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 thermo-plastics (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, ** 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, Sihn 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[®]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.

これまでにも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	Thickness
	resin	[mm]
Thermoset prepreg (CFRTS)	Epoxy	0.02
Thermoplastic prepreg (CFRTP)	Polyamide 6	0.04

Tuble 1 Stucking bequence of the quasi isotropic fulfillates.					
Code	Cutting direction	Configuration	Г	`hickness of a layer [mm]	$V_{\rm f}$ [%]
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°	$[45_{12}/0_{12}/-45_{12}/90_{12}]_{\rm s}$	0.24	(Thick-ply laminate)	53.9
EP-240-90	90°	$[-45_{12}/90_{12}/45_{12}/0_{12}]_{\rm s}$	0.24	()	
PA-40-0	0°	$[45/0/-45/90]_{68}$	0.04	(Thin ply lominate)	52 /
PA-40-90	90°	$[-45/90/45/0]_{6s}$	0.04	(1 min-pry familiate)	55.4
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	(Inter-ply laninate)	00.4

Table 2 Stacking sequence of the quasi-isotropic laminates

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13mm,長さ100mm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_t) 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.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{1}$$

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 $V_{\rm f}$ 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 $V_{\rm f}$ が55%の 場合の数値も計算した。

$$_{55\%} = \frac{55}{V_{\rm f}} \sigma \tag{2}$$

また曲げ弾性率 $E_{\rm f}^{\rm chord}$ 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.

б

$$E_{\rm f}^{\rm chord} = \frac{\varDelta \sigma}{\varDelta \varepsilon} \tag{3}$$







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	Ι.
Labre 0	1 ichului	ourongui	01	opecimento,	~	LITIL U	Ŀ

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	١.
rubic i	1 ionuiui	moundo	01	opconneno,	~	or u	••

Ply thiskness [mm]	Cutting direction			
Fly unckness [mm]	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 Flacture stra	in or specific	ciis, c [/o].			
Ply thickness [mm]	Cutting direction				
Fly thickness [mm]	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)			

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

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

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. 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, $\varepsilon = 1.6\%$, (a). Next, another buckling occurred, $\varepsilon = 2.0\%$, (b). Finally, failure occurred at a tensile side, $\varepsilon = 3.3\%$, (c).



Fig. 12 In PA-40-90 specimen, buckling occurred at a compressive side, $\varepsilon = 1.8\%$, (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



1 mm

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

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 CFRTS 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 ク端から層間剝離が発生した。その後 45°/90°層間の複 数の剝離が結合し長い剝離に成長したのち,最後に 45°/ 90°層間の剝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 剝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 試験片の比較と同様のこと が言える。EP-240-90 試験片の比較を同様のこと が言える。EP-240-90 試験片の比較を同様のこと 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剝 離長さは,PA-40-90 でおよそ 2 mm,PA-240-90 でおよ そ 13 mm であった.PA-40-90 では多数の層間で剝離が 生じており,そのために剝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剝離の 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, より脆性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 層間に長い剝離が発生するのに対して, CFRTP 試験片 では多数の層間で短い層間剝離が発生した。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 間剝離が短く,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 片では脆性的な破壊形態を示すことが確認されたが、発 生した層間剝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 ん化により層内剝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 み合わせることにより、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⁵⁾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。

$$-\frac{\sigma_{\rm L}^2}{F_{\rm Lc}F_{\rm Lt}} + \frac{\sigma_{\rm L}\sigma_{\rm T}}{F_{\rm Lc}F_{\rm Lt}} - \frac{\sigma_{\rm T}^2}{F_{\rm Tc}F_{\rm Tt}} + \left(\frac{1}{F_{\rm Lc}} + \frac{1}{F_{\rm Lt}}\right)\sigma_{\rm L} + \left(\frac{1}{F_{\rm Tc}} + \frac{1}{F_{\rm Tt}}\right)\sigma_{\rm T} + \frac{\tau^2}{F_{\rm LTS}} = 1$$
(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 $V_{\rm f}$ は各積層板で異なるため,それ ぞれの積層板の $V_{\rm f}$ 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	$V_{\rm f}*$
Tensile modulus $0^{\circ} E_{\rm L}$	119 [GPa]	51.6
Tensile modulus $90^{\circ} E_{\rm T}$	9.5 [GPa]	51.1
Tensile modulus $45^{\circ} E_{45}$	10.2[GPa]	51.6
Poisson's ratio ν_{LT}	0.32	
Ultimate tensile strength $0^{\circ} F_{Lt}$	2333[MPa]	51.6
Ultimate tensile strength 90° $F_{\rm Tt}$	62 [MPa]	51.1
Ultimate compressive strength 0° $F_{\rm Lc}$	985 [MPa]	51.1
Ultimate compressive strength 90° $F_{\rm Tc}$	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 $\pm45^{\circ}$ 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.

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)

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

* 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 その場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 $F_{\rm Lc}$, $F_{\rm Tt}$ 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 $F_{\rm Lc}^{\rm In-situ}$ は 1861, 1783 MPa, $F_{\rm Tt}^{\rm In-situ}$ 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乗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 μ m 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.

$$F_{\text{Tt}}^{\text{in-situ}} = \sigma_{22}^{t*} SC(t)$$

$$SC(t) = -0.0139^{*} t + 4.4393 \qquad (5)$$

$$\sigma_{22}^{t} = 23 \text{ [MPa], } t: \text{ply thickness } [\mu \text{m}]$$

また、これらの値は厚層の EP-240-0 試験片から得られ た $F_{Lc}^{In-situ} = 1113$ MPa, $F_{Tt}^{In-situ} = 75.6$ MPa, 厚層の EP-240-90 試験片から得られた $F_{Tt}^{In-situ} = 42.8$ 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 CFRTP 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に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 て長い層間剝離が発生した.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剝離が多数発生し 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 較して短い層間剝離が多数発生し, 層間剝離発生領域が 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

- 川邊和正,松尾達樹,前川善一郎:材料,47,7 (1998),727-734.
- 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.
- H. Saito, M. Morita, K. Kawabe, M. Kanesaki, H. Takeuchi, M. Tanaka & I. Kimpara : *J. Reinf. Plast. Comp.*, **30**, 13 (2011), 1097–1106.
- R. Amacher, J. Cugnoni, J. Botsis, L. Sorensen, W. Smith & C. Dransfeld : *Compos. Sci. Technol.*, 101 (2014), 121-132.
- M. Kanesaki, H. Saito, M. Tanaka, M. Hojo & I. Kimpara : J. Compos. Mater., 39, 3 (2013), 89–98.
- A. Arteiro, G. Catalanotti, A.R Melro, P. Linde &, P.P. Camanho : *Compos. Struct.*, **116** (2014), 827– 840.