

宇宙航空研究開発機構研究開発資料
JAXA Research and Development Memorandum

一方向炭素繊維／エポキシ複合材料の
90°引張り強度における寸法効果について

Size Effect on the Transverse Tensile Strength
of Unidirectional Carbon Fiber / Epoxy Composites

小笠原 俊夫^{*1}, 原 栄一^{*2}

Toshio OGASAWARA and Eiichi HARA

*1 研究開発本部 材料グループ

Advanced Materials Group,
Aerospace Research and Development Directorate

*2 航空宇宙技術振興財団

Foundation for Promotion of
Japanese Aerospace Technology (JAST)

2009年2月

February 2009

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

一方向炭素繊維／エポキシ複合材料の90° 引張り強度における寸法効果について*

小笠原俊夫^{*1}、 原 栄一^{*2}

Size Effect on the Transverse Tensile Strength of Unidirectional Carbon Fiber / Epoxy Composites*

Toshio OGASAWARA^{*1} and Eiichi HARA^{*2}

Abstract

Size effect of the transverse tensile strength of unidirectional carbon fiber / epoxy composites (CFRP) was examined experimentally. Three point bending tests and tensile tests were carried out for two kinds of carbon/epoxy composites, and the Weibull statistics based on weakest link theory was applied for evaluating the size effect. The size effect was calculated as a function of the effective volume, surface area, or edge length using the Weibull parameters obtained from three point bending tests, and the numerical results were compared with the experimental results. As a result, it was found that competing risk model considering both effective volume and surface area showed good agreement with the experimental results. It was demonstrated that the transverse tensile strengths of unidirectional carbon/epoxy composites are basically equivalent to the bending strengths.

概 要

一方向Carbon/Epoxy複合材料（CFRP）を対象として、90° 方向引張り強度の寸法効果について実験的な検討を行った。2種類の一方向CFRPに対して3点曲げ試験および引張り試験を行い、寸法効果の評価には、最弱リンクモデルに基づくワイブル分布を適用した。曲げ試験によって得られたワイブル係数を用いて有効体積、有効表面積および有効エッジに対する寸法効果を計算し、実験結果との比較を行った。その結果、有効体積と有効表面積の両方を考慮した競合リスクモデルが実験結果と良い対応を示すことがわかった。これらの検討により一方向CFRPの90° 引張り強度における曲げ強度と引張り強度の等価性が実験的に示された。

Key words; Transverse tensile strength, Size effect, Weibull statistics, Unidirectional composite laminate

1. はじめに

一方向複合材料の90° 引張り強度は、0° 引張り強度やせん断強度、圧縮強度等と比較して強度のばらつきが相対的に大きく、また著しい寸法効果を示すことが知られている[1-6]。90° 引張り試験では、通常、材料中の最も弱い部分から脆性的に破壊する。このことは90° 引張りに対しては最弱リンクモデルが適用可能であることを示唆しており、事実、強度データの整理には極値統計における第3漸近分布であるワイブル（Weibull）分布[7]がしばしば適用される。

ところで一方向材の90° 方向の曲げ試験では、すべての試験片が引張り面から引張り破壊することから、曲げ試験と引張り試験の等価性が古くから指摘されている。例えば、O'Brienら[2]、Adamsら[3]は、Graphite/Epoxy複合材料を対象とした引張り試験と曲げ試験を実施し、統一的な整理を試みている。また、O'Brienらは、Glass/EpoxyとCarbon/Epoxyを対象として試験片幅やスパン幅の

* 平成20年12月2日 受付 (Received 2 December, 2008)

*1 研究開発本部 材料グループ (Advanced Materials Group, Aerospace Research and Development Directorate)

*2 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology (JAST))

異なる3点曲げ強度および4点曲げ強度を実施し、強度に及ぼす寸法（体積）効果をワイブル分布に基づいて整理し、実験値と計算値との詳細な比較を行った結果について報告している[5]。しかしながら、いずれの研究においても引張り試験と曲げ試験の試験結果に対する直接的かつ統一的な整理は十分に行われておらず、引張り試験と曲げ試験の等価性については未だ実験的に実証されたとは言えないのが現状である。

以上の背景を踏まえて本研究は、Carbon/Epoxy複合材料を対象とした3点曲げ試験および引張り試験を実施し、試験結果に対してワイブル統計に基づく寸法効果の統一的な整理を行うことで、曲げ試験と引張り試験の等価性について実験的に評価することを目的として実施したものである。寸法効果の整理方法として、従来から検討されている有効体積による整理に加え、有効表面積および有効エッジに着目した結果の整理についても検討を行う。あわせて破壊源が競合する場合についても簡単なモデルに基づいて考察する。

2. 脆性材料の寸法効果について

単軸引張り応力下における脆性材料の強度分布に対する2母数ワイブル確率分布関数 $F(\sigma_R)$ は、一般に次式で表される[8]。

$$\begin{aligned} F(\sigma_R) &= 1 - \exp\left\{-\left(\sigma_R/\sigma_0\right)^m \left(V_{eff}/V_0\right)\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\left(\sigma_R/\sigma_0^*\right)^m\right\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$V_{eff} = \int_V f(r) dV \quad (2)$$

$$\sigma_0^* = \sigma_0 \left(V_{eff}/V_0\right)^{-1/m} \quad (3)$$

ここで m は形状係数、 σ_0 は尺度母数、 σ_R は物体中の代表引張り応力、 V_{eff} は有効体積、 V_0 は基準体積、 $f(r)$ は物体内の応力分布を表現する関数、 r は物体内の座標ベクトルである。引張り方向以外のすべての応力はここでは無視する。一様断面の引張り試験片では評定部での応力も一様であると仮定できることから V_{eff} は評定部の体積と等価となる。

$$V_{eff} = LBt \quad (4)$$

L は評定部長さ、 B は試験片幅、 t は試験片厚さである。

一方、図1に示すようなスパン幅 L_s の3点曲げ試験を考えると、引張り応力の発生している部位における応力分布を線形で仮定することにより V_{eff} は次式で与えられる。

$$V_{eff} = \frac{L_s B t}{2(m+1)^2} \quad (5)$$

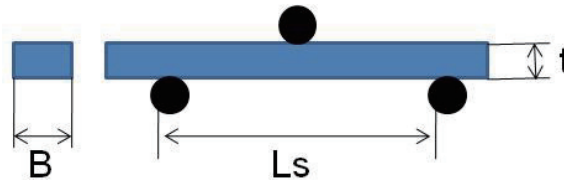


図1 3点曲げ試験片

ワイブル分布における強度の平均値は、 Γ をガンマ関数とすると、

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 (V_{eff}/V_0)^{-1/m} \Gamma(1+1/m) \quad (6)$$

これより平均強度が有効体積比の $-1/m$ に比例するという良く知られた寸法効果を表す関係が得られる。

ところで、上記では有効体積について考えたが、材料の破壊が表面を起点として発生する場合には、有効体積よりも有効表面積による取り扱いの方が適切である。引張り試験の場合は、試験片表面での応力が一様であることから、

$$A_{eff} = 2L(B+t) \quad (7)$$

3点曲げ試験の場合は表面での引張り応力が発生している部分のみを考慮すると

$$A_{eff} = L_s B / (m+1) \quad (8)$$

同様にエッジに着目した整理も可能である。引張り試験の有効エッジ長さは

$$L_{eff} = 4L \quad (9)$$

また、曲げ試験の場合の有効エッジ長さは

$$L_{eff} = 2L_s / (m+1) \quad (10)$$

これらの場合も有効体積と同様に、平均強度が有効表面積の $-1/m$ に比例するという寸法効果が現れる。

3. 実験方法

3.1 供試材料

実験に使用した一方向積層板は、東邦テナックスのIM600/133 (16 plies)および東レのT800H/3900-2 (12 plies)の2種類である。材料の仕様および特性値を表1にまとめて示す。なお表中の材料特性値はJAXA先進複合材データベースから引用したものである。

試験片の表面仕上げは、上下面がツール面 (As-received)、側面がダイヤモンドブレードで切断された切断面である。引張り試験片および曲げ試験はいずれも1枚の母板から切り出し加工し、エッジ部および切断面の研磨などは特に実施していない。曲げ試験における引張り面 (下面) は、As-received面である。

Table 1 Properties of carbon /epoxy composites used in this study [9]

	IM600/133	T800H/3900-2
Manufacturer	Toho-Tenax (Japan)	Toray (Japan)
Carbon fiber	IM600	T800H
Matrix	Toughened epoxy #133	Toughened epoxy #3900-2
Vf (%)	55	55
E _L (GPa)	152	152
E _T (GPa)	8.21	7.94
G _{LT} (GPa)	4.36	4.12
ν_{LT}	0.334	0.322
G _{Ic} (kJ/m ²)	0.435	0.322

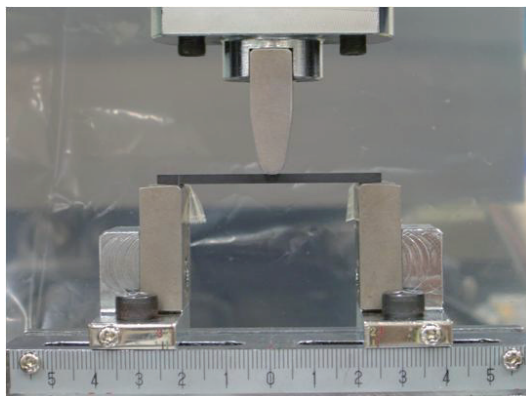
3.2 曲げ試験および引張り試験方法

曲げ試験および引張り試験の試験条件を表2に、試験状況の写真を図2に示す。曲げ試験には電気機械式材料試験機 (Instorn 4502, Load cell 5kN) を使用し、変位速度1.28 mm/min、室温中で

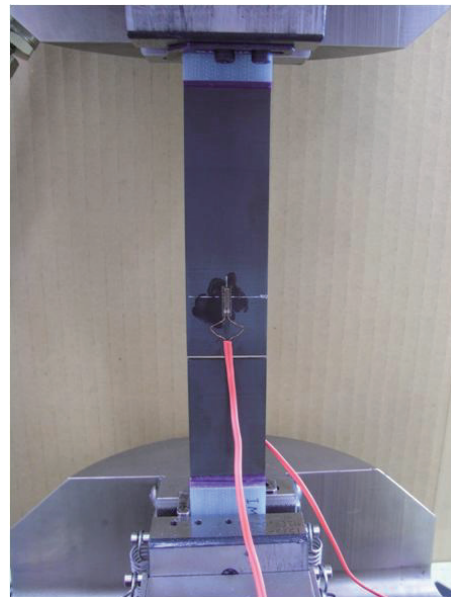
実施した。また引張り試験はGFRPのタブをつかみ部に接着後、油圧サーボ型材料試験機（Instron 8802型、Load cell 100kN）を使用して、変位速度 1mm/min、室温中で試験を実施した。引張り試験ではひずみゲージにより試験片表裏のひずみを測定し、顕著な曲げ成分が生じていないことを確認した。

Table 2 Configurations of bending and tensile tests

	Span (Ls) (mm)	Length (L) (mm)	Width (B) (mm)	Number of specimens	
				IM600/133	T800H/3900-2
3point-Bending	15	NA	5	10	10
	15	NA	10	16	20
	45	NA	10	6	10
Tension	NA	125	10	5	5
	NA	125	25.4	5	5



(1) 3点曲げ試験



(2) 引張り試験

図2 3点曲げ試験および引張り試験の試験状況

4. 実験結果と考察

4.1 実験結果

曲げ試験および引張り試験で得られた強度の平均値を表3にまとめて示す。曲げ試験ではすべての試験において引張り側が起点であることを確認した。90° 引張り強度が明確な寸法効果を有し、試験片寸法の増大とともに強度が低下することを明瞭に確認することができる。すなわち、90° 引張り強度は試験片寸法に大きく依存し、試験条件を確定しない限り固有の引張り強度というものとは存在しない。

曲げ試験、引張り試験のいずれの場合にも、強度の試験片幅依存性が明確に現れており、このことは寸法効果として有効エッジ長さの影響が相対的に小さいことを示唆している。この結果は、

O'Brienらの実験結果[4]とは若干異なる。

図3は、幅10mm、スパン幅15mmの曲げ試験によって得られた強度のワイブルプロットである。破壊確率の計算にはMedial-rank法を適用した。直線回帰によって推定されたワイブル係数を表4に示す。ここでは基準体積を 1mm^3 、基準表面積を 10mm^2 、基準エッジ長さを 1mm として尺度母数を計算した。

得られたワイブル形状係数 m から有効体積、有効表面積および有効エッジ長さを計算した。曲げ強度と引張り強度を有効体積で整理した場合の結果を図4(1)(2)に、有効表面積で整理した場合の結果を図5(1)(2)に示す。図中の直線は(1)式を用いて、破壊確率5%、50%および95%における強度値を計算した結果である。IM600/133では、有効体積による整理では実験結果と計算結果との差異が大きいが、有効面積による整理では良い一致が見られている。一方、T800H/3900-2では有効体積、有効面積ともに実験結果と計算結果は概ね一致しているが、有効体積による整理の方が良い対応が得られているようである。

Table 3 Flexural and tensile strengths

	Span (Ls) (mm)	Length (L) (mm)	Width (B) (mm)	Average Strength (MPa)	
				IM600/133	T800H/3900-2
3point-Bending	15	NA	5	135.1	142.1
	15	NA	10	127.7	143.1
	45	NA	10	115.3	113.1
Tension	NA	125	10	84.7	69.2
	NA	125	25.4	73.0	58.3

Table 4 Estimated Weibull Parameters (3point-bending, Ls=15 mm, B=10)

	m	σ_0^* (MPa)	σ_0 (MPa) ($V_0=1\text{ mm}^3$)	σ_0 (MPa) ($A_0=10\text{ mm}^2$)	σ_0 (MPa) ($L_0=1\text{ mm}$)
IM600/133	13.0	132.8	131.9	133.6	140.9
T800H/3900-2	9.92	145.2	151.3	150.0	160.8

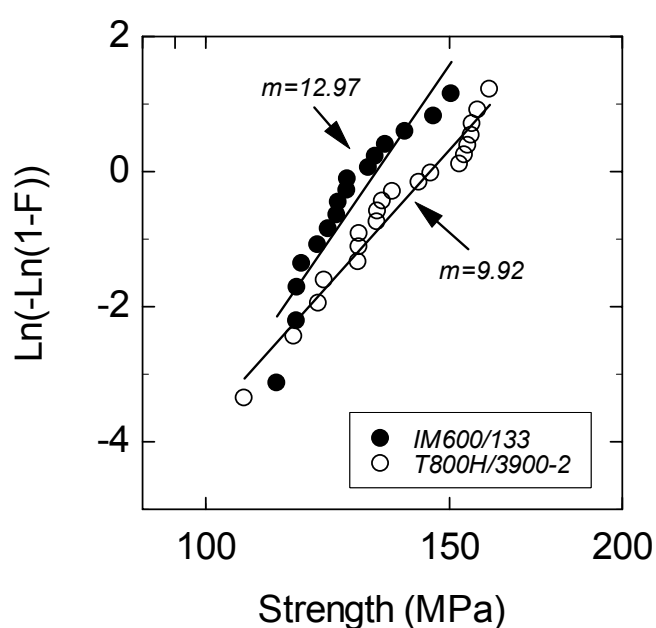
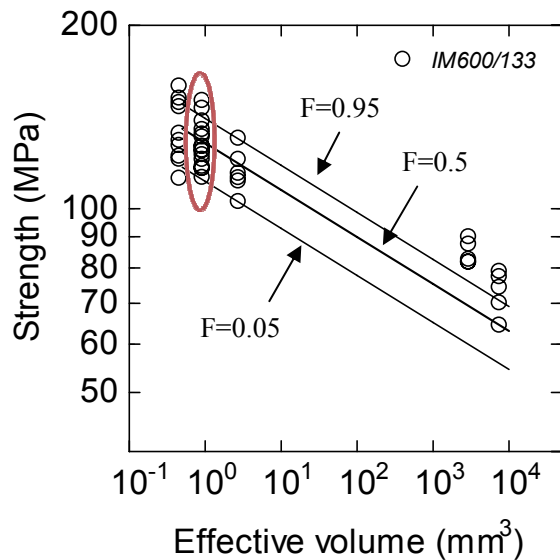
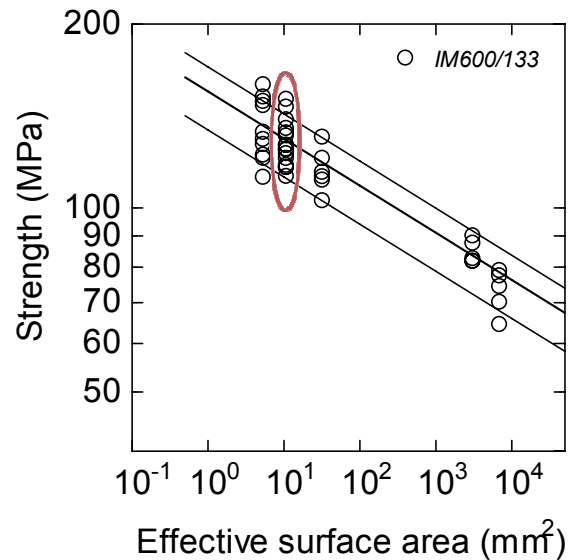


図3 3点曲げ強度のワイブルプロット（幅10mm、スパン幅15mm）

曲げ試験では試験片厚さ方向に対する引張り応力の勾配が大きく、内部からの破壊確率は相対的に小さい。これは曲げ試験における有効体積が小さいことから理解される。これに対して引張り試験では評定部の引張り応力が一様であるため、内部／表面両方からの破壊が生じ得る。このことは引張り強度と曲げ強度の等価性を最弱リンクモデルにおける寸法効果に基づいて議論する場合には、破壊起点に関する考察が不可欠であることを示唆している。

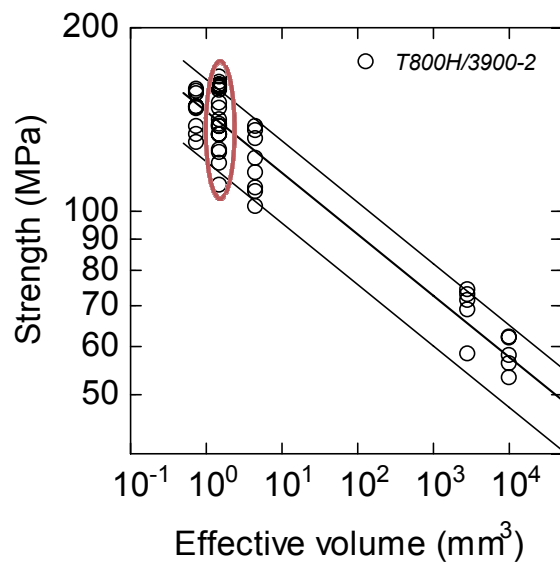


(1) 有効体積による整理

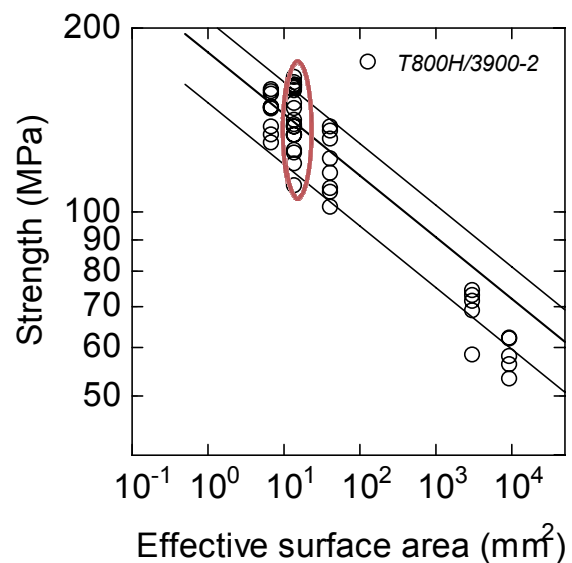


(2) 有効表面積による整理

図4 引張り強度／曲げ強度の寸法効果 (IM600/133)



(1) 有効体積による整理



(2) 有効表面積による整理

図5 引張り強度／曲げ強度の寸法効果 (T800H/3900-2)

4.2 破壊源の競合

表面および内部からの破壊確率を同時に扱うモデルとして、競合リスクモデル(Competing risk model)に基づく多重モードワイブル分布が提案されている。複数の破壊要因が存在するときの系の信頼度 R は、個々の破壊要因による信頼度を R_i とすると次式で与えられる[10]。

$$R(\sigma_R) = \prod_{i=1}^k R_i(\sigma_R) \quad (11)$$

個々の破壊要因に対する確率分布関数としてワイブル分布を考えると個々の破壊要因に対する信頼度 R_i は

$$R_i(\sigma_R) = 1 - F_i(\sigma_R) = \exp\{-B_i\} \quad (12)$$

これより競合リスクモデルに基づく多重モードワイブル分布関数が得られる[11]。

$$F(\sigma_R) = 1 - \exp\left\{-\sum_{i=1}^k B_i\right\} \quad (13)$$

表面および内部からの破壊を考える場合は、

$$F(\sigma_R) = 1 - \exp\{-(B_1 + B_2)\} \quad (14)$$

$$B_1 = (\sigma_R / \sigma_{01})^{m_1} (V_{eff} / V_0) \quad B_2 = (\sigma_R / \sigma_{02})^{m_2} (A_{eff} / A_0)$$

すなわち、表面破壊および内部破壊によるワイブルパラメータをそれぞれ推定することで、それぞれの破壊起点が競合する際の破壊確率を求めることができる。

実際には、表面破壊と内部破壊のパラメータを独立に推定することは困難であるので、極めて近似的ではあるが、これらの値が同じであると仮定すると、

$$F(\sigma_R) = 1 - \exp\left\{-(\sigma_R / \sigma_0)^m (V_{eff} / V_0 + A_{eff} / A_0)\right\} \quad (15)$$

すなわち、寸法効果として有効体積と有効表面積の和を扱うことで双方の効果を考慮することができる。同様に、エッジ破壊も考慮する場合には、

$$F(\sigma_R) = 1 - \exp\left\{-(\sigma_R / \sigma_0)^m (V_{eff} / V_0 + A_{eff} / A_0 + L_{eff} / L_0)\right\} \quad (16)$$

このように寸法効果を考慮する場合には、有効体積、有効表面積、有効エッジ長さ、およびこれらの組み合わせを考えることができる。表5は曲げ試験 (Ls=15mm、B=10mm) と引張り試験 (L=125mm、B=25.4mm) における実験結果とワイブル統計による推定結果の比較をしたものである。表5において、+は実験値に対して推定値が過大だったもの、-は過小だったものを示す。ここでは各モードのワイブルパラメータが同一であるという極端な近似をしているが、表面および内部からの破壊の競合を考慮した2重モードワイブル分布による推定値が良い近似を与えるようである。図6(a)(b)に有効体積と有効表面積の和に対して試験結果をプロットした結果を示す。いずれの材料においても計算値と実験値は概ね良い対応を示していることがわかる。

Table.5 Comparison between experimental results and estimated values

Size effect	IM600/133	T800H/3900-2
V_{eff}	- 12.7 %	+ 0.8 %
A_{eff}	+ 6.2 %	- 26.6 %
L_{eff}	+ 14.8%	+ 40.17%
$V_{eff} + A_{eff}$	- 8.0 %	- 6.7 %
$V_{eff} + A_{eff} + L_{eff}$	- 3.1 %	- 13.4 %

(- ; under estimation, + ; over estimation)

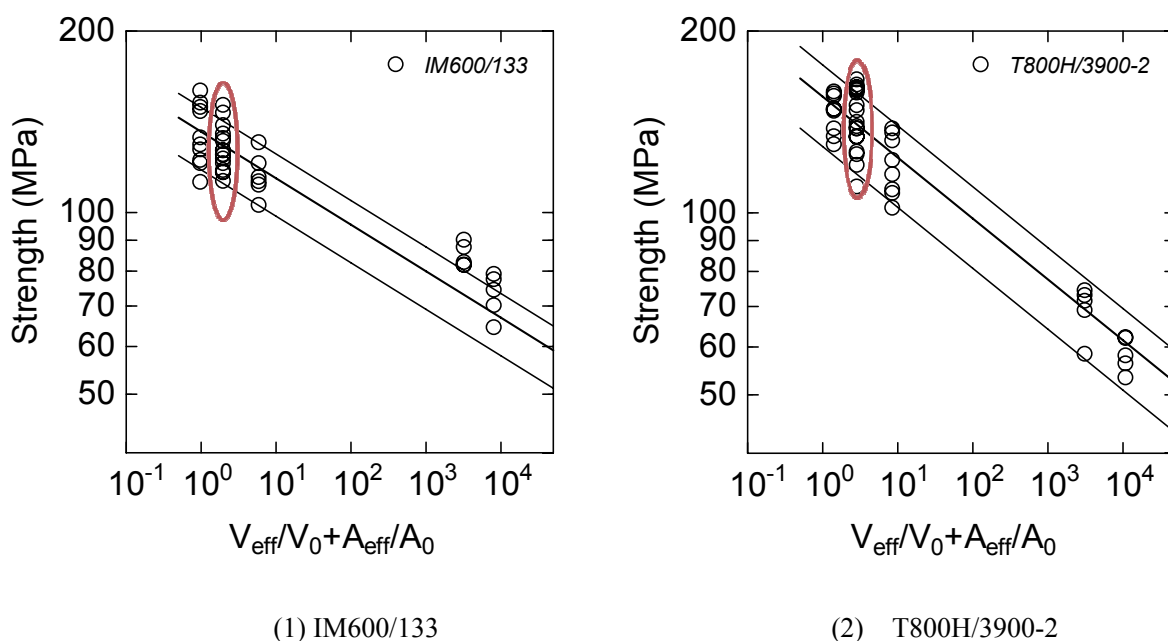


図6 引張り強度／曲げ強度の寸法効果（競合リスクモデル）

一般にCFRPを一方向材として使用することは少なく、 90° 引張り強度が実用上で必要となるのはトランスバースき裂の発生を予測する場合である。特に 90° 層の厚さが厚くなると応力基準の破壊クライテリアが適用されるため、 90° 引張り強度がしばしば参照される [12]。しかしながらトランスバースき裂を対象とした場合の有効体積（表面積）はASTM-D3039等で規格化されている引張り試験片と比較して著しく小さく、曲げ試験の結果を適用する方が適切であろう。また、試験法という観点から見ると、 90° 引張り試験では、試験機の実アライメント等に伴う曲げ変形や、チャック部における応力集中など、実験上の本質的な困難さがあり、また試験コストも高い。これに対して、曲げ試験は試験が容易で、試験片コストが低く、多数の試験を実施可能であるという利点がある。例えばASTM-D3039で規定される 90° 引張り試験片の寸法は幅25mm×長さ175mmであり、一般的な曲げ試験片（幅5mm×長さ60mm）であれば15本のサンプリングができる。このことは引張り試験片3本分で曲げ試験片45本のデータ取得が可能であることを意味し、得られた結果からは寸法効果と強度分布の両方を考慮した 90° 引張り強度を得ることができる。

このように曲げ試験による 90° 引張り強度のデータ取得は実用面においても有用かつ合理的な手法であり、ラウンドロビン試験を含む更なる詳細な検討によって引張り試験と曲げ試験の等価性が幅広く実証されれば、将来の工業標準化検討対象にもなり得る可能性もあるものとする。

5. まとめ

本研究では、2種類のCarbon/Epoxy複合材料を対象とした3点曲げ試験および引張り試験を行い、一方向CFRPの90° 引張り強度の寸法効果について統一的な整理を行った。得られた結果を以下に総括する。

1. 90° 引張り強度は脆性破壊であり、これに起因した顕著な寸法効果を示すため、強度値の取り扱いには注意が必要である。
2. 90° 引張り強度における寸法効果は、最弱リンクモデルに基づくワイブル分布によって整理できる。寸法効果を議論する場合には、有効表面積および有効体積の双方について検討し、確率論的に上下限に関する評価を行うことが肝要である。近似的には表面および内部破壊を考慮した競合リスクモデルの適用も効果的である。
3. 曲げ試験は引張り試験と比較して試験方法も簡便で試験コストも著しく低く、確率統計論的な整理も容易であることから、標準的な90° 引張り強度試験方法として有望である。

参考文献

- 1) M. R. Wisnom. Size effects in the testing of fibre-composite materials, Composites Science and Technology, 59, Issue 13 (1999), 1937-1957.
- 2) T. K. O'Brien and S. A. Salpekar, Scale Effects on the Transverse Tensile Strength of Graphite Epoxy Composites, NASA/TM-107637 (1992).
- 3) D. F. Adams, T. R. King, D. M. Blacketter, Evaluation of the Transverse Flexure Test Method for Composite Materials, Composite Science and Technology, 39 (1990), 341-353.
- 4) T. K. O'Brien, A. D. Chawan, K. DeMarco, I. Paris, Influence of Specimen Configuration and Size On Composite Transverse Tensile Strength and Scatter Measured Through Flexure Testing, Journal of Composites Technology and Research, 25 [1] (2003), 50-68. (NASA/TM-2001-211030)
- 5) T. K. O'Brien, R. Krueger, Analysis of Flexure Tests for Transverse Tensile Strength Characterization of Unidirectional Composites, Journal of Composites Technology and Research, Volume 25, Issue 1 (2003), 50-68.
- 6) M. R. Wisnom and M. I. Jones, Size Effect in Interlaminar Tensile and Shear Strength of Unidirectional Glass Fibre/Epoxy, J. Reinforced Plastics and Composites, 15 (1996), pp2-15.
- 7) W. Weibull, A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, 18 (1951), 293-237.
- 8) N. A. Weil, and I. M. Danial, Analysis of Fracture Probabilities in Non-uniformly Stressed Brittle Materials, J. Amer. Ceram. Soc., 47 (1964), pp268-274.
- 9) Advanced Composites Database System: JAXA-ACDB; Ver.06-1, <http://www.jaxa-acdb.com/>
- 10) NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 8.1.8.1 Competing risk model, www.itl.nist.gov/div898/handbook/
- 11) 村田 博隆, 松尾 陽太郎, 宮川 雅巳, 北上 浩一, 多重モードワイブル分布のパラメータ推定に及ぼす破壊原因データの役割, 日本機械学会論文集. A 編, Vol.52, No.473(1986) pp. 27-34.
- 12) 東郷敬一郎、材料強度解析学、内田老鶴圃 (2004)、p295-297.

付録 試験データ

(1) IM600/133

3点曲げ (Ls=15mm, B=5mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	曲げ強さ (MPa)
BEND-525-01	4.92	2.32	11.40	0.15	126.99
BEND-525-02	5.08	2.35	11.96	0.16	129.41
BEND-525-03	5.10	2.34	11.96	0.15	120.50
BEND-525-04	4.95	2.37	11.70	0.15	121.98
BEND-525-05	4.96	2.36	11.69	0.18	147.00
BEND-525-06	5.11	2.37	12.12	0.19	151.82
BEND-525-07	5.09	2.38	12.09	0.20	159.00
BEND-525-08	5.11	2.31	11.81	0.14	112.19
BEND-525-09	5.09	2.36	12.03	0.17	132.94
BEND-525-10	4.90	2.33	11.43	0.18	149.30
平均					135.1
標準偏差					15.7
変動係数					11.6

3点曲げ (Ls=15mm, B=10mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	曲げ強さ (MPa)
BEND-25-01	10.06	2.32	23.38	0.35	146.14
BEND-25-02	10.05	2.38	23.86	0.29	116.33
BEND-25-03	10.05	2.37	23.85	0.30	120.49
BEND-25-04	10.06	2.35	23.60	0.31	124.42
BEND-25-05	10.06	2.37	23.88	0.31	124.71
BEND-25-06	10.05	2.38	23.93	0.30	116.41
BEND-25-07	10.06	2.38	23.94	0.33	131.13
BEND-25-08	10.06	2.31	23.19	0.30	126.60
BEND-25-09	10.05	2.38	23.90	0.35	139.36
BEND-25-10	10.05	2.38	23.93	0.30	117.35
BEND-25-11	10.05	2.38	23.92	0.32	126.51
BEND-25-12	10.06	2.37	23.89	0.34	134.88
BEND-25-13	10.07	2.36	23.78	0.31	122.65
BEND-25-14	10.06	2.38	23.91	0.38	150.51
BEND-25-15	10.06	2.38	23.90	0.28	112.58
BEND-25-16	10.07	2.37	23.85	0.33	132.62
平均					127.7
標準偏差					10.9
変動係数					8.5

3点曲げ (Ls=45mm, B=10mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	曲げ強さ (MPa)
BEND-55-01	10.05	2.38	23.97	0.09	111.02
BEND-55-02	10.05	2.38	23.96	0.10	120.51
BEND-55-03	9.98	2.38	23.73	0.09	112.46
BEND-55-04	9.98	2.38	23.79	0.10	114.31
BEND-55-05	9.98	2.38	23.75	0.09	102.75
BEND-55-06	10.02	2.38	23.87	0.11	130.50
平均					115.3
標準偏差					9.4
変動係数					8.2

引張り (L=125mm, B=10 mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	破断荷重 (kN)	破断強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
90TS-10-01	9.967	2.371	23.634	1.95	82.59	8.8
90TS-10-02	9.953	2.370	23.586	1.93	81.79	8.3
90TS-10-03	9.957	2.367	23.564	2.12	89.97	8.2
90TS-10-04	9.950	2.367	23.548	1.92	81.70	8.1
90TS-10-05	9.957	2.368	23.574	2.06	87.51	8.5
平均	9.96	2.37			84.7	8.4
標準偏差					3.8	0.3
変動係数					4.5	3.1

引張り (L=125mm, B=25.4 mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	破断荷重 (kN)	破断強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
90TS-254-01	25.353	2.310	58.558	4.35	74.3	8.3
90TS-254-02	25.320	2.353	59.574	4.18	70.1	8.1
90TS-254-03	25.337	2.374	60.153	4.75	79.0	8.4
90TS-254-04	25.330	2.379	60.260	3.88	64.4	8.1
90TS-254-05	25.343	2.373	60.148	4.65	77.4	8.2
平均	25.34	2.36	59.74		73.0	8.2
標準偏差					5.9	0.1
変動係数					8.1	1.3

(2) T800/3900-2

3点曲げ (Ls=15mm, B=5mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	曲げ強さ (MPa)
BEND-525-01	4.93	2.29	11.28	0.17	147.29
BEND-525-02	4.98	2.29	11.40	0.18	158.49
BEND-525-03	4.95	2.29	11.34	0.17	148.22
BEND-525-04	4.95	2.29	11.34	0.18	155.84
BEND-525-05	4.96	2.30	11.39	0.16	137.68
BEND-525-06	4.94	2.29	11.31	0.18	157.26
BEND-525-07	4.96	2.29	11.38	0.16	133.61
BEND-525-08	4.88	2.29	11.18	0.17	148.34
BEND-525-09	4.93	2.29	11.29	0.12	104.40
BEND-525-10	4.95	2.29	11.35	0.15	129.64
平均	4.942	2.292	11.326		142.1
標準偏差					16.5
変動係数					11.6

3点曲げ (Ls=15mm, B=10mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	曲げ強さ (MPa)
BEND-1025-01	9.95	2.31	23.01	0.39	162.69
BEND-1025-02	9.95	2.29	22.77	0.33	141.18
BEND-1025-03	9.95	2.29	22.82	0.39	165.96
BEND-1025-04	9.95	2.28	22.65	0.31	133.54
BEND-1025-05	9.94	2.27	22.60	0.34	147.56
BEND-1025-06	9.93	2.31	22.93	0.35	150.49
BEND-1025-07	9.94	2.27	22.56	0.25	110.32
BEND-1025-08	9.93	2.30	22.84	0.32	138.85
BEND-1025-09	9.94	2.28	22.68	0.37	160.05
BEND-1025-10	9.95	2.27	22.59	0.36	159.17
BEND-1025-11	9.95	2.31	23.00	0.30	126.04
BEND-1025-12	9.95	2.29	22.82	0.38	161.19
BEND-1025-13	9.94	2.29	22.77	0.31	133.33
BEND-1025-14	9.95	2.28	22.65	0.29	124.81
BEND-1025-15	9.94	2.31	22.98	0.33	137.59
BEND-1025-16	9.91	2.32	22.97	0.32	133.57
BEND-1025-17	9.95	2.29	22.78	0.37	157.87
BEND-1025-18	9.94	2.32	23.02	0.28	119.82
BEND-1025-19	9.94	2.30	22.83	0.38	160.97
BEND-1025-20	9.90	2.31	22.86	0.32	137.73
平均	9.940	2.294			143.1
標準偏差					16.2
変動係数					11.3

3点曲げ (Ls=45mm, B=10mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	曲げ強さ (MPa)
BEND-1055-01	9.94	2.30	22.86	0.09	109.17
BEND-1055-02	9.94	2.27	22.53	0.08	101.77
BEND-1055-03	9.94	2.27	22.60	0.06	82.76
BEND-1055-04	9.95	2.27	22.59	0.10	131.54
BEND-1055-05	9.94	2.27	22.61	0.09	122.09
BEND-1055-06	9.95	2.27	22.59	0.10	135.57
BEND-1055-07	9.95	2.27	22.62	0.08	107.67
BEND-1055-08	9.95	2.27	22.62	0.07	86.66
BEND-1055-09	9.93	2.30	22.84	0.09	115.64
BEND-1055-10	9.95	2.26	22.52	0.10	137.69
平均	9.944	2.277			113.1
標準偏差					19.2
変動係数					17.0

引張り (L=125mm, B=10 mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	破断荷重 (kN)	破断強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
90TS-10-01	9.947	2.284	22.722	1.62	71.39	8.0
90TS-10-02	9.963	2.282	22.736	1.33	58.32	8.0
90TS-10-03	9.947	2.281	22.688	1.56	68.89	8.1
90TS-10-04	9.943	2.279	22.661	1.65	72.95	8.2
90TS-10-05	9.950	2.279	22.673	1.69	74.32	8.1
平均	9.95	2.28			69.2	8.1
標準偏差					6.4	0.1
変動係数					9.2	0.8

引張り (L=125mm, B=25.4mm)

S/N	板幅 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)	破断荷重 (kN)	破断強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
90TS-254-01	25.337	2.275	57.628	3.58	62.14	8.1
90TS-254-02	25.360	2.273	57.635	3.07	53.28	8.1
90TS-254-03	25.373	2.273	57.665	3.24	56.22	8.1
90TS-254-04	25.367	2.271	57.612	3.57	61.95	8.2
90TS-254-05	25.347	2.272	57.588	3.34	57.96	8.1
平均	25.36	2.27			58.3	8.1
標準偏差					3.8	0.0
変動係数					6.5	0.5