研究論文

CFRP 直交積層板の薄層化による損傷進展抑制に関する実験的評価

竹内 博紀^{*1}, 斎藤 博嗣^{*2}, 金 原 勲^{*3}

(2010 年 8 月 10 日受付)

Experimental Evaluation of the Damage Growth Restraining in 90° Layer of Thin-ply CFRP Cross-ply Laminates

Hiroki TAKEUCHI,^{*1} Hiroshi SAITO^{*2} and Isao KIMPARA^{*3}

(Received August 10, 2010)

Abstract: In this study, a systematic detailed experimental observation was made on the damage growth behavior in 90° layer of cross-ply CFRP laminates. It is generally known that the crack initiation strain is increased with decreasing the thickness of 90° layer. However the mechanism has not been well clarified in the case of very thin thickness such as less than 0.100 mm. We used a thin-ply prepreg developed by SAKAI OVEX CO., LTD with the theoretical minimum thickness of 0.040 mm. As a result of observation, the mode and the growth behavior of the damage were different depending on the ply thickness of 90° layer. It is shown that the damage growth is faster with the 90° layer to be thicker and vice versa. It is suggested that the damage growth behavior can be controlled with the ply thickness of 90° layer based on energy release rates by the FEM simulation.

Key words: CFRP, Thin-ply, Damage propagation, Cross-ply laminates, Transverse crack

1. 緒 言

CFRP 複合材料は一般的に、一方向に強化したシートを交互に重ね合わせて使用するため、積層構造を有する。最も基本的な積層構造は繊維方向 (0° 層) と繊維直交方向 (90° 層) に積層した直交積層材であるが、この直交積層材では 90° 層の破断ひずみが 0° 層に比べて小さく、積層材の破断応力よりも低い応力で損傷が発生する。この 90° 層内の損傷は、一般的にトランスバースクラックと呼ばれ、層間はく離、スプリッティング、繊維破断などに影響を及ぼすとされ、非常に重要視されている。そのため、このトランスバースクラックの発生を抑制することができれば、設計上非常に有効であると考え

られる。

一方、層厚を変化させることにより、このトランスバースクラックの発生ひずみを増大させるとした、川邊ら¹⁾の研究がある。川邊らは、炭素繊維束に損傷を与えることなく、1 層の厚みが 0.050 mm 以下の非常に薄いプリプレグを使用し、擬似等方積層板の引張試験を行ったところ、AE 測定により、90° 層内樹脂割れの発生が遅れることが確認されている。

また、著者ら²⁾も、1 層の厚みが 0.040 mm のプリプレグを用いて層内の損傷を観察した結果、初期損傷の発生ひずみは層厚によらず一定であるものの、その進展速度が遅くなることを確認した。

これまでもトランスバースクラックの発生、進展に関する研究は多く行われてきたが^{1~10)}、いずれの研究も、非常に薄い層での損傷の発生・進展過程を詳細に観察した例はなく、その損傷進展プロセスに関する検討を行った研究もほとんどないため、その破壊メカニズムはまだ明らかではない。

そこで本研究では層厚を薄くすることで耐損傷性が向

^{*1} サカイオーベックス株式会社 (916-0141 福井県丹生郡越前町西田中 20-16)

SAKAI OVEX CO., LTD

^{*2,*3} 金沢工業大学ものづくり研究所

Research Laboratory for Integrated Technological Systems, Kanazawa Institute of Technology

^{*2} 講師 Lecturer, 教授 Professor

上することを検証し、その破壊メカニズムを明らかにすることを目的とする。本報では、まず引張試験を行い、その損傷の詳細な観察結果を示す。また、FEMを用いて、クラックのエネルギー解放率を計算し、実験結果と比較・検討し、損傷進展メカニズムについて考察する。

2. 実 験

2.1 材 料

評価対象である積層板は薄層である 90° 層を通常層厚の 0° 層で挟んだ $[0_2/90_n/0_2]$ 構造とした。積層構成を Table 1 に示す。積層構成は $[0_2/90_n/0_2]$ ($n=1, 2, 4$) とした。 0° 層の厚みを 0.48 mm で一定厚みにし、 90° 層の厚みを積層枚数を変えることで、 90° の厚みを $0.04\sim 0.16\text{ mm}$ の間で変化させ 90° 層厚が損傷に及ぼす影響を検討した。

また、実験に用いた材料を Table 2 に示す。いずれもマトリクスは 130°C 硬化タイプのエポキシ樹脂である。 90° 層には、IMS60-24k, 800 tex の開織した炭素繊維束を用いて理論成形厚み 0.040 mm のプリプレグを使用した。

試験片はオートクレーブ成形法により成形した。また、試験片の形状は、Fig. 1 に示すように、幅 2.5 mm 、長さ 200 mm 、ゲージ長は 100 mm である。

試験片中央部に長さ方向に沿ってゲージ長 5 mm 、幅 2.5 mm のひずみゲージを接着し、ひずみを測定した。

2.2 試験方法

試験は 2.1 節で述べた試験片に引張試験機で引張負荷を与え、 90° 層内に発生する損傷を試験片側面からその場で観察した。観察範囲は試験部中央部の 3 mm である。試験速度は 1 mm/min である。損傷の進展を観察するために、ひずみ 0.1% 毎に試験を中断し、負荷荷重を保った

Fig. 1 Dimension of specimen for tensile test.

Fig. 2 In-situ observation of the damage.

Fig. 3 Observation area.

Table 1 Thickness of 90° ply in specimen.

	Total thickness [mm]	90° ply thickness [mm]
$n=1$ $[0_2/90_1/0_2]$	1.00	0.04
$n=2$ $[0_2/90_2/0_2]$	1.04	0.08
$n=4$ $[0_2/90_4/0_2]$	1.12	0.16

Table 2 Fiber and matrix in 0° and 90° ply.

	Fiber	Matrix	Thickness [mm]
0° ply	T700-24k	Epoxy 2592	0.24
90° ply	IMS60-24k	Epoxy	0.04

まま損傷の観察を行った。試験はひずみが 1.5% に達するまで行った。

損傷の観察は Fig. 2 のように、Keyence 製マイクロスコープを用いた。倍率は $\times 1,000\sim \times 3,000$ 倍である。なお、試験片の側面は粒径 $1\mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒により研磨した。

90° 層内の損傷を観察し、各層厚における損傷の進展

挙動，クラック密度を計測した。なお，本論文においてクラックは，損傷の最小単位である，繊維/樹脂界面のはく離が2つ以上連結，もしくは，繋がっていないが，並んで発生したものをクラックとみなしカウントした (Fig. 3)。

また，以後文中では， $[0_2/90_1/0_2]$ は $n=1$ ， $[0_2/90_2/$

$0_2]$ は $n=2$ ， $[0_2/90_4/0_2]$ は $n=4$ と記す。

3. 損傷観察結果

3.1 $[0_2/90_1/0_2]$ ($n=1$) の損傷観察結果

$[0_2/90_1/0_2]$ ， $n=1$ の観察結果を Fig. 4(a) に示す。この観察結果は，観察範囲内 (3 mm) において最も早く，

Fig. 4 Observation of damage growth at 90° layer.

クラック先端が $0^\circ/90^\circ$ 層間に達したクラックである。

まず、ひずみ0.4%において繊維マトリクスの界面の界面はく離と思われる初期損傷が発生している様子が観察された。

ひずみ0.8%では、ひずみ0.4%で発生した界面はく離がひずみの増加によりその影響で隣にある繊維界面においても、界面はく離が観察された。

ひずみ1.5%では、0.8%で発生した界面はく離がひずみの増加によりクラックの開口が増大する様子が観察された。また、クラックの開口は 90° 層中央部で最も大きく開口し、隣接する 0° 層に近づくにつれ開口幅が小さくなり、殆ど開いていない様子が観察された。また、繊維同士が接している部分では、界面はく離同士は連結しているが、繊維間に樹脂がある部分では、連結していないことが分かる。

Fig. 5(a)に $n=1$ における観察範囲内で発生した損傷の進展と、ひずみの関係を示す。Fig. 5(a)は損傷観察範囲内で観察された複数のクラックの長さを、各ひずみにレベルにおいて平均値と標準偏差をとり、プロットしたものである。Fig. 5(a)より、初期破損が発生するひずみは0.4%付近であることが分かる。また、発生したクラックは、安定的に徐々に進展していることが分かる。

3.2 $[0^\circ_2/90^\circ_2/0^\circ_2]$ ($n=2$) の損傷観察結果

Fig. 4(b)に、 $[0^\circ_2/90^\circ_2/0^\circ_2]$, $n=2$ の損傷進展の観察結果を示す。ひずみ0.4%において、繊維マトリクスの界面の界面はく離と思われる、初期損傷が発生している様子が観察された。

ひずみ1.0%までその後クラックは殆ど進展せず、ひずみ1.1~1.2%でクラックが大きく進展している。この時、界面はく離同士が連結した大きなクラックと、そのクラックの前方に未連結の新たな界面はく離が観察された。

ひずみ1.3%で 90° 層厚方向にクラックが貫通し、大きく開口している様子が観察された。また、 90° 層内中央部では、完全に連結した一つのクラックとなっているが、隣接する 0° 層近傍では、損傷の先端は、繊維間の樹脂により完全に連結していない様子が観察される。

Fig. 5(b)に $n=2$ における観察範囲内で発生した損傷の進展と、ひずみの関係を示す。初期損傷が発生するひずみは0.4%付近であることが分かる。また、ひずみ1.1~1.4%を境にして、10~20 μm 前後のクラックが不安定に急速に 90° 層厚方向に進展している損傷が多く見られた。また、クラックの先端から長さの短い層間はく離が発生している損傷も、数は少ないが観察された。

標準偏差が1.1%で大きくなり、その後、1.5%で小さく

(a) $n=1$, $[0^\circ_2/90^\circ_1/0^\circ_2]$

(b) $n=2$, $[0^\circ_2/90^\circ_2/0^\circ_2]$

(c) $n=4$, $[0^\circ_2/90^\circ_4/0^\circ_2]$

Fig. 5 90° layer in crack growth behavior.

なって収束しているのは、ひずみ1.1%で新たに小さなクラックが発生し、その後、クラックが進展したためである。

3.3 $[0^\circ_2/90^\circ_4/0^\circ_2]$ ($n=4$) の損傷観察結果

Fig. 4(c)に $[0^\circ_2/90^\circ_4/0^\circ_2]$, $n=4$ の損傷進展の観察結果を示す。

ひずみ0.7%において繊維マトリクスの界面で界面はく離と思われる損傷が観察された。

その後、ひずみ0.9%まで損傷は殆ど進展せず、ひずみ1.0%において損傷は 90° 層厚方向に大きく進展し、損傷の先端は隣接層にほぼ達している。 90° 層中央部では、損

傷は完全に連結した一つのクラックとなっているが、隣接する 0° 層近傍では、繊維間の樹脂により損傷が連結していない様子が観察される。

ひずみ 1.3% では、連結していなかった損傷同士も、繊維間の樹脂が塑性変形を起こし、連結している様子が観察された。また、先端から層間はく離が発生している様子が観察される。

Fig. 5(c) に $n=4$ における観察範囲内で発生した損傷の進展と、ひずみの関係を示す。Fig. 5 より、初期損傷が発生するひずみは 0.5% 付近であることが分かる。また、ひずみ 1.0~1.2% を境にして、10~20 μm 前後のクラックが不安定に急速に 90° 層厚方向に進展している。この損傷進展の傾向は $n=2$ の場合と同じであると考えられる。但し、損傷が急激に進展し始めるひずみは、 $n=2$ の場合よりも若干小さくなっている。

また、ひずみ 0.9~1.0% で標準偏差が大きくなっているのは、新たに長さの短いクラックが、複数発生したためである。その後、ひずみの増加に伴い、クラックが進展するものと、短いまま止まるクラックが観察された。そのため、 $n=2$ の場合と異なり、ひずみが増加しても標準偏差は大きいままである。これは先に進展したクラックが層厚方向に貫通し、クラックが大きく開口したため 90° 層内の応力緩和が起こり、長さの短いクラックが進展しなくなったものと考えられる。

3.4 クラック密度

各層厚におけるクラック密度の測定結果を Fig. 6(a), (b) に示す。Fig. 6(a) は、クラック長さに関係なく、界面はく離が 2 つ以上並んだものをすべてクラックとしてカウントした結果であり、Fig. 6(b) は、層厚に対して、長さが 75% 以上に成長したクラックのみをカウントした結果である。

まず Fig. 6(a) の測定結果について述べるが、 90° 層が薄くなるに従い、クラック密度が高くなっていることが分かる。特に $n=1$ の場合、 $n=2$ と比較すると、層厚は $1/2$ だがクラック密度は約 3 倍となっている。

一方、75% 以上の長さのクラックのみをカウントした Fig. 6(b) では、やはり層厚が薄いほうがクラック密度は高いが、Fig. 6(a) の結果と比較すると、 $n=1$ のクラック密度が大きく減少し、 $n=2$ のクラック密度とほぼ同じになっている。

ここで、Fig. 7 にひずみの増加とクラック開口変位 (COD) の測定結果を示す。この結果は、最も大きく開口している部分を測定したものである。なお、COD の計測は、画像処理により、クラック開口部の画素数から換算

(a) All crack is counted

(b) Crack length of 75% or more is counted

Fig. 6 Relation between crack density and strain in 90° layer.

Fig. 7 Relation between crack opening displacement and strain.

し求めている。

Fig. 7 の結果は、層厚が薄い $n=1$ は、 $n=2$ 、 $n=4$ に比べると、COD が極端に小さくなっている。クラックが開口している部分では、 90° 層内において応力負担はゼ

口になり、クラックの長さ、開口幅が長くなるほど、 90° 層内の応力緩和の範囲は大きくなっているものと考えられる。そのため、層厚が厚い場合は、クラックの開口による 90° 層内の応力緩和が大きく、クラック密度が低くなっていると考えられる。層厚が薄くなるにつれ、一つ一つのクラックの長さ、COD が小さくなることから、 90° 層内の応力緩和の範囲が狭くなり、クラック密度が高くなっていくものと考えられる。特に $n=1$ の場合には、剛性の高い 0° 層が非常に近くなるため、クラックが開口しにくくなっているものと考えられ、個々の損傷による応力緩和が小さいことから、微細な損傷が非常に多く発生しているものと考えられる。

3.5 90° 層内損傷観察結果のまとめ

各層厚における損傷の観察結果から、以下のことが分かった。初期損傷の発生ひずみに関しては $0.4\sim 0.5\%$ であり大きな差はなかった。本研究の材料では、熱残留応力の差が、各層厚でほぼないので、妥当な結果であると考えられる。

次に損傷クラックの進展について述べる。 $n=1$ の場合、クラックは安定的に徐々に進展する。すべての長さのクラックをカウントした場合、クラック密度は最も高いが、COD は小さく、繊維同士が密着しているところ以外では、繊維間の樹脂により、界面はく離同士が繋がっていないものが多く見られる。また、クラックの長さも短いものが数多く観察された。

$n=2$ の場合、ひずみ $1.1\sim 1.4\%$ においてクラックが不安定に、急速に進展する。COD、クラック密度は $n=1$ と $n=4$ の中間である。

90° 層内で 0° 層から離れている場所では、損傷は完全に繋がっているが、 0° 層近傍では完全に繋がっていない部分も見られた。

$n=4$ の場合、ひずみ $1.0\sim 1.2\%$ において急速にクラックが進展する。また、COD は最も大きくなり、クラック密度は最も小さい。また、その損傷は、完全に連結した一つのクラックとなっているものが多く、その先端からは層間はく離の発生が観察された。

クラックが急速に進展するひずみは、層厚が薄くなるにつれ大きくなる傾向が見られ、これは川邊ら¹⁾の研究の、初期破損ひずみが増大するという結果と同じ傾向であると考えられる。

また、 $n=1$ の場合には、クラックが安定的に徐々に進展するのに対し、 $n=2$ 、 $n=4$ の場合には不安定に、損傷が急速に進展する様子が観察され、 90° 層内の損傷進展は層厚によって大きく二つの進展モードがあるのではな

いかと考えられる。

4. 損傷進展メカニズム

4.1 損傷進展条件

前節の損傷観察の結果より、 90° 層内の損傷進展は大きく分けて二つの損傷進展モードがあるのではないかと考えられた。一つは、 $n=1$ の場合の安定的に徐々に進展するモード、もう一つは、 $n=2$ 、 $n=4$ の場合の、あるひずみで不安定に急速に進展するモードである。野田らの研究によれば、トランスバースクラックの発生と進展をそれぞれ、応力破壊条件とエネルギー解放率を用いてシミュレーションし、実験結果と良い一致を得ていることから、本項では、層厚の影響を受けると考えられるエネルギー解放率を計算し、クラックが不安定に急速に進展するひずみと比較し、層厚がクラック進展に及ぼす影響について考察する。

4.2 エネルギー解放率の計算

エネルギー解放率の計算は、汎用 FEM 解析ソフト MSC Marc. Ver. 2008 を用いて行った。計算手法には仮想クラック閉口法: VCCM (virtual crack closure method) を採用した。VCCM ではクラックは、有限要素解析により得られるき裂先端近傍の節点力と変位で計算される。本解析で用いたモデルの境界条件を Fig. 8 に示す。解析に用いたモデルは $1/2$ モデルである。 90° 層内の要素サイズは $2.5\mu\text{m}$ とし、8 節点アイソパラメトリック要素を用いて計算を行った。不安定に急速にクラックが進展する現象は繊維とマトリクスを考慮したメゾ的な現象ではなく、マクロ的な現象であると考えたため、 0° 層、 90° 層は均質材として取り扱い、エネルギー解放率を計算することにした (Fig. 9)。解析に使用した材料定数を Table 3 に示す。

クラックの長さを、 $0^\circ/90^\circ$ 層間に向かって垂直方向に長くしていき、任意のクラック長さ $2a$ のクラックがもつ、先端のエネルギー解放率の計算を行った。また、クラックは 2 次元モデルであるので、試験片幅方向に貫通している。

実際の観察結果は、クラックが試験片幅方向に貫通していないことも考えられるので、貫通したクラックを有する 2 次元モデルは、試験片側面の表面に近い場所を再現していると考えるのが妥当であると思われる。

クラックの進展は、厚み方向への進展と、幅方向への進展の両方が考えられるが、試験片の側面は自由端であることから、内部よりも応力が高くなるため、まず側面の表面で発生・進展すると考えられる。そのため、試験

Fig. 8 A calculated by method by crack closure method (VCCM).

Fig. 9 Boundary condition.

Table 3 Material properties of 0° layer and 90° layer.

0° layer ^a	E (GPa)	113.5
	ν	0.3
	α ($10^{-6}/K$)	1.0
90° layer ^b	E (GPa)	8.31
	ν	0.45
	α ($10^{-6}/K$)	22.5
	ΔK	105

^aRef. 11. ^bRef. 12.

片側面の表面に近い場所でのエネルギー解放率と損傷進展の関係を議論することは安全側での設計を考える上で意義があると考え。

4.3 エネルギー解放率と損傷進展の考察

Fig. 10 に計算結果を示す。Fig. 10 の(a), (b), (c), は各層厚におけるエネルギー解放率の計算結果である等高線図と、クラックの進展の散布図を重ね合わせたものである。

(a) $n=1$, 90 layer thickness 0.04mm

(b) $n=2$, 90 layer thickness 0.08mm

(c) $n=4$, 90 layer thickness 0.16mm

Fig. 10 Relation between damage progress behavior and energy release rate.

まず、Fig. 10(a)の $n=1$ の場合、クラック先端のエネルギー解放率はクラック長さ0.030 mm時に最大となり、その後、クラックの先端が0°層に近づくにつれて減少することが分かる。Fig. 10(b), (c)と比較して、エネルギー解放率の値は非常に小さいことが分かる。

Fig. 10(b)の $n=2$ の場合、クラック長さ0.060 mm時

に最もエネルギー解放率が高くなり、その後減少している。

Fig. 10(c)の $n=4$ の場合、クラック長さ0.12 mm時に最もエネルギー解放率が高くなり、その後減少している。

各層厚における計算結果より、クラックの長さが長くなるに伴い、エネルギー解放率が上昇し、層厚みの約75%のクラック長さの時にエネルギー解放率が最大となる。その後、クラック先端が隣接する 0° 層に近づくに伴い、エネルギー解放率が減少する傾向が共通して見られる。エネルギー解放率が減少に転じるのは、隣接する 0° 層の剛性が高いため、クラック先端が開口しにくくなるためであると考えられる。

また、Fig. 10(b) ($n=2$) と Fig. 10(c) ($n=4$) では、エネルギー解放率が $20\sim 40 \text{ J/m}^2$ を境に大きくクラックが進展していることが分かる。このことより、 90° 層内の破壊靱性値は、 $20\sim 40 \text{ J/m}^2$ の間にあるのではないかと推察される。文献値による層内破壊靱性値¹³⁾ともほぼ一致しており、クラック先端のエネルギー解放率が破壊靱性値に達した時、クラックが急速に進展すると考えられる。

また計算結果より、クラック長さが層厚の75%程度になるまでは、クラックの成長に伴い、エネルギー解放率が大きくなっていることから、一旦破壊靱性値を超えてクラックが進展し始めると、クラックは加速的に急速に進展すると考えられる。 $n=2$, $n=4$ の場合、 $n=1$ に比べて、初期損傷が成長して 90° 層間に達するまでの距離が長いので、進展速度が速く、損傷は脆性的に進展するものと思われる。そのため、 $n=2$, $n=4$ では、繊維間の樹脂をクラックが横断した、一つの大きなクラックになった様子が多く観察されたと考えられる。一方 $n=1$ の場合、Fig. 10(a)より、エネルギー解放率が $20\sim 40 \text{ J/m}^2$ に達する領域は小さく、クラックの進展は、強度の低い繊維/マトリクス界面での破壊が支配的になると考えられる。そのため、損傷観察結果からも、繊維間の樹脂は破損せず橋掛けしている様子が多く見られたと考えられる。このことは、Fig. 7の $n=1$ のCODが極端に小さいことの要因の一つであると思われる。また、CODの減少は、クラック先端からの層間はく離の発生を抑制していると考えられ、 $n=1$ において層間はく離が観察されなかった結果と一致する。

以上より、層厚の違いがエネルギー解放率と損傷の進展速度に影響を及ぼし、クラックが安定的に、徐々に進展するモードと、不安定に、急速に進展するモードの違いを引き起こしていると考えられ、そのモードの違いが、

Fig. 11 Schematic of crack growth mode.

損傷形態の違いの原因であると考えられる。

4.4 層厚と損傷進展メカニズム

クラックが徐々に進展するモードと急速に進展するモードの二つの進展モードが観察された。それぞれの進展モードにおける損傷進展の模式図を Fig. 11 に示す。

まず、Fig. 11(a)に $n=1$ で見られた、クラックが徐々に進展するモードの模式図を示す。Fig. 11(a)のStep 1において、成形時などに発生した初期欠陥や、繊維配列の不統一によって、応力集中が起こり、初期損傷が繊維/界面で発生する。次にStep 2において、初期損傷周辺部の応力集中によって、新たな繊維/マトリクス界面はく離が発生する。その後ひずみが増加し、Step 3において、エネルギー解放率が層内破壊靱性値に達する前に、新たな繊維/マトリクス界面が発生し、層厚方向に損傷が並ぶ。そのため、繊維間の樹脂は破損せず残り、橋掛け状態になり、連続した一つの大きなクラックにはならない。そのため、CODは小さくなり、クラックの開口による 90° 層内の応力緩和は小さくなるため、クラック密度は高くなるものの、クラック先端からの層間はく離

は発生しなくなる。

次に、Fig. 11 (b) に $n=2$, $n=4$ で見られた、損傷が急速に進展するモードの損傷進展の模式図を示す。Step 2 までは、Fig. 11 (a) と同じメカニズムで損傷が進展する。その後、ひずみが増加し、Step 3 でエネルギー解放率が、層内破壊靱性値に達し、クラックが進展し始めると、クラック長さの増加に伴い、エネルギー解放率は上昇するため、加速的にクラックは進展する。そのため損傷は脆性的に進展し、繊維間の樹脂を横断した一つの大きなクラックになりやすい。クラック長さが長く、かつ、COD が大きくなるため、 90° 層内の応力緩和領域が大きくなることから、 $n=1$ に比べて、クラック密度は小さくなるが、クラック先端から層間はく離が発生しやすくなる。

5. 結 言

$0^\circ/90^\circ$ 直交積層材料を用いて 90° 層の厚みを変化させ、 90° 層内の損傷進展を観察した結果、次のことが明らかになった。

(1) 90° 層の厚みによって、損傷進展モードが変化し、本研究で用いた材料では、 $n=2$, $n=4$ (層厚 0.08 mm, 0.16 mm) の場合、損傷が急速に進展する現象が観察された。層厚が $n=1$ (層厚 0.04 mm) の場合、損傷は一気に進展することなく徐々に進展した。このモードの違いは、 90° 層内のクラックのエネルギー解放率の計算結果より、層が薄くなることで、エネルギー解放率の値が減少することに起因すると推察された。

(2) 損傷進展モードの違いにより、 90° 層内の損傷形態が変化した。層が薄くなることで、損傷は、一つの繋がったクラックにならず、COD が小さくなることから、クラック先端から発生する層間はく離の発生が抑制されることが確認された。

以上より、薄層化による引張り応力下における、直交積層板内の損傷進展の抑制効果が確認され、その抑制効果はエネルギー解放率が小さくなることに起因していると考えられた。損傷の進展が鈍化し、さらに、層間はく

離の発生が抑制されることは、損傷許容設計上非常に有効であると考えられる。

また、本論文における損傷進展の検討結果は、側面からの観察であるため、試験片幅方向への進展は考慮されていないが、層厚が薄くなることによって、幅方向への進展の抑制も考えられるため、3 次元的なクラックの進展挙動について検討することは今後の重要な課題であると考え、従って、今後、幅方向へのクラックの進展の観察を行い、3 次元的 FEM モデルによるき裂進展挙動の検討を行いたいと考える。

参 考 文 献

- 1) 笹山秀樹, 川邊和正, 友田 茂, 大澤 勇, 影山和郎, 小形信男: 日本複合材料学会誌, **30**, 4 (2004), 142-148.
- 2) 竹内博紀, 北口哲也, 斎藤博嗣, 金原 勲: 材料システム, **28** (2010), 39-46.
- 3) J.E. Bailey & A. Parvizi: *J. Mater. Sci.*, **13** (1977), 2131-2136.
- 4) K.W. Garrett & J.E. Bailey: *J. Mater. Sci.*, **12** (1977), 157-168.
- 5) S. Ogiwara, N. Takeda & A. Kobayashi: *Compos. Sci. Technol.*, **57** (1997), 267-285.
- 6) 荻原慎二, 武田展雄, 小林訓史, 小林 昭: 材料, **47**, 1 (1998), 68-72.
- 7) 野田淳二, 清水真佐男, 岡部朋永, 武田展雄: 日本機械学会論文集 A, **70**, 698 (2004), 1364-1369.
- 8) T. Hobbiebrunken, M. Hojo, K.K. Jin & S.K. Ha: *Compos. Sci. Technol.*, **68** (2008), 3107-3113.
- 9) 西川康博, 三木崇之, 大窪和也, 藤井 透, 川邊和正: 日本機械学会論文集 A, **71**, 710 (2005), 1356-1361.
- 10) S. Shin, R.Y. Kim, K. Kawabe & S.W. Tsai: *Compos. Sci. Technol.*, **67** (2007), 996-1008.
- 11) K. Ogi, S. Yashiro, M. Takahashi & S. Ogiwara: *Compos. Sci. Technol.*, **69** (2009), 469-476.
- 12) T. Yokozeki & T. Aoki: *Compos. Sci. Technol.*, **65** (2005), 1647-1654.
- 13) 小林訓史, 小島嗣也, 若山修一: 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集 (I) (2003), pp. 149-150.