

研究論文

薄層化 CFRP 積層板の曲げ特性に及ぼす 層厚さおよびマトリクス樹脂の影響

山田 耕平^{*1}, 川邊 和正^{*2}, 山本 慧^{*3}, 松田 直樹^{*4}, 西川 雅章^{*5}, 北條 正樹^{*6}

(2018 年 6 月 26 日受付)

Effect of Ply Thickness and Matrix Resin on Flexural Properties of Thin Ply CFRP Laminates

Kohei YAMADA,^{*1} Kazumasa KAWABE,^{*2} Satoru YAMAMOTO,^{*3}
Naoki MATSUDA,^{*4} Masaaki NISHIKAWA^{*5} and Masaki HOJO^{*6}

(Received June 26, 2018)

Abstract: In this study, flexural tests using both thermoset and thermoplastic carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates with varied ply thicknesses were conducted in order to evaluate the effect of ply thickness and matrix resin on the flexural properties of thin ply composites. Results confirmed that the flexural properties were improved by decreasing the ply thickness in both thermoset and thermoplastic laminates. Furthermore, in-situ observation of specimens during the test revealed that short delamination occurred in the carbon fiber carbon fiber reinforced thermoplastics (CFRTP) thin ply laminate, while long delamination was observed in case of carbon fiber reinforced thermosets (CFRTS). This indicates that damage progressions of the laminates were influenced by the toughness of the matrix resin. On comparing the in-situ strength in the first ply failure calculated from the classical laminate theory in the thin and thick ply laminates, it was confirmed that high damage resistance was caused by higher in-situ strength in each layer in the thin ply laminate.

Key words: CFRP laminates, Thin ply prepreg, Flexural property, Damage progression, In-situ strength

1. 緒 言

航空機, 自動車分野において, 炭素繊維強化プラスチック (carbon fiber reinforced plastics, CFRP) を用いた構造部材等の研究開発が推進されている。構造材料としての CFRP の力学的特性を評価するうえで, 内部に発

生するトランスバースクラックや層間剝離等の初期の損傷の発生, 進展に関する研究は非常に重要である。CFRP における損傷の発生と進展を抑制する方法の一つに積層板を構成する各層の層厚さを薄くする薄層化技術があげられる。そのような中, 近年開繊技術を用いて製造される繊維目付が極めて低い薄層プリプレグが注目されている。開繊技術は連続的かつ均一に繊維束を広げることが可能であるため, 厚さ 0.04 mm 以下と極めて薄く, 繊維の真直性の高いプリプレグを製造できる¹⁾。薄層プリプレグを用いた材料を使用することでより薄く, より軽い構造体を実現できるとともに, 設計上厚さに制約がある場合には, 厚さ方向により多くの一方向材を任意の角度で配置することが可能になるため, 設計範囲を拡大することができる。

薄層プリプレグを用いることでトランスバースクラッ

^{*1,*2} 福井県工業技術センター

Industrial Technology Center of Fukui Prefecture

^{*1} 研究員 Researcher, ^{*2} 総括研究員 Senior Researcher

^{*3~*6} 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻

Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University

^{*3} 修士課程 Graduate Student, ^{*4} 助教 Assistant Professor, ^{*5} 准教授 Associate Professor, ^{*6} 教授 Professor

クの進展, 層間剝離の発生, 進展が抑制されることにより, 積層板の力学的特性が向上することを示す報告が数多くなされている. 例えば, Sihm ら²⁾ は, 厚さが 0.04 mm のプリプレグを用いて作製した層厚さがそれぞれ 0.04, 0.2 mm の積層板について引張, 疲労, 衝撃負荷に対する各種特性の比較を行い, 薄層化によりマトリクスクラック, 層間剝離が抑制されることにより薄層化 CFRP 積層板がいずれも高い特性を有することを実験的に示した. 川邊ら³⁾ は, 厚さが 0.04 mm の薄層プリプレグを用いて層厚さの異なる擬似等方性積層板を作製し, 層厚さが圧縮特性に与える影響を調べ, 圧縮試験において層厚さが薄くなると初期破損応力, 初期破損ひずみともに向上することを明らかにした. Saito ら⁴⁾ は, 層厚さが与える衝撃損傷形態への影響について実験を行い, 薄層化により衝撃後圧縮強度が向上し, 衝撃によるトランスバースクラックの発生が抑制されることを示し, 有限要素法 (finite element method, FEM) によりクラック先端におけるエネルギー解放率を薄層と厚層とで比較することにより, クラック抑制効果が発現する層厚さが 0.04 mm 以下であることを明らかにした. また, Amacher ら⁵⁾ は, 繊維目付が 30 g/m² の薄層プリプレグを用いて層厚さの異なる積層板について引張試験, 圧縮試験, 衝撃試験を行い, 薄層化により初期損傷が抑制されることを実験的に示すとともに, 積層板理論を用いたモデルにより引張試験を考察することにより, 層厚さが薄くなると引張試験の初期損傷発生箇所におけるその場強度が向上することを定量的に示した. これらの結果は, 積層板を構成する層を薄くすることで, 構造部材の軽量化と信頼性の向上の両方が実現できることを示唆している.

また, CFRP 積層板における損傷の抑制にはマトリクス樹脂の変更も有効であることが知られている. 例えば, Kanesaki ら⁶⁾ は, マトリクス樹脂に熱硬化性樹脂を用いる薄層プリプレグから作製した炭素繊維強化熱硬化性プラスチック (carbon fiber reinforced thermosets, CFRTS) 積層板と, 熱可塑性樹脂を用いる炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (carbon fiber reinforced thermoplastics, CFRTP) 積層板について衝撃試験, 衝撃後圧縮試験を行い, 衝撃損傷のメカニズムについて詳細な観察を行った結果, 熱可塑性樹脂の使用により樹脂のじん性を高くすることで, トランスバースクラックの進展, およびそれを起点とする層間剝離の発生を抑制できることを示した. 樹脂の高じん性のために, CFRTP 積層板は CFRTS 積層板より損傷抑制性能に優れることが期待されるが, 比較的新しい材料である CFRTP では積層板の

層厚さが損傷の抑制に及ぼす影響が未だ十分に明らかでなく, その調査の必要性が高い.

これまでに薄層化やマトリクス樹脂の高じん化およびこれらの手法を組み合わせることにより, 構造部材の軽量化と信頼性の向上の両方が実現できることが示されてきたが, CFRP を構造部材に適用する際に重要視される面外荷重下での薄層化 CFRP 積層板の特性についての実験結果の報告はあまりなされていないのが現状である.

そこで本研究では, CFRP 積層板において面外方向からの静的負荷により発生するトランスバースクラックおよびそれを起点とする層間剝離に対する薄層化の影響を調べる. まず厚さ 0.02 mm の CFRTS 一方向プリプレグシートを用い, 層厚さが異なる擬似等方性積層板を作製して曲げ試験を行い, 積層板を構成する層厚さを薄くすることで曲げ特性の優位性があるかを実験的に検証し, 薄層化がトランスバースクラックおよび層間剝離の発生と進展におよぼす影響を評価した. また, マトリクス樹脂を PA6 樹脂に変更した厚さ 0.04 mm の CFRTP 一方向プリプレグシート積層板についても曲げ試験を行い, マトリクス樹脂が曲げ特性, 損傷形態におよぼす影響について検討した. 試験中は試験片の端面をその場観察し, 最終破壊の瞬間の前後を高速度カメラで撮影することで詳細なトランスバースクラックおよび層間剝離の進展過程を調査した.

2. 実 験

2.1 供試材料

CFRTS および CFRTP の擬似等方性積層板を試験片として用いた. 試験片作製に用いたプリプレグの材料および厚さを Table 1 に示す. CFRTS 試験片のプリプレグは熱硬化性エポキシ樹脂 jER828 および jER1001 (三菱ケミカル製) を質量比 4:6 で混合した樹脂を, 炭素繊維 TR50S15L (三菱ケミカル製) で強化したもので, 厚さは約 0.02 mm である. また, CFRTP 試験片のプリプレグは, 熱可塑性 PA6 樹脂ダイアミロン C (三菱ケミカ

Table 1 Specification of prepregs.

	Matrix resin	Thickness [mm]
Thermoset prepreg (CFRTS)	Epoxy	0.02
Thermoplastic prepreg (CFRTP)	Polyamide 6	0.04

Table 2 Stacking sequence of the quasi-isotropic laminates.

Code	Cutting direction	Configuration	Thickness of a layer [mm]	V_f [%]
EP-20-0	0°	$[45/0/-45/90]_{12s}$	0.02	(Thin-ply laminate) 53.6
EP-20-90	90°	$[-45/90/45/0]_{12s}$	0.02	
EP-240-0	0°	$[45_{12}/0_{12}/-45_{12}/90_{12}]_s$	0.24	(Thick-ply laminate) 53.9
EP-240-90	90°	$[-45_{12}/90_{12}/45_{12}/0_{12}]_s$	0.24	
PA-40-0	0°	$[45/0/-45/90]_{6s}$	0.04	(Thin-ply laminate) 53.4
PA-40-90	90°	$[-45/90/45/0]_{6s}$	0.04	
PA-240-0	0°	$[45_6/0_6/-45_6/90_6]_s$	0.24	(Thick-ply laminate) 53.4
PA-240-90	90°	$[-45_6/90_6/45_6/0_6]_s$	0.24	

ル製)を同じく TR50S15L で強化したもので、厚さは約 0.04 mm である。CFRTS プリプレグおよび CFRTP プリプレグは福井県工業技術センターで製作した。

積層板は 4 種類作製した。いずれも擬似等方性積層板で、設計厚さは 1.92 mm である。各積層板ではマトリクス樹脂の材料または一層の層厚さが異なる。CFRTS 積層板の積層構成は、薄層材が $[45/0/-45/90]_{12s}$ (層厚さ: 0.02 mm)、厚層材が $[45_{12}/0_{12}/-45_{12}/90_{12}]_s$ (層厚さ: 0.24 mm) である。CFRTP 積層板の積層構成については薄層材が $[45/0/-45/90]_{6s}$ (層厚さ: 0.04 mm)、厚層材が $[45_6/0_6/-45_6/90_6]_s$ (層厚さ: 0.24 mm) である。CFRTS 積層板はオートクレーブ成形によって、CFRTP 積層板はプレス成形によって作製した。

積層板から幅 13 mm、長さ 100 mm の寸法で試験片を切り出した。擬似等方性積層板の曲げ強度および曲げ弾性率は、最も荷重を負担できる 0° 層が板厚方向のどの位置にあるかに依存する。しかしながら、実際の負荷においては、どの方向の曲げ荷重を受けるかの任意性があることから、本研究では曲げ特性の相違が顕著と考えられる 2 方向について曲げ試験を行い、曲げ特性と損傷形態の比較を行うこととした。積層板内の 0° 層に対して平行な方向を長手方向として切り出した試験片 (0° 切り出し) と、積層板内の 0° 層に対して垂直な方向を長手方向として切り出した試験片 (90° 切り出し) を作製した。0° 切り出し試験片 (以後 0° 試験片と表記) と 90° 切り出し試験片 (90° 試験片) とでは長手方向に対する各層の繊維配向角が 90° ずれている。4 種類の積層板から各 2 種類の試験片を切り出し、全 8 種類の試験片に対して試験を実施した。各試験片の材料および積層構成および繊維体積含有率 (fiber volume fraction, V_f) を Table 2 にまとめた。

2.2 試験方法

各試験片に対して 3 点曲げ試験を行った。試験はロー

ドセル容量 10 kN の精密万能試験機 (島津製作所製) を用いて行った。試験は ASTM D 7264 に準拠して行った。

試験中は高速度カメラ (MEMRECAM HX-3: ナックイメージテクノロジー製) を用いて試験片の圧子直下近傍の端面における損傷をその場観察した。また、試験片の最終破壊前後の瞬間を高速度カメラを用いて 50,000 fps または 100,000 fps で撮影した (512×264 pixel)。高速度カメラの撮影トリガーは、データロガー (DL850EV: 横河計測製) からのトリガー信号または手動によって入力した。データロガーはロードセルから入力される荷重値が急落したときトリガー信号を出力するよう設定した。

試験後にデジタルマイクロスコープ (VHX-5000: キーエンス製) を用いて観察倍率 200 倍で試験片端面の損傷を観察した。

2.3 曲げ強度、弾性率の算出

曲げ強度 σ は ASTM D 7264/D 7264M に記載の下記計算式により計算した。

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

b , h は試験片の幅、厚さ、 P は破壊時の荷重、 L は下側支点間距離である。曲げ強度は各擬似等方性積層板の V_f の違いを差し引いて同列の比較を行う目的で、式 (1) で得られた σ を用いた下記計算式により V_f が 55% の場合の数値も計算した。

$$\sigma_{55\%} = \frac{55}{V_f} \sigma \quad (2)$$

また曲げ弾性率 E_t^{chord} については、応力-ひずみ (引張側) 曲線のひずみ 0.1, 0.3% の 2 点間の勾配を下記計算式により計算した。 $\Delta \epsilon$ は引張側のひずみの増分、 $\Delta \sigma$ は曲げ応力の増分である。

$$E_t^{\text{chord}} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad (3)$$

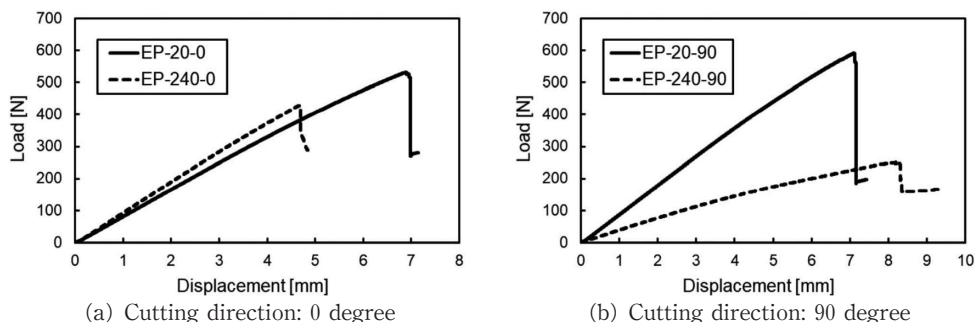


Fig. 1 Load-displacement curves in flexural tests (thermoset resin).

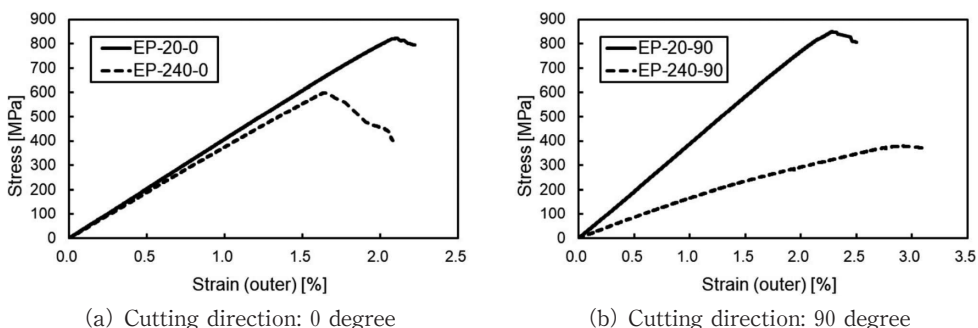


Fig. 2 Stress-strain curves in flexural tests (thermoset resin).

3. 実験結果

3.1 CFRTS 積層板の曲げ特性

3.1.1 応力-ひずみ曲線

CFRTS 積層板の曲げ試験における応力-ひずみ関係について、薄層と厚層とで比較を行った。3点曲げ試験の荷重-変位曲線と応力-ひずみ曲線を Fig. 1, 2 に示す。また、各試験片における曲げ試験の強度、弾性率および破断ひずみを Table 3, 4, 5 に示す。Fig. 2 において、薄層試験片と厚層試験片を比較すると 0° および 90° 試験片とも薄層試験片の方が強度が高かった。この要因は、層厚さが薄くなると 0° 層が外側の層に多く配置されるためである。また、切り出し方向による強度の差を両者で比較すると、厚層試験片では 0° 層がより外側の層に配置される EP-240-0 試験片が EP-240-90 試験片と比べて約 70% 高いのに対し、薄層試験片の場合は切り出し方向による曲げ強度の差がほとんどないことから、試験片の切り出し方向による異方性が小さいことがわかる。この要因は、最も荷重を負担できる 0° 層の破壊が強度を支配する曲げ試験において、層厚さが薄くなると 0° 層が厚さ方向に偏在することなく均等に配置されるためである。また EP-240-90 試験片は、他の試験片に比べて非線形性

Table 3 Flexural strength of specimens; σ [MPa].

Ply thickness [mm]	Cutting direction	
	0°	90°
Thermoset prepreg		
0.02	809 (831)	806 (828)
0.24	618 (630)	367 (375)
Thermoplastic prepreg		
0.04	699 (720)	667 (687)
0.24	593 (611)	393 (405)

* Data written in brackets indicates flexural strength normalized to 55% fiber volume fraction.

Table 4 Flexural modulus of specimens; E [GPa].

Ply thickness [mm]	Cutting direction	
	0°	90°
Thermoset prepreg		
0.02	43.9 (45.1)	41.0 (42.1)
0.24	38.3 (39.1)	17.2 (17.6)
Thermoplastic prepreg		
0.04	40.6 (41.8)	35.6 (36.6)
0.24	38.7 (39.8)	18.5 (19.0)

* Data written in brackets indicates flexural modulus normalized to 55% fiber volume fraction.

Table 5 Fracture strain of specimens; ϵ [%].

Ply thickness [mm]	Cutting direction	
	0°	90°
Thermoset prepreg		
0.02	1.9 (1.6)	2.0 (1.9)
0.24	1.6 (1.6)	3.0 (2.3)
Thermoplastic prepreg		
0.04	3.3 (1.6)	2.7 (1.8)
0.24	1.6 (1.6)	4.7 (3.0)

* Data written in brackets indicates the strain at which first ply failure occurred.

が強い。この要因は、EP-240-90 試験片では 0° 層がすべて試験片の厚さ方向中央に配置され、中央の層以外は ±45, 90° 層で構成されるため、マトリクス樹脂の塑性変形が試験片の応力-ひずみ曲線の非線形性に影響しているためである。

3.1.2 薄層試験片 (0°, 90° 切り出し) の損傷形態

CFRTS 積層板の薄層および厚層試験片について切り出し方向による損傷形態の比較を行った。Fig. 3 より EP-20-0 試験片では、圧縮側での 0° 層を起点とした座屈が初期損傷であった。その後、引張側で損傷が生じて最終破壊に至った。Fig. 4 に示す試験後のマイクロスコブによる観察画像より、引張側 90° 層ではトランスバースクラックが、引張側 0° 層では繊維破断が発生していたことが分かった。また、引張側層間剝離は、圧子直下を境界として左側では 45°/90° 層間に、右側では -45°/0° 層間に主に生じており、剝離の進展する層間が圧子直下で変化していた。

Fig. 5 および試験後の観察より EP-20-90 試験片では、損傷進展過程および損傷形態は EP-20-0 試験片と同様であり、両者に差異がないことを確認した。

3.1.3 厚層試験片 (0°, 90° 切り出し) の損傷形態

Fig. 6 より EP-240-0 試験片では、最終破壊に至るまで損傷の発生は見られず、圧縮側 0° 層での座屈が試験片の最終破壊モードであった。

Fig. 7 より EP-240-90 試験片では引張側 90° 層のトランスバースクラックが初期損傷であり、続いてクラック端から層間剝離が発生した。また、剝離の進展と並行して引張側最外層の -45° 層にクラックが発生した。その後 45°/90° 層間の複数の剝離がつながって長い剝離に成長したのち、最終破壊は 90°/-45° 層間の剝離が -45° 層のクラックと結合することで生じた。また、試験後の観察より両試験片とも圧縮側においても層間剝離が生じていた。厚層試験片の場合、90° 試験片では 0° 層が中立面

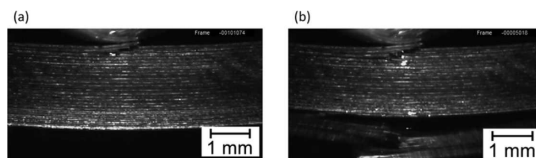


Fig. 3 In EP-20-0 specimen, buckling occurred at a compressive side, $\epsilon = 1.6\%$, (a). Next, failure occurred at a tensile side, $\epsilon = 1.9\%$, (b).

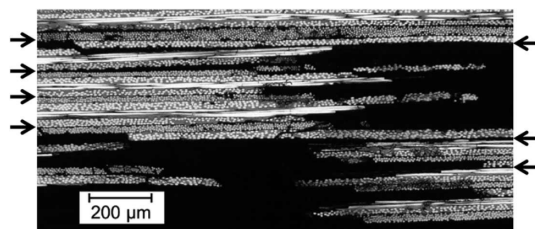


Fig. 4 Micrograph of a failed area at a tensile side in EP-20-0 specimen.

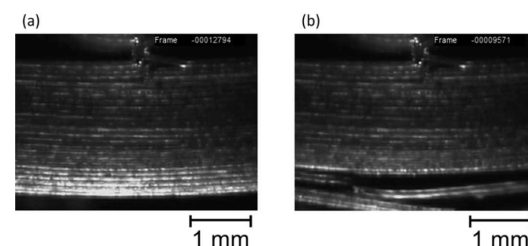


Fig. 5 In EP-20-90 specimen, buckling occurred at a compressive side, $\epsilon = 1.9\%$, (a). Next, failure occurred at a tensile side, $\epsilon = 2.0\%$, (b).

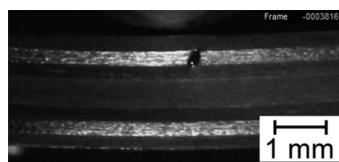


Fig. 6 In EP-240-0 specimen, buckling occurred at a compressive side, $\epsilon = 1.6\%$.

近傍のみに配置されるのに対して、0° 試験片では外側の層に配置される。この 0° 層の配置される位置の違いによって、損傷形態に差が生じた。

3.1.4 薄層と厚層試験片の損傷形態の比較

次に薄層試験片と厚層試験片の損傷形態について比較する。EP-20-0 試験片 (薄層) と EP-240-0 試験片 (厚層) の損傷形態を比較すると、両試験片とも座屈が初期損傷

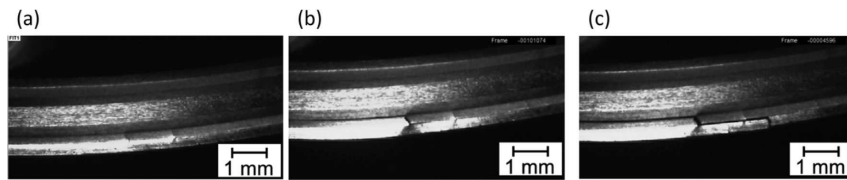


Fig. 7 In EP-240-90 specimen, transverse cracking occurred at a 90° layer of a tensile side, $\epsilon = 2.3\%$, (a). Next, delamination at a crack tip and crack at a -45° layer of tensile side occurred, $\epsilon = 3.0\%$, (b). Right after, delamination led to failure, (c).

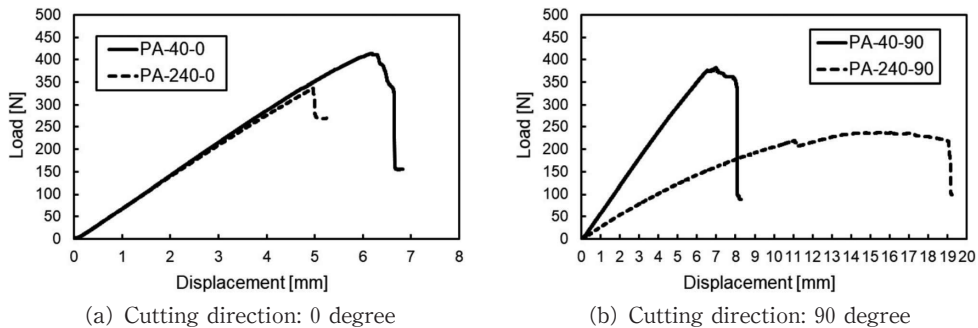


Fig. 8 Load-displacement curves in flexural tests (thermoplastic resin).

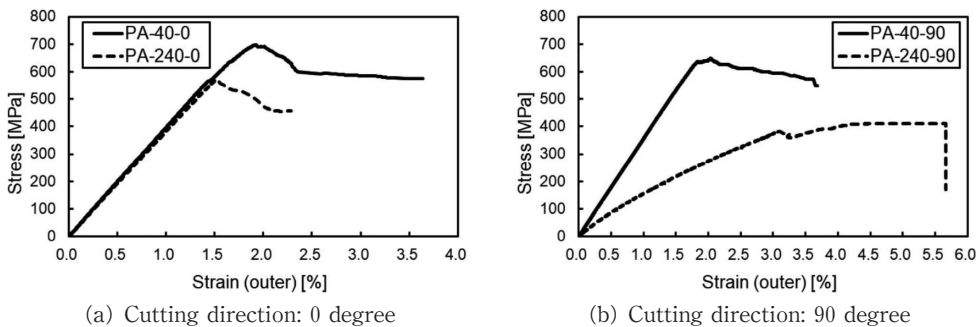


Fig. 9 Stress-strain curves in flexural tests (thermoplastic resin).

であることは共通しているが引張側での損傷は EP-20-0 試験片でのみ発生した。これは EP-240-0 試験片では、 90° 層が積層板の中立面近傍のみに存在するためにトランスバースクラックおよびそれを起点とする層間剝離が発生しなかったためである。

EP-20-90 試験片 (薄層) と EP-240-90 試験片 (厚層) の損傷形態を比較すると、EP-20-90 試験片でのみ圧縮側で座屈が発生していた。これは EP-20-90 試験片では表層近くに 0° 層が存在するためである。また、両試験片とも引張側の層間剝離が最終破壊モードとなっており、試験後の観察ではそれぞれの最大の剝離長さは、EP-20-90 試験片でおよそ 23 mm、EP-240-90 試験片でおよそ 11 mm であった。EP-20-90 試験片は最終破壊時の負荷応力が

EP-240-90 試験片の約 2 倍であり、破壊時に解放されるエネルギーの大きさのために長い層間剝離が発生したものと考えられる。ただし、端面におけるその場観察の結果のみから考察しているため、剝離以外の損傷でのエネルギー発生の違いが影響した可能性も考えられる。一方、最大の剝離長さに大きな差が生じた要因は 90° 切り出しでは試験片の剛性が大きく異なるためであり、層厚さのみの影響によるものではない。板厚方向で発生する応力に差が生じない面内荷重試験とは異なり、試験片の外側で高い応力が発生する曲げ試験においては、薄層試験片では 0° 層が板厚方向に均等に配置されており板全体の剛性が高くなっているのに対し、厚層試験片では 0° 層が中央層のみに配置され、剛性が低くなる。このこと

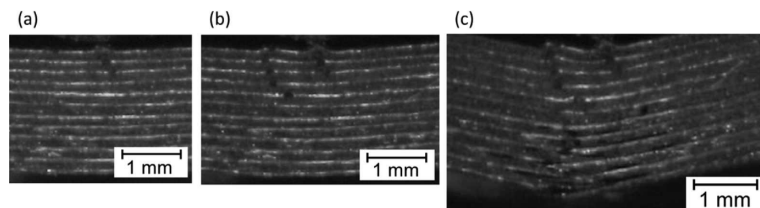


Fig. 10 In PA-40-0 specimen, buckling occurred at a compressive side, $\epsilon=1.6\%$, (a). Next, another buckling occurred, $\epsilon=2.0\%$, (b). Finally, failure occurred at a tensile side, $\epsilon=3.3\%$, (c).

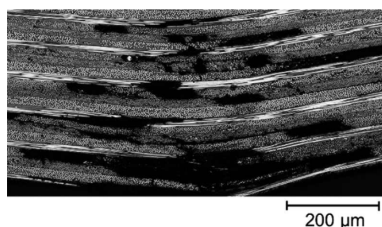


Fig. 11 Micrograph of a failed area at a tensile side in PA-40-0 specimen.

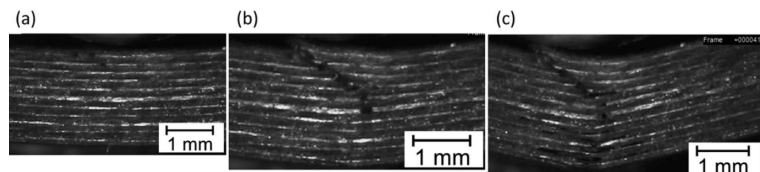


Fig. 12 In PA-40-90 specimen, buckling occurred at a compressive side, $\epsilon=1.8\%$, (a). Next, buckling grew into the center of the laminate, $\epsilon=2.2\%$, (b). Finally, failure occurred at a tensile side, $\epsilon=2.7\%$, (c).

が原因となり、層間剝離の発生長さに違いを生じた。

3.2 CFRTP 積層板の曲げ特性

3.2.1 応力-ひずみ曲線

CFRTP 積層板についても同様の試験を実施し、エポキシ樹脂と PA6 樹脂のマトリクス樹脂による違い、薄層効果の違いについて比較を行った。3 点曲げ試験の荷重-変位曲線と応力-ひずみ曲線を Fig. 8, 9 に示す。マトリクス樹脂が熱可塑性樹脂の場合でも熱硬化性樹脂と同様に、薄層試験片の方が厚層試験片に比べて強度が向上し、試験片の切り出し方向による異方性が小さいことが確認できる。エポキシ樹脂の試験結果と比較すると、PA6 樹脂のいずれの試験片においても損傷が直ちに進展するのではなく、荷重のピークが過ぎた後も破壊が進行していることからマトリクス樹脂の違いによって損傷の進行の仕方がかわっていることがわかる。また PA-240-90 試験片ではエポキシ樹脂と比べて PA6 樹脂の方が同一負荷時のたわみ量が非常に大きいことから樹脂の非線形性の影響が強いことがわかる。

3.2.2 薄層試験片 (0°, 90° 切り出し) の損傷形態

CFRTP 積層板の薄層および厚層試験片について切り

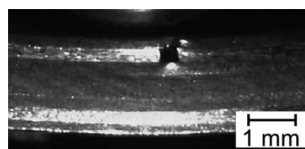


Fig. 13 In PA-240-0 specimen, buckling occurred at a compressive side, $\epsilon=1.6\%$

出し方向による損傷形態の比較を行った。Fig. 10 より PA-40-0 試験片では、圧縮側での 0° 層を起点とした座屈が初期損傷である。座屈は試験片の板厚中心に向かって複数の 0° 層で段階的に発生した。その後、引張側で損傷が発生して最終破壊に至った。Fig. 11 に示す試験後のマイクロスコープによる観察画像より、引張側 90° 層ではトランスバースクラックが、引張側の 0° 層では少数の繊維破断が発生していたことが分かった。また、引張側層間剝離は CFRTP の薄層材と同様に、圧子直下を境界として層間剝離の発生位置が変化した。また、Fig. 12 および試験後の観察より、PA-40-90 試験片では、損傷進展過程および損傷形態は PA-40-0 試験片と同様であり、切り出し方向による差異はないことを確認した。

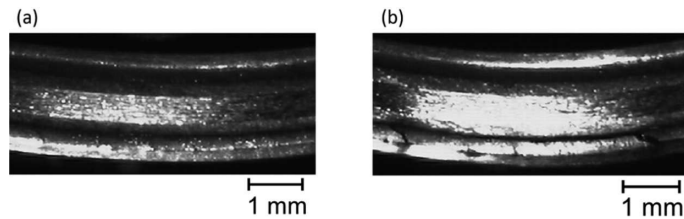


Fig. 14 In PA-240-90 specimen, transverse cracking occurred at 90° layer of a tensile side, $\epsilon=3.0\%$. Next, delamination at a crack tip occurred, $\epsilon=3.6\%$, (a). Finally, delamination led to failure, $\epsilon=4.7\%$, (b).

3.2.3 厚層試験片 (0°, 90° 切り出し) の損傷形態

Fig. 13 より PA-240-0 試験片では、圧縮側 0° 層での座屈が最終破壊モードであった。圧縮側 0° 層以外での損傷は見られなかった。

Fig. 14 より PA-240-90 試験片では、引張側 90° 層のトランスバースクラックが初期損傷であり、続いてクラック端から層間剥離が発生した。その後 45°/90° 層間の複数の剥離が結合し長い剥離に成長したのち、最後に 45°/90° 層間の剥離が板幅方向に貫通することで最終破壊に至った。また、試験後の観察より圧縮側においても層間剥離が生じていたことが分かった。PA-240-90 試験片は試験中大きくたわみ、著しい大変形を示した。PA-40-0 試験片 (薄層) と PA-240-0 試験片 (厚層) を比較すると、EP-20-0 試験片と EP-240-0 試験片の比較と同様のことが言える。EP-240-90 試験片と PA-240-90 試験片の比較では、トランスバースクラックの発生ひずみは EP-240-90 試験片の 2.3% に対して PA-240-90 試験片が 3.0% となっており、EP-240-90 試験片の方が大きい。これは、熱可塑性樹脂の高じん性によるものと考えられる。

3.2.4 薄層と厚層試験片の損傷形態の比較

PA-40-0 試験片と PA-240-0 試験片の比較においては、マトリクス樹脂がエポキシ樹脂の場合と同様の傾向が見られた。PA-40-90 試験片 (薄層) と PA-240-90 試験片 (厚層) を比較すると、PA-40-90 でのみ圧縮側で 0° 層の座屈が発生している。試験後の観察ではそれぞれの最長の剥離長さは、PA-40-90 でおおよそ 2 mm、PA-240-90 でおおよそ 13 mm であった。PA-40-90 では多数の層間で剥離が生じており、そのために剥離一つあたりの長さが短いものと考えられる。

3.2.5 両マトリクス樹脂での損傷形態の比較

二つのマトリクス樹脂での違いに着目すると、90° 試験片を除いてエポキシ樹脂の方が PA6 樹脂と比較して厚層、薄層ともに高い強度を示した。このことは樹脂の剛性の違いによるものと考えられる。例えば、Table 3 と Table 4 で比較すると、条件の異なる試験片に対する曲

げ強度のおおよその大小関係の傾向は曲げ弾性率の大小関係の傾向と近い。圧縮側 0° 層の座屈が初期損傷となる各試験片では、座屈の発生ひずみはほぼ同一であるので、曲げ弾性率が高い試験片ほど曲げ強度が高い傾向にあると言える。ただし、0° 層の座屈が発生しない両樹脂の厚層 90° 試験片はこの傾向の例外である。また、90° 試験片において両樹脂の厚層、薄層を比較すると、厚層の場合、PA6 樹脂の方がエポキシ樹脂と比べてたわみ量が 2 倍近くまで増加しているのに対して、薄層の場合は両樹脂でたわみ量がほとんど変わっていない。このことにより、層厚さが薄くなると隣接する層の拘束効果が強くなり、マトリクス樹脂のクラック進展および層間剥離の発生が最終破壊の直前まで抑制されることに加え、荷重点近傍での局所的な領域で損傷が進行したことにより、より脆的な破壊の挙動を示したと考えられる。EP-20-0 試験片および EP-20-90 試験片と PA-40-0 試験片および PA-40-90 試験片では、一層あたりの層厚さがそれぞれ約 0.02 mm と約 0.04 mm と異なるので直接の比較はできないが、傾向として、CFRTS 試験片は 2 つか 3 つの層間に長い剥離が発生するのにに対して、CFRTP 試験片では多数の層間で短い層間剥離が発生した。CFRTP 試験片ではマトリクス樹脂の高じん性のために発生する層間剥離が短く、積層板の損傷の発生および進展による剛性の低下が CFRTS 試験片ほど急激でないために、その後累積する損傷が徐々に板厚中心方向へと進展したものと考えられる。損傷観察の結果から両樹脂とも薄層試験片では脆的な破壊形態を示すことが確認されたが、発生した層間剥離の長さには差異が見られ、マトリクス樹脂のじん性の影響が確認できた。

このことから曲げ試験における初期の損傷発生抑制効果は高じん化よりも薄層化により強く現れると考えられる。一方、両マトリクス樹脂とも同程度のたわみ量で最大荷重を示しているものの、PA6 樹脂では荷重のピークを過ぎた後も最終破断ひずみが伸びており、樹脂の高じん化により層内剥離の進展に対するじん性が向上してい

ることがわかる。

4. 古典積層理論を用いたその場強度の評価

4.1 CFRTP 積層板の曲げ特性

実験結果から両マトリクス樹脂の曲げ試験においても厚層に比べて薄層の方が高い曲げ強度および曲げ弾性率を示すことが確認できた。ただし、マトリクス樹脂がエポキシ樹脂の場合と PA6 樹脂の場合ではその損傷形態が異なっており、PA6 樹脂の場合は層厚さによる影響のみでなく、母材の高じん性の影響が損傷の発生、進展に影響していることがわかった。ここでは特に薄層化の損傷抑制への効果を検証するため、エポキシ樹脂での試験結果からその場強度を算出して層厚さの影響を調べた。また、損傷観察の結果、0°, 90° 試験片について薄層化した時の損傷発生状況が異なっていた。これらの試験結果は曲げ試験における応力分布および切り出し方向によって 0° 層の配置が変わることによる影響が含まれており、薄層化のみの効果とは言い難い。そこで、古典積層理論 (classical laminate theory, CLT) で曲げ応力分布を予測して、その場強度を求めることで薄層化の効果を検証した。薄層化による力学特性の向上と初期破損の発生が抑制されることによる破壊形態の変化は密接に関係しており、Arteiro ら⁷⁾ は、FEM を用いた解析を行い、層厚さが薄くなると隣接する層の拘束効果によりその場強度が向上し、初期損傷となるトランスバースクラックの発生が抑制されることを示している。

そこで、本研究においても古典積層理論と破壊則を組み合わせることで、曲げ負荷下での初期破損発生時におけるその場強度を算出し、薄層化による損傷抑制効

果を定量的に評価した。破壊則には先行文献⁹⁾とは異なり、引張強度と圧縮強度の違いを考慮することができる Hoffman 則を用いた。

$$-\frac{\sigma_L^2}{F_{Lc}F_{Lt}} + \frac{\sigma_L\sigma_T}{F_{Lc}F_{Lt}} - \frac{\sigma_T^2}{F_{Tc}F_{Tt}} + \left(\frac{1}{F_{Lc}} + \frac{1}{F_{Lt}}\right)\sigma_L + \left(\frac{1}{F_{Tc}} + \frac{1}{F_{Tt}}\right)\sigma_T + \frac{\tau^2}{F_{LTs}} = 1 \quad (4)$$

また、積層板の構成方程式の計算および破壊則による計算には Table 6 に示す一方向材の 0°, 45°, 90° 引張、圧縮試験で取得した弾性率と強度を用いた。データ取得に用いた一方向材の V_f は各積層板で異なるため、それぞれの積層板の V_f も Table 6 にあわせて示す。

4.2 解析結果

Fig. 15 に EP-20-0 試験片についての解析例を示す。

Table 6 Mechanical properties of uni-directional laminates.

Property	Unit	V_f^*
Tensile modulus 0° E_L	119 [GPa]	51.6
Tensile modulus 90° E_T	9.5 [GPa]	51.1
Tensile modulus 45° E_{45}	10.2 [GPa]	51.6
Poisson's ratio ν_{LT}	0.32	
Ultimate tensile strength 0° F_{Lt}	2333 [MPa]	51.6
Ultimate tensile strength 90° F_{Tt}	62 [MPa]	51.1
Ultimate compressive strength 0° F_{Lc}	985 [MPa]	51.1
Ultimate compressive strength 90° F_{Tc}	162 [MPa]	51.1
Maximum in-plane shear stress F_{LTs}^{**}	166 [MPa]	57.8

* Fiber volume fraction of each laminate used for each test.

** Obtained from tensile test of $\pm 45^\circ$ laminates.

Related standard: ASTM D3518

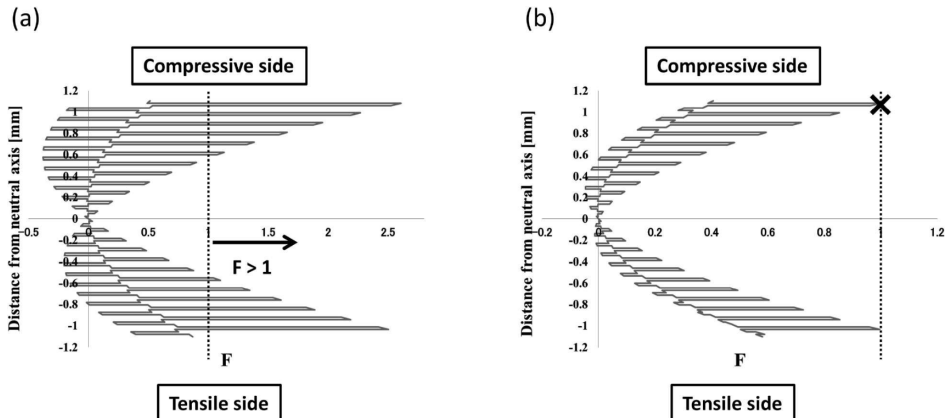


Fig. 15 Prediction of first ply failure by Hoffman criterion using classical laminate theory in 3 point flexural test of EP-20-0.

Table 7 In-situ strength of each specimen calculated by using CLT model.

Specimen	Position of first ply failure	Longitudinal compressive strength [MPa]	Transverse tensile strength [MPa]
UD	—	985	62
EP-20-0	0° layer at a compressive side	1861 (1911)	111 (113)
EP-20-90	0° layer at a compressive side	1783 (1832)	118 (122)
EP-240-0	0° layer at a compressive side	1113 (1133)	75.6 (80.6)
EP-240-90	90° layer at a tensile side	—	42.8 (44.0)

* Data written in brackets indicates in-situ strength calculated from specimen normalized to 55% fiber volume fraction.

Table 6 に示した一方向材から取得した強度を用いて、初期破損である圧縮側での 0° 層を起点とした座屈が発生した応力を負荷した際の各層の破壊予測結果を Fig. 15(a) に示す。圧縮側の 0° 層の座屈と引張側の 90° 層のトランスバースクラックが発生することが予測されているものの、実験で得られた初期破損発生応力よりも低い応力で破損が発生する予測となり、実験結果と異なる。このように、Hoffman 則にて得られる破壊予測の結果とその後観察の結果が異なる層に注目し、初期破損発生応力の予測値と実験での測定値が同じになるように各層におけるその場強度を調整した。EP-20-0 試験片の場合、具体的には実験で測定された初期破損発生応力負荷時に各層の破壊の予測が Fig. 15(b) のように圧縮側での最外 0° 層でのみ座屈による破壊がおこるように 0° 方向圧縮強度 F_{Lc} と 90° 方向引張強度 F_{Tt} を求め、得られた値を初期破損発生時のその場強度 (in-situ strength) として、各試験片におけるその場強度を比較した。なお、その場強度の算出にあたっては先行文献⁵⁾と同様に、式(4)中の F_{Lc} , F_{Tt} にそれぞれ独立の係数 (>1) を乗じ、実験結果と矛盾しないように (圧縮側の最外 0° 層の予測値が 1 以上、かつ引張側の最外 90° 層の予測値が 1 より小さくなるように) 両係数を調整することにより、その場強度を求めた。

計算結果を Table 7 に示す。表中の「—」の表記は、破壊則による予測と観察結果が一致しているためにその場強度を求めることができないことを表している。薄層の試験片では、EP-20-0 試験片、EP-20-90 試験片とも、それぞれ $F_{Lc}^{in-situ}$ は 1861, 1783 MPa, $F_{Tt}^{in-situ}$ は 111, 118 MPa と、一方向材の実験から得られた強度の 2 倍近くに増加していた。なお、先行文献⁵⁾では、その場強度を求める際に一方向材で得られた強度に乘じる係数を層厚さを変数とする一次関数として近似している。その計算式を以下に示す。先行文献⁵⁾で示されたモデルおよび数式(5)

に層厚さ 20 μm を代入して得られる 95.7 MPa とも近い値となることから、本研究で得られた $F_{Tt}^{in-situ}$ は妥当な計算結果とみなすことができる。

$$F_{Tt}^{in-situ} = \sigma_{22}^t * SC(t) \\ SC(t) = -0.0139 * t + 4.4393 \quad (5) \\ \sigma_{22}^t = 23 \text{ [MPa]}, t: \text{ply thickness } [\mu\text{m}]$$

また、これらの値は厚層の EP-240-0 試験片から得られた $F_{Lc}^{in-situ} = 1113 \text{ MPa}$, $F_{Tt}^{in-situ} = 75.6 \text{ MPa}$ 、厚層の EP-240-90 試験片から得られた $F_{Tt}^{in-situ} = 42.8 \text{ MPa}$ と比較しても高い値であることから厚層試験片と比べると薄層試験片の方がその場強度が高い。つまり、損傷抑制効果が現れている。また、0° 試験片について薄層試験片と厚層試験片で初期損傷が発生した層でのその場ひずみを比較すると厚層では 0.93% であるのに対し、薄層では 1.53% となることから層厚さが薄くなると隣接する層の拘束により最も荷重を負担できる 0° 層がより大きい荷重を負担しており、薄層化による強度向上の一因となっている。

5. 結 言

本研究では、層厚さが異なる擬似等方性 CFRTS および CF RTP 積層板を作製して曲げ試験を行い、薄層化およびマトリクス樹脂が曲げ特性および損傷形態におよぼす影響を評価した。また、試験中に試験片の端面をその場観察し、最終破壊前後の瞬間を高速度カメラで撮影することで詳細な損傷進展過程の調査を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 擬似等方性積層板について、積層板を構成する層厚さを薄くすると、マトリクス樹脂がエポキシ樹脂、PA6 樹脂のいずれの場合でも、曲げ強度、曲げ弾性率が向上する効果が見られた。本研究においては 0°, 90° の 2 方向のみ評価ではあるが、傾向として、層厚さが薄くなるに

つれ、試験片の切り出し方向による曲げ強度および曲げ弾性率の異方性が小さくなることがわかった。層厚さが薄くなると、マトリクス樹脂のじん性に関わらず厚層と比べて最大荷重に達した後破断に至るまでの伸びが小さく脆性的な破壊挙動を示した。

(2) CFRTS では、薄層試験片は厚層試験片と比較して長い層間剥離が発生した。一方 CFRTP では、薄層試験片は厚層試験片と比較して短い層間剥離が多数発生した。CFRTS と CFRTP で違いが生じた要因は破断時のエネルギー解放量の大きさが異なるためである。薄層試験片において、CFRTP 試験片では CFRTS 試験片と比較して短い層間剥離が多数発生し、層間剥離発生領域が板厚中心方向へ長く進行した。また、厚層試験片において、CFRTP 試験片は CFRTS 試験片よりトランスバースクラックの発生ひずみが大きかった。

(3) また、積層板理論と破壊則を用いて初期破損発生時のその場強度を計算し、定量的に薄層効果を評価した結果、層厚さが薄くなると厚層試験片と比べて各層のそ

の場強度が向上することによって高い損傷抑制効果を示すことがわかった。

参 考 文 献

- 1) 川邊和正, 松尾達樹, 前川善一郎: 材料, **47**, 7 (1998), 727-734.
- 2) S. Sihn, R.Y. Kim, K. Kawabe & S.W. Tsai: *Compos. Sci. Technol.*, **67** (2007), 996-1008.
- 3) 川邊和正, 笹山秀樹, 影山和郎, 小形信男: 日本複合材料学会誌, **34** (2008), 173-181.
- 4) H. Saito, M. Morita, K. Kawabe, M. Kanesaki, H. Takeuchi, M. Tanaka & I. Kimpara: *J. Reinf. Plast. Comp.*, **30**, 13 (2011), 1097-1106.
- 5) R. Amacher, J. Cugnoni, J. Botsis, L. Sorensen, W. Smith & C. Dransfeld: *Compos. Sci. Technol.*, **101** (2014), 121-132.
- 6) M. Kanesaki, H. Saito, M. Tanaka, M. Hojo & I. Kimpara: *J. Compos. Mater.*, **39**, 3 (2013), 89-98.
- 7) A. Arteiro, G. Catalanotti, A.R. Melro, P. Linde & P.P. Camanho: *Compos. Struct.*, **116** (2014), 827-840.