ノート

曲げおよび引張り試験による 2種類の炭素繊維／炭素複合材料の非主軸強度

田辺靖博, 筑後了治, 石井 元, 宗像光博, 平岡利治*, 安田榮一

(平成2年8月30日受理)

Off-axis Angle Strength of Two Types of C/C Composites with Bending and Tensile Tests

Yasuhiro Tanabe, Ryouji Chikugo, Hajime Ishii,
Mitsuhiko Munakata, Toshiharu Hiraoka* and Eiichi Yasuda

Research Laboratory of Engineering Materials
Tokyo Institute of Technology
4259, Nagatsuta, Midoro, Yokohama 227, JAPAN

*Research and Development Section
Toyo Tanso Co., Ltd.
2181, Nakahime, Ohnohara, Mitoyo 769-16, JAPAN

The effects of bending and tensile tests on the off-axis strengths were investigated using two types of C/C composites; unidirectional and two dimensional woven composites. The tensile strengths of axial direction were nearly equal to the bending ones for both of the composites. However, the tensile strength in off-axis strengths of the unidirectional and of the two dimensional composites were dominated by the tensile strength and shear strengths of the matrix, respectively.

KEYWORDS: C/C composite, Off-axis angle, Bending strength, Tensile strength

1. はじめに

炭素繊維／炭素複合材料（C/C複合材料）は、異方性の強い材料であり、その非主軸方向強度は、この材料の利用に際し重要な物性である。近年、筆者らは、この点に着目し系統的な研究を行なっている¹⁾。

C/C複合材料の強度を測定する場合、曲げ試験により行なうことが多い。これは、試験が簡便であることによるが、C/C複合材料の強度は試験方法（曲げ、引張り）により異なるとの報告がある²⁾。試験法の違いによるC

/C複合材料強度の相違に関する検討は、筆者の調べた限りではこれ以外には報告されておらず、加えて非主軸方向について試験法と強度との関係について言及した論文は見当たらない。

そこで、本研究では一方向強化複合材料ならびに二方向強化複合材料を用い、非主軸方向強度の試験法による相違について検討した。

2. 実験方法

2.1 試 料

(a) 一方向強化複合材料

炭素繊維にPAN系トレカM-40（3000フィラー、東レ）を、マトリックス前駆体にフルフリルアルコール初期重合体ヒタフラン302（日立化成工業）を用い、フィラ

東京工業大学工業材料研究所：〒227 横浜市緑区長津田 4259

* 東洋炭素株式会社開発部：〒769-16 三豊郡大野原町大字中姫 2181

Fig. 1 Specimen configuration.

メントワインディング法により巻取り、重合硬化後、アルゴン雰囲気下1000℃にて炭素化処理を行いUD-C/C試料とした。試料の高密度、見かけ密度、繊維含有率は各々1.51g/cm³、1.62g/cm³、41%であった。高密度は試料寸法と乾燥重量から、見かけ密度はブタノール置換によるアルキメデス法により、繊維含有率は試料横断面の顕微鏡観察から各々求めた。

(b) 二方向強化複合材料

炭素繊維には、PAN系トレカT-300の5H朱子織りトレカクロス(1000フィラー、東レ)を用いた。これを約150×120mmに切断し、繊維軸方向が同じになるようにして25枚重ねた。繊維含有率を約50%にするため、厚みを調節した炭素製の枠組にはめ、真空中2600℃で熱処理を行い高弾性化を行なった。これを、常圧で枠組ごと溶融ピッチに含浸し、焼成した。その後、加圧下で含浸・焼成を6回繰り返して緻密化を計った。枠組は、十分なピッチ含浸を行なうため3回目の焼成後取り外した。窒素雰囲気下、1000℃にて炭素化し2D-C/Cとした。試料の高密度、見かけ密度は各々1.64g/cm³、1.92g/cm³であった。測定方法は、2.1(a)に同じ。

2.2 強度測定

(a) 曲げ強度

試料を長さ約100mm、幅6.5mm、厚さ1.5mmにflat-wise試験片となるよう機械加工した。試験片の長手方向と繊維軸とのなす角度が、UD-C/Cでは0、14、23、54、90度、2D-C/Cでは一方の繊維軸に対して0、15、30、45度となるように切り出した。

試験は、外スパン81mm、内スパン27mm、外圧子直径6mm、内圧子直径8mmで行なった。試料ならびに治具寸法は、予備試験を行い決めた。つまり、試料が中央でせん断破壊しないように、あるいは圧子直下で圧縮破壊しないような寸法とした¹⁾。クロスヘッドスピードは0.5mm/minで、各水準5本の試験を行なった。

(b) 引張り強度

試料を長さ100mm、幅3.5mm、厚さ1.5mmに加工

し、試験片とした。試験片の長手方向と繊維軸とのなす角度は、曲げ試験と同様である。

試験片両側にアルミニウム製のタブをアクリル系接着剤で貼り付けた後、タブに穴を開け、ピンを介して治具に取り付けて引張り試験を行なった。穴開け加工時のタブ変形を抑える目的で試験片と同じ厚さのスペーサーを同じくタブ上部に接着した。測定部の長さは、35mmとした。試験片の寸法などをFig. 1に示す。均一な引張り状態を確認するために試験片の35×3.5mm面(2面)中央部にゲージ長1mmのひずみゲージを貼った。クロスヘッドスピードは0.5mm/minで、UD-C/C試料は各水準5本、2D-C/C試料は各水準2本の試験を行なった。

3. 結果と考察

両複合材料とも、曲げならびに引張り試験における応力-ひずみ曲線は破断荷重まではほぼ直線を示し、破断後は脆性的に破断した。従って、最大荷重を複合材料の破断荷重としても何ら問題ないと考えられる。そこで、以後の強度は最大荷重より算出した。

UD-C/Cおよび2D-C/Cの曲げ強度の結果をFig. 2(a)およびFig. 3(a)に示す。○印が平均で、棒が標準偏差を表わす。いずれの試料とも、引張り応力の作用する面(外圧子のあたる面)から破壊が進行した。UD-C/Cの繊維強度発現率が低い、これは表面処理繊維を用いたためである³⁾。UD-C/Cの強度の配向角度依存性は、繊維軸方向(0度)の引張り強度と繊維軸垂直方向(90度)の引張り強度に依存し、最大主応力説で記述できることは既に報告した¹⁾。2D-C/Cの非主軸方向の曲げ強度は45度方向の強度に依存し、最大せん断応力説で記述できた。つまり、2D-C/Cの非主軸方向強度は、マトリックスあるいは界面でのせん断破壊に支配されていると考えられる。なお、図中には次式で表わせる最大主応力説ならびに最大せん断応力説による計算結果も合わせて示してある。

$$\text{UD-C/Cの場合, } \sigma = \sigma_0 / \cos^2 \theta, \sigma = \sigma_{90} / \sin^2 \theta$$

$$\text{2D-C/Cの場合, } \sigma = \sigma_0 / \cos^2 \theta, \sigma = \tau / (\sin \theta \cos \theta)$$

ここで、 σ_0 : 繊維軸方向の強度

σ_{90} : 繊維軸垂直方向の強度

τ : せん断強度、 θ : 配向角度

引張り試験の結果をFig. 2(b)およびFig. 3(b)に示す。Fig. 2中の○印は平均で、棒は標準偏差を表わす。Fig. 3中の○印は、実測点を示す。UD-C/Cならびに2D-C/Cともに、曲げ強度と同様、配向角度の増加とともに急激に強度が減少している。図中には最大主応力説ならびに最大せん断応力説による計算結果も合わせて

Fig. 2 Strength of UD-C/C composite as a function of off-axis angle.
(a) bending strength, (b) tensile strength

Fig. 3 Strength of 2D-C/C composite as a function of off-axis angle.
(a) bending strength, (b) tensile strength

示してある。

ここで注目すべき点は、両複合材料とも繊維軸方向(0度)の強度は、曲げ試験あるいは引張り試験によらずほぼ同じ値を示しているのに対して、非主軸方向の強度は曲げ試験に比べて引張り試験の方がはるかに低いことである。

一般に脆性材料の強度は、その有効体積あるいは有効表面積に依存することが示されている⁴⁾。本実験で用いた材料は、複合材料である。しかし、その応力-ひずみ曲線は最大荷重まではほぼ直線であり、その破壊も脆性的であることから、ワイブル統計に基礎を置く有効表面積あるいは有効体積の概念を当てはめることが可能である。

と仮定して以下に考察する。これら複合材料のワイブル係数は実測されていない。しかし、本試験と同一試験片、同一試験方法による繊維軸方向強度のワイブル係数はUD-C/Cで11, 2D-C/Cで14と推定され⁵⁾、表面積効果で繊維軸方向の強度が説明できることが示されている⁵⁾。つまり、有効表面積を考慮することにより、曲げ強度から引張り強度を推定できることが示されている。

本実験で用いた試験片の非主軸方向の引張り強度は、ワイブル係数が低い場合でも表面積効果を考える限り、曲げ強度の90%程度もしくはそれ以上となる⁵⁾。また、体積効果を考えると曲げ強度の65%以上となる⁵⁾。したがって、本実験のように非主軸方向の引張り強度が、曲げ強度の約半分程度になることは表面積効果よりも主に体積効果のためと推察される。しかし、体積効果だけでは十分には説明できない(65%と50%との差)。

これは、次のように考えることができる。つまり、非主軸方向の強度は、マトリックス強度、言い替えばマトリックス中の欠陥に依存している。曲げ試験では試料厚さ方向の応力分布から、表面近くの欠陥は内部の欠陥より小さくても破壊の起点となる。これに対して、引張り試験では厚さ方向の応力分布による影響は理論的にはない。従って、曲げ試験では引張り表面から破壊する確率が相対的に大きい、引張り試験では相対的に内部から破壊する確率が増える。さらには、表面破壊に起因する強度のワイブル係数と内部破壊に起因する強度のワイ

ブル係数が異なることも考えられる。このため、複合材料の非主軸方向の強度が、ワイブル係数と体積効果からだけでは十分に説明できなかったものと考えられる。しかし、主軸方向強度は表面積効果で説明できた⁵⁾。これは、主軸方向の場合、曲げ試験あるいは引張り試験にかかわらず、ほとんどの破壊が表面欠陥から進行したことを示していると推察される。

文 献

- 1) 安田榮一, 筑後了治, 平岡利治, 堀宛英毅, 田辺靖博, 松尾陽太郎, 第16回炭素材料学会年会要旨集, 2 A 18, 炭素材料学会(東京)
- 2) G. Popp, H. Boeder and U. Gruber, *Verbundwerkstoff* 1, 137 (1985)
- 3) L.M. Manocha, E. Yasuda, Y. Tanabe and S. Kimura, *Carbon* 26, 333 (1988)
- 4) 松尾陽太郎, 「セラミックスの力学的特性評価」 西田俊彦, 安田榮一編著, 日刊工業新聞社(1986) p. 41
- 5) Y. Tanabe, E. Yasuda and R. Chikugo, *Report of RLEM TIT*, No. 16, in press

謝 辞

炭素繊維, ならびにクロスは(株)東レの御好意によった。記して感謝します。