高温環境下におけるクロスプライ CFRTP 積層板の
トランスバースクラック発生及び累積挙動の評価細井 厚志^{*1}, 寺内 幹^{*2}, 角田 大^{*2}, 木村 達哉^{*2}, 古挽 彰^{*3}, 川田 宏之^{*1,*4}Evaluation of initiation and multiplication of transverse crack
in cross-ply CFRTP laminates at elevated temperaturesAtsushi HOSOI^{*1}, Motoki TERAUCHI^{*2}, Dai TSUNODA^{*2}, Tatsuya KIMURA^{*2},
Akira KOBIKI^{*3} and Hiroyuki KAWADA^{*1,*4}^{*1} Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering, Faculty of Science and Engineering, Waseda University
3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan^{*2} Department of Applied Mechanics, Graduate School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University
3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan^{*3} Production Engineering Center, IHI Corporation

1 Shin-nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 235-8501, Japan

^{*4} Kagami Memorial Research Institute for Materials Science and Technology
2-8-26 Nishiwaseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169-0051, Japan

Received: 11 July 2017; Revised: 20 September 2017; Accepted: 25 October 2017

Abstract

The effects of environment temperature on initiation and multiplication of transverse crack in cross-ply carbon fiber reinforced thermoplastic (CFRTP) laminates have been investigated. Static tensile tests for the cross-ply laminates and the 90° unidirectional laminates were carried out at room temperature, 93 °C and 130 °C, respectively. The transverse cracks were observed by soft X-ray photography. The tensile strength and the failure strain in the cross-ply laminates and the 90° unidirectional laminates at high temperature decreased compared to the values at room temperature. It was also found that the behavior of initiation and multiplication of the transverse cracks in the cross-ply laminates was changed due to the environment temperature. The experimental results under different temperature were analyzed by Weibull distribution on the basis of probabilistic model. Next, the energy release rate was calculated due to formation of a new micro crack based on the Weibull distribution. The predicted transverse crack density by Weibull distribution was compared with the experiment result and the reasonability of using Weibull distribution to CFRTP cross-ply laminates under high temperature was verified. It was found that the critical energy release rate of CFRTP laminates has decreased at high temperature and the experimental results showed that the matrix strength was decreased at high temperature. Also, the fiber-matrix interfacial fracture on the fracture surface of the 90° unidirectional laminates was observed in some areas at high temperature whereas the matrix fracture was observed at room temperature. Therefore, it was suggested that the interface strength between polymer and fiber was decreased at high temperature.

Keywords : Composite materials, Transverse crack, CFRTP laminates, Elevated temperature, Tensile properties

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) はその優れた比強度・比剛性から、金属に代わる構造材料として輸送機器分野への適用が進められている。近年、航空機の一次構造部材である主翼、胴体に熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) の適用が進んでおり、航空エンジン部材にも CFRTP の採用が見られる (村上他, 2013)。この

No.17-00312 [DOI:10.1299/transjsme.17-00312], J-STAGE Advance Publication date : 8 November, 2017

^{*1} 正員, 早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)^{*2} 早稲田大学 理工学術院 大学院基幹理工学研究科^{*3} 正員, (株) IHI (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原 1)^{*4} 正員, フェロー, 早稲田大学 各務記念材料技術研究所 (〒169-0051 東京都新宿区西早稲田 2-8-26)

E-mail of corresponding author: hosoi@waseda.jp

ように構造材料としての適用が進んでいる CFRTP において、信頼性の確保のために損傷発生、進展プロセスを十分に把握することが必要である。CFRP 積層板の最初期の損傷はトランスバースクラックと呼ばれる荷重方向に垂直に生じる母材樹脂割れであり、繊維破断、層間はく離などの重大な損傷を引き起こす原因となる。したがって、トランスバースクラックの発生挙動を理解することは非常に重要である。

これまで、静的及び疲労負荷下におけるトランスバースクラックの累積挙動や内部への進展挙動について、実験および解析に基づく定量的な評価は数多くの研究で行われてきた。Garrett and Bailey (Garrett and Bailey, 1977) や、Lee and Daniel (Lee and Daniel, 1990) は shear lag 解析によりトランスバースクラックの累積挙動およびトランスバースクラック形成に伴う積層板の剛性低下を定量的に評価した。Nairn (Nairn, 1989) は、Hashin (Hashin, 1985) によって提案された変分原理を用いた応力解析を応用し、トランスバースクラック形成に伴うエネルギー解放率の算出を行った。横関ら (Yokozeki and Aoki, 2002) は試験片幅および厚さの異なる擬似等方積層板およびクロスプライ積層板を作製し、トランスバースクラックの試験片幅方向の進展に対して評価を行うとともに仮想き裂開口法を用いてエネルギー解放率を算出し、自由端近傍および試験片中央付近におけるトランスバースクラック進展に伴うエネルギー解放率の差異から試験片内のトランスバースクラック進展挙動が特徴づけられることを示した。さらに、トランスバースクラックの破壊形態は脆性破壊の様相を示すことから、トランスバースクラックの発生や累積挙動について確率論的モデルを導入した定量評価もなされている (Fukunaga et al., 1984, Sun et al., 2003, Vinogradov and Hashin, 2005)。

疲労負荷下におけるトランスバースクラック累積挙動について、Liu and Narin (Liu and Nairn, 1990) は変分原理に基づきトランスバースクラック形成に伴うエネルギー解放率を算出し、トランスバースクラック密度増加率とエネルギー解放率範囲にべき乗関係があることを示した。また、黄木ら (黄木, 矢代, 2009, Ogi et al., 2009) は、積層板中の 90°層が初期き裂を有する単位格子の集合であることを仮定し、疲労荷重により微小き裂が成長し、臨界き裂長さに達したときにトランスバースクラック形成される安定き裂成長 (Slow crack growth: SCG) の概念に確率論を組み合わせた確率的 SCG モデルを構築し、疲労荷重下におけるトランスバースクラックの累積挙動を評価した。近年、著者ら (高村他, 2011, 細井他, 2012, Hosoi et al., 2013, 栗原他, 2013, 川田他, 2014, Hosoi et al., 2015) は、トランスバースクラック密度増加率とトランスバースクラック形成に伴うエネルギー解放率幅がべき乗関係にあることを応用し、疲労荷重下におけるトランスバースクラック発生までの負荷サイクル数を定量的に予測する簡便な方法を提案した。

このようなトランスバースクラックの発生や成長挙動の評価に関する研究は、CFRTP 積層板に対しても幾つか行われている。Huang ら (Huang et al., 2000) は Paris 則を応用し、熱可塑性ポリイミド樹脂を母材とした CFRTP 積層板のトランスバースクラック発生寿命を予測している。著者ら (Hosoi et al., 2016) は熱硬化性炭素繊維強化プラスチック (CFRTS) 積層板と CFRTP 積層板のトランスバースクラック発生寿命を評価し、CFRTP 積層板においては長寿命域において疲労強度低下が大きいことを示した。

一方で、CFRP の高温環境下における力学特性は、熱残留応力の解放、繊維と樹脂の界面強度や樹脂の粘弾性特性の変化が引き起こされ複合的に作用するため、常温と比較し大きく変化することが知られている (Huang et al., 1997, Kobayashi and Takeda, 2002)。武田ら (Takeda and Ogihara, 1994) はエポキシ樹脂を母材とする 2 種類のプリプレグ (T800H/3631 および T300/3601) を用いてクロスプライ積層板を成形し、常温および 80 °C 環境下でトランスバースクラック形成挙動を評価した。その結果 T800H/3631 においては 80 °C 環境下でトランスバースクラックが生じにくくなることを示した。Shear-lag モデルに基づき CFRP 積層板内にトランスバースクラックが発生する際のエネルギー解放率を算出したところ、80 °C 環境下におけるエネルギー解放率は常温環境下より高い値を示し、これは常温から 80 °C までの範囲においては繊維/樹脂界面の強度低下は大きくないためと考察している。一方、Kim ら (Kim and Ye, 2004, 2005) はポリエーテルイミド樹脂を母材とした一方向 90°CFRTP 積層板に対して高温環境下で層間破壊靱性や繊維樹脂間の界面せん断強度評価を行った。その結果、130 °C 環境下において母材樹脂単体の臨界破壊靱性値は常温と比べて増加するものの、き裂進展開始に対する臨界層間破壊靱性は常温と比較し大幅に減少することを示した。さらに、単繊維埋蔵型試験片を用いてフラグメンテーション試験を行った結果、130 °C における界面せん断強度は常温より低下することを示した。しかしながら一方向材の基礎物性評価にとどまっており、クロスプライ材等の積層板に対する損傷評価までは行われていない。

以上に示したように CFRTS 積層板に生じるトランスバースクラックの発生や成長挙動については種々の検討がなされてきたが、それに比べて CFRTP 積層板については十分な検討がなされているとは言えない。特に高温環境下においては、母材樹脂や繊維樹脂界面の力学的特性の変化、積層板成形時に生じた熱残留応力の解放といった要因が相互に作用し、トランスバースクラックの発生や成長挙動に大きな影響を及ぼす。CFRTP を構造部材として更なる適用を拡大させるためには、高温環境下における機械的性質を評価する必要がある。そこで本研究では、CFRTP 積層板のトランスバースクラックの発生や成長挙動に及ぼす温度依存性を定量的に評価し、そのメカニズムを明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

2・1 試験片

本研究においてはスーパーエンジニアリングプラスチックを母材とした CFRTP 積層板を用いて試験を行った。トランスバースクラックの発生や成長挙動の評価を対象とするために積層構成はクロスプライ $[0/90_4]_s$ 積層板を採用した。試験片形状は長さ 230 mm、幅 30 mm の短冊形とし、試験片端部には長さ 55 mm のエメリークロスタブを張り付けた。試験片端面の表面は、粒径 $0.25\ \mu\text{m}$ のダイヤモンドパウダーを研磨剤としてバフ研磨を施し、 $Ra = 0.07 \pm 0.01\ \mu\text{m}$ に収まっていることを確認した。一方向 90° 材の試験片形状は、JIS K 7165 を参考に長さ 250 mm、幅 25 mm、厚さ 2 mm の短冊形とした。試験片端部にはクロスプライ積層板と同様のタブを張り付けた。これらの試験片の概要を図 1 及び表 1 に示す。また、母材樹脂単体試験片の試験片寸法は JIS K 7161 を参考に図 2 に示すようなダンベル型とした。ただし、平行部を有さないダンベル型とし、試験片の作製は NC フライスをを用いて試験片形状に切り出した。また、すべての試験片に対して、#800、#2000 のエメリーペーパーで標点間に研磨を施した後に試験を行った。タブにはエメリークロスを用いた。

Fig. 1 Specimen geometry of CFRTP laminates.

Table 1 Dimensions of CFRTP specimens.

			$[0/90_4]_s$	90° unidirectional laminate
Overall length	L	mm	230	250
Gauge length	L_0	mm	120	150
Specimen width	W	mm	30	25

Fig. 2 Specimen geometry of matrix specimen.

2・2 静的引張試験

供試体の機械的性質及びトランスバースクラック発生・進展挙動に対する環境温度の影響を評価するために、静的引張試験を行った。環境温度は使用温度を想定し、室温および 93 °C、130 °C とした。引張速度は 0.5 mm/min とした。トランスバースクラックの観察は、任意の応力で静的引張試験を中断した試験片に対して行った。なお、この静的引張試験中に任意の応力で中断する試験を静的中断試験と呼称する。図 3 に示すように試験片中央部 60 mm の範囲におけるトランスバースクラック数をカウントした。トランスバースクラック密度 D を式 (1) のように定義した。ただし、トランスバースクラック数を N 、標点間距離を L_g (60 mm) とする。トランスバースクラックは試験片内のマイクロクラックが 90°層の厚さ方向に成長して形成され試験片幅方向に進展するが、本研究ではトランスバースクラック数のカウントは軟 X 線画像にて観察可能な試験片両端において幅方向に 0.3 mm 以上進展したものに対して行った。

$$D = \frac{N}{2L_g} \quad (1)$$

Fig. 3 Schematic of transverse crack in the CFRTP laminates and definition of transverse crack density.

3. 実験結果

3・1 静的引張試験結果

試験により得られたクロスプライ積層板および一方向 90°材の応力—ひずみ線図を図 4 に、機械的性質を表 2 に示す。クロスプライ積層板に関しては、室温環境下と比較し 93 °C、130 °C における機械的性質（弾性率、破断強度、破断ひずみ）はあまり変化しなかった。これは、クロスプライ積層板において 0°層の荷重分担率が高いことに加え本研究の範囲において温度依存性が小さいためと考えられる。一方で、一方向 90°材においては環境温度が上昇するにつれて弾性率、破断強度、破断ひずみが低下することが確認された。これは高温環境下において母材樹脂及び繊維/樹脂界面の強度が低下したためと示唆される。また、室温および 93 °C、130 °C 環境下において一方向の材料特性値を表 3 にまとめた。

Fig. 4 Stress-strain curves of cross-ply laminates and unidirectional 90° laminates at room temperature, 93 °C and 130 °C.

Table 2 Mechanical properties of CFRTP cross-ply and 90° unidirectional laminates at each test temperature.

Laminate configuration			[0/90 ₄] _s cross-ply laminates			90° unidirectional laminates		
Temperature	T		RT	93 °C	130 °C	RT	93 °C	130 °C
Young's modulus	E	GPa	37.1	37.9	38.7	8.72	8.31	7.98
Tensile strength	σ_b	MPa	446	419	410	86.0	69.7	57.5
Failure strain	ϵ_b	%	1.20	1.14	1.12	1.09	0.937	0.835

Table 3 Material properties of CFRTP laminates.

Temperature	T		RT	93 °C	130 °C
Longitudinal Young's modulus	E_L	GPa	159	154	163
Transverse Young's modulus	E_T	GPa	8.72	8.31	7.98
In-plane shear modulus	G_{LT}	GPa	4.60	3.89	3.59
In-plane Poisson ratio	ν_{LT}		0.360	0.352	0.344
Longitudinal thermal expansion coefficient	α_L	10 ⁻⁶ K ⁻¹	0		
Transverse thermal expansion coefficient	α_T	10 ⁻⁶ K ⁻¹	30.3		
Stress free temperature	T_{sf}	°C	246		

3・2 静的荷重負荷下におけるトランスバースクラック発生、進展挙動

室温および 93 °C, 130 °C 環境下における静的中断試験後のトランスバースクラック観察結果をそれぞれ図 5-7 に示す. なお, それぞれの図における左図は試験片標点間内全体の観察結果を示しており, 右図は左図中の枠内の拡大図である. 各図にカッコ書きで試験片個別の破断強度を示した. また, 各図 (a) ~ (e) にカッコ書きで記載した応力レベルは, 試験片個別の破断強度から算出した値である. 各図 (a) には, 静的中断試験実施前の試験片に対して軟 X 線観察を行った結果を示しており, いずれの試験片においても初期状態としてトランスバースクラックは存在しないことを確認した.

環境温度を室温および 93 °C, 130 °C と上昇させた場合, トランスバースクラックは低応力域で発生しやすくなることがわかる. 図 5 に, 室温環境下におけるトランスバースクラックの発生及び累積, 試験片幅方向への進展挙動を示した. これより, 室温環境下においては 201 MPa において最初期のトランスバースクラックが発生し, 荷重応力の増加に伴いトランスバースクラックが増加, 内部に進展する様子が確認された. それと比較し, 図 6 に示した 93 °C 環境下においては, 図 6 (b) より荷重応力 80.6 MP という低応力においてすでに試験片端部にトランスバースクラックが発生していた. 図 6 (c) に示す荷重応力 161 MPa においては試験片端部に長さ 1 mm に満たないトランスバースクラックが多数発生しており, また内部に 1 mm 以上進展したクラックの周辺には, 0° 層の割れであるスプリッティングが観察された. スプリッティングはトランスバースクラック先端の応力特異性により発生すると示唆される. 荷重応力をさらに増加させるとトランスバースクラックはさらに累積し, 内部に進展する様子が確認された. また, 図 6 (e) に示す荷重応力 363 MPa においてスプリッティングは試験片端部全域に広がっていることが確認されるとともに, 層間はく離のような陰影も見られた. さらに, 130 °C 環境下においては, 図 7 (b) より荷重応力 40.3 MPa (破断応力の 9.6 %) という低応力下においてトランスバースクラックが既に複数発生していることが確認された. 図 7 (c) に示した荷重応力 80.6 MPa においては, トランスバースクラック数が大幅に増加しており, また試験片端部から 5 mm 以上試験片幅方向に進展しているものも多数存在している. またスプリッティングも既に試験片端部全域に確認された. 図 7 (d) より荷重応力を 161 MPa まで増加させると, トランスバースクラックは試験片幅方向に大きく進展していることが確認された. 一方で, 図 7 (d), (e) を比較するとトランスバースクラックについてその数や内部進展挙動に大きな変化はなかった. なお, 図 7 (e) に示した荷重応力 403 MPa においては層間はく離のような陰影が複数確認された. 図 8 にこれらの観察結果に基づき各温度におけるトランスバースクラック密度と荷重応力の関係を示す. 図 8 より環境温度が高いほど低い荷重応力でトランスバースクラックが累積し試験片が破断する前に飽和にいたることが分かる.

Fig. 5 Damage growth observation of cross-ply laminates at room temperature by soft X-ray photography ($\sigma_b = 479$ MPa).

Fig. 6 Damage growth observation of cross-ply laminates at 93 °C by soft X-ray photography ($\sigma_b = 384$ MPa).

Fig. 7 Damage growth observation of cross-ply laminates at 130 °C by soft X-ray photography ($\sigma_b = 418$ MPa).

トランスバースクラック飽和密度は平均で 3.61 mm^{-1} であった。室温環境下での試験ではトランスバースクラック密度が飽和する前に試験片が破断した。

一般にトランスバースクラックの発生、進展挙動は大きく分けて2つのタイプに分類される。(I) 試験片両端部でトランスバースクラックが発生した後、直ちに試験片幅方向に貫通し、貫通したトランスバースクラックが試験片内部に累積するタイプと、(II) 試験片両端部で長さの短いトランスバースクラックが発生した後、試験片両端部に累積するとともに、試験片幅方向へ進展するタイプがある。比較的 90° 層の厚いクロスプライ積層板において、熱硬化性樹脂を母材とした CFRTS 積層板に生じるトランスバースクラックは、母材樹脂の特性やプリプレグの厚さにも依存するが一般に前者のタイプの破壊挙動を呈することが多い(栗原他, 2013)。本研究で用いた CFRTP 積層板では、図 5-7 に示すように後者のタイプの破壊挙動を示した。これは母材樹脂の高い靱性および自由端効果に起因するものと示唆される。しかし、高温環境下、特に 130°C 環境下においては、低応力においてトランスバースクラックが多数発生し、また室温環境下と比較すると内部に大きく進展することから、高温環境下では CFRTP 積層板の靱性が低下することも示唆される。

Fig. 8 Relationship between transverse crack density and applied stress at each temperature condition.

4. 解 析

4・1 トランスバースクラック形成における確率的モデル

本解析においては、確率的 SCG モデル(黄木, 矢代, 2009, Ogi et al., 2009) の概念を踏襲しつつ、微小トランスバースクラック発生に伴うエネルギー解放率の概念を盛り込んだ新たなモデルを構築した。本研究ではクロスプライ積層板内の 90° 層が、初期欠陥により強度のバラつきを有する単位格子の集合であると仮定し、トランスバースクラックの発生及び累積挙動を評価した。図 9 に示すように、クロスプライ積層板は多数の単位格子(体積 V_0) からなり、各単位要素には 90° 層端部に長さ a_i の初期き裂が一個ずつあるものと仮定する。トランスバースクラックはこの初期き裂が不安定に進展することで発生すると仮定する。任意の応力 σ を受ける各格子において、初期欠陥寸法に応じて応力拡大係数は定義されるが、その初期欠陥のサイズが一樣ではない場合、各欠陥周りの応力分布は各格子においてそれぞれ異なる。そこで、各格子における見かけの破壊強度は異なると仮定した。即ち、各格子においてトランスバースクラック形成に伴う見かけのエネルギー解放率は異なると仮定し、格子内にトランスバースクラックが一つ形成される際のエネルギー解放率を算出した。本解析においては、ある格子においてトランスバースクラックが発生した場合も、隣接する格子の応力状態に影響を及ぼさないと仮定した。その背景は、供試体に生じるトランスバースクラックは、幅方向に貫通しない微小なものであるため未損傷の 90° 層から十分に応力伝達がなされることに基づく。それ故に本解析モデルにおいては、隣接する格子内でトランスバースクラックが発生した際、そのクラック近傍の 90° 層の応力伝達の影響は隣の格子に及ばず、個々の格子内の応力は独立であると考えられる。この仮定はトランスバースクラック密度が高くない領域で有効であると考えられる。

Fig. 9 Unit elements with initial defects in the cross-ply laminates.

4・2 ワイブル分布の導入

図9に示した各格子における静的強度，即ち各格子にトランスバースクラックが発生する際の90°層応力はワイブル分布に従うとすると，任意の90°層応力 $\sigma^{(90)}_i$ における破壊確率は次式で表される．

$$F(\sigma^{(90)}_i) = 1 - \exp \left\{ -V_e \left(\frac{\sigma^{(90)}_i - \sigma_L}{\sigma_s} \right)^m \right\} \quad (2)$$

ここで， V_e は単位要素の体積， σ_s は尺度係数， m は形状係数あり， σ_L は位置係数である．3母数ワイブル分布においてはこの位置係数が $\sigma^{(90)}_i$ の下限値を示す．また，位置係数 σ_L を推定する際には， $Y = \ln \ln (1/(1-F))$ ， $X = \ln(\sigma - \sigma_L)$ とおいた際の相関係数が最大となる σ_L を求めた．なお，単位要素の体積 V_e は以下の式で表される．

$$V_e = \frac{2t_1 W_a}{D_s} \quad (3)$$

ここで， t_1 は90°層厚さの半分， W_a は幅方向に進展する試験片片側のトランスバースクラック長さ， D_s は飽和トランスバースクラック密度である．今回，累積破断確率は以下に示すメジアンランク法に基づき算出した．算出の際には，応力 σ においてトランスバースクラックが新たに N_n 個発生した時，破断応力が σ である90°層単位要素は N_n 個であると仮定した．

$$P(\sigma^{(90)}_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (4)$$

ここで， n ：要素数， i ：要素番号である．なお，本解析においては，静的引張試験を中断してトランスバースクラック観察を行う都合上，同一の負荷応力 σ において複数のトランスバースクラックが発生する．そのようなトランスバースクラックには，累積破壊確率という概念のもと，負荷応力 σ 未満で発生したトランスバースクラック

個数の和と、負荷応力 σ で発生したトランスバースクラック数との総和を要素番号として与えた。すなわち、同一応力下で発生したトランスバースクラックには同一の要素番号を与えている。このようにしてすべてのトランスバースクラックに要素番号を与え、ワイブルパラメータを取得した。任意の 90° 層応力 $\sigma^{(90)}_i$ におけるトランスバースクラック密度 D は破壊確率 F を用いて以下の式で表される。

$$D = D_s F(\sigma^{(90)}_i, V_e) = D_s \left[1 - \exp \left\{ -V_e \left(\frac{\sigma^{(90)}_i - \sigma_L}{\sigma_s} \right)^m \right\} \right] \quad (5)$$

4・3 単位格子に微小トランスバースクラックが形成される際のエネルギー解放率算出

本研究においては、Nairn (Nairn, 1989) により提案された手法を応用して、試験片端面に微小なトランスバースクラックが形成される際のエネルギー解放率を算出した。Nairn は、図 10 に示すような 2 つのトランスバースクラック間に、新たにトランスバースクラックが形成される際のエネルギー解放率を式 (6) のように提案した。

Fig. 10 Model of cross-ply laminates with transverse cracks.

$$G = 2hWa \left(\sigma_0 - \frac{\Delta\alpha T_d E_0}{C_1 E_T} \right)^2 \frac{\partial}{\partial A} \left(\frac{1}{E_{TC}} \right) \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{hE_0}{t_2 E_L E_T} \quad (7)$$

ここで、 E_T 、 E_L 、 E_0 はそれぞれ一方向材 90° 方向及び、 0° 方向、積層板全体の荷重軸方向の縦弾性率、 σ_0 は積層板全体に負荷される応力、 $\Delta\alpha$ は一方向材の繊維垂直方向と繊維平行方向における線膨張係数の差、 T_d は試験片の環境温度と熱残留応力が作用しない応力フリー温度の差、 h 、 t_1 、 t_2 はそれぞれ積層板の1/2の厚さ、 90° 層の1/2の厚さ、片側の 0° 層の厚さであり、 W は試験片幅の1/2の長さである。なお、 E_{TC} はトランスバースクラックを有する積層板の弾性率であり、次式のように表される。

$$\frac{1}{E_{TC}} = \frac{1}{E_0} + \frac{E_T^2 t_1 C_3}{E_0^2 h} \frac{\sum \chi(\rho_i)}{\sum \rho_i} \quad (8)$$

$$C_3 = \frac{\lambda + 1}{60 E_T} (3\lambda^2 + 12\lambda + 8) \quad (9)$$

ρ はトランスバースクラック間隔 $2a$ を 90° 層厚さ $2t_1$ で除した無次元化トランスバースクラック密度 ($\rho = a/t_1$) である. また, λ は 0° 層と 90° 層の厚さ比 ($\lambda = t_2/t_1$) であり, χ はトランスバースクラック密度により変化する関数である. ここで, 試験片端部にのみトランスバースクラックが発生する場合のエネルギー解放率を定式化する. 試験片両端部に発生するトランスバースクラックは対称性があると仮定する. 図 11 に示すように試験片幅の半分を W とし, トランスバースクラックが生じる領域(幅 W_a) と, トランスバースクラックが生じない領域(幅 $W - W_a$) に仮想的に分割すると, 微小トランスバースクラックが発生した積層板の弾性率は E'_{TC} は複合則より次式で表される.

$$E'_{TC} = \frac{W_a E_{TC} + (W - W_a) E_0}{W} \quad (10)$$

本研究では, 式(6)において E_{TC} の項に E'_{TC} を, 微小トランスバースクラック面積として $dA = 2W_a \cdot 2t_1$ を代入し, 試験片両端部に微小トランスバースクラックが形成されるエネルギー解放率を算出した. なお, 本研究において各格子間におけるトランスバースクラック同士の影響を考慮していないため, エネルギー解放率の算出にはトランスバースクラック間隔は十分に広いものとして評価した. また, 微小トランスバースクラック長さはトランスバースクラック発生 の定義と同様に $W_a = 0.3 \text{ mm}$ とした.

Fig. 11 The formation of a new transverse crack in small crack region.

4・4 解析結果

本解析において飽和トランスバースクラック密度 D_s は図 8 に示す実験結果から判断し, 3.61 mm^{-1} とした. なお, 提案したモデルにおいて D_s は材料が有する標点間内の初期欠陥の個数を示すことから, 環境温度に依らず平均的なトランスバースクラック密度を飽和密度とした. 要素数 n は, 室温環境下において 688, 93°C 環境下において 1656, 130°C 環境下において 1742 であった. 静的中断試験結果より取得したワイブル分布図を図 12 に, 得られたワイブルパラメータを表 4 に示す. また, ワイブルパラメータを式 (2) に代入し, 取得したワイブル予測線を図 13 に示す. これより実験結果にばらつきがあるものの, いずれの環境温度においても, ワイブル分布を用い

た予測線と実験値とは比較的良い一致を示していることが確認された。すなわち、クロスプライ積層板内の 90° 層を初期欠陥が分布した脆性固体とみなすことの妥当性を示している。なお、室温環境下における試験結果に関しては、トランスバースクラックが増加し始める応力よりも十分低い応力において数本のトランスバースクラックが生じており、ワイブル予測線も低応力側に若干推移したと考えられる。

Fig. 12 Weibull plots for transverse crack multiplication in 90° layer of CFRTP cross-ply laminates.

Table 4 Weibull parameters for transverse crack multiplication in 90° layer.

Temperature	T	RT	93 °C	130 °C
Shape parameter	m	15.5	2.82	0.671
Scale parameter	σ_s MPa	110	15.3	0.123
Location parameter	σ_L MPa	0	30.7	31.4

Fig. 13 Relationship between transverse crack density and applied stress of CFRTP cross-ply laminates. The smooth line is calculated using equation (5).

得られたワイブル予測線から、最初のトランスバースクラックが発生する応力におけるエネルギー解放率を算出した。ここで、各温度におけるワイブル予測線と負荷応力軸との交点はそれぞれ表 4 の位置係数 σ_L により与えられる。しかしながら、この値は実験値におけるトランスバースクラックの発生応力よりも大幅に小さい値となっている。そこで今回は、ワイブル予測線が $D=1/60$ mm⁻¹ (標点間距離中にトランスバースクラックが一つ入際の密度) を超えた時の応力値をトランスバースクラック発生応力 $\sigma_{ti,weibull}$ とした。算出された値を表 5 に示す。これより、ワイブル予測線で算出されたトランスバースクラック発生応力は、室温環境下と比較し 93 °C, 130 °C 環境下における値の方が大幅に小さくなった。また、93 °C 環境下におけるトランスバースクラック発生応力は 130 °C 環境下における値より小さく算出された。これは、熱残留応力による影響と考えられ、トランスバースクラック発生応力における 90°層応力を算出したところ、130 °C 環境下の値は 93 °C 環境下の値より小さくなった。次に、トランスバースクラック発生応力 $\sigma_{ti,weibull}$ を用いて、最初のトランスバースクラック発生に伴うエネルギー解放率 G_{IC} を算出した結果を表 5 に示す。これより、このエネルギー解放率は室温環境下と比較し 93 °C 環境下では 84 %, 130 °C 環境下では 88 %もの低下が見られた。

トランスバースクラック形成挙動を破壊力学的に定量評価するために、式 (6 - 10) を用いてトランスバースクラック形成に伴うエネルギー解放率を算出した。さらに、式 (2) を用いてトランスバースクラック累積確率とエネ

ルギ解放率の関係を算出した。その結果を図 14 に示す。図 14 では、格子内に存在するき裂のサイズのばらつきにより、見かけのエネルギー解放率にばらつきをもたらす挙動が示されている。ここで、累積確率が 1 付近になる、すなわちトランスバースクラック密度が飽和する付近において、特に室温環境下のエネルギー解放率は非常に高い値を示している。本解析においては、格子内のトランスバースクラックは隣接する格子内の応力に影響を及ぼさないと仮定しているため、試験片が高応力を受ける際、未損傷の格子はその応力を一様に受けると仮定している。高応力負荷下において微小トランスバースクラックが密に発生した場合、微小トランスバースクラック周辺における局所的な応力は回復しきれなくなるため、実際は高応力側においてエネルギー解放率は図 14 ほど高い値を示さないと考えられるが、トランスバースクラックが比較的少ない段階においては解析結果と実験結果との間に大きな差異はないと考えられる。さらに、図 14 において、室温環境下、93 °C 環境下においては、エネルギー解放率の増加に伴い累積確率も上昇している。すなわち、見かけの靱性値が低い格子から順にトランスバースクラックが発生していることを意味する。さらに、130 °C 環境下においては、エネルギー解放率がある値を超えると急速に破壊確率は 1 に漸近する。これはすなわち、格子内の欠陥のサイズに依らず、トランスバースクラックが同時に多数発生することを意味する。130 °C 環境下においては、格子内の欠陥のばらつきによる影響以上に、高温環境下における母材樹脂や繊維樹脂界面の強度低下などトランスバースクラックの形成を促進する影響が大きく作用していることが考えられる。

Table 5 Applied stress and critical energy release rate for first transverse crack formation in cross-ply laminates.

Temperature	T	RT	93 °C	130 °C
Stress applied in cross-ply laminates for first transverse crack formation	$\sigma_{ti,weibull}$ MPa	206	25	39
Stress applied in 90° layer of cross-ply laminates for first transverse crack formation	$\sigma_{ti}^{(90),weibull}$ MPa	94	37	31*
Energy release rate of first transverse crack formation	G_{TC} J/m ²	473	78	55

* The calculated value is 31.44 MPa at 130 °C and it is written rounded off to the decimal point in this table.

Fig. 14 Cumulative probability of each unit breaking as a function of energy release rate for transverse crack formation.

5. 考 察

高温環境下において CFRTP 積層板はトランスバースクラックが発生しやすくなり、またトランスバースクラック発生に伴うエネルギー解放率が大幅に低下することが示された。これに関して、母材樹脂の強度低下および界面強度の低下という観点から考察を行った。図 15 に、母材樹脂および一方向 90°材の引張強度と環境温度の関係を示す。なお、母材樹脂および一方向 90°材のいずれも、室温環境下における引張強度にて正規化した値である。図 15 に示す結果から、一方向 90°材および母材樹脂どちらも高温環境下において引張強度が低下することが示された。また、一方向 90°材の静的引張試験後の破面観察結果を図 16 に示す。これより、室温および 93 °C、130 °C のいずれの環境温度においても、その破面には繊維に樹脂が付着した箇所と繊維表面が露出した箇所が混在していることが確認できる。しかしながら高温環境下、特に 130 °C 環境下においては繊維表面が露出した領域が拡大していることが確認され、高温環境下で繊維/樹脂間の界面強度は低下していると示唆される。また、図 4 および表 3 より、室温から 93 °C、130 °C と環境温度を上昇されるに従い、一方向 90°材の引張強度、破断ひずみ、弾性率も低下している。すなわち、クロスプライ積層板内の 90°層の機械的特性も同様に高温環境下では低下していると考えられ、トランスバースクラック形成に伴うエネルギー解放率の低下に影響を及ぼすと考えられる。

Fig. 15 Relationship between tensile strengths of 90° unidirectional laminates and matrix resin at each test temperature condition.

6. 結 言

本研究では、クロスプライ熱可塑性 CFRP 積層板を用い、室温及び 93 °C、130 °C 環境下におけるトランスバースクラック発生及び累積挙動を評価した。その結果、本研究で用いたクロスプライ[0/90₄]_s積層板において、いずれの環境温度においてもトランスバースクラックは試験片幅方向に貫通しないことが明らかとなった。また、室温環境下と比較し 93 °C、130 °C 環境下においては低応力において多数のトランスバースクラックが生じることが明らかとなった。クロスプライ積層板における 90°層が初期欠陥を有する脆性固体であると仮定し、ワイブル分布を応用した解析を行った結果、いずれの環境温度においても解析結果は実験結果と良い一致を示した。さらにこの解析結果を用いて、最初のトランスバースクラックが形成される際の負荷応力、及びエネルギー解放率を算出した。その結果、室温環境下における見かけの臨界エネルギー解放率は $G_{TC} = 473 \text{ J/m}^2$ と算出されたのに対し、93 °C、130 °C においてはそれぞれ $G_{TC} = 78 \text{ J/m}^2$ 、 $G_{TC} = 55 \text{ J/m}^2$ と算出され、臨界エネルギー解放率は環境温度の上昇に伴い大きく低下した。これは、一方向 90°材及び母材樹脂単体の引張試験や破面観察の結果から、母材樹脂及び繊維/樹脂界面の強度低下に起因するものと考えられる。

(a) Room temperature

(b) 93 °C

(c) 130 °C

Fig. 16 Fracture surface of unidirectional 90° laminates.

文 献

- Fukunaga, H., Chou, T.W., Peters, P.W.M. and Schulte, K., Probabilistic failure strength analysis of graphite/epoxy cross-ply laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, No. 4 (1984), pp. 339-356.
- Garrett, K.W. and Bailey, J.E., Multiple transverse fracture in 90° cross-ply laminate of a glass fiber reinforced polyester, *Journal of Material Science*, Vol. 12, No. 1 (1977), pp. 157-168.
- Hashin, Z., Analysis of cracked laminates: A variational approach, *Mechanics of Materials*, Vol. 4, No. 2 (1985), pp. 121-136.
- 細井厚志, 高村啓吾, 佐藤成道, 川田宏之, 静的引張試験による疲労荷重下における $[0_m/90_n]_s$ クロスプライ CFRP 積層板に生じるトランスバースクラックの発生予測, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 78, No. 791 (2012), pp. 1000-1012.
- Hosoi, A., Shigemori, K., Fujita, Y. and Kawada, H., Effect of fiber volume fraction on first transverse crack formation in cross-ply CFRP laminates under fatigue loading, *Proceeding of the 27th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity*, Vol. 2 (2013), pp. 925-935.
- Hosoi, A., Sakuma, S., Fujita, Y. and Kawada, H., Prediction of initiation of transverse cracks in $[0_m/90_n]_s$ cross-ply CFRP laminates under fatigue loading by fatigue properties of unidirectional CFRP in 90° direction, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 68 (2015), pp.398-405.
- Hosoi, A., Watanabe, T., Kobiki, A., Kotani, M. and Kawada, H., Evaluation of transverse crack initiation in CFRTS and CFRTS laminates under fatigue loading, *Proceedings of 22nd International Symposium Plasticity and its Current Applications* (2016), pp.109-111.
- Huang, X., Gillespie Jr, J.W. and Eduljee, R.F., Effect of temperature on the transverse cracking behavior of cross-ply composite laminates, *Composites Part B-Engineering*, Vol. 28, No. 4 (1997), pp. 419-424.
- Huang, X., Gillespie Jr, J.W., Eduljee, R.F. and Shen, Z., Matrix cracking behavior of K3B/IM7 composite laminates subject to static and fatigue loading, *Composite Structures*, Vol. 49, No.4 (2000), pp. 435-441.
- 川田宏之, 曾我理昂, 重盛洗, 細井厚志, 藤田雄三, 層間高靱性化 CFRP クロスプライ積層板の繰り返し荷重下におけるトランスバースクラック発生評価, *日本機械学会論文集*, Vol. 80, No. 812 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0079.
- Kim, K.Y. and Ye, L., Interlaminar fracture toughness of CF/PEI composites at elevated temperatures: roles of matrix toughness and fiber/matrix adhesion, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35 No. 4 (2004), pp. 477-487.
- Kim, K.Y. and Ye, L., Influence of matrix and interface on transverse mechanical properties of CF-PEI thermoplastic composites at elevated temperatures, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 24, No.4 (2005), pp. 429-445.
- Kobayashi, S. and Takeda, N., Experimental characterization of microscopic damage behavior in carbon/bismaleimide composite - effects of temperature and laminate configuration, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, No. 11 (2002), pp. 1529-1538.
- 栗原謙, 細井厚志, 佐藤成道, 川田宏之, 疲労荷重下における CFRP クロスプライ積層板のトランスバースクラック発生に関する層厚さの影響, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 79, No. 799 (2013), pp. 249-265.
- Lee, J.W. and Daniel, I.M., Progressive transverse cracking of crossply composite laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 24. No. 11 (1990), pp. 1225-1243.
- Liu, S. and Nairn, J.A., Fracture mechanics analysis of composite microcracking: Experimental results in fatigue, *Proceeding of the 5th Technical Conference of Composite Materials*, American Society of Composites (1990), pp. 287-295.
- 村上務, 盛田英夫, 及川和喜, 複合材ファンシシステム研究開発, *IHI 技報*, Vol. 53, No. 4 (2013), pp. 63-67.
- Nairn, J.A., The strain energy release rate of composite microcracking: A variational approach, *Journal of Composite Materials*, Vol. 23, No. 11 (1989), pp. 1106-1127 (and errata: *Journal of Composite Materials*, Vol. 24, No. 2 (1990), pp. 223-224).
- 黄木景二, 矢代茂樹, 確率的 SCG モデルとエネルギー解放率を用いたトランスバースクラックに関する疲労破壊クライテリア, *日本複合材料学会誌*, Vol. 35, No. 5 (2009), pp. 212-220.
- Ogi, K., Yashiro, S., Takahashi, M. and Ogihara, S., A probabilistic static fatigue model for transverse cracking in CFRP cross-ply laminates, *Composites Science and Technology*, Vol.69, No. 3-4 (2009), pp. 469-476.
- Sun, Z., Daniel, I.M. and Luo, J.J., Statistical damage analysis of transverse cracking in high temperature composite laminates, *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, Vol. 341, No. 1-2 (2003), pp.49-56.
- 高村啓吾, 細井厚志, 佐藤成道, 川田宏之, 疲労負荷下におけるクロスプライ CFRP 積層板のトランスバースク

ラック発生評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 779 (2011), pp. 1123-1134.

Takeda, N. and Ogihara, S., In situ observation and probabilistic prediction of microscopic failure processes in CFRP cross-ply laminates, *Composites Science and Technology*, Vol.52, No. 2 (1994), pp. 183-195.

Vinogradov, V. and Hashin, Z., Probabilistic energy based model for prediction of transverse cracking in cross-ply laminates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 2 (2005), pp. 365-392.

Yokozeki, T. and Aoki, T., Transverse crack propagation in the specimen width direction of CFRP laminates under static tensile loadings, *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No.17 (2002), pp. 2085-2099.

References

Fukunaga, H., Chou, T.W., Peters, P.W.M. and Schulte, K., Probabilistic failure strength analysis of graphite/epoxy cross-ply laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, No. 4 (1984), pp. 339-356.

Garrett, K.W. and Bailey, J.E., Multiple transverse fracture in 90° cross-ply laminate of a glass fiber reinforced polyester, *Journal of Material Science*, Vol. 12, No. 1 (1977), pp. 157-168.

Hashin, Z., Analysis of cracked laminates: A variational approach, *Mechanics of Materials*, Vol. 4, No. 2 (1985), pp. 121-136.

Hosoi, A., Takamura, K., Sato, N. and Kawada, H., Prediction of transverse crack initiation in $[0_m/90_n]_s$ cross-ply CFRP laminates subjected to fatigue loading by static tensile test, *The Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 78, No. 791 (2012), pp. 1000-1012 (in Japanese).

Hosoi, A., Shigemori, K., Fujita, Y. and Kawada, H., Effect of fiber volume fraction on first transverse crack formation in cross-ply CFRP laminates under fatigue loading, *Proceeding of the 27th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity*, Vol. 2 (2013), pp. 925-935.

Hosoi, A., Sakuma, S., Fujita, Y. and Kawada, H., Prediction of initiation of transverse cracks in $[0_m/90_n]_s$ cross-ply CFRP laminates under fatigue loading by fatigue properties of unidirectional CFRP in 90° direction, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 68 (2015), pp.398-405.

Hosoi, A., Watanabe, T., Kobiki, A., Kotani, M. and Kawada, H., Evaluation of transverse crack initiation in CFRTS and CFRTF laminates under fatigue loading, *Proceedings of 22nd International Symposium Plasticity and its Current Applications* (2016), pp.109-111.

Huang, X., Gillespie Jr, J.W. and Eduljee, R.F., Effect of temperature on the transverse cracking behavior of cross-ply composite laminates, *Composites Part B-Engineering*, Vol. 28, No. 4 (1997), pp. 419-424.

Huang, X., Gillespie Jr, J. W., Eduljee, R. F. and Shen, Z., Matrix cracking behavior of K3B/IM7 composite laminates subject to static and fatigue loading, *Composite Structures*, Vol. 49, No.4 (2000), pp. 435-441.

Kawada, H., Soga, M., Shigemori, K., Hosoi, A. and Fujita, Y., Evaluation of transverse crack initiation in interlaminar toughened CFRP cross-ply laminates under cyclic loading, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 80, No. 812 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0079.

Kim, K.Y. and Ye, L., Interlaminar fracture toughness of CF/PEI composites at elevated temperatures: roles of matrix toughness and fiber/matrix adhesion, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35 No. 4 (2004), pp.477-487.

Kim, K.Y. and Ye, L., Influence of matrix and interface on transverse mechanical properties of CF-PEI thermoplastic composites at elevated temperatures, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 24, No.4 (2005), pp. 429-445.

Kobayashi, S. and Takeda, N., Experimental characterization of microscopic damage behavior in carbon/bismaleimide composite - effects of temperature and laminate configuration, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, No. 11 (2002), pp. 1529-1538.

Kurihara, K., Hosoi, A., Sato, N. and Kawada, H., Effect of ply thickness on transverse crack initiation in CFRP cross-ply laminates under fatigue loading, *The Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 79, No. 799 (2013), pp. 249-265 (in Japanese).

Lee, J.W. and Daniel, I.M., Progressive transverse cracking of crossply composite laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 24, No. 11 (1990), pp. 1225-1243.

Liu, S. and Nairn, J.A., Fracture mechanics analysis of composite microcracking: Experimental results in fatigue, *Proceeding of the 5th Technical Conference of Composite Materials*, American Society of Composites (1990), pp. 287-295.

Murakami, T., Morita, H. and Oikawa, K., Development of composite fan system, *Journal of IHI technologies*, Vol. 53, No. 4 (2013), pp. 63-67 (in Japanese).

Hosoi, Terauchi, Tsunoda, Kimura, Kobiki and Kawada, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.83, No.855 (2017)

- Nairn, J.A., The strain energy release rate of composite microcracking: A variational approach, *Journal of Composite Materials*, Vol. 23, No.11 (1989), pp. 1106-1127 (and errata: *Journal of Composite Materials*, Vol. 24, No. 2 (1990), pp. 223-224).
- Ogi, K. and Yashiro, S., Fatigue fracture criteria for transverse cracking with the use of the probabilistic SCG model and energy release rate, *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, Vol. 35, No. 5 (2009), pp. 212-220 (in Japanese).
- Ogi, K., Yashiro, S., Takahashi, M. and Ogihara, S., A probabilistic static fatigue model for transverse cracking in CFRP cross-ply laminates, *Composites Science and Technology*, Vol.69, No. 3-4 (2009), pp. 469-476.
- Sun, Z., Daniel, I.M. and Luo, J.J., Statistical damage analysis of transverse cracking in high temperature composite laminates, *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, Vol. 341, No. 1-2 (2003), pp.49-56.
- Takamura, K., Hosoi, A., Sato, N. and Kawada, H., Evaluation of transverse crack initiation in cross-ply CFRP laminates under fatigue loading, *The Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 77, No. 779 (2011), pp. 1123-1134 (in Japanese).
- Takeda, N. and Ogihara, S., In situ observation and probabilistic prediction of microscopic failure processes in CFRP cross-ply laminates, *Composites Science and Technology*, Vol.52, No. 2 (1994), pp. 183-195.
- Vinogradov, V. and Hashin, Z., Probabilistic energy based model for prediction of transverse cracking in cross-ply laminates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 2 (2005), pp. 365-392.
- Yokozeki, T. and Aoki, T., Transverse crack propagation in the specimen width direction of CFRP laminates under static tensile loadings, *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No.17 (2002), pp. 2085-2099.