一方向炭素繊維強化複合材料の高温における 非主軸圧縮強度とそのモデル化*

河井昌道^{*1}, 斎藤 覚^{*2}

Off-Axis Compressive Strength of a Unidirectional CFRP Laminate at High Temperature and Its Modeling

Masamichi KAWAI^{*3} and Satoru SAITO^{*3} Department of Engineering Mechanics and Energy, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan

The off-axis compressive strength and its rate dependence of a unidirectional carbon/epoxy laminate are examined for various fiber orientations at high temperature. Static compression tests are carried out at two different strain rates of 0.1 and 10%/min for each fiber orientation. The fiber-orientation and strain-rate dependence of off-axis compressive strengths and associated failure modes are first discussed. The off-axis compressive strengths are compared with the off-axis tensile strengths at the same strain rates and test temperature, and differences between the ultimate off-axis strengths in tension and compression are quantified. Then, the Hoffman failure criterion that distinguishes between the off-axis strengths in tension and compression is tested for the accuracy of prediction of the different off-axis tensile and compressive strengths and the associated failure envelope at different strain rates. It is demonstrated that while the fiber orientation dependence of the off-axis tensile and compressive strengths are predicted with reasonable accuracy, the failure envelope associated with off-axis compression is poorly described using the Hoffman failure criterion. This observation suggests that consideration of the influence of the transverse compressive stress on the in-plane shear strength along fibers is essential for accurate prediction of failure envelope. Finally, a modified form of the Hoffman failure criterion that meets the requirement is proposed, and it is demonstrated to have an improved predictive capability compared with the original form.

Key Words: Unidirectional Composite, Off-Axis Compressive Strength, Strength Differential, Rate Dependence, Failure Envelope, Modified Failure Criteria, High Temperature

1. 緒言

一方向炭素繊維強化複合材料(一方向 CFRP)の繊維方向の圧縮強度は、引張強度に比べて一般に低い値を示す。最悪の場合には、圧縮強度が引張強度の 50% 以下になることもある^{(1), (2)}。逆に、一方向 CFRP の繊維垂直方向(トランスバース方向)については圧縮強度が引張強度よりも 40% 以上高くなる^{(2), (3)}。このように、一方向 CFRP の繊維方向強度とトランスバース方向強度が引張負荷と圧縮負荷に対して異なる値を示すことは、非主軸方向の静的強度が引張負荷と圧縮負荷に対して異なる値を呈することだけでなく、非主軸引張強度と非主軸圧縮強度の相対的な大小関係が繊維配

向角に依存して変化する可能性も示唆している。

構造要素に CFRP 積層板を安全かつ効率的に適用するためには、CFRP 積層板の引張と圧縮に対する耐荷能力を精密に予測する技術が整備されていなければならない⁽⁴⁾。この要請に対して、CFRP 積層板の強度を支配する一方向 CFRP の引張強度、圧縮強度およびそれらの方位依存性を詳しく調べることが重要課題となる。さらに、一方向 CFRP の非主軸引張強度と非主軸圧縮強度の違い(負荷様式依存性/引張・圧縮非対称性)を合理的に予測するための工学的強度予測モデルを確立することも CFRP 構造要素の信頼性の高い強度設計に不可欠の要件となる。

一方向 CFRP の引張強度と圧縮強度の違いを表現できる現象論的な破壊基準として、例えば、Hoffman 則⁽⁵⁾および Tsai-Wu 則⁽⁶⁾がよく知られている。これらの強度則を適用する場合、引張破壊と圧縮破壊に対して主軸せん断強度の違いは考慮されない。しかし、一方

* 原稿受付 2008 年 5 月 20 日。

^{*1} 正員、筑波大学大学院システム情報工学研究科(〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。^{*2} 筑波大学大学院システム情報工学研究科。
E-mail: mkawai@kz.tsukuba.ac.jp

向 CFRP の主軸せん断強度が引張負荷と圧縮負荷に対して異なる値を示すことを示唆する研究が報告されている⁽⁷⁾。このような実験事実からの刺激もあって、一方向強化複合材料のせん断強度の負荷様式依存性を記述することができる強度予測モデルの定式化に関する研究が活発化している⁽⁸⁾。

新しい強度モデルの有効性を検証する場合、一方向 CFRP の非主軸強度の引張と圧縮による違い（負荷様式依存性）と繊維配向角依存性、および非主軸負荷に対する破壊包絡面の形状について、予測精度を評価することが基礎的な要件となる。一方向 CFRP の非主軸変形が顕著なひずみ速度依存性を示すことから⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾、非主軸強度（引張、圧縮）を評価する際にはそれらの負荷速度依存性を考慮することが重要になる。しかしながら、基礎となる一方向 CFRP の面内の非主軸圧縮強度とそのひずみ速度依存性を引張挙動と対比に基づいて体系的に調べた研究はまだ多くなく、非主軸引張負荷と非主軸圧縮負荷に対する破壊包絡面とその精密な予測方法についても一層の実験的および理論的な検討が必要と思われる。

本研究においては、一方向 CFRP 積層板の高温における非主軸圧縮強度、および非主軸圧縮強度の準静的な範囲におけるひずみ速度依存性を調べる。また、従来の代表的な破壊基準とそれに簡単な修正を施した破壊基準を用いて静的強度解析を行い、試験結果との比較に基づいてそれらの非主軸強度予測に関する適用性を評価する。このため、まず、代表的な非主軸繊維配向角を有する試験片を用いて非主軸静的圧縮試験を 2 種類のひずみ速度で行い、非主軸圧縮強度の繊維配向角依存性とひずみ速度依存性および破壊様式の違いによる影響を明らかにする。非主軸圧縮試験の結果と同条件で行った非主軸引張試験の結果を比較することによって、非主軸引張強度と非主軸圧縮強度の違いを定量的に評価する。次に、代表的な強度則の一つである Hoffman 則を用いて解析を行い、強度予測と破壊包絡面予測に対する精度を調べる。最後に、せん断強度のトランスバース圧縮応力依存性を考慮した修正 Hoffman 則および類似の修正を施した Tsai-Hill 則を提案し、非主軸圧縮強度予測に関する有効性を実験結果との比較に基づいて検証する。

2. 試験片および試験方法

2・1 供試材 供試材は、炭素繊維 T800H（東レ）と Epoxy 樹脂 #2500（130℃ 硬化型）を用いたプリプレグ T800H/Epoxy（P2053F-17、東レ）を 12 枚積層した一方向積層板 [0]₁₂ である。一方向積層板はオートク

Fig. 1 Specimen Geometry (dimensions in mm)

レーブによって加圧成形（硬化温度 130℃、一定加圧時間 2 h）されたものであり、厚さは約 2 mm である。

長手方向と繊維軸のなす角度（繊維配向角 θ ）が $\theta = 0, 10, 15, 30, 45, 90^\circ$ となる 6 種類の短冊形平滑試験片を一方向積層板パネル（400×400 mm）から切り出した。試験片の形状と寸法を図 1 に示す。静的圧縮試験に対しては、座屈を軽減する目的から、標線間距離 10 mm、試験片幅 10 mm の短冊形試験片（図 1 (a)）〔以後、短試験片と呼ぶ〕を用いた。短試験片の寸法は JIS K7076⁽¹³⁾ および Haberland と Matthews の報告⁽¹⁴⁾ を参考にして決めた。比較のために行った静的引張試験に対しては、JIS K7073⁽¹⁵⁾、JIS K7083⁽¹⁶⁾ に準ずる標線間距離 100 mm、試験片幅 20 mm（ $\theta = 0^\circ$ については 10 mm）の短冊形試験片（図 1 (b)）〔以後、長試験片と呼ぶ〕を使用した。試験片の両端には掴み部を保護するため、アルミニウム合金製のタブを Epoxy 系接着剤（ARALDITE）を用いて貼付した。タブの厚さは長試験片に対しては 1 mm、短試験片に対しては 2 mm とした。なお、タブの接着強度を高めるため、加熱装置 Gravity Oven LG-112（ESPEC）を使い、90℃ で 1 時間の加熱接着処理を施した。

2・2 試験方法 すべての繊維配向角 $\theta = 0, 10, 15, 30, 45, 90^\circ$ について、静的圧縮試験と静的引張試験を試験温度 $T = 100^\circ\text{C}$ で行う。いずれの場合についても、2 種類の一定公称ひずみ速度 10、0.1%/min による試験を行う。公称ひずみ速度は変位制御に基づくものであり、長試験片については変位速度を 10、0.1 mm/min、短試験片については 1.0、0.01 mm/min とした。なお、供試材の量的制限から、引張試験には各条件について原則 1 本の試験片を使用し、圧縮については同条件で 3~4 本の試験を行った。

静的試験には、油圧サーボ式材料試験システム

Fig. 2 Failure morphology under longitudinal compression ($\theta = 0^\circ$) at 10%/min

(a) in-plane shear failure

(b) kink failure

Fig. 3 Failure morphology under off-axis compression ($\theta = 10^\circ$) at 10%/min

(MTS 810 Test Star) を用いた。試験片の加熱には、室温から約 350°C までの範囲で任意の温度にデジタル設定することのできる環境槽を利用した。この環境槽は試験片と油圧グリップの全体を覆うように装着されている。いずれの試験においても、環境槽内の温度を試験温度に昇温し、1 時間の加熱保持によって温度が安定化した後に試験を開始した。環境槽内の湿度は制御していない。試験片のひずみはゲージ長 1 mm (短試験片) と 2 mm (長試験片) のロゼットひずみゲージを用いて計測した。

3. 試験結果および考察

3.1 非主軸圧縮破壊様式 ひずみ速度 10%/min

(a) in-plane shear failure

(b) kink failure

Fig. 4 Failure morphology under off-axis compression ($\theta = 15^\circ$) at 10%/min

の静的圧縮荷重によって破断した試験片の巨視的な破壊様式をすべての繊維配向角について図 2～図 5 に示す。

繊維方向 $\theta = 0^\circ$ へ圧縮荷重を与えた場合 (図 2), 板厚方向に貫通したスプリットングき裂が長手方向に成長し、タブ内に達した後にタブ内で面内繊維座屈を起こして最終破壊に至った。圧縮荷重軸と繊維軸のなす角度が相対的に小さい $\theta = 10, 15^\circ$ の場合、同じ条件の圧縮試験であっても大きく異なる 2 種類の破壊様式が観察された。これらの繊維配向角 ($\theta = 10, 15^\circ$) に対して現れた異なる破壊様式をそれぞれ図 3 と図 4 に示す。図 3a ($\theta = 10^\circ$) と図 4a ($\theta = 15^\circ$) の圧縮破壊においては、繊維方向に沿ってせん断破壊したことがわかる。一方、図 3b と図 4b を見ると、キンク状繊維座屈によって圧縮破壊の起きたことがわかる。限られた試験数ではあるが、30%程度の頻度で後者の破壊様式が認められた。繊維配向角が大きい $\theta = 30, 45, 90^\circ$ の試験片 (図 5 a, b, c) については、破壊様式にゆらぎはなく、繊維方向に沿ってせん断破壊の進行したことが確認できる。

$\theta = 10, 15^\circ$ の試験片に見られたキンク破壊を除けば、非主軸圧縮荷重による破壊が試験片の繊維方向にそって生じていることは非主軸引張荷重による破壊様式

Fig. 5 Failure morphology under off-axis compression ($\theta = 30, 45, 90^\circ$) at 10%/min

⁽²⁾ と類似している。しかしながら、破断面を厚さ方向に観察すると、非主軸引張破壊との違いが明瞭に認められた。写真を用いて測定した破断面の傾き（厚さ方向からの偏り角 φ ）を図 6 に示す。キンク破壊を起こさなかった $\theta = 10, 15^\circ$ の試験片の破断面の厚さ方向からの偏り角はそれぞれ $\varphi \approx 7^\circ, \varphi \approx 23^\circ$ であった。これらの傾きを破断面と試験片表面のなす角度 $90^\circ - \varphi$ を用いて表現すれば、それぞれ $90^\circ - \varphi \approx 83^\circ, 67^\circ$ となる。このことから、キンク破壊を起こさなかった $\theta = 10, 15^\circ$ の試験片は、実は面内せん断破壊と面外せん断破壊の両方を伴っていたことがわかる。ただし、 $\theta = 10, 15^\circ$ の試験片については、面外せん断破壊の程度は小さく、面内せん断破壊が支配的であったと考えることができる。その理由は、面内せん断形の圧縮破壊に対応する

Fig. 6 Angle of fracture plane with through-the-thickness direction under off-axis compression at 10%/min

応力-ひずみ関係が引張による応力-ひずみ関係にほとんど一致したからである。これらのことから、キンク破壊を起こさず、せん断破壊が支配的であった $\theta = 10, 15^\circ$ の試験片の非主軸圧縮破壊は、全体的には非主軸引張破壊に類似な特徴を有していると解釈することができる。なお、非主軸圧縮変形挙動の繊維配向角依存性と速度依存性の詳細は、非主軸引張変形挙動との比較を含めて別報⁽¹⁷⁾ にまとめているので、紙面の制限もあり、ここでは省略する。

図 6 から、繊維配向角 θ が大きくなるにつれて、破断面の厚さ方向の傾き φ が次第に大きくなるのがわかる。トランスバース圧縮破壊 ($\theta = 90^\circ$ の場合) は、面外せん断破壊に支配されており、破断面の傾きは $\varphi \approx 63^\circ$ となった。この傾き角は最大せん断応力面の傾き (45°) よりも大きい。この観察結果は摩擦現象に類似したトランスバース圧縮応力による効果が関与したことを示唆する。なお、これは単純なアナロジー的解釈であり、繊維と樹脂の間のすべり摩擦等の具体的な物理機構を指すものではない。

以上の観察から、せん断破壊を伴った非主軸圧縮破壊が、実は、面外せん断破壊の影響を受けた組み合わせ面内-面外せん断破壊となっていること、また繊維配向角の増加とともに面外せん断破壊の影響が顕著になっていることがそれぞれ分かった。なお、図 3b と図 4b に見られた面内のキンク状繊維座屈についても、板厚方向にキンク状繊維座屈を起こしていることが確認された。この観察は図 3b と図 4b に見られる非主軸圧縮破壊が面内と面外の組み合わせキンク状繊維座屈に支配されていることを示唆している。

Table 1 Off-axis tensile and compressive strengths at 10 and 0.1%/min

θ deg	Fracture stress σ_x^f MPa			
	10%/min		0.1%/min	
	UTS	UCS	UTS	UCS
0	2073.7	539.9	1319.5	401.5
10	224.7	246.5	194.6	169.6
15	130.8	190.0	109.9	128.4
30	65.6	138.2	51.5	109.1
45	43.4	125.7	32.7	100.0
90	33.1	100.0	20.3	75.2

Table 2 Principal fracture strengths in tension and compression at 10 and 0.1%/min

Test conditions		Principal strengths		
Strain Rate	Loading Mode	X MPa	Y MPa	S MPa
10%/min	Tension	2073.7	33.1	37.3
	Compression	539.9	100.0	62.8
0.1%/min	Tension	1319.5	20.3	33.3
	Compression	401.5	75.2	49.8

低ひずみ速度 (0.1%/min) の圧縮試験においても、上記の破壊様式に類似の結果が観察された。面外せん断破壊 (破壊面の傾斜) が明瞭に現れる繊維配向角は 10%/min の圧縮試験の場合よりもやや大きくなった。しかし、 $\theta = 90^\circ$ の試験片の破壊面の偏り角は平均で $\phi = 64^\circ$ となり、高ひずみ速度の圧縮試験の結果とほぼ同じ値を示した。

3・2 非主軸圧縮強度 公称ひずみ速度 10%/min の静的試験から求めた非主軸強度と繊維配向角の関係を図 7 に示す。具体的な数値は表 1 に示している。 $\theta = 10, 15^\circ$ については、明瞭な圧縮形破壊様式であるキンク形の様式を伴って破壊した試験片の強度値を採用した。この図から、試験を行ったいずれの繊維配向角 ($\theta = 10, 15, 30, 45, 90^\circ$) についても、非主軸圧縮強度は同じ方位の非主軸引張強度に比べて大きくなっていることがわかる。引張強度に対する圧縮強度の倍率 (UCS/UTS) を具体的に求めると、繊維配向角ごとにそれぞれ 1.1 倍 ($\theta = 10^\circ$)、1.5 倍 (15°)、2.1 倍 (30°)、2.9 倍 (45°)、3.0 倍 (90°) になっている。

引張試験と圧縮試験から求めた異方性主軸に関する

Fig. 7 Fiber orientation dependence of off-axis compressive strength at 10%/min

Fig. 8 Fiber orientation dependence of off-axis compressive strength at 0.1%/min

面内主軸強度を表 2 にまとめて示す。この表に示す面内せん断強度は実際の破壊様式に面外せん断が含まれたことを考慮しない近似値を表している。表 2 から、ひずみ速度 10%/min の場合、引張負荷条件に対する値と比較して、圧縮負荷条件下の主軸強度は繊維方向に 70%低下し、トランスバース強度と面内せん断強度はそれぞれ 3.0 倍、1.7 倍になったことがわかる。

3・3 非主軸圧縮強度の速度依存性 図 8 は 0.1%/min の低速圧縮試験から求めた圧縮強度の繊維配向角依存性を示している。繊維配向角 $\theta = 10^\circ$ については圧縮強度が引張強度よりも僅かに小さく計測されているが、その他の繊維配向角については、10%/min の圧縮試験の場合と同様に、非主軸圧縮強度が非主軸引張強度よりも大きくなっている。なお、ひずみ速度によって $\theta = 10^\circ$ に対する引張強度と圧縮強度の大小が逆転しているのは、両者の大小関係が変化する繊維配向角近辺であること、繊維配向角変化に伴う強度変化が大きいこと、および強度差が小さいことなどから、

Fig. 9 Comparison of off-axis compressive strengths at different strain rates

計測結果のばらつきの影響を強く受けたためと推測できる。

低速圧縮試験の場合、引張強度に対する圧縮強度の倍率 (UCS/UTS) は、繊維配向角ごとにそれぞれ 0.9 倍 ($\theta=10^\circ$), 1.2 倍 (15°), 2.1 倍 (30°), 3.1 倍 (45°), 3.7 倍 (90°) となった。主軸強度について比較した場合、繊維方向の強度が 30% に低下し、トランスバース強度と面内せん断強度はそれぞれ 3.7 倍, 1.5 倍に増加している。トランスバース強度と面内せん断強度の増加割合は上述の高速圧縮試験の場合とほぼ同じである。したがって、非主軸圧縮強度と非主軸引張強度の繊維配向角依存性および相対的な強度レベルの違いはこの研究で調べたひずみ速度範囲においてほとんど変化しないことがわかる。

2 種類のひずみ速度 10%/min, 0.1%/min に対する非主軸圧縮強度と繊維配向角の関係を重ねて図 9 に示す。繊維方向を除くすべての繊維配向角に対して、低ひずみ速度下の圧縮強度が高ひずみ速度下のそれよりも約 10~20% 小さくなっている。

4. 非主軸引張・圧縮非対称強度の予測

この研究では、代表的な強度則の一つである Hoffman 則⁽⁵⁾を用いて解析を行い、強度予測と破壊包絡面予測の精度を評価する。さらに、せん断強度のトランスバース圧縮応力依存性を考慮した修正 Hoffman 則を提案し、非主軸強度予測に関する適用性を実験結果との比較に基づいて明らかにする。類似の修正を施した修正 Tsai-Hill 則の適用性についても検討する。

4.1 Hoffman 強度則 応力成分の一般 2 次式で規定される Hoffman 則⁽⁵⁾は、平面応力条件について、

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C} \right) \sigma_2 \\ & + \frac{1}{X_T X_C} \sigma_1^2 + \frac{1}{Y_T Y_C} \sigma_2^2 \\ & + \frac{1}{S^2} \sigma_{12}^2 - \frac{1}{X_T X_C} \sigma_{11} \sigma_{22} = 1 \end{aligned} \quad (1)$$

と表示される。ここで、 X_T , X_C , Y_T , Y_C は引張と圧縮による繊維方向およびトランスバース方向強度を、また S は繊維に沿うせん断強度を表す。上式において、材料強度は絶対値を用いている。Hoffman 則は、引張と圧縮の違いを除くことで、Tsai-Hill 則⁽¹⁸⁾に帰着させることができる。

4.2 修正 Hoffman 則 Hoffman 則は引張強度と圧縮強度の違いを記述することができる。しかし、Hoffman 則はせん断応力の一次項を含まないので、引張と圧縮に対して異なるせん断強度を含む表示は得られない。一方、実験においては引張試験と圧縮試験から求めたせん断強度に違いが認められた。Hoffman 則のせん断強度の取り扱いに関する制限を緩和することができる。予測精度の向上が期待できる。

本研究では、せん断強度のトランスバース圧縮応力依存性を考慮して Hoffman 則を次のように修正することを考える。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C} \right) \sigma_2 \\ & + \frac{1}{X_T X_C} \sigma_1^2 + \frac{1}{Y_T Y_C} \sigma_2^2 \\ & + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^*} \right)^2 - \frac{1}{X_T X_C} \sigma_{11} \sigma_{22} = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

$$S^* = S_T + \mu_L < -\sigma_{22} > \quad (3)$$

とおく。修正せん断強度の定義に含まれる角括弧は Macaulay 括弧を表し、 $\langle x \rangle = \max\{0, x\}$ と定義されている。また、この表示に含まれる S_T は引張試験によって求めたせん断強度を、また μ_L は摩擦係数に類似な正の係数を表す。このように、せん断強度の符号による違いがトランスバース圧縮応力の作用に起因すると仮定する方法は、例えば、Puck と Schurmann⁽¹⁹⁾, Xiao と Gillespie⁽²⁰⁾ によって効果的に用いられているものである。この研究では、同様の考え方をこれまでに議論されていない Hoffman 則に組み合わせて使用するこ

Fig. 10 Off-axis compressive strength predicted using the Hoffman failure criterion (10%/min)

Fig. 12 Off-axis compressive strength predicted using a modified Hoffman criterion (10%/min)

Fig. 11 Off-axis failure envelope predicted using the Hoffman failure criterion (10%/min)

Fig. 13 Off-axis failure envelope predicted using a modified Hoffman criterion (10%/min)

とを考える。このように修正された Hoffman 則は引張強度と圧縮強度を一つの式で表現できるので便利な形式を与えていると考えられる。

4・3 修正 Tsai-Hill 強度則 一方向複合材の非主軸強度の繊維配向角依存性は、引張負荷あるいは圧縮負荷のいずれかに限定したとき、全角度範囲 ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) について Tsai-Hill 強度則を良好に使用することができる⁽²¹⁾。このことを考慮すれば、上記の修正 Hoffman 則と同様の手法を用いて、修正された Tsai-Hill 則

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X^*}\right)^2 - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^{*2}} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^*}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^*}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

を考えることができる。繊維方向と繊維垂直方向の強度は、引張と圧縮に対して使い分けることとし、

$$X^* = X_T + H(-\sigma_{11})(X_C - X_T) \quad (5)$$

$$Y^* = Y_T + H(-\sigma_{22})(Y_C - Y_T) \quad (6)$$

と表示する。ここで、 $H(\bullet)$ は Heaviside のステップ関数を表す。修正されたせん断強度 S^* には、修正 Hoffman 則と同じ表現 [式(3)] を仮定する。

4・4 実験結果との比較 2種類のひずみ速度について同様の比較を行ったが、いずれの速度についても同じ結論が導かれた。紙面の制限を考慮して、以下では 10%/min に対する結果のみを示す。

4・4・1 Hoffman 則 まず、Hoffman 則を用いて予測したひずみ速度 10%/min による非主軸強度と繊維配向角の関係を引張と圧縮のそれぞれについて実験結果

Fig. 14 Off-axis compressive strength predicted using a modified Tsai-Hill criterion (10%/min)

Fig. 16 Off-axis strength predicted using the Tsai-Hill criterion respectively for tension and compression (10%/min)

Fig. 15 Off-axis failure envelope predicted using a modified Tsai-Hill criterion (10%/min)

Fig. 17 Off-axis failure envelope predicted using the Tsai-Hill criterion respectively for tension and compression (10%/min)

と重ねて図 10 に示す。非主軸引張強度と非主軸圧縮強度の繊維配向角依存性が良好に予測されている。

図 11 に、トランスバース応力成分 σ_{22} とせん断応力成分 τ_{12} を用いた応力平面に描いた破壊包絡線について、計算結果と実験結果の比較を示す。実験結果に基づく破壊包絡線によって、非主軸引張と非主軸圧縮による破壊強度の非対称性が明瞭に図示されることが確認できる。Hoffman 則によって予測した破壊包絡線は、非主軸引張に対応する第 1 象限については実験結果とほぼ一致している。しかし、非主軸圧縮に対応する第 2 象限の予測精度は極めて低くなっている。これは、実際の非主軸圧縮強度が非主軸引張破壊に伴うせん断強度よりも高いせん断強度に支配されており、この特徴が Hoffman 則に考慮されていないためと考えられる。

4・4・2 修正 Hoffman 則 修正 Hoffman 則 ($\mu_L = 0.4$) を用いて予測したひずみ速度 10%/min による非主軸強度 (引張, 圧縮) の繊維配向角依存性および非主軸破壊包絡線を実験結果と重ねてそれぞれ図 12 と図 13 に示す。非主軸圧縮強度の繊維配向角依存性の予測精度は、図 12 と図 10 の比較から、Hoffman 則による予測も良好であるが、さらに改善された結果の得られていることがわかる。非主軸破壊包絡線については、摩擦応力を考慮した修正 Hoffman 則が実験結果の傾向を良好に記述できていることがわかる。元の Hoffman 則に比べて改善された非主軸破壊包絡線の予測が達成されている。このことはせん断強度がトランスバース圧縮応力から受ける影響を摩擦応力によって表現するモデル化の有効性を明らかにしている。

なお、修正 Hoffman 則に含まれる係数 μ_L の値は $\theta = 45^\circ$ に対する非主軸圧縮強度が再現されるように決めた。また、同じ μ_L の値を用いて低ひずみ速度による非主軸破壊包絡線を精度よく予測できることを確認した。

4・4・3 修正 Tsai-Hill 則 修正 Tsai-Hill 則を用いて予測した非主軸強度（引張、圧縮）の繊維配向角依存性および非主軸破壊包絡線をひずみ速度 10%/min について試験結果と重ねてそれぞれ図 14 と図 15 に示す。摩擦係数 μ_L には $\mu_L = 0.7$ を仮定した。修正 Tsai-Hill 則は、破壊基準を引張と圧縮に対して使い分ける煩雑さがあるものの、非主軸強度の繊維配向角依存性と非主軸破壊包絡線を引張と圧縮の負荷様式に拘わらず精度よく予測できている。なお、修正 Tsai-Hill 則に含まれる係数 $\mu_L = 0.7$ は $\theta = 45^\circ$ に対する圧縮強度が再現できるように決めた。また、同じ値 $\mu_L = 0.7$ を仮定する修正 Tsai-Hill 則を用いることによって、低ひずみ速度に対する非主軸破壊包絡線を精度良く予測することができることを確認した。

比較のため、Tsai-Hill 則に引張試験から求めた強度 (X_T , Y_T , S_T) と圧縮試験から求めた強度 (X_C , Y_C , S_C) をそれぞれ用いた場合の予測結果を図 16 (繊維配向角依存性) と図 17 (破壊包絡線) に示す。引張と圧縮のそれぞれに Tsai-Hill 則を適用した場合、非主軸強度の繊維配向角依存性については、繊維配向角 $\theta = 10, 15^\circ$ の近くで予測精度の低下が認められるが、繊維配向角が大きい範囲では修正 Tsai-Hill 則による予測と大きく違わない結果が得られている。非主軸破壊包絡線については、 $10^\circ < \theta < 15^\circ$ で最大のせん断強度が現れることが予測されているが、実験では $\theta = 45^\circ$ 当たりで最大値が現れる。したがって、非主軸破壊包絡線の形状に関して、予測結果と実験結果には定性的に明瞭な違いが認められる。このことは、圧縮試験から求めたせん断強度を用いるだけでは十分な予測精度が保証されないことを意味している。上述の修正強度則が非主軸破壊包絡線の形状を記述できていることを併せると、トランスバース圧縮応力の作用によって変化するせん断強度を考慮することが有効な修正法であることを確認することができる。

5. 結 言

本研究では、一方向炭素繊維強化複合材料 T800H/Epoxy#2500 の高温におけるマトリックス支配形の非主軸圧縮強度とそのひずみ速度依存性を調べた。また、非主軸引張負荷に対する結果と比較し、両者の違いを定量的に明らかにした。さらに、一定のせん断強度を用いる静的強度則 [Hoffman 則, Tsai-Hill 則]

とこれらにせん断強度のトランスバース圧縮応力依存性を考慮した修正強度則の適用性を試験結果に基づいて評価した。得られた主な結果をまとめると以下のようになる。

(1) 繊維配向角が小さい場合 ($\theta = 10, 15^\circ$)、最終破壊様式に依存して非主軸圧縮強度が大きく変化する。面内せん断形の破壊様式によって圧縮破壊が生じた場合は、低めの圧縮強度が測定され、その大きさは同じ繊維配向角に対する非主軸引張強度にほぼ一致した。一方、面内せん断と面外せん断の組み合わせによって破壊した試験片の圧縮強度は同じ繊維配向角に対する引張強度よりも高くなった。

(2) 繊維配向角 ($\theta = 30, 45, 90^\circ$) に対する非主軸圧縮強度は非主軸引張強度の 2~3 倍の大きさに達した。

(3) 繊維配向角 ($\theta = 30, 45, 90^\circ$) に対する非主軸圧縮破壊は、面内については繊維に沿って、試験片厚さ方向には試験片表面から傾いた面に沿って生じた。外荷重に垂直な断面を基準として測った破断面の傾斜角 ϕ は繊維配向角 θ の増加とともに大きくなり、 $\theta = 90^\circ$ で $\phi \approx 63^\circ$ に達した。

(4) 異なるひずみ速度による非主軸圧縮強度についても、上記 (1) ~ (3) と同様の傾向が観察された。非主軸圧縮強度の大きさは、ひずみ速度に依存しており、低ひずみ速度 0.1%/min による非主軸圧縮強度は高ひずみ速度 10%/min によるそれよりも約 10~30% 小さくなった。

(5) 非主軸圧縮強度に基づいて評価した面内の繊維垂直方向強度と繊維に沿うせん断強度は、非主軸引張強度から求めた値に比べて、それぞれ約 3 倍、約 1.7 倍 (10%/min)、約 3.7 倍、約 1.5 倍 (0.1%/min) の値を示した。

(6) Hoffman 則は、試験したいずれのひずみ速度に対しても、見かけ上、圧縮強度の繊維配向角依存性を良好に記述することができる。しかし、応力面 ($\sigma_{22} - \tau_{12}$) に描いた非主軸破壊包絡線については、予測結果と実験結果に違いが目立つ。非主軸破壊包絡線の予測精度が低いことは、Hoffman 則の特殊な場合に相当する Tsai-Hill 則についても同様である。

(7) せん断強度のトランスバース圧縮応力依存性を考慮した修正 Hoffman 則および修正 Tsai-Hill 則は、非主軸圧縮強度の繊維配向角依存性だけでなく、非主軸破壊包絡線を精度良く記述することができる。

参考文献

- (1) Hahn, H.T. and Williams, J.G., Compression Failure Mechanisms in Unidirectional Composites, Composite Materials: Testing and Design, ASTM STP 893, (1986), pp. 115-139, ASTM.

- (2) Kawai, M. and Suda, H., Influences of Stress-Ratio on the Off-Axis Fatigue Strength of Unidirectional CFRP, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 69, No. 683 (2003), pp. 1135-1142.
- (3) Abot, J.L. and Daniel, I.M., Through-Thickness Mechanical Characterization of Woven Fabric Composites, Journal of Composite Materials, Vol. 38, No. 7 (2004), pp. 543-553.
- (4) Shuart, M. J., Failure of Compression-Loaded Multidirectional Composite Laminates, AIAA, Vol. 27, No. 9 (1989), pp. 1274-1279.
- (5) Hoffman, O., The Brittle Strength of Orthotropic Materials, Journal of Composite Materials, Vol. 1, No. 2 (1967), pp. 200-206.
- (6) Tsai, S.W. and Wu, E.M., A General Theory of Strength for Anisotropic Materials, Journal of Composite Materials, Vol. 5, (1971), pp. 58-80.
- (7) Shin, E.S. and Pae, K.D., Effects of Hydrostatic Pressure on In-Plane Shear Properties of Graphite/Epoxy Composites, Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 6 (1992), pp. 828-868.
- (8) Davila, C.G., Camanho, P.P. and Rose, C.A., Failure Criteria for FRP Laminates, Journal of Composite Materials, Vol. 39, No. 4 (2005), pp. 323-345.
- (9) Gates, T.S. and Sun, C.T., Elastic/Viscoplastic Constitutive Model for Fiber Reinforced Thermoplastic Composites, AIAA Journal, Vol. 29, No. 3 (1991), pp. 457-463.
- (10) Kawai, M., Kawase, Y., Negishi, R. and Masuko, Y., Off-Axis Inelastic Behavior of Unidirectional AS4/PEEK at High Temperature and Its Micromechanical Analysis, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 66, No. 652 (2000), pp. 2128-2135.
- (11) Masuko, Y. and Kawai, M., Stress Relaxation Behavior of Symmetric Angle-Ply Laminates of CFRP at High Temperature and Numerical Simulation, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 69, No. 688 (2003), pp. 1678-1685.
- (12) Kawai, M. and Masuko, Y., Creep Behavior of Symmetric Angle-Ply Laminates of CFRP at High Temperature and Numerical Simulation, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 69, No. 686 (2003), pp. 1473-1481.
- (13) JIS K7076, A Compression Examination Method in a Respect of CFRP, In: Japanese Industrial Standard, Japanese Industrial Association, (1991).
- (14) Haberle, J.G. and Matthews, F.L., An Improved Technique for Compression Testing of Unidirectional Fibre-Reinforced Plastics; Development and Results, Composites Part A, Vol. 25, No. 5 (1994), pp. 358-371.
- (15) JIS K7073, Testing Method for Tensile Properties of Carbon Fiber-Reinforced Plastics, In: Japanese Industrial Standard, Japanese Standards Association, (1988).
- (16) JIS K7083, Testing Method for Constant-Load Amplitude Tension-Tension Fatigue of Carbon Fibre Reinforced Plastics, In: Japanese Industrial Standard, Japanese Industrial Association, (1993).
- (17) Zhang, J.Q., Kawai, M., Saito, S., Xiao, Y. and Hatta, H., Rate-Dependent Nonlinear Behavior of a Unidirectional Carbon/Epoxy Laminate Subjected to Off-Axis Tension and Compression at High Temperature and a Viscoplasticity Formulation, Transactions of the Japan Society of Composite Materials, (2008), in press.
- (18) Azzi, V.D. and Tsai, S.W., Anisotropic Strength of Composites, Experimental Mechanics, Vol. 5, (1965), pp. 283-288.
- (19) Puck, A. and Schurmann, H., Failure Analysis of FRP Laminates by Means of Physically Based Phenomenological Models, Composites Science and Technology, Vol. 58, (1998), pp. 1045-1067.
- (20) Xiao, J.R. and Gillespie, Jr., J.W., A Phenomenological Mohr-Coulomb Failure Criterion for Composite Laminates Under Interlaminar Shear and Compression, Vol. 41, No. 11 (2007), pp. 1295-1309.
- (21) Kawai, M., Yajima, S., Takano, Y. and Hachinohe, A., Off-Axis Fatigue and Its Damage Mechanics Modeling for Unidirectional Carbon Fiber-Reinforced Composite at Room and High Temperatures, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 64, No. 627 (1998), pp. 2838-2846.