しかし、繊維不連続部を表面に有する CFRP 積層板や、繊維不連続部を複数有する CFRP 積層板に対する基礎的研究や評価は進んでいないのが現状である。

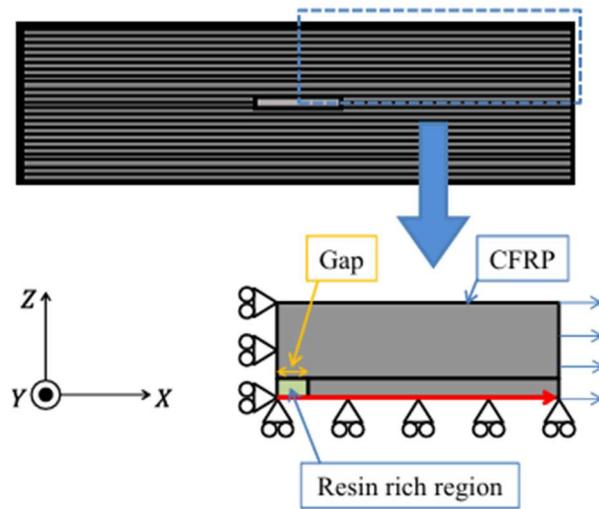
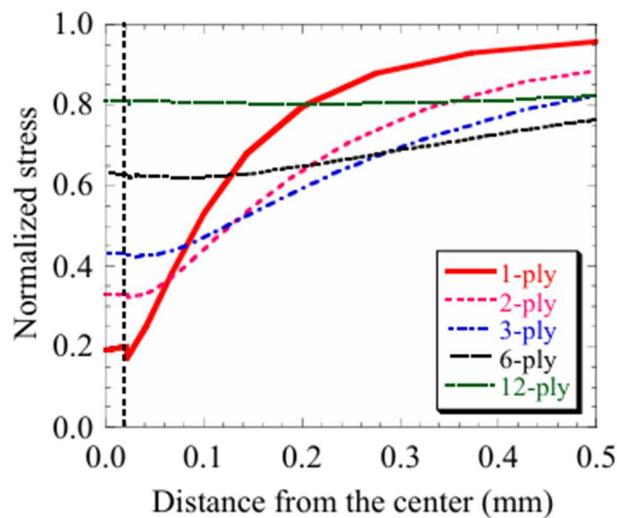
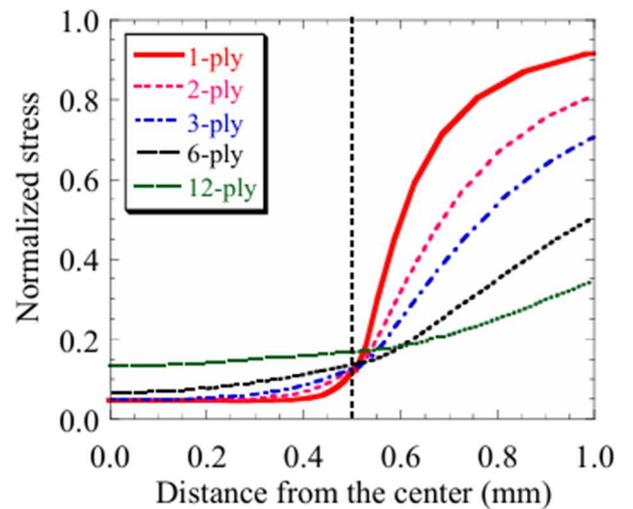


Fig. 1-1 Analysis model of stress distribution



(a) Short gap



(b) Long gap

Fig. 1-2 The relationship between normalized stress and distance from the center (short gap)

Fig. 1-3 The relationship between normalized stress and distance from the center (long gap)

1-4 オートクレーブ成形法

CFRP 積層板の成形法は, VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) 成形や, プレス成形など様々な方法があるが, 本研究では, オートクレーブ成形と呼ばれる成形法 (図 1-4) で CFRP 積層板を作製した. これは, オートクレーブ (圧力容器) を用いて, プリプレグを積層させたものを加温・加圧・真空引きしながら樹脂を硬化させる成形法である. 以下に詳細を記載する.

予め, プリプレグの積層体をバギングフィルムで包装し, 真空吸引できるブリーザーを取り付ける. ブリーザーを真空ポンプと接続し, フィルム内部を真空引き・減圧する. この状態で外部から蒸気によって加温・加圧をする. 加温により樹脂の流動性を高め, 内部の減圧と外部の加圧を同時に行うことにより, プリプレグの積層時に層間に残存する気泡が効率的に取り除かれる. この気泡が残ったまま成形が完了すると, ボイドと呼ばれる空洞となる. ボイドは, 成形品の脆弱部であり, 荷重負荷時に応力集中が生じ, 材料の強度を低下させる要因になってしまう.

オートクレーブ成形法の最大の利点として, ボイドが比較的少なく, 高品質な成形品を安定して成形できるという点がある. 一方, 欠点として, 成形時間が長いことや, 副資材を多く用いる必要があること, 自動化に適さないことから, 量産化させることが難しい点が挙げられる.

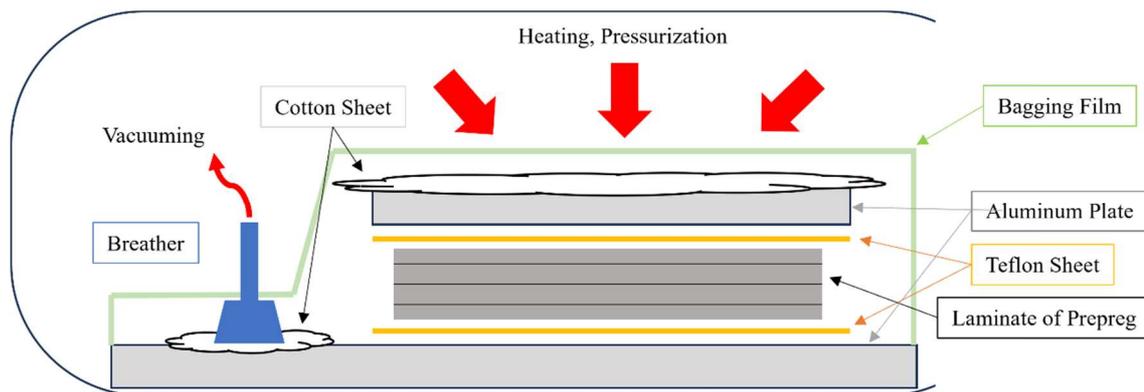


Fig. 1-4 Schematic diagram of autoclave molding

1-5 引張試験

本研究では、日本産業規格（Japanese Industrial Standards : JIS）が規定した JIS K 7073（炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法）に定められた、試験片寸法・試験方法・評価方法に則り、引張試験を行った。引張試験とは、材料に引張荷重を加え、応力とひずみの関係を測定することで、その材料の引張強度や降伏応力、ヤング率などを求めることができる試験方法である。

材料に引張荷重を加え続けた時、初めは材料の弾性領域内であるため、応力とひずみが線形に増加していく。やがて、材料が比例限度に到達すると、この線形が崩れ、永久ひずみが残る弾性限度・降伏点に達する。降伏点以降、荷重は少し低下した後、再度増加を始め、材料の最大応力に到達し、破断に至る。一般的に、材料の設計範囲は弾性領域内に留まる比例限度とされる。

また、試験中の応力値は材料に対する負荷荷重の測定値と、材料の寸法より求めることができるが、ひずみ値の測定は、ひずみを求めたい位置にひずみゲージを貼って測定することが一般的であり、本研究でもその手法を採用した。ひずみゲージとは、電気絶縁体である樹脂ベース上に、抵抗材料となる金属箔と引出線であるゲージリードが取り付けられたものである。金属抵抗材料が、外力による伸びの影響で抵抗値が増加する性質を利用し、抵抗値の変化を電圧の測定値から求め、材料のひずみを算出することができる（式①）。ここで、ゲージ率 K_s とは、ひずみゲージの感度を表す係数であり、一般的に用いられる銅・ニッケル系やニッケル・クロム系合金のゲージ率 K_s は 2 程度である。ひずみゲージを引張方向に平行に接着剤で貼ることで、材料とひずみゲージの伸びが限りなく等しくすることが可能である。

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \varepsilon \dots \textcircled{1}$$

R : 抵抗値 [Ω], ΔR : 抵抗値の変化量 [Ω], K_s : ゲージ率 [-], ε : ひずみ [-]

1-6 4点曲げ試験

本研究では、JIS が規定した JIS K 7074（炭素繊維強化プラスチックの曲げ試験方法）に定められた、試験方法・評価方法に則り 4点曲げ試験を行った（試験片寸法は、試験片作製時点での母材の残量の都合で、規定より試験片幅の小さい条件で作製した）。曲げ試験とは、丸棒または角棒状の材料に曲げようとする荷重を加え、荷重とたわみの関係を測定することで、曲げ強さや曲げ弾性などを求めることができる試験方法である。曲げ試験は主に、材料の両端を支えて中央 1 点に荷重を加える 3点曲げと、左右両支点から等距離に等しい荷重を加える 4点曲げの 2種類が挙げられる。

3点曲げは容易に試験が可能だが、材料に与えられる曲げ荷重が一様でなく、基本的性質の評価には向いていないが、工業的に材料の曲げやすさを調査する目的では、この試験方法が一般的に用いられる。一方で、4点曲げは荷重が加わる 2点間で材料に加わる曲げ荷重が一様であるため、純粋な曲げの状態になり、基本的性質を評価することができる。

1-7 研究目的

1-3 で述べたように、繊維不連続部を内部に一つ有する CFRP 積層板の力学的特性や損傷挙動の評価は、これまでの研究でも進められており、繊維不連続部の状態の変化による評価も行われてきた。しかし、繊維不連続部を表面に有する CFRP 積層板や、繊維不連続部を複数有する CFRP 積層板に対する基礎的研究や評価は進んでいないのが現状である。

そこで、本研究では、炭素繊維の不連続部を複数有する CFRP 積層板について、力学的特性や損傷挙動を解明することで、繊維不連続部が CFRP 積層板に与える影響をより深く理解することを研究目的とした。

第 2 章 実験方法

この章では、本研究を進めるにあたり、どのような試験片を成形し、どのような評価試験を行ったかを説明する。繊維不連続部を数値的に評価できるように試験片の成形を行い、力学的特性や損傷挙動を評価するために、引張試験と 4 点曲げ試験の試験方法を記した。

2-1 試験片

2-1-1 材料

本研究で用いた試験片は、エポキシ系炭素繊維強化プラスチックのプリプレグ (T700SC/2592, 東レ株式会社) を使用して成形した。プリプレグを構成する母材 (熱硬化性樹脂) はエポキシ樹脂#2500, 強化材 (炭素繊維) は炭素繊維 T700SC であり、厚さは 0.14 mm である。以下の表 2-1, 2-2 に、その物性値を示す。

Table. 2-1 Details of CFRP

Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)	
CFRP (T700SC/2592, Torayca)	
Ply Thickness	0.14 mm
Type	Prepreg (preimpregnated composite fiber)

Table. 2-2 Material properties of CFRP

Unidirectional material properties	
Tensile strength in 0° direction [MPa]	2860
Young's modulus in 0° direction [GPa]	134
Flexural strength in 0° direction [MPa]	1690

2-1-2 試験片寸法, 繊維不連続部の条件

本研究で用いた試験片は, [0] の一方向材であり, 積層数は 8, 16, 32 ply の 3 種類成形した. 厚さ方向の寸法は, それぞれ約 1.12 mm, 2.24 mm, 4.48 mm である. また, 幅方向と長手方向の寸法は, 引張試験では 10 mm × 200 mm, 4 点曲げ試験では, 10 mm × 120 mm とした.

そして, 繊維不連続部を意図的に複数作るにあたり, 長手方向中心から同距離に, CFRP 積層板の表面上下に樹脂リッチがある位置と, 内部に樹脂リッチがある位置を用意し, その間の距離を樹脂リッチ間距離 (L) とした. 樹脂リッチ間距離 (L) の寸法は, L=5, 10, 20 mm の 3 種類とした. この樹脂リッチは, 中心の積層面を対称にしており, 内部樹脂リッチが重なるように成形した. つまり, 樹脂リッチ積層数が, [0]₈ では, 表面樹脂リッチが 2 ply で内部樹脂リッチが 4 ply, [0]₁₆ では, 表面樹脂リッチが 4 ply で内部樹脂リッチが 8 ply, [0]₃₂ では, 表面樹脂リッチが 8 ply で内部樹脂リッチが 16 ply となる (図 2-1) .

さらに, [0]₃₂ について, 長手方向の樹脂リッチ部の位置は変えずに, 樹脂リッチ積層数 (n) を変化させて樹脂リッチを細かく分散させた場合についても評価を行った. 具体的に, 樹脂リッチ積層数 (n) が, n=1, 2, 4, 8 ply の 4 種類である (図 2-2) . ここで, 対称の積層面での樹脂リッチ積層数は先述同様に 2 倍 (2n) である. また, n=8 ply は, 先述の [0]₃₂ で, 表面樹脂リッチが 8 ply, 内部樹脂リッチが 16 ply の試験片と同じ条件である.

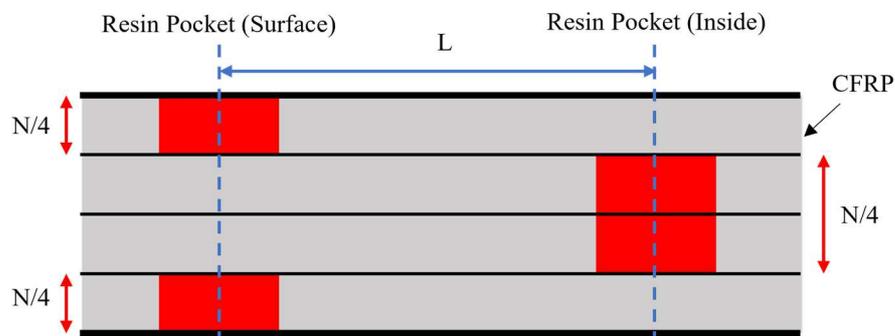


Fig. 2-1 Schematic diagram of specimen what is changed ply and the length between resin pockets

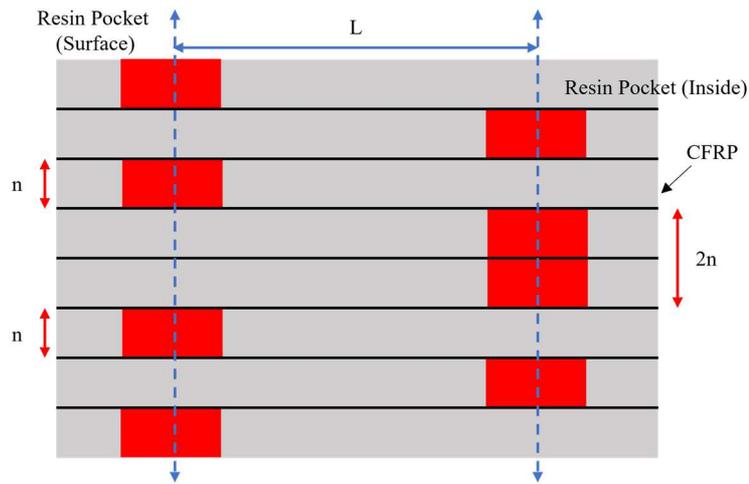


Fig. 2-2 Schematic diagram of specimen what is changed ply of per resin pocket

2-1-3 試験片断面の研磨

引張試験・4点曲げ試験中に断面を観察しやすくするために、研磨機（TegraPol-15, 丸東ストルアス株式会社, 図 2-3）を用いて研磨を行った。これは、ろくろのように回転する台に、円状の紙やすりやダイヤモンド研磨用の板を貼り付け、そこに研磨面を押し付けることで研磨することが可能な装置である。研磨手順として、まず、紙やすりで研磨を行った。具体的に、粗さ#500で30 s程度、粗さ#1000で1 min程度、粗さ#2000で2 min程度、粗さ#4000で3 min程度研磨し、徐々に細かくしながら磨いた。最後に、ダイヤモンド研磨を5 min程度施した。紙やすりでの研磨は水、ダイヤモンド研磨ではルーブリカント（ダイヤモンド砥粒の転がりを良くし、過度な損傷を防ぐ水性ベースの潤滑剤）を潤滑剤とした（図 2-4）。



Fig. 2-4 Surface of diamond polishing

Fig. 2-3 Polishing machine

2-2 CFRP 積層板の成形

CFRP 積層板はプリプレグを予め定めた指定数 (8, 16, 32 ply) 重ね、オートクレーブ成形法を用いて成形した。以下にその手順を記す。

1. プリプレグは冷凍庫でロール状に保管されており、そこから成形したい寸法に切り出して使用した。本研究では、成形時の寸法は、 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ とした。
2. 樹脂リッチ積層数 (n) に合わせてプリプレグを積層し、樹脂リッチを成形したい位置でカットした。例えば、樹脂リッチ間距離 (L) が $L=10\text{ mm}$ の時、 $120\text{ mm} \times 250\text{ mm}$, $130\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ となるようにカットした。
3. 樹脂リッチ積層数 (n) に合わせてカットしたプリプレグを全体の積層数に合うように積層した。この時、樹脂リッチとなる部分には 1 mm の間隔を空けるように積層した。このように積層することで、炭素繊維が途切れているが、その間隔に樹脂が流れ込んで、樹脂のみが存在する樹脂リッチ部が成形される。
4. 積層体の上下をアルミ板で挟み、その間にテフロンシートを挟んだ。テフロンシートは成形後に CFRP 積層板とアルミ板が剥がれなくなることを防ぐために必要である。また、加温・加圧時にこれらがずれてしまわないように、耐熱テープで固定した。
5. アルミ板で挟んだ積層体をバギングフィルム・両面テープで包装し、1か所にブリーザーを取り付けた。この時、アルミ板やブリーザーの端部によって、バギングフィルムが破れてしまうことを防ぐため、綿状のシートを使用した。
6. オートクレーブ (DANDELION, 株式会社羽生田鉄工所, 図 2-6) に積層体を入れ、ブリーザーを真空ポンプに接続して密閉した。この状態で、加温・加圧・真空引きすることで、CFRP 積層板を成形した。設定は、第一段階で、保持温度が $90.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加温が $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 保持圧力が 0 MPa , 保持時間が 60 min , であり、第二段階で、保持温度が $135.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加温が $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 保持圧力が 0.200 MPa , 保持時間が 270 min で行った。所要時間は冷却時間も合わせ、9時間程度であった。
7. オートクレーブ成形された CFRP 積層板のバリ取りを切断機 (複合材料切断機, AC-300CF, 丸東製作所, 図 2-7) を用いて切断した。樹脂リッチ間の中心を母材全体の中心とし、長手方向は 200 mm となるようにした。もう一方方向はバリを含め、左右 15 mm 程度ずつ切断した。

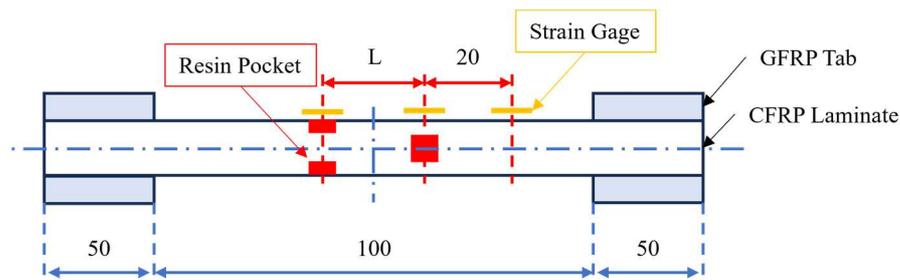


Fig. 2-5 Schematic diagram of specimen for tensile test

2-3 引張試験

引張試験により、引張強度の評価と損傷挙動を評価した。試験は、JIS K 7083 に定められた、試験片の寸法や試験方法に則り行った。試験片寸法は、10 mm × 200 mm であるが、長手方向の 200 mm のうち、両端 50 mm は引張試験機に固定させるための部分であり、評価部は中央 100 mm となる。また、引張試験はクロスヘッドの変位制御で行い、0.5 mm/min とした。以下にその手順を記す。ここで、試験数は各条件 5 本ずつ行い、そのうち 3 本は、以下の手順 3、7 に記す研磨面の観察も行った。また、手順の記載後に評価方法について記載する。

1. バリを取り除いた母材（約 220 mm × 200 mm）の引張試験機に固定させる位置に、GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastics）タブを接着した。これは、固定部で試験片の破壊や応力集中の発生を防ぐ役割がある。タブの厚さは、1 mm 程度である。まず、試験片の接着部にやすりを掛け、接着しやすいようにした。次に、接着剤（常温硬化型二液性エポキシ樹脂接着剤、株式会社スリーボンドホールディングス）を用いて GFRP タブを接着した。接着時間として半日以上置いた。
2. GFRP タブを接着した母材から、切断機を用いて 10 mm × 200 mm に引張試験用の試験片を切断した。
3. 引張試験中に断面を観察しやすくするために、研磨を行った。研磨後、光学顕微鏡（VHX-5000, 株式会社キーエンス, 図 2-8）を用いて、研磨面の観察・撮影を行った。
4. 引張試験中にひずみを測定するために、ひずみゲージ（KFGS-5-120-C1-11 L1M2R, 株式会社共和電業）を接着した。この時、GFRP タブの接着と同様に、試験片の接着部にやすりを掛けた。接着剤は、ひずみゲージ用の瞬間接着剤（CC-33A, 株式会社共和電業）を使用した。取り付け位置は、2 か所の樹脂リッチ部と、内部樹脂リッチから端部方向に 20 mm 離れた位置（繊維不連続部から十分離れた単純な CFRP 積層板と見なせる位置）、計 3 か所とした。また、試験片は中心の積層面で対称であるため、ひずみゲージは片面に寄せず、被らないように接着した。
5. ノギス・マイクロメータを用いて、試験片の正確な寸法（幅の長さ・厚さ）を測定した。幅の長さ・厚さは中央付近と左右に 30 mm 程度離れた位置、計 3 か所測定し、その平均値とした。
6. 引張試験機（TENSILON, RTF-1350, 株式会社エー・アンド・デイ, 図 2-9）を用いて、引張試験を行った。まず、試験片上部を固定してから荷重の原点調整を行い、下部を固定してから荷重が 0 になるように変位を調整した後、変位の原点調整を行った。次に、ひずみゲージをアンプに取り付け、アンプの原点調整や校正を行った。そして、クロスヘッドの変位制御を 0.5 mm/min に設定し、引張試験を試験片の破断まで実施した（図 2-10）。
7. 引張試験中、光学顕微鏡（VHX-1000, 株式会社キーエンス）を用いて断面を観察し、樹脂リッチ部付近の損傷を観察した。
8. 引張試験終了後、光学顕微鏡（VHX-5000, 株式会社キーエンス）を用いて、破断した試験

片の観察・撮影を行った。

2-3-1 強度評価

引張試験では、材料の強度を評価する値として、最大荷重・せん断強度を算出した。最大荷重は、荷重測定値の最大値を最大荷重とした。今回、破断まで試験を実施しており、破断する時点の荷重値が最大荷重である。せん断強度は、最大荷重を、繊維不連続部間の層間剥離を生じた部分の面積で割ることで算出した。せん断強度の算出は、以下の式②を用いた。

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{bL(N/n-2)} \dots \textcircled{2}$$

τ_{\max} : せん断強度 [MPa], P_{\max} : 最大荷重 [N], b : 試験片幅 [mm],

L : 樹脂リッチ間距離, N : 試験片積層数 [-], n : 一つ当たりの樹脂リッチ積層数 [-]

2-3-2 ヤング率の導出

ひずみゲージを取り付けた3か所それぞれについてヤング率（縦弾性率）を算出した。ヤング率は、材料の弾性領域内における、応力—ひずみ曲線の傾き（式③）を示し、材料の剛性を評価することが可能な、材料の力学的特性を理解するのに不可欠な値である。表面樹脂リッチ、内部樹脂リッチ付近のヤング率と、CFRP部のヤング率を比較することで、樹脂リッチが材料の剛性に及ぼす影響を評価した。

本研究では、応力—ひずみ曲線の作図後、線形と見なせる範囲について、最小二乗法による回帰分析を行い、算出された傾きをヤング率とした。

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \dots \textcircled{3}$$

E : ヤング率 [GPa], σ : 応力 [MPa], ε : ひずみ [mm]

2-4 4点曲げ試験

4点曲げ試験により、曲げ強度の評価と損傷挙動を評価した。試験は、JIS K 7074 に定められた、試験方法に則り行った（試験片寸法は、試験片作製時点での母材の残量の都合で、試験片幅について、規定では15 mm程度であるが、それより小さい10 mmで作製した）。試験片寸法は、10 mm × 120 mm であり、内側支点間距離は40 mm、外側支点間距離は80 mmとした。また、4点曲げ試験はクロスヘッドの変位制御で行い、0.2 mm/minとした。以下にその手順を記す。ここで、試験数は各条件3本ずつ行い、そのうち2本は、引張試験と同様に研磨面の観察も行った。また、手順の記載後に評価方法について記載する。

1. バリを取り除いた母材（約220 mm × 200 mm）から、切断機を用いて10 mm × 120 mm に4点曲げ試験用の試験片を切断した。
2. 4点曲げ試験中に断面を観察しやすくするために、研磨機を用いて研磨を行った。研磨後、光学顕微鏡（VHX-5000, 株式会社キーエンス）を用いて、研磨面の観察・撮影を行った。
3. 引張試験の手順5と同様の手順で、試験片の幅の長さ・厚さを測定した。

4. 万能試験機 (SC-5H, 株式会社 JT トーシ, 図 2-11) を用いて, 4 点曲げ試験を行った. まず, 外側支点間距離 (80 mm) に調整した支点到試験片を設置し, クロスヘッドに内側支点間距離 (40 mm) に調整した支点を取り付け, 試験片に当たらない程度に接近させた. 次に, 荷重の原点調整を行い, アンプの原点調整・校正を行った. そして, クロスヘッドの変位制御を 0.2 mm/min に設定し, 試験片が破断する, または, 荷重が急落した後, 荷重の変動がなくなるまで, 4 点曲げ試験を実施した (図 2-12) .
5. 4 点曲げ試験中, 光学顕微鏡 (VHX-1000, 株式会社キーエンス) を用いて断面を観察し, 樹脂リッチ部付近の損傷を観察した.
6. 4 点曲げ試験終了後, 光学顕微鏡 (VHX-5000, 株式会社キーエンス) を用いて, 試験後の試験片の観察・撮影を行った.

2-4-1 強度評価

4 点曲げ試験では, 材料の強度を評価する値として, 最大荷重・曲げ強度を算出した. 最大荷重は, 荷重が急落する前の最大値とし, また, その時のたわみ値を最大たわみとした. 曲げ強度は, JIS K 7074 に則り, 式④より導出した.

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max} l}{bh^2} \dots \textcircled{4}$$

σ_{\max} : 曲げ強度 [MPa], P_{\max} : 最大荷重 [N], l : 外側支点間距離 [mm],
 b : 試験片幅 [mm], h : 試験片厚さ [mm]

2-4-2 曲げ弾性率の導出

4 点曲げ試験から得られた荷重—たわみ曲線から, 曲げ弾性率を導出した. 曲げ弾性率は, 弾性領域内における, 応力—たわみ線図の傾きを示し, 引張試験におけるヤング率に相当する. また, 曲げ弾性率は, JIS K 7074 に則り, 式⑤より荷重—たわみ線図の傾きから導出することができる.

$$E = \frac{23l^3}{108bh^3} \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \dots \textcircled{5}$$

E : 曲げ弾性率 [GPa], l : 外側支点間距離 [mm], P : 荷重 [N], δ : たわみ [mm],
 b : 試験片幅 [mm], h : 試験片厚さ [mm]



Fig. 2-6 Autoclave machine



Fig. 2-7 Cutting machine for composite materials



Fig. 2-8 Microscope



Fig. 2-9 Tensile testing machine

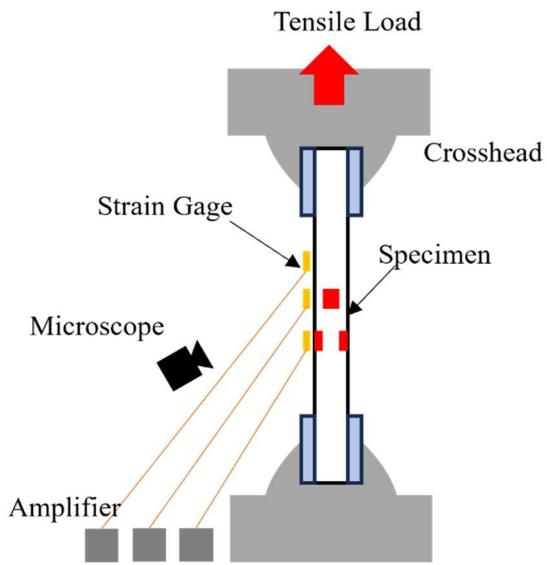


Fig. 2-10 Schematic diagram of tensile test



Fig. 2-11 Universal testing machine

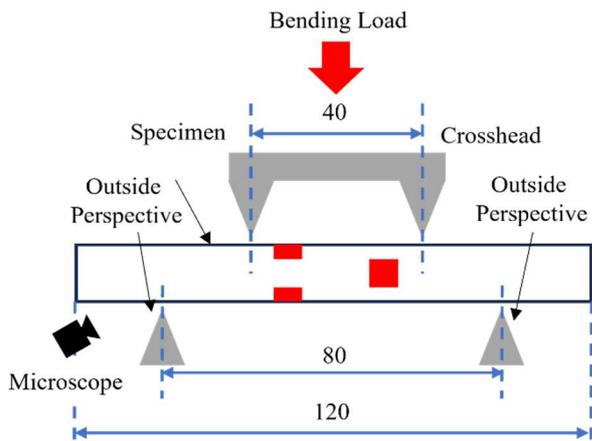


Fig. 2-12 Schematic diagram of 4 point bending machine

第3章 実験結果及び考察

この章では、実験結果とその考察を記述した。引張試験・4点曲げ試験それぞれについて、実験結果を踏まえ、本研究の目的に沿った整理と考察を行った。

各評価軸について、3つのパラメータ（積層数・樹脂リッチ間距離・一つ当たりの樹脂リッチ積層数）ごとに整理して結果をまとめた。当初の比較方法として、他のパラメータの条件を揃えることで比較を行っていたが、積層数を変化させた条件については別の方法で比較を行った。それは、試験片の厚さ（積層数）と樹脂リッチ間距離の比が等しい条件について比較を行うという比較方法だ。積層数のみの変化で比較したいとき、樹脂リッチ間距離が同じ条件で比較すると、試験片全体で見た時に積層数が大きい条件ほど相対的に樹脂リッチ間距離が近い条件になってしまうためである。そこで、本研究では、積層数の変化による評価を行う際、8 ply, L=5 mm・16 ply, L=10 mm, 32 ply, L=20 mm の3条件を比較することで評価を行った。

3-1 引張試験

引張試験の結果について、最大荷重・せん断強度による強度評価を 3-1-1、ヤング率による力学的特性（剛性）の評価を 3-1-2、試験中に光学顕微鏡を用いて観察した、損傷挙動の評価を 3-1-3 に記す。また、評価結果記載後、各条件の応力—ひずみ曲線と、光学顕微鏡で撮影した画像を、条件ごとにまとめて記す。

ここで、各条件の試験本数について、最終的に強度評価値の算出が5本分、かつ、研磨した断面を観察した試験片が3本ずつできるように試験したが、試験の失敗により評価した値によって本数が異なっている。具体的に、研磨が不十分で試験数を増やした条件や、試験は破断まで行えたが、ひずみゲージによるひずみの測定が失敗したために、ヤング率の算出数が少ない条件が存在する。それぞれの条件について、評価軸ごとの本数をまとめた表を表 3-1, 3-2 に記す。

Table.3-1 The number of specimen what is changed ply and the length between resin pockets about each evaluation

ply [-]	L [mm]	Strength	Young's Modulus	Damage Observation
8	5	5	5	3
	10	7	5	3
	20	5	4	3
16	5	6	5	3
	10	5	5	3
	20	7	7	3

32	5	8	8	3
	10	5	4	3
	20	8	8	3

Table.3-2 The number of specimen what is changed ply of per resin pocket about each evaluation

n [-]	L [mm]	Strength	Young's Modulus	Damage Observation
1	5	5	5	3
	10	7	6	3
	20	7	7	3
2	5	5	5	3
	10	5	5	3
	20	6	5	3
4	5	5	5	3
	10	6	6	3
	20	6	6	3
8	5	8	8	3
	10	5	4	3
	20	8	8	3

3-1-1 強度評価

各条件の試験片について、最大荷重・せん断強度の値を表 3-3, 3-4 に記す。ここで、表内の (AVG) は平均値、(SD) は標準偏差値を表す。また、積層数・樹脂リッチ間距離 (L) ・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の変化に着目して、最大荷重を比較した棒グラフを図 3-1 ~ 3-3 に、せん断強度を比較した棒グラフを図 3-4 ~ 3-6 に記す。ここで、各グラフの平均・標準偏差について、サンプル数は表 3-1, 3-2 の「強度」の数に準ずる。

・積層数を変化させたとき

図 3-1, 3-4 より、積層数の増加に伴い、最大荷重は増加する一方、せん断強度は減少する党結果が得られた。具体的に、最大荷重は 8 ply から 16 ply で 186%, 16 ply から 32 ply で 156% になり、せん断強度は 8 ply から 16 ply で 93%, 16 ply から 32 ply で 79% になった。

・樹脂リッチ間距離 (L) を変化させたとき

図 3-2, 3-5 より、L の増加に伴い最大荷重は増加し、せん断強度は減少するという結果が得られた。具体的に、それぞれの積層数の条件の結果を平均すれば、最大荷重は L=5 mm から

L=10 mm で 160%, L=10 mm から L=20 mm では 124%になり, せん断強度は L=5 mm から L=10 mm で 81%, L=10 mm から L=20 mm では 62%になった.

・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) を変化させたとき

図 3-5, 3-6 より, n の増加に伴い, 最大荷重は減少する一方, せん断強度は増加するという結果が得られた. 具体的に, それぞれの L の条件の結果を平均すれば, 最大荷重は n=1 から n=2 で 80%, n=2 から n=4 で 58%, n=4 から n=8 で 49%になり, せん断強度は n=1 から n=2 で 173%, n=2 から n=4 で 138%, n=4 から n=8 で 146%になった.

ここで, n=1, 2 の条件に関して, 樹脂リッチのまとまりごとにその層間で破断することに加えて, 樹脂リッチ付近で繊維破断を伴う破壊形態を示した. これは, 脆性部である樹脂リッチと層間はく離面の数を増やしたことで応力の集中を抑制でき, 本来の CFRP 積層板に近い強度を示したと考えることができる.

以上の結果をまとめると, 最大荷重は, 積層数・樹脂リッチ間距離 (L) の増加に伴い増加する一方, 一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の増加に伴い減少することが分かる. また, せん断強度は, 積層数・樹脂リッチ間距離 (L) の増加に伴い減少する一方, 一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の増加に伴い増加することが分かる.

ここで, せん断強度の結果について考察を行う. 積層数の増加・L の増加・n の減少に伴い, せん断強度は減少した. つまり, 言い換えれば最大荷重が増加する条件では, せん断強度が減少したことになる. これは, 試験片全体として最大荷重は増加するものの, 脆性部である樹脂リッチの耐荷重は大きく変化しないため, 樹脂リッチの限界荷重に先に到達してしまうためと考えられる.

この考察の正当性を確かめるために, 実際の試験過程における損傷挙動を比較する. 例えば, 16 ply について樹脂リッチ間距離 (L) を変化させた時のクラック発生応力を比較すると, L=5 mm では 240 MPa, L=10 mm では 310 MPa, L=20 mm では 350 MPa であった(これらの値はサンプル数三つの平均値である.). 一方で, 各条件における最大応力は, L=5 mm では 240 MPa, L=10 mm では 340 MPa, L=20 mm では 470 MPa であり, 試験片全体の強度に対し, 低い応力値で損傷が発生したことが分かる. これは, 先程の考察と対応している.

Table.3-3 Max load and shear strength of specimens what are changed ply and the length between resin pockets

ply [-]	L [mm]	No.	Max Load [N]	Shear Strength [MPa]	Max Load (AVG) [N]	Max Load (SD) [N]	Shear Strength (AVG) [MPa]	Shear Strength (SD) [MPa]
8	5	1	4444	44.5	4419	22.9	44.2	0.21
		2	4395	44.0				
		3	4425	44.2				

		4	4348	43.5				
		5	4484	44.7				
	10	1	7143	35.7	7080	51.4	35.9	0.24
		2	6944	35.4				
		3	6888	35.1				
		4	7048	35.9				
		5	7079	36.1				
		6	7174	36.4				
		7	7284	37.0				
	20	1	8175	21.1	8024	87.9	20.4	0.26
		2	8122	20.7				
		3	7682	19.5				
		4	8090	20.7				
		5	8050	20.3				
16	5	1	5957	58.9	5812	78.7	57.8	0.79
		2	5832	57.5				
		3	5594	55.8				
		4	5897	57.9				
		5	5561	55.8				
		6	6029	60.9				
	10	1	7646	38.8	8213	198.0	41.2	0.85
		2	8493	43.1				
		3	7850	39.4				
		4	8391	42.1				
		5	8683	42.4				
	20	1	10611	26.2	11107	197.8	27.6	0.51
		2	11098	28.0				
		3	10560	26.5				
4		10923	27.0					
5		11086	27.6					
6		11368	27.9					
7		12105	30.3					
32	5	1	5725	58.4	5803	141.2	58.0	1.21
		2	5452	55.5				
		3	5049	51.3				
		4	6080	59.6				
		5	5992	59.3				

	6	6290	62.0				
	7	6063	60.8				
	8	5774	56.9				
10	1	10572	51.5	10387	150.6	51.7	0.67
	2	10322	50.3				
	3	10072	51.4				
	4	10870	54.3				
	5	10099	51.2				
20	1	13434	34.0	12832	177.6	32.6	0.52
	2	13516	34.1				
	3	12924	32.8				
	4	12551	31.5				
	5	13071	34.5				
	6	12410	30.9				
	7	12684	32.0				
	8	12063	31.0				

Table.3-4 Max load and shear strength of specimens what are changed ply of per resin pocket

n [-]	L [mm]	No.	Max Load [N]	Shear Strength [MPa]	Max Load (AVG) [N]	Max Load (SD) [N]	Shear Strength (AVG) [MPa]	Shear Strength (SD) [MPa]
1	5	1	33929	23.3	38136	1595.0	25.5	0.93
		2	36531	24.4				
		3	36930	24.7				
		4	43149	28.6				
		5	40141	26.6				
	10	1	42074	13.8	43645	1102.1	14.4	0.34
		2	41852	13.7				
		3	38593	13.0				
		4	46243	15.2				
		5	46634	15.4				
		6	45296	14.9				
		7	44824	14.8				

20	1	42088	6.9	42560	614.3	7.1	0.14	
	2	40063	6.5					
	3	44210	7.5					
	4	42916	7.3					
	5	41415	7.0					
	6	44841	7.6					
	7	42388	7.2					
2	5	1	22519	23314	607.6	33.1	0.70	
		2	23376					33.5
		3	21480					30.6
		4	24392					34.6
		5	24805					34.2
	10	1	36648	25.9	36176	682.0	25.6	0.38
		2	37462	26.4				
		3	35857	25.3				
		4	37231	26.3				
		5	33684	24.3				
	20	1	41191	14.5	41196	484.8	15.0	0.19
		2	42457	15.8				
		3	39722	14.8				
		4	41796	15.1				
		5	42200	15.2				
6		39810	14.8					
4	5	1	14169	14944	252.2	49.8	0.71	
		2	15213					50.9
		3	14782					49.3
		4	15696					51.9
		5	14861					49.2
	10	1	17698	28.8	17739	180.1	30.5	0.48
		2	18134	31.6				
		3	17811	31.0				
		4	17628	30.7				
		5	18192	31.5				
		6	16969	29.4				
	20	1	28184	22.9	25680	549.5	21.6	0.32
		2	24187	21.0				
		3	25015	21.7				

		4	25390	20.9				
		5	25780	21.2				
		6	25525	22.2				
	5	1	5725	58.4	5803	141.2	58.0	1.21
		2	5452	55.5				
		3	5049	51.3				
		4	6080	59.6				
		5	5992	59.3				
		6	6290	62.0				
		7	6063	60.8				
		8	5774	56.9				
8	10	1	10572	51.5	10387	150.6	51.7	0.67
		2	10322	50.3				
		3	10072	51.4				
		4	10870	54.3				
		5	10099	51.2				
20	20	1	13434	34.0	12832	177.6	32.6	0.52
		2	13516	34.1				
		3	12924	32.8				
		4	12551	31.5				
		5	13071	34.5				
		6	12410	30.9				
		7	12684	32.0				
		8	12063	31.0				

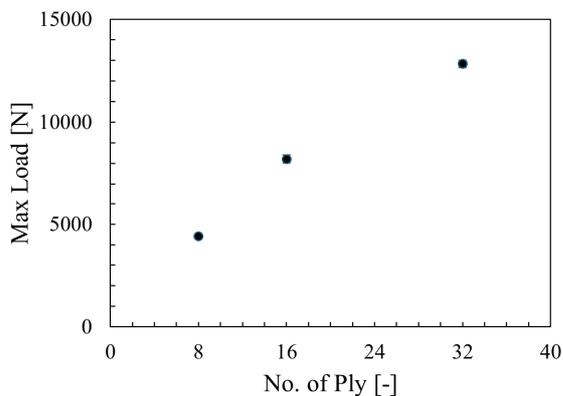


Fig. 3-1 The relationship between max load and ply

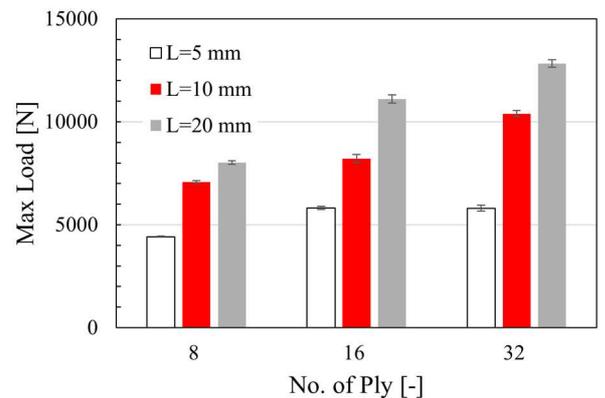


Fig. 3-2 The relationship between max load and the length between resin pockets, per ply

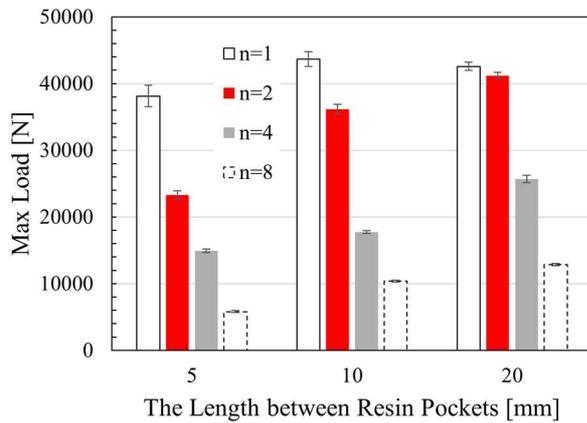


Fig. 3-3 The relationship between max load and ply of per resin pocket, per the length between resin pockets

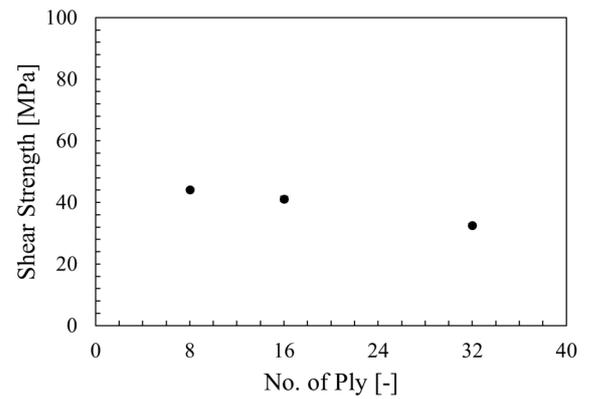


Fig. 3-4 The relationship between shear strength and ply

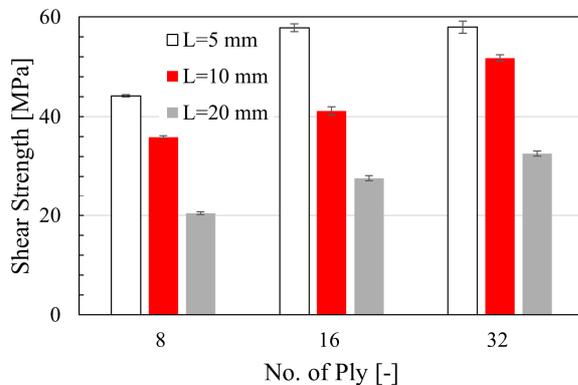


Fig. 3-5 The relationship between shear strength and the length between resin pockets, per ply

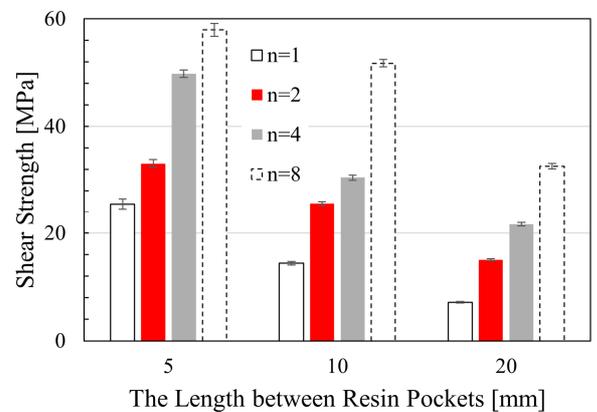


Fig. 3-6 The relationship between shear strength and ply of per resin pocket, per the length between resin pockets

3-1-2 ヤング率による力学的特性評価

引張試験によって得られた応力-ひずみ曲線から、各条件について算出したヤング率の値を表 3-5, 3-6 に記す。ひずみゲージごとのヤング率を、積層数・樹脂リッチ間距離 (L)・一当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の変化に着目して比較したグラフを、No.1 (表面側樹脂リッチ付近), No.2 (内部樹脂リッチ付近), No.3 (樹脂リッチから十分離れた CFRP 部) それぞれ図 3-7~3-9, 3-10~3-12, 3-13~3-14 に記す。ここで、各グラフの平均・標準偏差について、サンプル数は表 3-1, 3-2 の「ヤング率」の数に準ずる。

また、それぞれの条件における応力-ひずみ曲線は以下のようにになっており、これらのグラフから算出したヤング率を表 3-5, 3-6 に記載した。応力-ひずみ曲線にはひずみゲージの番号に記載したグラフを記載した。条件ごとに整理した結果と考察を記載する。

(1) No.1 のヤング率

・積層数を変化させたとき

図 3-7 より、ひずみゲージ No.1 (表面側樹脂リッチ) では、積層数の増加に伴いヤング率は減少した。具体的に、それぞれの L の条件の結果を平均すれば、8 ply から 16 ply で 80%、16 ply から 32 ply で 59%になるという結果が得られた。

・樹脂リッチ間距離 (L) を変化させたとき

図 3-8 より、ひずみゲージ No.1 (表面側樹脂リッチ) では、L の増加に伴いヤング率は増加した。具体的に、それぞれの積層数の条件の結果を平均すれば、L=5 mm から L=10 mm で 120%、L=10 mm から L=20 mm で 123%になるという結果が得られた。

・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) を変化させたとき

図 3-9 より、ひずみゲージ No.1 (表面側樹脂リッチ) では、n の増加に伴いヤング率は減少した。具体的に、それぞれの L の条件の結果を平均すれば、n=1 から n=2 で 69%、n=2 から n=4 で 62%、n=4 から n=8 で 54%になるという結果が得られた。

以上の結果をまとめると、ひずみゲージ No.1 (表面側樹脂リッチ) におけるヤング率は、積層数・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の増加に伴い減少する一方、樹脂リッチ間距離 (L) の増加に伴い増加することが分かる。

ここで、積層数との関係性を考察する。これは、せん断強度に対する考察同様、試験片全体として最大荷重は増加するものの、脆性部である樹脂リッチの耐荷重は大きく変化しないため、応力として低い値でひずみが進行することが原因と考えられる。

次に、樹脂リッチ間距離 (L) ・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) との関係性について考察する。いずれも、層間はく離面の総断面積が大きくなる条件において、ヤング率が大きくなることに注目する。図 3'-1, 3'-2 に示すように、荷重を受け持つ層間はく離面 (図中の赤線部) が増加することにより、層間はく離面のひずみが減少し、樹脂リッチ部の応力集中が抑制されると考えられる。

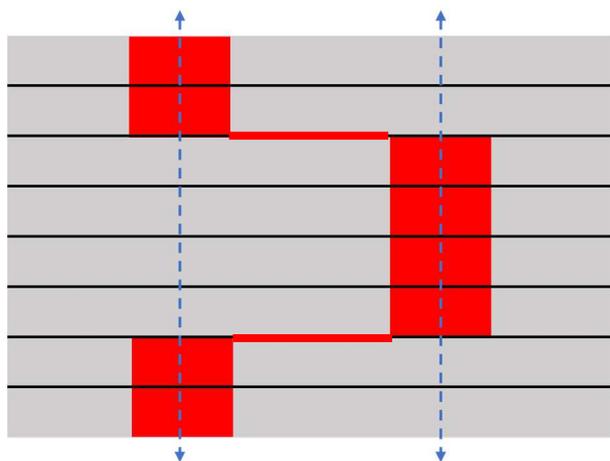


Fig. 3'-1 Schematic diagram of specimen with few delamination surfaces

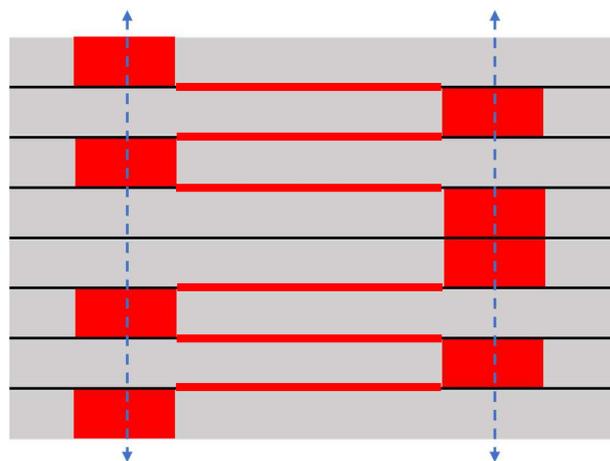


Fig. 3'-2 Schematic diagram of specimen with many delamination surfaces

(2) No.2 のヤング率

No.2 (内部樹脂リッチ) でのヤング率の結果について, 32 ply($n=8$), $L=5$ mm の条件では, ヤング率の平均値が 172 GPa となり, 他の条件に比べ著しく値が大きいことに加え, 物性値で定められたヤング率の値 (123 GPa) とも大きく値が離れていたため, 試験片成形時や評価試験実施時の失敗などを考慮し, 外れ値と判断して評価の対象から除外した.

・積層数を変化させたとき

図 3-10 より, ひずみゲージ No.2 (内部樹脂リッチ) では, 積層数の増加に伴いヤング率は増加した. 具体的に, 8 ply から 16 ply で 111%, 16 ply から 32 ply で 117%になるという結果が得られた.

・樹脂リッチ間距離 (L) を変化させたとき

図 3-11 より, ひずみゲージ No.2 (内部樹脂リッチ) では, L の増加に伴うヤング率の変化は小さいことが分かった. 具体的に, $L=5$ mm から $L=10$ mm で 97%, $L=10$ mm から $L=20$ mm で 98%になるという結果が得られた.

・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) を変化させたとき

図 3-12 より, ひずみゲージ No.2 (内部樹脂リッチ) では, n の増加に伴いヤング率は増加した. 具体的に, No.2 のヤング率は $n=1$ から $n=2$ で 107%, $n=2$ から $n=4$ で 120%, $n=4$ から $n=8$ で 91%になるという結果が得られた.

以上の結果をまとめると, ひずみゲージ No.2 (内部樹脂リッチ) のヤング率は, 積層数・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の増加に伴い増加する一方, 樹脂リッチ間距離 (L) との関係性は低いことが分かる.

ここで, 積層数・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) との関係性について考察する. 内部樹脂リッチにおけるヤング率との関係性は, 表園側樹脂リッチにおけるヤング率との関係性と逆の傾向を示した. これは, 図 3'-3, 3'-4 のように, 樹脂リッチ部とひずみゲージを貼った表面までの距離 (積層数) (図中の黒矢印) が増加し, 樹脂リッチ部のひずみの変化が反映されにくくなったためと考えられる.

また, 樹脂リッチ間距離 (L) との関係性が小さいのは, L が変化してもひずみゲージと樹脂リッチ部との距離 (積層数) に変化が生じないためである.

ここで, 本研究ではヤング率の算出方法として, 試験片の表面にひずみゲージを貼り, そのひずみの変化から求めるという方法を採用した. そのため, 表面のひずみの変化は正しく算出されたが, 内部のひずみの変化が本来より小さく計測されたと考えられる. 内部のひずみを正確に評価するために, サンプリングモアレ法やデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation : DIC) に代表される, 全視野画像計測法の利用することで改善が期待できる.

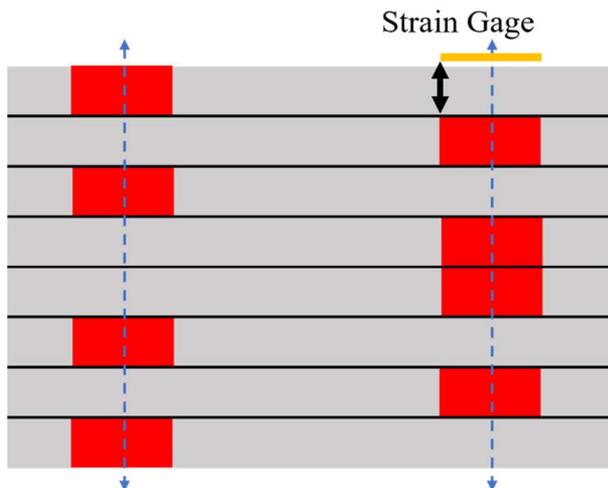


Fig. 3'-3 Schematic diagram of specimen with few plies between strain gage and inside resin pocket

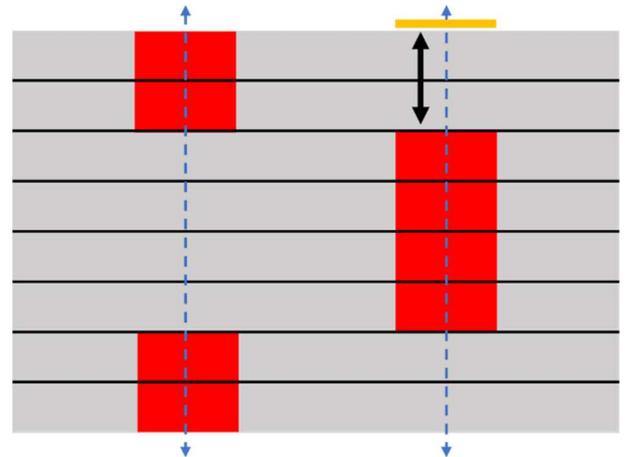


Fig. 3'-4 Schematic diagram of specimen with many plies between strain gage and inside resin pocket

(3) No.3 のヤング率

図 3-13, 3-14 より, No.3 (樹脂リッチから十分離れた CFRP 部) のヤング率 E の値が, 120 [GPa] \leq E \leq 130 [GPa] 程度であり, 変化が少ないことが分かる. ヤング率は材料固有に定められる定数であり, その形状や寸法に依らない値であり, 試験結果でも同じことが言えることから, 本試験の妥当性が示された. 2-1-1 の試験片材料における表 2-2 より, ヤング率は 134 GPa であるため, 繊維不連続部の影響により 8%程度剛性が低下したことが分か

Table. 3-5 Young's modulus of specimens what are changed ply and the length between resin pockets

ply [-]	L [mm]	No.	Young's Modulus [GPa]			Young's Modulus (AVG) [GPa]			Young's Modulus (SD) [GPa]		
			No. (Strain Gage)			No. (Strain Gage)			No. (Strain Gage)		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
8	5	1	41.7	71.9	126.4	42.3	76.9	123.7	1.68	2.86	1.99
		2	48.4	86.7	123.4						
		3	42.6	76.6	128.2						
		4	39.1	70.7	123.9						
		5	39.6	78.8	116.5						
	10	1	61.0	100.8	121.2	48.4	77.3	119.1	3.17	5.97	2.51
		2	45.9	67.8	109.6						
		3	45.1	71.0	120.2						
		4	45.4	73.1	120.0						
		5	44.5	73.7	124.5						

	20	1	73.5	73.5	129.2	66.7	85.0	132.9	7.95	5.47	3.99
		2	73.3	95.0	127.7						
		3	76.9	93.7	144.8						
		4	43.0	77.9	130.0						
16	5	1	26.7	81.5	116.5	28.6	90.8	123.6	0.92	2.96	2.07
		2	28.5	88.4	124.1						
		3	26.8	93.3	125.5						
		4	29.5	90.9	129.2						
		5	31.7	99.6	122.8						
	10	1	25.8	91.5	109.5	33.6	85.5	121.3	4.88	3.64	4.17
		2	29.7	82.0	129.2						
		3	51.1	86.1	130.8						
		4	24.5	94.1	122.9						
		5	37.0	73.6	114.0						
	20	1	62.6	77.6	127.9	37.7	83.9	129.1	4.35	4.16	1.39
		2	30.0	90.2	126.0						
		3	31.7	89.0	124.1						
		4	30.9	96.9	134.9						
		5	33.5	75.9	130.7						
		6	40.8	91.8	128.2						
7		34.7	65.8	131.8							
32	5	1	14.6	259.1	123.5	12.9	172.4	123.2	0.52	16.49	1.73
		2	10.9	150.6	116.5						
		3	13.7	177.9	119.8						
		4	12.6	169.2	123.4						
		5	10.6	169.4	128.2						
		6	13.1	213.2	129.6						
		7	14.2	118.8	117.8						
		8	13.1	121.1	127.1						
	10	1	18.0	125.5	116.0	16.5	115.4	119.0	1.86	6.67	2.31
		2	16.9	96.6	115.6						
		3	11.3	115.5	118.6						
		4	20.0	124.2	125.6						
	20	1	20.4	106.7	119.5	19.9	99.6	122.8	1.40	3.19	1.83
		2	19.4	104.0	118.4						
		3	19.0	105.2	122.5						
		4	28.8	100.1	126.3						

	5	19.2	105.7	133.6						
	6	17.2	79.9	117.7						
	7	15.3	93.4	121.5						
	8	20.1	101.8	123.3						

Table. 3-6 Young's modulus of specimens what are changed
ply of per resin pocket

n [-]	L [mm]	No.	Young's Modulus [GPa]			Young's Modulus (AVG) [GPa]			Young's Modulus (SD) [GPa]		
			No. (Strain Gage)			No. (Strain Gage)			No. (Strain Gage)		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	5	1	84.9	97.8	134.0	76.3	94.1	130.1	4.37	1.35	1.74
		2	87.8	95.7	133.0						
		3	66.0	91.8	131.1						
		4	74.6	94.8	127.6						
		5	68.1	90.3	124.7						
	10	1	64.8	91.1	121.8	65.7	90.3	122.3	1.42	1.18	1.47
		2	69.2	92.6	126.3						
		3	66.4	93.3	126.9						
		4	67.1	85.4	117.8						
		5	67.5	88.7	121.0						
		6	59.2	90.5	120.0						
	20	1	72.8	99.0	125.8	69.6	98.0	125.5	0.98	1.53	0.79
		2	70.9	93.0	122.2						
		3	69.8	100.8	128.0						
		4	71.3	101.3	127.2						
		5	71.6	100.0	123.6						
		6	70.9	100.4	125.0						
		7	64.8	91.3	127.0						
2	5	1	44.0	112.8	126.5	49.2	106.9	126.2	1.38	1.80	1.04
		2	49.8	106.6	128.2						
		3	49.5	107.3	128.3						
		4	50.3	101.5	122.8						
		5	52.3	106.2	125.0						
	10	1	47.8	89.5	128.4	47.0	96.5	124.2	0.34	1.86	1.66
		2	47.3	97.7	120.0						

		3	47.4	96.6	122.6							
		4	45.8	99.0	122.3							
		5	46.8	100.0	127.9							
	20	1	50.3	100.2	125.3	49.8	99.4	128.3	0.66	1.14	0.88	
		2	51.1	95.8	128.8							
		3	51.2	102.7	130.3							
		4	48.5	100.1	129.7							
		5	48.1	98.3	127.7							
4	5	1	29.0	121.6	115.5	28.0	125.0	119.7	0.25	1.60	1.11	
			2	28.2	121.8							122.1
			3	27.7	124.0							120.0
			4	27.9	128.6							120.5
			5	27.5	128.9							120.3
		10	1	28.7	167.0	129.2	26.5	132.3	124.8	0.78	11.78	1.75
			2	24.9	104.2	121.0						
			3	24.5	108.4	129.4						
			4	24.9	107.0	118.8						
			5	27.6	158.2	125.6						
			6	28.3	149.2	124.6						
		20	1	36.4	108.7	127.6	36.6	106.0	126.2	0.38	1.91	1.17
			2	37.6	104.2	127.0						
			3	37.2	99.1	128.3						
			4	35.7	103.0	121.1						
			5	35.3	109.2	124.6						
			6	37.4	111.7	128.7						
	8	5	1	14.6	259.1	123.5	14.7	194.8	140.4	0.78	16.78	6.08
			2	10.9	150.6	116.5						
			3	13.7	177.9	119.8						
			4	16.0	207.9	152.9						
			5	12.8	201.0	152.5						
			6	15.9	264.9	155.7						
			7	17.9	149.6	147.1						
			8	16.0	147.6	154.8						
		10	1	18.0	125.5	116.0	17.3	121.0	123.4	1.18	8.72	4.90
			2	16.9	96.6	115.6						
			3	14.3	137.9	136.4						
			4	20.0	124.2	125.6						

20	1	20.4	106.7	119.5	19.9	99.6	122.8	1.40	3.19	1.83
	2	19.4	104.0	118.4						
	3	19.0	105.2	122.5						
	4	28.8	100.1	126.3						
	5	19.2	105.7	133.6						
	6	17.2	79.9	117.7						
	7	15.3	93.4	121.5						
	8	20.1	101.8	123.3						

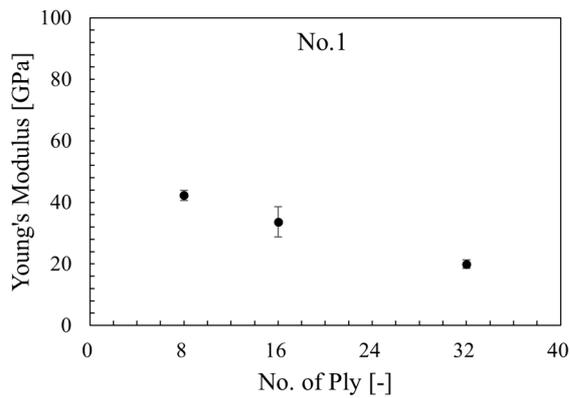


Fig. 3-7 The relationship between Young's modulus(No.1) and ply

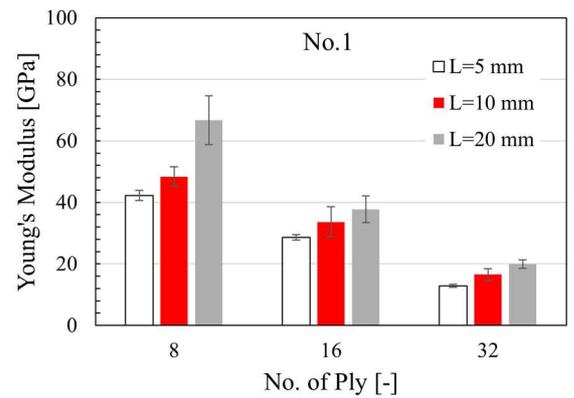


Fig. 3-8 The relationship between Young's modulus(No.1) and the length between resin pockets, per ply

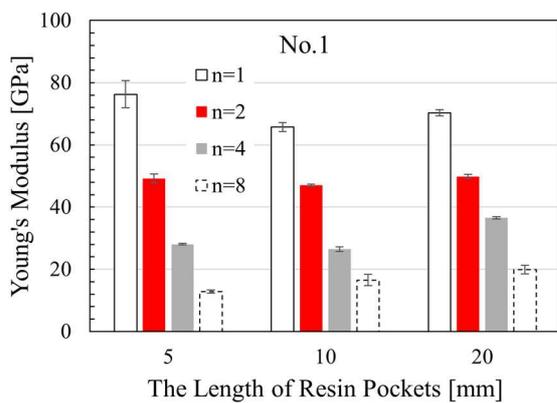


Fig. 3-9 The relationship between Young's modulus(No.1) and ply of oer resin pocket, per the length between resin pockets

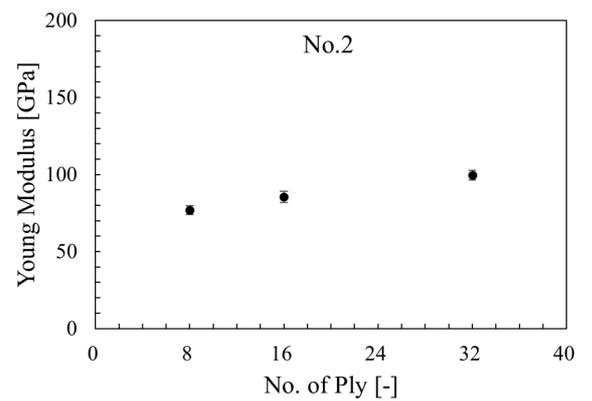


Fig. 3-10 The relationship between Young's modulus(No.2) and ply, per the length between resin pockets

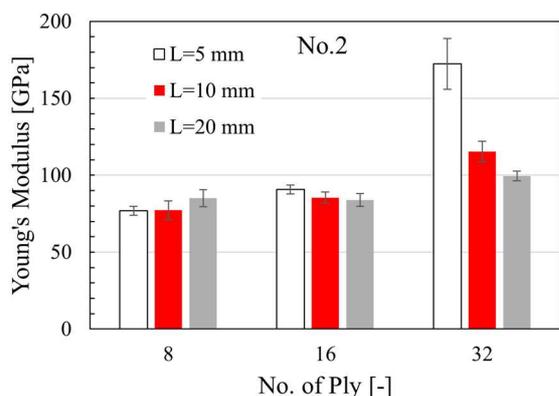


Fig. 3-11 The relationship between Young's modulus(No.2) and the length between resin pockets, per ply

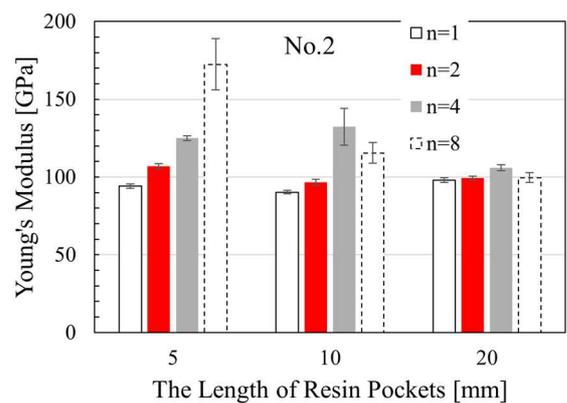


Fig. 3-12 The relationship between Young's modulus(No.2) and ply of oer resin pocket, per the length between resin pockets

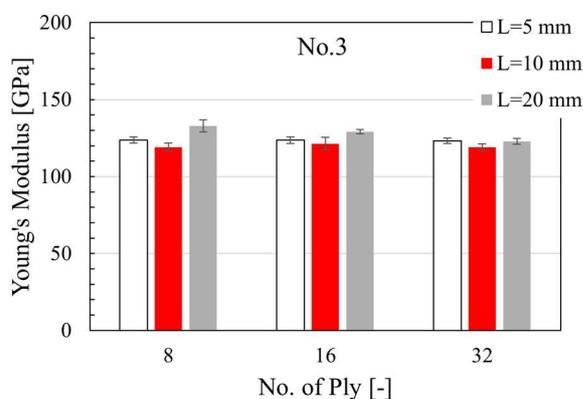


Fig. 3-13 The relationship between Young's modulus(No.3) and ply, per the length between resin pockets

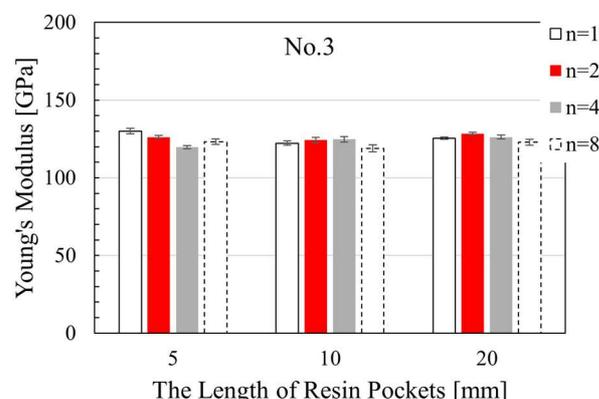


Fig. 3-14 The relationship between Young's modulus(No.3) and ply of oer resin pocket, per the length between resin pockets

3-2 4点曲げ試験

4点曲げ試験の結果について、最大荷重・最大たわみ・曲げ強度による強度評価を 3-2-1、曲げ弾性率による力学的特性(剛性)の評価を 3-2-2、試験中に光学顕微鏡を用いて観察した、損傷挙動の評価を 3-2-3 に記す。また、評価結果記載後、各条件の荷重-たわみ曲線と、光学顕微鏡で撮影した画像を、条件ごとにまとめて記す。

ここで、各条件の試験本数について、各条件 3 本ずつ実施したが、そのうち 2 本ずつ断面を研磨し、損傷挙動を観察した。

試験は、荷重が急落してから 2 min 程度試験を継続し、破断に至るか荷重の変化が大きく見られなくなったことを確認できるまで実施した。

3-2-1 強度評価

各条件の試験片について、最大荷重・最大たわみの値を表 3-9, 3-10 に記す。また、曲げ強度の値を表 3-11, 3-12 に記すが、3-2-2 で記す曲げ弾性率の値も同表に記載する。ここで、表内の (AVG) は平均値、(SD) は標準偏差値を表す。また、積層数・樹脂リッチ間距離 (L) ・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の変化に着目して、最大荷重・最大たわみ・曲げ強度を比較した棒グラフをそれぞれ図 3-313~3-315, 3-316~3-318, 3-319~3-321 に記す。

・積層数を変化させたとき

図 3-313, 3-316, 3-319 より、積層数の増加に伴い、最大荷重は増加する一方、最大たわみ・曲げ強度は減少するという結果が得られた。具体的に、最大荷重は 8 ply から 16 ply で 259%, 16 ply から 32 ply で 328% になり、最大たわみは 8 ply から 16 ply で 46%, 16 ply から 32 ply で 56% になり、曲げ強度は 8 ply から 16 ply で 72%, 16 ply から 32 ply で 82% になった。

この結果は、引張試験の積層数を変化させたときのせん断強度の変化に対応している。

・樹脂リッチ間距離 (L) を変化させたとき

図 3-314, 3-317, 3-320 より、L の増加に伴い、最大荷重・最大たわみ・曲げ強度は増加するという結果が得られた。具体的に、それぞれの積層数の条件の結果を平均すれば、最大荷重は L=5 mm から L=10 mm で 120%, L=10 mm から L=20 mm で 114% になり、最大たわみは L=5 mm から L=10 mm で 122%, L=10 mm から L=20 mm で 108% になり、曲げ強度は L=5 mm から L=10 mm で 125%, L=10 mm から L=20 mm で 114% になった。最大荷重は、曲げ強度の変化量に合わせて増加していることが分かる。

ここで、L の増加に伴い曲げ強度が増加したことについて。これは、L の増加により脆性部である層間はく離面が大きくなるため、応力の集中が緩和されたことが原因であると考えられる。

・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) を変化させたとき

図 3-315, 3-318, 3-321 より、n の増加に伴い、最大荷重・最大たわみ・曲げ強度は減少するという結果が得られた。具体的に、それぞれの L の条件の結果を平均すれば、最大荷重は n=1 から n=2 で 92%, n=2 から n=4 で 75%, n=4 から n=8 で 44% になり、最大たわみは n=1 から n=2 で 95%, n=2 から n=4 で 71%, n=4 から n=8 で 72% になり、曲げ強度は n=1 から n=2 で 96%, n=2 から n=4 で 64%, n=4 から n=8 で 50% になった。

曲げ強度が、n の増加に伴い減少したことについて。これは、n の変化によって層間はく離する面が少なくなったと同時に、樹脂リッチの数も少なくなった (n=1, 2, 4, 8 の条件それぞれで樹脂リッチの数は 31, 15, 7, 3 か所になる。) ことが原因であると考えられる。試験片の脆性部が少なくなったことにより、脆性部に集中する応力が増加したことが予想される。

以上の結果をまとめると、最大荷重は、積層数・樹脂リッチ間距離 (L) の増加に伴い増加する一方、一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の増加に伴い減少するということが分かる。ま

た、最大たわみ・せん断強度は、積層数・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の増加に伴い減少する一方、樹脂リッチ間距離 (L) の増加に伴い増加することが分かる。

ここで、引張試験におけるせん断強度の結果と比較を行う。せん断強度は、L の減少・n の増加に伴い増加したのに対し、曲げ強度は、L の増加・n の減少に伴い増加するという逆の結果が得られた。せん断強度の結果については、これらの条件の変化により、最大荷重が増加するものの、樹脂リッチ部の耐荷重は大きく変わらないため、樹脂リッチの限界荷重に先に到達してしまうためと考察した。一方、曲げ強度の結果について、これらの条件の変化により、脆性部が大きくなることにより応力集中が緩和されたことが原因であると考察した。

これらの評価試験の違いとして、せん断強度は層間又は離面に対して強度を算出したのに対し、曲げ強度は評価部全体の強度を算出したことが挙げられる。このことが、それぞれの評価値より、影響を受けたに違いを生じさせたと考えられる。

Table. 3-9 Max load and max deflection of specimens what are changed ply and the length between resin pockets

ply [-]	L [mm]	No.	Max Load [N]	Max Deflection [mm]	Max Load (AVG) [N]	Max Load (SD) [N]	Max Deflection (AVG) [mm]	Max Deflection (SD) [mm]
8	5	1	100	6.04	103	2.6	6.36	0.188
		2	101	6.35				
		3	108	6.69				
	10	1	89	7.19	92	2.2	7.05	0.095
		2	92	6.87				
		3	96	7.10				
	20	1	107	7.27	111	1.8	7.36	0.092
		2	113	7.55				
		3	112	7.27				
16	5	1	268	2.24	267	8.3	2.31	0.059
		2	280	2.43				
		3	251	2.27				
	10	1	272	2.80	267	7.3	2.91	0.065
		2	276	3.03				
		3	252	2.92				
	20	1	321	3.01	331	10.7	3.04	0.035
		2	321	3.01				

		3	353	3.11				
32	5	1	446	0.90	524	40.2	1.11	0.108
		2	546	1.24				
		3	581	1.20				
	10	1	901	1.24	901	33.0	1.43	0.109
		2	958	1.61				
		3	843	1.45				
	20	1	868	1.49	875	8.2	1.63	0.070
		2	865	1.70				
		3	891	1.70				

Table. 3-10 Max load and max deflection of specimens what are changed ply of per resin pocket

n [-]	L [mm]	No.	Max Load [N]	Max Deflection [mm]	Max Load (AVG) [N]	Max Load (SD) [N]	Max Deflection (AVG) [mm]	Max Deflection (SD) [mm]
1	5	1	2301	2.27	2368	45.3	2.60	0.166
		2	2350	2.76				
		3	2455	2.77				
	10	1	2432	2.82	2651	293.6	3.12	0.231
		2	2289	2.96				
		3	3233	3.57				
	20	1	2653	2.79	2463	97.7	2.86	0.074
		2	2407	3.01				
		3	2329	2.78				
2	5	1	2002	2.23	1967	49.8	2.32	0.048
		2	1869	2.35				
		3	2032	2.39				
	10	1	2309	2.57	2344	37.6	2.80	0.114
		2	2419	2.89				
		3	2304	2.93				
	20	1	2637	3.02	2579	57.1	3.07	0.035
		2	2465	3.14				
		3	2636	3.04				
4	5	1	1408	1.63	1434	24.2	1.74	0.073
		2	1412	1.88				

		3	1482	1.73				
	10	1	2067	1.86	2070	40.7	1.94	0.058
		2	2142	1.90				
		3	2001	2.05				
	20	1	1504	1.71	1670	122.5	2.07	0.275
		2	1909	2.61				
		3	1596	1.90				
8	5	1	446	0.90	524	40.2	1.11	0.108
		2	546	1.24				
		3	581	1.20				
	10	1	901	1.24	901	33.0	1.43	0.109
		2	958	1.61				
		3	843	1.45				
	20	1	868	1.49	875	8.2	1.63	0.070
		2	865	1.70				
		3	891	1.70				

Table. 3-11 Bending strength and bending modulus of specimens
what are changed ply and the length between resin pockets

ply [-]	L [mm]	No.	Bending Strength [MPa]	Bending Modulus [GPa]	Bending Strength (AVG) [MPa]	Bending Strength (SD) [MPa]	Bending Modulus (AVG) [GPa]	Bending Modulus (SD) [GPa]
8	5	1	638	150	620	11.7	143	3.6
		2	598	138				
		3	624	140				
	10	1	658	155	673	24.3	149	3.2
		2	720	146				
		3	639	146				
	20	1	738	156	737	0.4	152	2.2
		2	737	149				
		3	737	151				
16	5	1	410	122	420	7.5	121	1.3
		2	434	123				
		3	415	119				
	10	1	420	104	449	17.9	108	2.6

		2	481	113				
		3	446	107				
	20	1	557	135	555	5.8	130	2.5
		2	544	126				
		3	564	130				
32	5	1	185	72	212	13.6	70	1.7
		2	227	67				
		3	225	72				
	10	1	337	89	338	16.2	87	1.1
		2	366	86				
		3	310	86				
	20	1	371	91	369	1.1	86	2.6
		2	369	82				
		3	367	85				

Table. 3-12 Bending strength and bending modulus of specimens what are changed ply of per resin pocket

n [-]	L [mm]	No.	Bending Strength [MPa]	Bending Modulus [GPa]	Bending Strength (AVG) [MPa]	Bending Strength (SD) [MPa]	Bending Modulus (AVG) [GPa]	Bending Modulus (SD) [GPa]
1	5	1	885	115	929	24.4	109	3.7
		2	970	110				
		3	932	102				
	10	1	1050	122	1045	71.2	109	6.8
		2	920	102				
		3	1166	102				
	20	1	1071	123	990	48.6	111	5.9
		2	995	107				
		3	903	103				
2	5	1	847	121	818	15.4	113	4.0
		2	815	112				
		3	794	108				
	10	1	991	122	979	5.9	113	4.5
		2	972	109				

		3	975	108				
	20	1	1105	121	1045	30.1	111	5.2
		2	1019	109				
		3	1012	103				
	5	1	573	110	576	1.3	105	3.0
		2	577	100				
		3	577	104				
4	10	1	567	83	570	5.3	81	1.5
		2	562	78				
		3	580	82				
	20	1	619	114	674	55.3	105	4.8
		2	785	101				
		3	619	99				
	5	1	185	72	212	13.6	70	1.7
		2	227	67				
		3	225	72				
8	10	1	337	89	338	16.2	87	1.1
		2	366	86				
		3	310	86				
	20	1	371	91	369	1.1	86	2.6
		2	369	82				
		3	367	85				

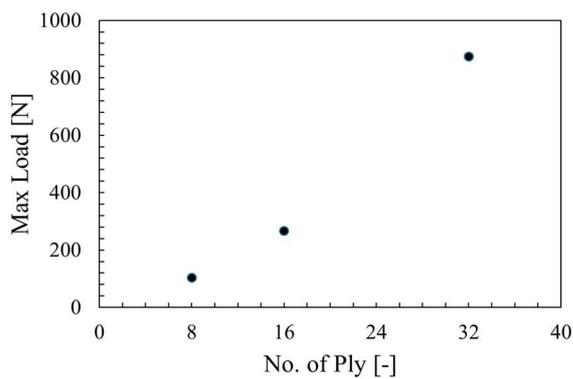


Fig. 3-313 The relationship between max load and ply

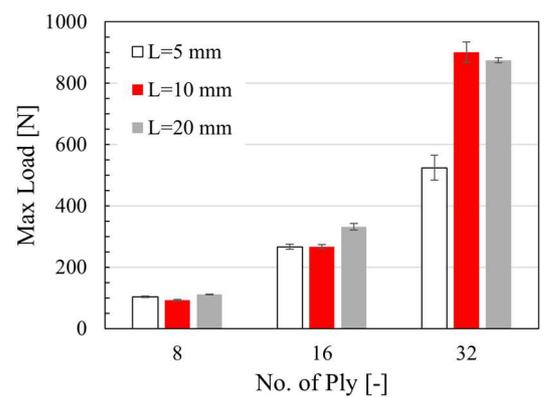


Fig. 3-314 The relationship between max load and the length between resin pockets, each ply

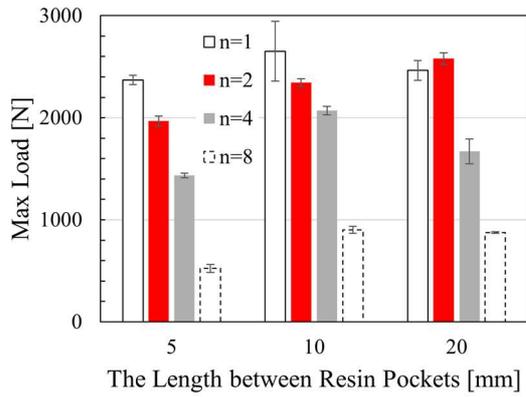


Fig. 3-315 The relationship between max load and ply of per resin pocket, each the length between resin pockets

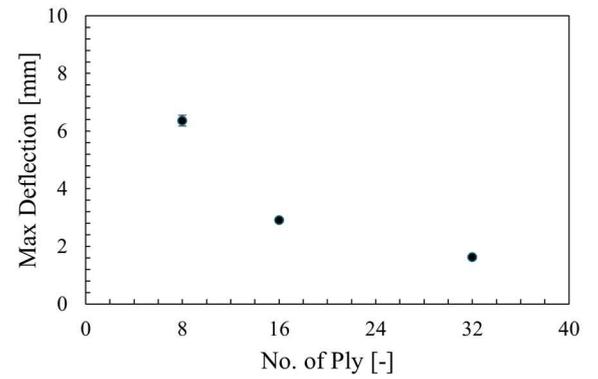


Fig. 3-316 The relationship between max deflection and ply

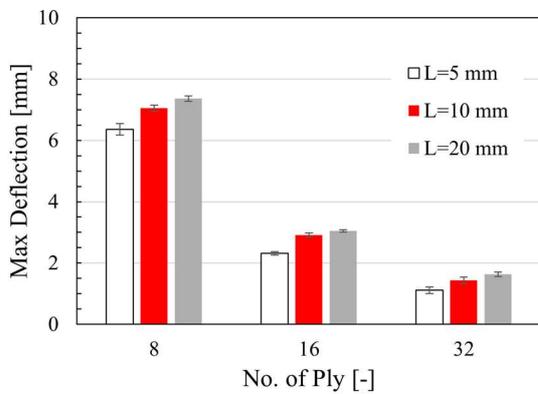


Fig. 3-317 The relationship between max deflection and the length between resin pockets, each ply

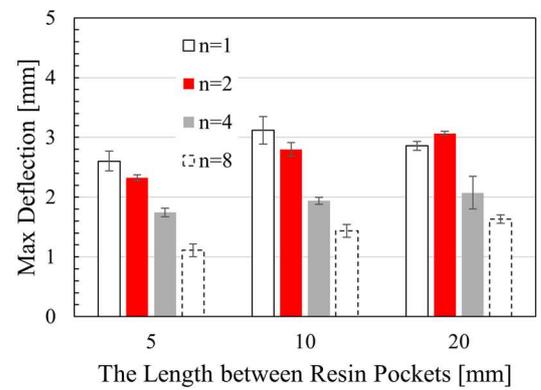


Fig. 3-318 The relationship between max deflection and ply of per resin pocket, each the length between resin pockets

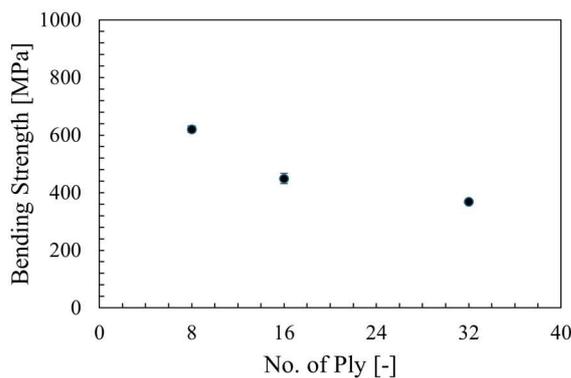


Fig. 3-319 The relationship between bending strength and ply

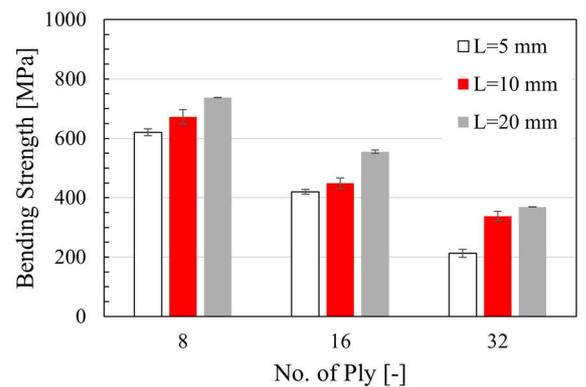


Fig. 3-320 The relationship between bending strength and the length between resin pockets, each ply

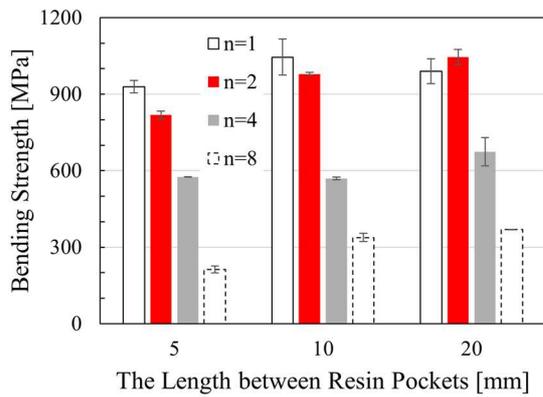


Fig. 3-321 The relationship between bending strength and ply of per resin pocket, each the length between resin pockets

3-2-2 曲げ弾性率による力学的特性評価

4点曲げ試験によって得られた荷重—たわみ曲線から、各条件について算出した曲げ弾性率の値を上記の表 3-11, 3-12 に記載した。曲げ弾性率について、積層数・樹脂リッチ間距離 (L)・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の変化に着目して比較したグラフを、図 3-322~3-324 に記す。

また、それぞれの条件における荷重—たわみ曲線は以下のようになっており、これらのグラフから算出した曲げ弾性率を表 3-15, 3-16 に記載した。条件ごとに整理した結果と考察を記載する。

・積層数を変化させたとき

図 3-322 より、積層数の増加に伴い、曲げ弾性率は減少する。具体的に、8 ply から 16 ply で 75%、16 ply から 32 ply で 80%になった。これは、引張試験における積層数を変化させたときの No.1 (表面側樹脂リッチ) におけるヤング率の変化に対応している。

それに加え、引張試験時の積層数の変化に伴う No.1 のヤング率の変化率に比べ、曲げ弾性率の変化率は小さいことが分かる。これは、4点曲げ試験では、評価部全体の曲げを等しくしているため、局所的な表面側樹脂リッチ部を評価した引張試験と比べ、変化率が小さいと考えられる。

・樹脂リッチ間距離 (L) を変化させたとき

図 3-323 より、L の増加に伴う曲げ弾性率の変化は小さいもののわずかに増加するという結果が得られた。具体的に、L=5 mm から L=10 mm で 106%、L=10 mm から L=20 mm で 107%になった。

これは、引張試験における積層数を変化させたときの No.1 (表面側樹脂リッチ) におけるヤング率の変化に対応している。

・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) を変化させたとき

図 3-324 より, n の増加に伴い, 曲げ弾性率は減少するという結果が得られた. 具体的に, n=1 から n=2 で 103%, n=2 から n=4 で 86%, n=4 から n=8 で 86% になった.

これは, 引張試験における n を変化させたときの No.1 (表面側樹脂リッチ) におけるヤング率の変化と対応している.

以上の結果をまとめると, 曲げ弾性率は, 積層数・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) の増加に伴い減少する一方, 樹脂リッチ間距離 (L) の増加に伴いわずかに増加することが分かる.

これらの結果は, 引張試験における積層数を変化させたときの No.1 (表面側樹脂リッチ) のヤング率との関係と対応している.

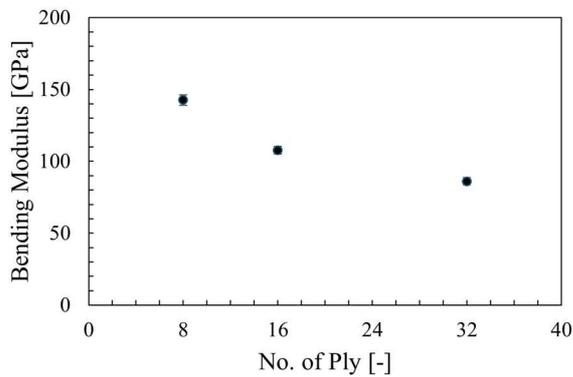


Fig. 4-322 The relationship between bending modulus and

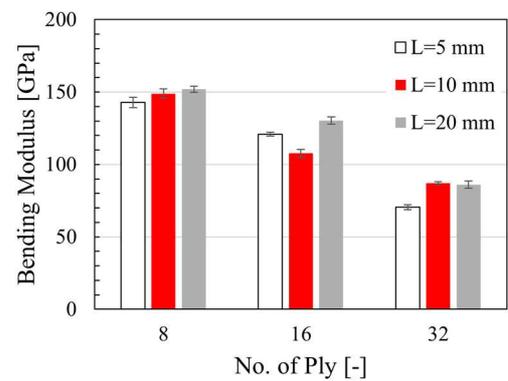


Fig. 4-323 The relationship between bending modulus and the length between resin pockets, each ply

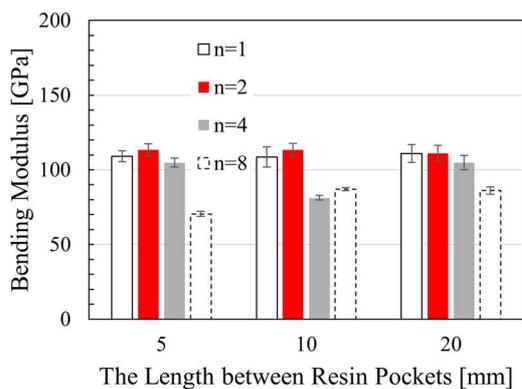


Fig. 4-324 The relationship between bending modulus and ply of per resin pocket, each the length between resin pockets

第4章 結言

繊維不連続部を内部に一つ有する CFRP 積層板の力学的特性や損傷挙動の評価は、これまでの研究でも進められており、繊維不連続部の状態の変化による評価も行われてきた。しかし、繊維不連続部を表面に有する CFRP 積層板や、繊維不連続部を複数有する CFRP 積層板に対する基礎的研究や評価は進んでいないのが現状である。

本研究では、炭素繊維の不連続部を複数有する CFRP 積層板について、力学的特性や損傷挙動を解明することで、繊維不連続部が CFRP 積層板に与える影響をより深く理解することを研究目的とした。具体的に、引張試験による繊維方向の引張荷重を加えた時と、4点曲げ試験による曲げ荷重を加えた時について、評価を行うことで力学的特性や損傷挙動を解明を図った。

複数の繊維不連続部の変化を数値的に評価するため、試験片成形の際、繊維不連続部を作る場所を長手方向に対して二か所定め、一つは試験片表面側に、もう一つは試験片内部に繊維不連続部（樹脂リッチ）を成形するようにした。そして、その距離を樹脂リッチ間距離（L）とし、L=5, 10, 20 mm と3種類変化させ、CFRP 積層板の積層数も 8, 16, 32 ply と3種類用意した。また、一つ当たりの樹脂リッチ積層数（n）を変化させたときの評価も行うため、32 ply について n=1, 2, 4 を新たに成形し、既存の n=8 と合わせ4種類用意した。これにより、積層数・樹脂リッチ間距離・一つ当たりの樹脂リッチ積層数の計3つのパラメータを変化させることにより、複数の繊維不連続部を数値的に評価できるようにした。特に、樹脂リッチ間距離の比較により、複数の繊維不連続部の位置関係の変化による影響、一つ当たりの樹脂リッチ積層数の比較により、繊維不連続部の数の変化による影響を評価することができた。

本研究での実験結果を受けての考察は、繊維不連続部を内部に一つ有する CFRP 積層板に対する先行研究（中谷他, 2015）における実験による評価と、解析による繊維不連続部付近の応力分布を評価を参考にしている。ここで、本研究では実験値による評価を行ったため、応力分布を解析で評価はできておらず、計測結果から荷重の集中を考察し、そのメカニズムを予想することを考察とした。

以下に、パラメータごとに評価結果を記載する。

・積層数を変化させたときの力学的特性・損傷挙動の評価

1. せん断強度・曲げ強度は、積層数の増加に伴い減少する。
2. 引張試験における表面側樹脂リッチ部でのヤング率と、4点曲げ試験における曲げ弾性率は、積層数の増加に伴い減少する。
3. クラック発生応力は、積層数の増加に伴い減少する。

・樹脂リッチ間距離 (L) を変化させたときの力学的特性・損傷挙動の評価

1. せん断強度は、L の増加に伴い減少する一方、曲げ強度は、L の増加に伴い増加する。
2. 引張試験における表面側樹脂リッチ部でのヤング率と、4点曲げ試験における曲げ弾性率は、L の増加に伴い増加する。
3. クラック発生応力は、L の増加に伴い増加する。

・一つ当たりの樹脂リッチ積層数 (n) を変化させたときの力学的特性・損傷挙動の評価

1. せん断強度・曲げ強度は、n の増加に伴い増加する。
2. 引張試験における表面側樹脂リッチ部でのヤング率と、4点曲げ試験における曲げ弾性率は、n の増加に伴い減少する。
3. クラック発生応力は、n の増加に伴い減少する。

以上の結果と考察は、パラメータの変化により脆性部である樹脂リッチ部や層間はく離面の変化に大きく関係していることが分かった。脆性部を増やすことで応力の集中が緩和され、材料全体として大きな強度を示した。また、力学的特性的観点から見ても、剛性の向上が確認できた。損傷挙動は、脆性部を増やすことで応力の集中が緩和された結果、繊維破断に至るまで材料の強度が向上した。

一方で、今後の展望として、繊維不連続部を複数有する CFRP 積層板の応力分布を解析することで、実験結果との比較を行い、その損傷挙動との整合性を確認することが必要であると考えられる。また、今回、樹脂リッチ部の総体積は CFRP 積層板の積層数ごとに変化が小さいように成形し、評価を行った。本研究で、脆性部の数を増やすことによる応力集中の緩和が確認できたため、樹脂リッチ部の総体積を増やすことによる力学的特性や損傷挙動の評価も必要と考えられる。そして、本研究では実験の結果から応力の集中度合いを考察し、評価したが、解析による応力集中の評価により、より明らかになると期待できる。

参考文献

Fish, J.C. and S.W., Delamination of tapered composite structures, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.34, (1989), pp.43-54.

Harrison, P.N. and Johnson, E.R., A mixed variational formulation for interlaminar stresses in thickness-tapered composite laminates, *International Journal of Solids Structures*, Vol.33, (1996), pp.2377-2399.

He, K., Ganesan, R. and Hoa, S.V., Modified shear-lag model for analysis of a composite laminate with drop-off plies, *Composites Science and Technology*, Vol.63, (2003), pp.1453-1462.

Heru SB ROCHARDJO, 小茂鳥潤, 清水真佐男, 宮野靖, 一方向 CFRP 材料の引張破壊機構に及ぼす試験片形状の影響, *日本機械学会論文集(A 編)*, Vol.61, (1995).

平野啓之, 熱硬化性 CFRP の成形法と材料への要求, *ネットワークポリマー*, Vol.36, No.1, (2015).

J.T.Hartness, R.Y. Kim, A comparative study on fatigue behavior of polyetheretherketon and epoxy with reinforced graphite cloth, 28th National SAMPE Symposium, (1983), pp.535-544.

金原勲, H. Chul Kim, 大沢勇, 竹鼻三雄, 一方向 CFRP の三点曲げ破面のフラクトグラフィ, *材料*, Vol.28, No.315, (1979).

宮本博, 菊池正紀, *材料力学*, 株式会社裳華房, (1987).

Mohammad Fikry bin Mohammad Jelani, Mechanical Properties and Damage Behavior in CFRP Laminates with Ply Discontinuities, Department of Mechanical Engineering Graduate School of Science and Technology Tokyo University of Science, (2022).

永田優, 中谷隼人, 松葉朗, 河野洋輔, 荻原慎二, 層間高靱性型 CFRP 積層板の力学的特性に及ぼす繊維不連続部の影響, *日本機械学会論文集*, Vol.81, No.825, (2015).

中谷隼人, 永田優, 喜多村竜太, 松葉朗, 河野洋輔, 荻原慎二, 異なる寸法の繊維不連続部を有する CFRP 積層板の損傷挙動, *日本機械学会論文集*, Vol.81, No.831, (2015).

Nakatani, H., Nakaya, K., Matsuba, A., Kouno, Y. and Ogihara, S., Effect of prepreg cut on the mechanical properties in CFRP laminates, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.5, No.12, (2011), pp.742-752

中谷隼人, 中谷健志, 松葉朗, 河野洋輔, 荻原慎二, 繊維不連続部を有する一方向強化 CFRP の損傷挙動, *日本機械学会論文集*, Vol.79, No.799, (2013).

日本産業規格, JIS K 7073 炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法, (1988).

日本産業規格, JIS K 7074 炭素繊維強化プラスチックの曲げ試験方法, (1988).

野口義男, 直交積層 CFRP の引張特性試験方法に関する評価, *航空宇宙技術研究所, 航空宇宙技術研究所資料*, TM-736, (1999).

野口義男, 一方向強化 FRP の引張疲れ試験法に関する評価, *航空宇宙技術研究所報告* TR-1241, (1994).

大堀敏郎, 李漢哲, 大澤勇, 高橋淳, 曲げ荷重を受ける不連続炭素繊維強化熱可塑性樹脂版の最適構造設計, 日本複合材料学会誌, Vol.43, No.2, (2017).

内田敏一, 高井由佳, 後藤彰彦, 黒田孝二, 濱田泰以, オートクレーブ成形の積層過程における熟練技術者の特徴, 科学・技術研究, Vol.5, No.1, (2016).

和田原英輔, 吉岡健一, 北野彰彦, CFRPの現状と今後の展望, 成形加工, Vol.19, No.12, (2007).