

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

炭素繊維強化複合材の面外引張特性試験方法の検討(その1)

原 栄一, 横関 智弘, 八田 博志, 石川 隆司

2007年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

Abstract	1
概要	1
1. 序論.....	2
1. 1 試験法の必要性	2
1. 2 文献調査と本研究の試験方法.....	2
1. 2. 1 文献の調査.....	2
1. 2. 2 本研究の試験方法	3
2. 供試体形状の検討（解析）.....	3
2. 1 材料特性	3
2. 1. 1 CFRP(IM600/#133)	3
2. 1. 2 接着層材料（AF163-2K）の引張試験.....	3
2. 2 解析モデルの形状.....	4
2. 2. 1 円柱供試体の形状と境界条件	4
2. 2. 2 スプール形状供試体解析モデル	4
3. 解析結果	5
3. 1 解析結果 1（円柱形状供試体弾性体接着層）.....	5
3. 1. 1 応力分布	5
3. 1. 2 ノミナル応力（基準応力）	7
3. 1. 3 測定位置による面外歪みの変化と見かけの弾性率（ノミナル弾性率）.....	8
3. 2 解析結果 2（円柱形状供試体・塑性体接着層）.....	8
3. 3 弾性 / 塑性接着層の影響に関する考察	9
3. 4 円柱形状供試体の解析から示唆された問題点.....	9
3. 5 スプール形状の解析結果と考察	9
4. 試験.....	12
4. 1 供試体材料.....	12
4. 2 円柱形状供試体の試験.....	12
4. 3 スプール形状供試体の試験	14
5. 結論（供試体形状の違いと解析試験結果の比較）.....	14
6. 今後の課題.....	15
参考文献.....	15

炭素繊維強化複合材の面外引張特性試験方法の検討（その1）*

原栄一^{*1}, 横関智弘^{*2}, 八田博志^{*3}, 石川隆司^{*4}

Study of out-of-plane (Interlaminar) tensile test method for CFRP Laminates: Part 1

Eiichi HARA^{*1}, Tomohiro YOKOZEKI^{*2}, Hiroshi HATTA^{*3} and Takashi ISHIKAWA^{*4}

Abstract

Although several out-of-plane test methods are proposed in MIL-HDBK-17 and in research publications, their reliability remains to be established. The present study focuses on the flatwise tension test. Finite element analyses and experiments were carried out to find the most suitable specimen configuration to evaluate out-of-plane stiffness and strength.

Several variations of specimen configuration (cylindrical column and spool column) were examined. Nine types of cylindrical model were investigated, with the diameter fixed at 25 mm and the thickness varied between 2 mm and 100 mm. The numerical calculations indicated stress concentrations near the adhesive layer and a multi-axial stress state in the cylindrical model. The “stress ratio” is defined as a representative value in which the nominal stress is divided by the maximum stress in order to describe the apparent strength. Based on stress ratios, the best configuration among the cylindrical column models was determined to be the thinnest. In the case of spool specimens, stress concentration near the minimum diameter at the center of a specimen was predicted. Through these calculations, it was concluded that the degree of multi-axial stress was lower in the spool specimens than in the column specimens, and the stress ratio approaches unity as the minimum diameter approaches zero. This suggests that the strength of a spool specimen increases as the center diameter decreases.

Several experimental tests were also carried out on cylindrical and spool specimens. Failure (including delamination in the adhesive layer) was confirmed for cylindrical specimens, whereas failure at the center of the specimen was confirmed for spool specimens.

Key words : test method, interlaminar properties, out-of-plane properties, CFRP

概要

複合材の面内特性や破壊靱性を評価するための試験は各団体（JIS,ISO,ASTM）により定められているが、面外引張特性（層間引張特性）を評価するための直接負荷試験は未だ規格化されていない。本研究では、炭素繊維強化プラスチック（carbon fiber reinforced plastic : CFRP）の面外方向の引張特性を取得するための試験方法を検討した。

負荷形態はハニカムサンドイッチ板のフラットワイズ試験と同様の直接負荷方式とし、最初に試験片形状の検討のため、有限要素解析を実施した。CFRPの0°一方向積層板を対象とし、供試体形状は円柱と板厚中心部がくびれたスプール状円柱（糸巻き形状）を検討した。有限要素法ソフトABAQUSを使用して供試体内の応力状態や供試体の各位置の歪みによる見かけの弾性率を検討した。解析結果より円柱形状の供試体の場合、治具接着面近傍の特定の位置で応力集中が発生することが予測された。また、スプール状円柱形状供試体の場合、板厚中心部で応力集中が発生し、供試体評定部内での破断が予測された。中心部の直径を減少させることで、この応力集中の度合いが緩和されることが予測された。

次に解析で検討した形状の供試体を製作し、検証試験を実施した。スプール状円柱の供試体の各試験結果は応力集中が予測された位置での破断が確認され、最小断面部の直径の違いによる破断強度の違いも解析予測と同様の傾向を得た。なお、円柱形状では試験実施の不安定性が確認され、標準化する試験法としては採用しがたいことも明らかにした。

キーワード：試験方法、層間特性、面外方向特性、CFRP

* 平成19年3月5日受付 (received 5 March, 2007)

*1 財団法人 航空宇宙技術振興財団 (Foundation for Promotion Japan Aerospace Technology)

*2 東京大学 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 (Department of Aeronautics and Astronautics, University of Tokyo)

*3 宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 複合材技術開発センター

(Advanced Composite Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

*4 宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ (Aviation Program Group)

1. 序論

1.1 試験法の必要性

繊維強化プラスチック (fiber reinforced plastic : FRP) は一般に強い異方性を示す。この異方性面内特性を評価するために、多くの FRP 試験規格が定められており、構造設計にはこれらの標準化された試験を用いたデータが活用されている。

近年の CFRP の適用分野拡大に伴い、熱可塑性粒子を層間に配することによって層間の靱性を向上させた材料や、層間方向に繊維を配向する CFRP 等が開発され、これらの材料の一部は航空機の一次構造部材に適用されている。このような材料の設計データを取得する時には、面内特性の試験だけでは材料の力学特性を評価する手法としては不十分で、面外特性を取得することが求められる。しかしながら、面外方向の引張特性を直接取得するための試験規格は未だ定められていない。本報告は面外引張特性取得に関して JIS や ISO 等の試験規格提案のための準備作業として、同試験方法に関する提案可能性を明らかにすることを目的に検討を行った結果をまとめたものである。

1.2 文献調査と本研究の試験方法

1.2.1 文献の調査

米国軍事規格の複合材版として、MIL-HDBK-17¹⁾ がある。このハンドブックは材料挙動に関する記述、試験法、材料データが要領よくまとめられており、試験法についても複数の方法が記述されている。面外特性の評価方法としては、参考試験方法の位置付けではあるが、接着された治具ブロックを介して試験をおこなうハニカムサンドイッチ板のフラットワイズ試験²⁾ (供試体の面外方向に直接負荷を与える直接負荷法)、曲がり梁の負

荷試験 (間接負荷法) が言及されている。

層間強度試験法に関しては、武田と高坂による解説³⁾ がある。この解説では、直接負荷法として、円形断面の平板試験片⁴⁾、断面積を減少させた円形の断面積減少平板試験片⁴⁾、リング状試験片 (FW パイプを使用した試験片)⁴⁾ を用いた方法が紹介されている。直接負荷法では、接着された治具ブロックを介して供試体に負荷を与える。直接負荷法で問題になるのが、供試体の自由縁での応力集中である。上記解説では、この応力集中を軽減させるために、接着治具の接着面角部に面取り加工を施し、供試体接着後、供試体と治具にできる隙間 (三角形断面) に樹脂を満たす方法が提案されている。

間接負荷法としては、L 型曲がり梁の引張負荷試験法⁵⁾ と 4 点曲げ試験法⁶⁾ が紹介されている。L 型曲がり梁の報告⁵⁾ では供試体の形状 (梁長さ・板厚・板幅・曲がり R の寸法) が計測される応力に違いを与えることが問題点として指摘されている。曲がり梁の強度取得 4 点曲げ試験方法は ASTM (American Society for Testing and Materials) により規格化されている。⁷⁾ 曲がり梁の試験はこれ以外にもいくつかの提示されており、試験間の主たる違いは供試体の形状や負荷方式である。^{8),9)} 間接法としては上記以外に、ある幅を持った CFRP アングルブライ積層板に面内方向引張負荷を与え、その際供試体自由端に発生する層間引張応力による破断を意図した試験¹⁰⁾ や、FRP の円盤を直径方向に圧縮させることで面外引張応力を発生させる FRP の割裂引張試験方法が提示されている¹¹⁾。この方法は JIS のコンクリート強度試験に類似負荷条件の試験方法¹²⁾ がある。

また、近年の動向として ASTM では Interlaminar Properties に関する試験規格として直接負荷法が WorkItem に指定され、規格化に向けた作業が進められている。¹³⁾

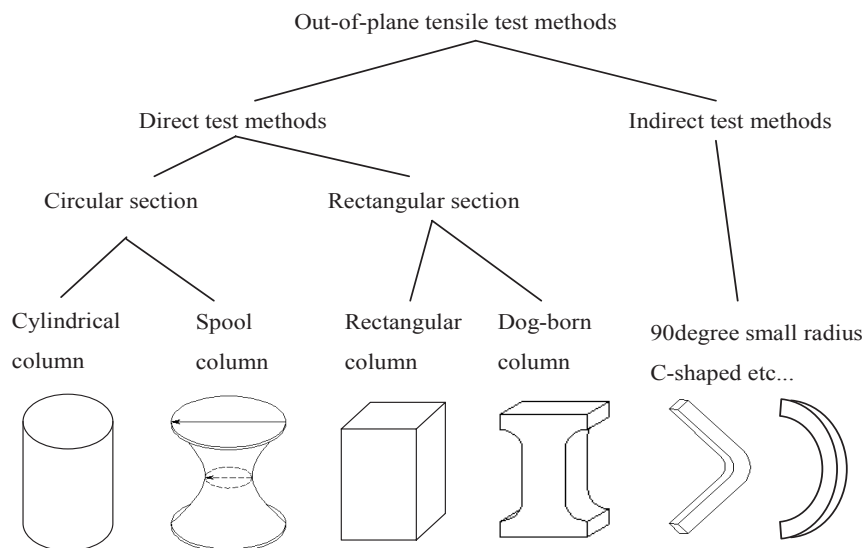


Fig.1 Tree diagram of out-of plane tensile test methods

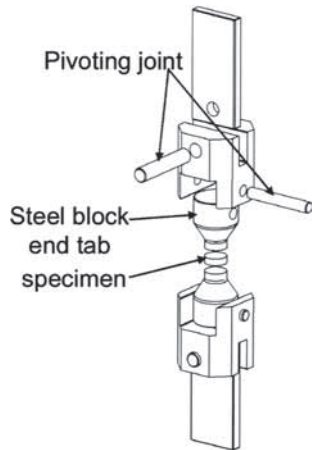


Fig.2 治具取り付け図

1.2.2 本研究の試験方法

前節のように、層間引張特性試験方法は直接負荷法と間接負荷法の2種類に分類される (Fig.1)。

間接負荷法の利点は試験自体の簡便さにある。ASTM規格を例にとると試験自体は通常の4点曲げとほぼ同様である。一方この方法の欠点としては、供試体形状が直接負荷法の平板試験片に比べて複雑で高価になること、試験結果の解釈が難しいこと、複雑形状を形成することから発生する残留応力の存在が指摘されている。また、間接負荷法では供試体を別途製作しなければいけないため、試験片が通常使用される平板と同じ特性を有するとは限らない。したがって、設計データとして採用しにくいことも問題である。

直接負荷法の利点は、基本的に平板から供試体が製作できること、意図した応力方向に確実に負荷させられる点にある。直接法の欠点としては、接着層が影響を与え、試験片内に応力集中が生じることが避けられないことが指摘されている。

本研究では直接負荷法の試験を検討する。試験治具はハニカムサンドイッチ板のフラットワイズ試験治具²⁾を参考にして設計した。Fig.2に示すように、試験片は治具ブロックに接着し、試験荷重は、自在継手を介して試験機から与える。供試体材料の形状は円柱と、円柱の断面直径を減少させたスプール形状とした。断面を長方形することも考えられるが、その場合長方形角部で応力集中が起こる。

2. 供試体形状の検討（解析）

供試体形状に関しては、有限要素解析により初期検討を行った。解析モデルには3次元ソリッド要素を用い、解析ソフトにはABAQUS6.5を使用した。

2.1 材料特性

2.1.1 CFRP(IM600/#133)

CFRPとしては、東邦テナックス製IM600/#133の一方方向強化材を想定した。このCFRPの材料特性をTable 1に示す。これらの材料定数は、JAXA/複合材技術開発センターの力学特性データベース¹⁴⁾より引用した。層間引張方向の弾性率は面内90°弾性率と同じであると仮定し、繊維方向と面外方向のポアソン比 ν_{13} は面内0°と面内90°のポアソン比 ν_{12} と同値と仮定した。また、 $\nu_{23} = 0.5, G_{23} = E_2 / \{2(1 + \nu_{23})\}$ と仮定した。

2.1.2 接着層材料 (AF163-2K) の引張試験

供試体と治具を接合する接着層材料は3M社製、AF163-2kのデータを準備した。カタログデータでは引張弾性率などの物性値が提示されていない。このため、接着材単体の板を成形し、これから引張試験を行って応力・ひずみ (S-S) 曲線と引張強度を得た。接着材の平均引張強度は42.3MPaであった。また、接着層材料はS-S曲線に非線形性を示した。この挙動を数値計算に取り込むため、接着層が線形弾性体の場合と、弾塑性体の場合に分けて解析を行った。

弾塑性体モデルは、正確な応力分布を与えると想定されるが、計算に長時間を要する。そこで、接着層を線形弾性体とした場合と弾塑性体として計算した場合の結果を比較し、線形弾性体接着層の有用性を試してみた。線形弾性体解析では、試験から計測された初期弾性率とポアソン比を使用した。弾塑性解析では、Ramberg-Osgood塑性モデルを使用した。Ramberg-Osgood塑性モデルで用いた近似曲線と実験データの比較結果をFig.3に示す。

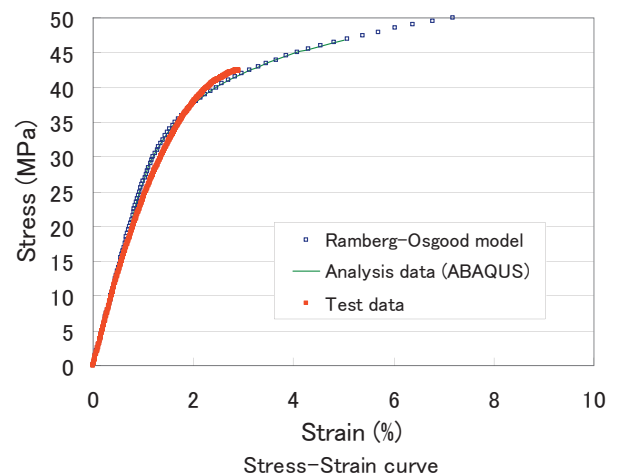


Fig.3 AF163-2Kの応力・歪線図

Table 1 材料特性値 (各弾性率・ポアソン比)

E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
G Pa	G Pa	G Pa				G Pa	G Pa	G Pa
153	8.20	8.20	0.335	0.335	0.5	4.36	4.36	3.07

2.2 解析モデルの形状

2.2.1 円柱供試体の形状と境界条件

後述の実験を考慮し、直径を 25mm、板厚は 2mm から 100mm まで 9 段階に変化させた、Fig.4 に示すような解析モデルを作成した。解析モデルは対称性を考慮して、試験片の 1/2 または 1/4 のみを取り上げモデル化している。この解析モデルは 3 次元ソリッド要素 (8 節点) で構成し、要素寸法は、厚さ 0.03625mm、面内は一辺約 0.5mm の矩形とした。(Fig.5b) 厚さは、CFRP プリプレグ 1ply の厚さが約 0.145mm であり、この 1 層を 4 分割した値が 0.03625mm である。ただし、一部板厚 25mm 以上の解析モデルを用いた場合も一部あり、この場合はメッシュ要素を大きくし、板厚 0.145mm で約 0.5mm 角の矩形要素を使用した。また、接着層は厚さ 0.10mm とし、接着層の治具接着面側に一様な強制変位を与えた。接着層の金属面は剛体と仮定し、接着面の強制変位は面外方向のみ、面内方向の強制変位量は 0 とした。強制変位量は 10000 μ 相当の強制とした。たとえば 6mm 分の解析モデルを作成した場合、接着層に与える強制変位量は 0.06mm、100mm の供試体モデルの場合強制変位量は 1mm と設定した。(Fig.5)

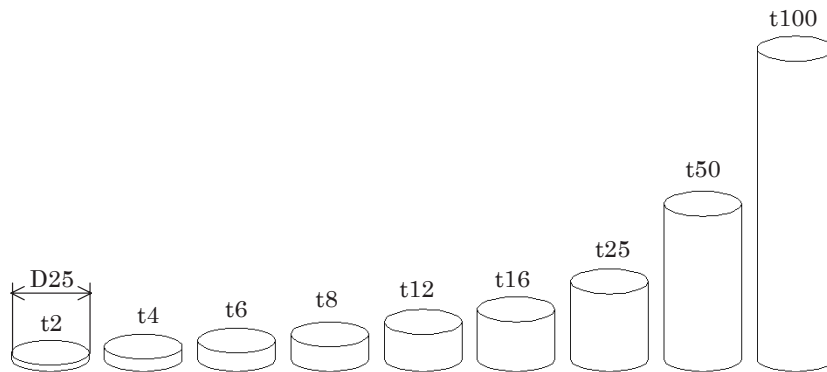


Fig.4 円柱供試体の解析モデル比較

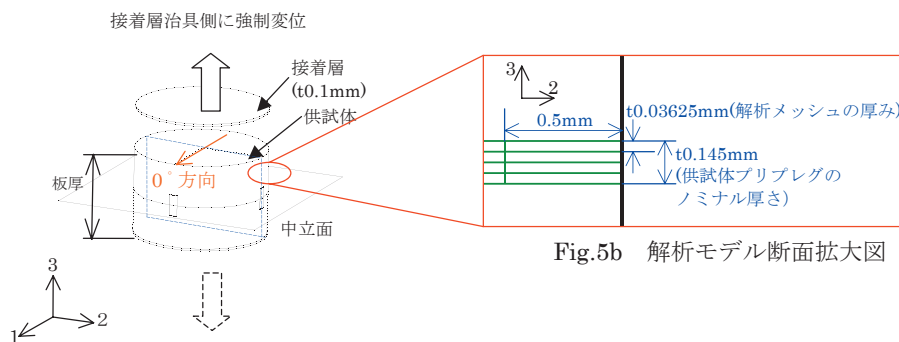


Fig.5a 供試体解析モデル

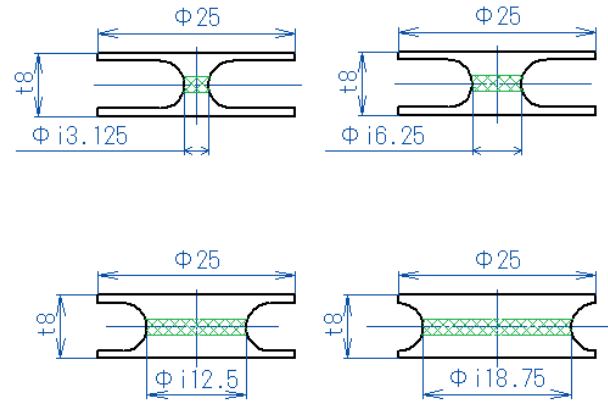


Fig.6 スプール形状供試体 (断面図)

2.2.2 スプール形状供試体解析モデル

円柱モデルでは接着面近傍の応力集中の影響を排除できない。応力集中効果を克服する方法として、スプール形状供試体の試験の検討を行った。スプール形状供試体断面の一例を Fig.6 に示す。スプール形状供試体は、接着部の直径 25mm、供試体板厚 8mm で共通とし、板厚中心部分の最小断面部の直径を 3.125mm、6.25mm、12.5mm、18.75mm の 4 段階に変えた解析モデルを作成した。スプール形状供試体の解析モデルも円柱モデルと同様に 3 次元ソリッド要素 (4 節点・4 面体) とし、メッシュ寸法は板厚方向に 0.145mm、面内方向は約 0.5mm 平方程度とした。ただし、応力集中が予想される中心部の厚さ 2mm の領域 (Fig.6 断面図の緑色ハッチング部) に

については円柱形状解析モデルと同様，メッシュ寸法を板厚方向に 0.03625mm とした．供試体の治具接着側に接着層の弾塑性体モデル（板厚 t0.10mm,）を設け，負荷条件として接着層の治具接着側面に一様強制変位を与えた．強制変位は面外方向のみ，面内方向の強制変位量は 0 とし，強制変位量は各供試体板厚の 10000 μ 分とした．

3. 解析結果

3.1 解析結果 1（円柱形状供試体・弾塑性体接着層）

3.1.1 応力分布

板厚 8mm 供試体モデルの解析で得られた各応力の分布図を Fig.7a-Fig.7f に示す．凡例の単位はすべて M Pa である．試験片内では一様な応力分布ではなく，面外引張応力だけでなく，面外せん断応力や面内応力も発生していることがわかり，また応力値の高い箇所は各応力成

分ごとに異なることも示唆される．CFRP 部における各応力成分の最大値及び最大応力を示した位置を Table2 に示す．全ての結果において，CFRP 部分の面外最大応力値よりも接着層の面外最大応力値が上回った．Fig.7c は板厚 8mm のモデルに関する面外方向の応力分布図で，供試体全体の 1/4 を表示している．面外方向の最大応力（Max Stress）はどの板厚でも 90° 方向（Fig.5a 参照）の接着層近傍特定の位置に現れた．Fig.7f は層間せん断応力分布図で，供試体の 1/8 を表示している．面内せん断応力最大値は供試体表面に現れたが，層間せん断応力の最大値は Fig.7f で示す 90° 位置の接着層近傍・供試体内部に発生した．Fig.7a で示した面内 0° 方向応力も同様の位置で最大応力（53M Pa）が発生しているが，面内引張試験による破断強度（2700M Pa）から考えると破断への影響は少ないと考えられる．面内 90° 方向応力値

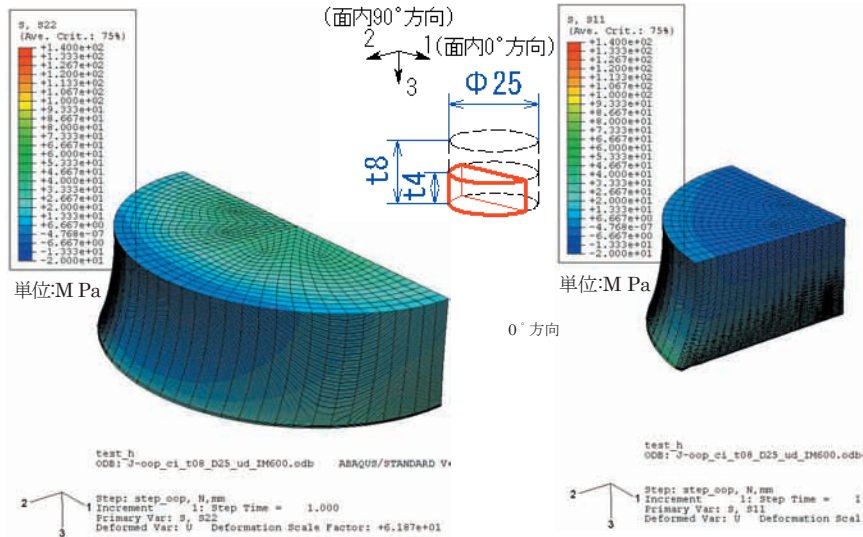


Fig.7a 解析結果 面内 0° 方向応力分布 (1/4 モデルと 1/8 モデル)

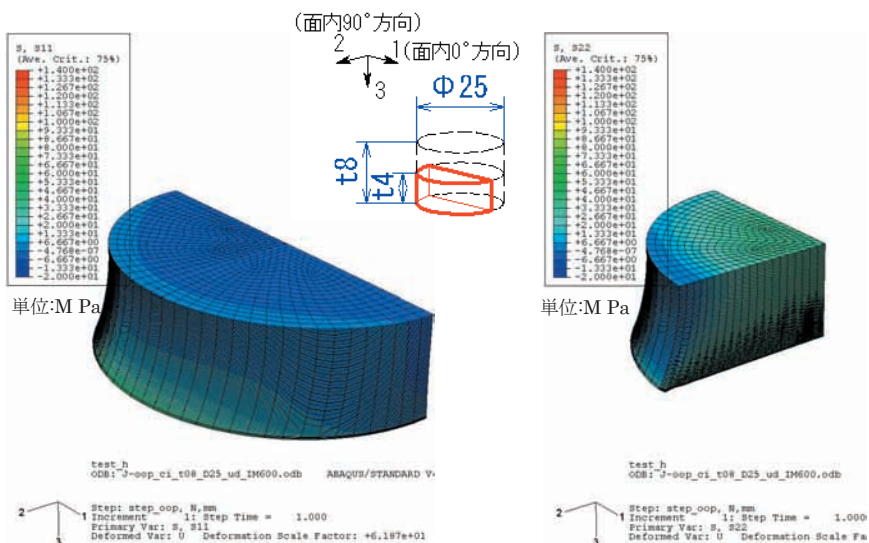


Fig.7b 解析結果 面内 90° 方向応力分布 (1/4 モデルと 1/8 モデル)

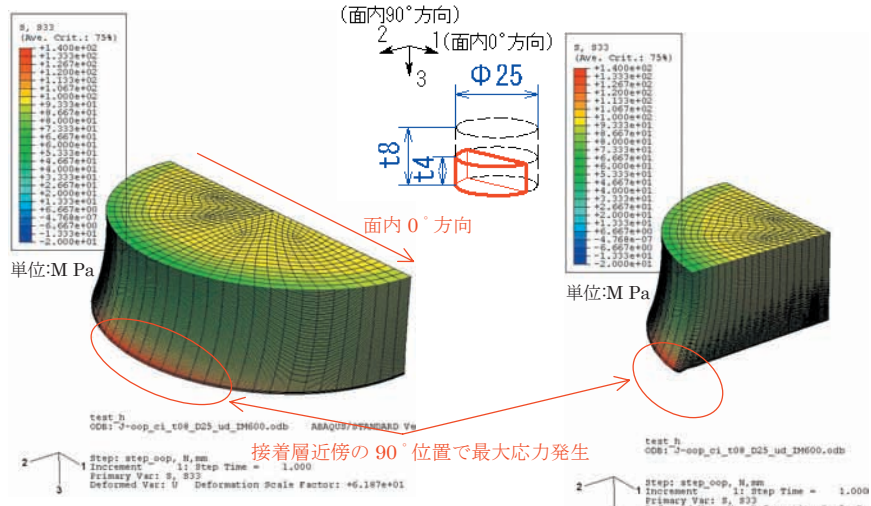


Fig.7c 解析結果 面外方向応力分布 (1/4モデルと1/8モデル)

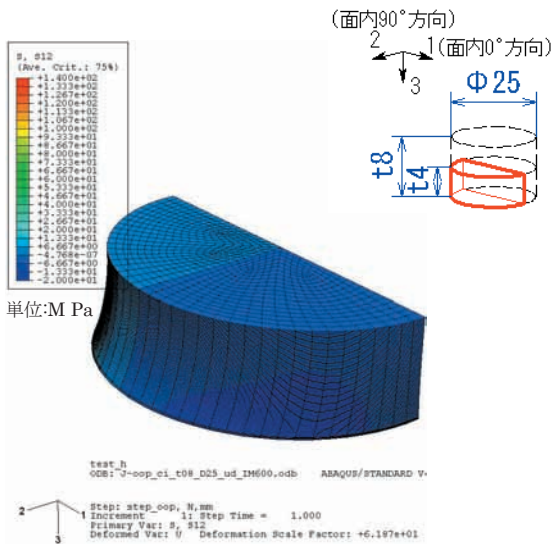


Fig.7d 解析結果 面内せん断応力分布 (1/4モデル)

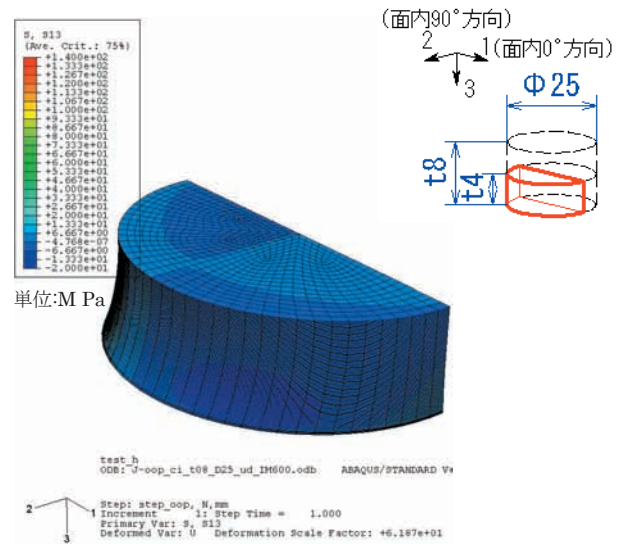


Fig.7e 解析結果 層間せん断応力(13方向)分布 (1/4モデル)

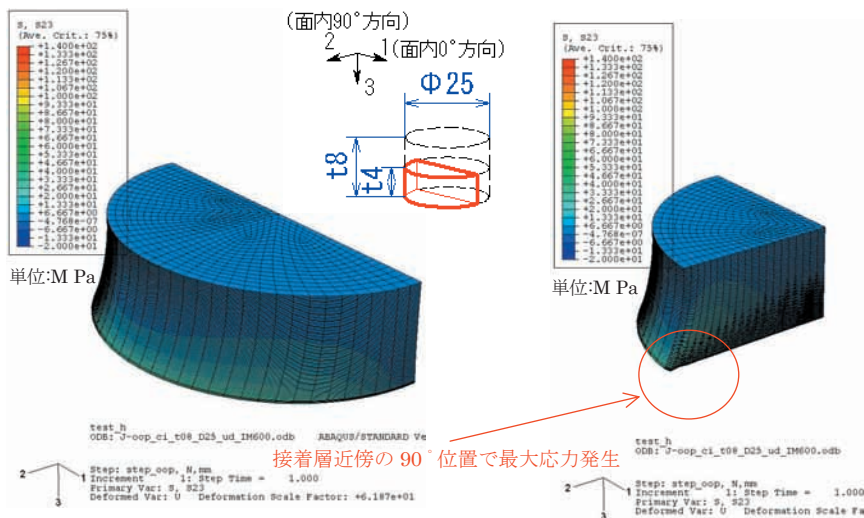


Fig.7f 解析結果 層間せん断応力(23方向)分布 (1/4モデルと1/8モデル)

Table 2 各応力の最大応力値と発生位置

供試体板厚	CFRP 最大応力 S ₁₁	CFRP 最大応力 S ₂₂	CFRP 最大応力 S ₃₃	CFRP 最大応力 S ₁₂	CFRP 最大応力 S ₁₃	CFRP 最大応力 S ₂₃
mm	M Pa					
2	39.0	44.3	87.4	9.7	8.1	20.2
4	39.0	48.5	104.6	10.9	10.8	29.7
6	47.4	48.4	122.3	11.7	11.2	35.2
8	53.7	46.9	136.2	12.2	10.8	38.9
12	60.0	45.8	153.4	12.8	11.8	42.8
16	62.3	47.6	161.2	13.2	11.9	44.0
25	54.8	46.0	158.0	13.4	12.0	40.7
50	52.6	43.3	146.5	12.5	10.6	38.0
100	47.2	41.7	141.2	12.3	10.5	36.1
最大応力発生位置 (板厚方向)	接着層 近傍	接着層 近傍	接着層 近傍	接着層 近傍	接着層 近傍 (中心寄り)	接着層 近傍
最大応力発生位置 (面内方向)	90°方向・ 供試体側面	供試体 中心	90°方向・ 供試体側面	±45°方向・ 供試体側面 近傍	±45°方向・ 供試体側面 近傍	90°方向・ 供試体側面 近傍

は面外方向の最大応力値の40%程度であるが、接着層近傍の供試体中央部に現れているため、これも破断への影響は少ないと考えられる。

円柱形状の供試体の場合、面外方向の最大引張応力発生位置の近傍に比較的高い層間せん断応力の発生が確認された。同様の位置に最大応力が発生している各方向の応力値を比較した場合、層間せん断応力(S₂₃)は面外引張応力の約30%程度であり、その他のせん断応力は面外引張応力の約10%程度であった。なお、全ての結果においてCFRP部の面外最大応力値よりも接着層の面外最大応力が上回っており、これは接着層を弾性体としてモデル化しているため応力集中が生じているためである。接着層のモデル化の影響は3.3節で議論する。

3.1.2 ノミナル応力（基準応力）

解析では、拘束を与えた節点における反力が求められている。接着面に並行な面内の全ての節点における面外引張方向の反力合計は、供試体負荷する外力と一致する。そこで解析結果から求められる、面外方向の反力合計を供試体の断面積で除した値をノミナル応力(Nominal Stress) = 基準応力として用いた。

実験ではロードセルで外力(=ノミナル応力)を計測するが、本研究の試験片には応力集中が現れる。この試験法を規格化するには、この応力集中を低減し試験片中の応力を一様に近づけることが求められる。この応力集中を評価する尺度の一つとして、応力比(=ノミナル応力/最大応力)を用いた解析結果の整理を以下に試みる。なお、応力状態が一様になっている状態とは、応力比(ノミナル応力/最大応力の比)が1になった状態を

示す。

Fig.8は、板厚と応力比・ノミナル応力・最大応力の関係を示した解析結果である。応力比は板厚増加に伴い、一度低下してから応力比0.6程度に収束した。

供試体板厚が薄くなるほど1に近づくことが予測された。ただし、各応力成分の割合を考慮に入れた場合、供試体板厚が薄くなるほど、面外応力以外の面内応力の割合が高くなっており、顕著な多軸応力状態試験になっている。円筒試験片を単純な面外引張試験として採用するためには、この影響を実験的に検討する必要がある。ただし、多軸応力状態の場合、1軸応力状態の破断応力よりも低い応力で破断すると考えられるため、面外引張強度

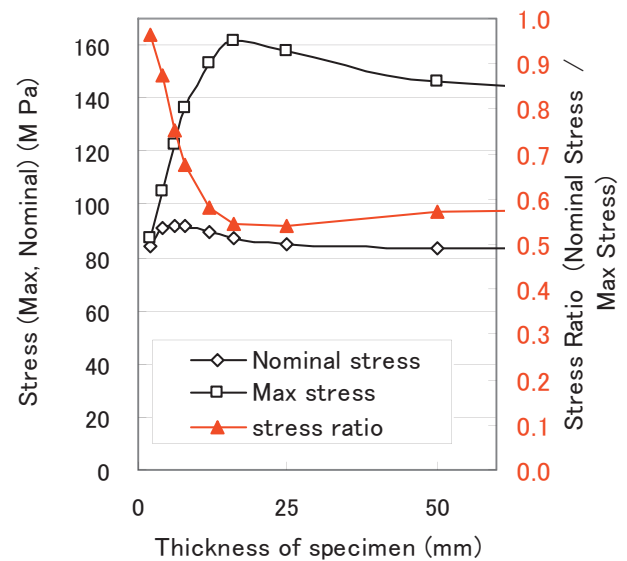


Fig.8 供試体板厚とノミナル応力・最大応力・応力比の関係

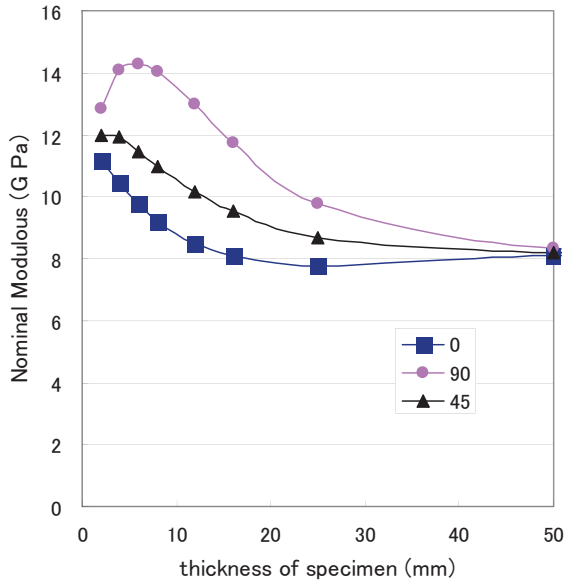


Fig.9 板厚と見かけの弾性率の関係

の安全側のデータを与える試験として適用の可能性は考えられる。

3.1.3 測定位置による面外歪みの変化と見かけの弾性率 (ノミナル弾性率)

供試体側面の面外方向の歪みは歪みゲージ等で測定可能である。またこの歪み量の変化とノミナル応力の変化から見かけの弾性率が計算できる。ただし、複合材料は異方性を持つため、測定位置によって歪み量が異なり、見かけの弾性率が異なって測定されることが予想される。この見かけの弾性率の妥当性を解析結果から推定する。

解析モデルの節点の変位量を調べ、歪み量を算出する。このときのノミナル応力と歪み量を用いて見かけの弾性率を計算する。①0°位置/②45°位置/③90°位置の3ヶ所を選択した。供試体側面に45°毎にゲージ長2mmの歪ゲージを接着し、歪み量を計測することを想定している。(Fig.5a)

解析結果より得た、板厚と各弾性率の関係を Fig.9 に示す。弾性率の大きさはほとんどのケースで(90°位置の弾性率) > (45°位置の弾性率) > (0°位置の弾性率)の順となった。板厚が2mm ~ 6mmの間は見かけの弾性率の差は大きくなり、板厚 t6mm ~ 50mmの間で、弾性率 8.2G Pa (材料特性値) に収束した。

板厚が増加するにつれ、材料特性値に近似したのは計測を想定した中立面近傍が一軸応力状態に近づいているためと考えられる。又、0°位置の弾性率が90°位置の弾性率よりも低くなったのは、90°位置の面外歪み量が0°位置のそれよりも小さいためであるが、これは供試

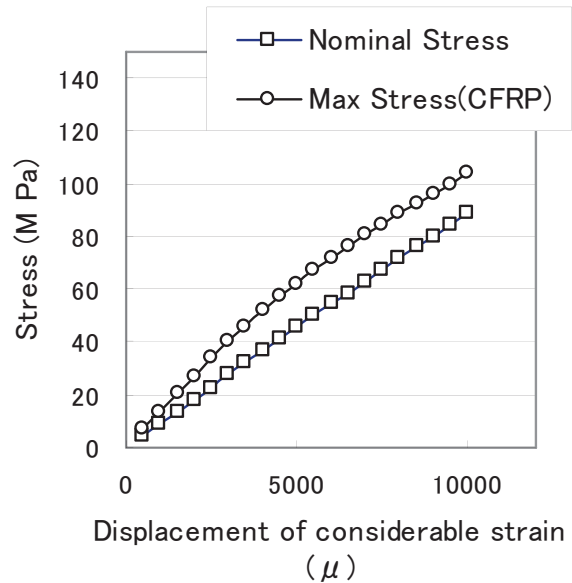


Fig.10 板厚 t8mm 供試体モデルの強制変位量とノミナル応力・最大応力の関係

体が面外方向に引張荷重を受けた場合のポアソン比 ν_{31} と ν_{32} が大きく異なることに起因すると考えられる。また、各位置のノミナル弾性率と材料特性値との誤差を比較すると、今回の解析モデルの範囲内においては、0°位置のノミナル弾性率が材料特性値に近い値を示した。なお、本報告の解析モデルでは、接着層板厚を 0.1mm とした。接着層板厚はノミナル弾性率を左右する要因の一つであるため、注意が必要である。(接着層と複合材の弾性率が異なるため)

3.2 解析結果2 (円柱形状供試体・塑性体接着層)

応力分布の傾向は弾性体接着層の解析結果と同様の結果を示した。供試体板厚 t8mm の解析モデルの強制変位量とノミナル応力、最大応力の変化を Fig.10 に示す。また、各板厚の供試体について、強制変位量 500 μ 分毎の応力比の値を Fig.11 に示す。2000 μ 相当の強制変位まで応力比は変化しないが、それ以降は応力比が変化する。これは接着層の挙動が弾性域から塑性域に変化したことによると考えられる。供試体の板厚による傾向も見ると、t2 ~ t12 までは応力比が減少した、t12 以上では増加した。

供試体板厚と応力比の関係を Fig.12 に示す。なお、強制変位量によって応力比が変化しているため、強制変位量 10000 μ 分の応力比の変化と強制変位量 4000 μ 分の応力比の変化を示す。傾向は接着層を弾性体とした場合と同様に变化した。応力比は板厚増加に伴い、一度低下してから応力比 0.7 程度に収束した。

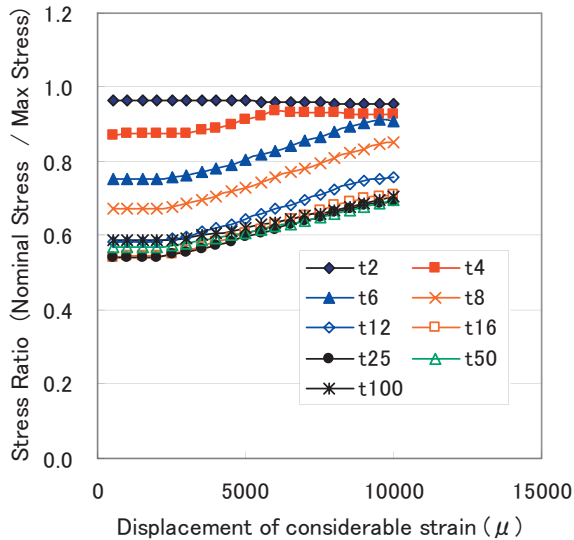


Fig.11 強制変位量とノミナル応力・最大応力の関係

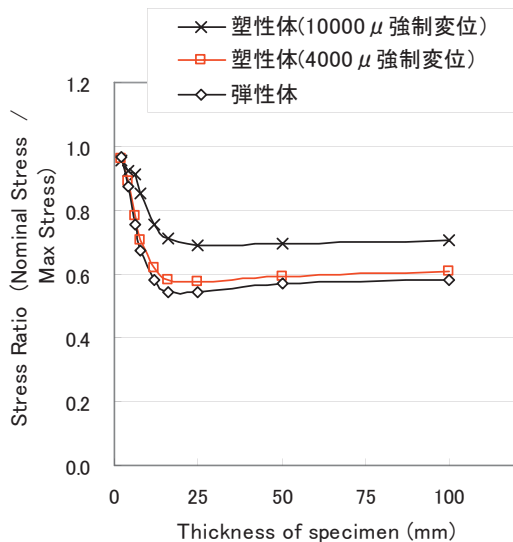


Fig.12 板厚と応力比の関係

3.3 弾性／塑性接着層の影響に関する考察

板厚と応力比の関係を Fig.12 に示す。応力比の最低値は、弾性接着層では 0.58、弾塑性接着層では 0.70 であった。ただし、破断応力と推定される 4000 μ の強制変位では、応力比は塑性接着層でも 0.61 になった。接着層を弾塑性体にすることで、過剰に応力比が下がらないことを確認した。ただし、強制変位量によって、ノミナル応力、最大応力、応力比が変化する。

今回の接着層の弾塑性体モデルとして、Ramberg-Osgood 塑性モデルを選択した。接着層のモデルを非硬化弾塑性体モデルのようにある歪み以上の応力が一定で推移するモデルを選択した場合、板厚と応力比の関係は変化する可能性がある。

3.4 円柱形状供試体の解析から示唆された問題点

これまでの解析結果から

- ①接着層近傍での破壊、結果として実試験においてノミナル強度値のばらつきが大きくなる
- ②最大応力部が多軸応力状態にある。
- ③板厚を増加させても応力比は 1 にならない。
- ④応力集中による取得データの低下。
- ⑤薄い板厚モデルは板厚変化に応力比が敏感、結果として実試験で計測されるノミナル強度が大きく変化する。

等の問題点が示唆された。また問題点の本質的な原因として、供試体評定部と固定部が非常に近いことが考えられる。

3.5 スプール形状の解析結果と考察

前節で推定された円柱形状供試体の試験の問題点に着目しつつ、以下ではスプール形状試験に関する解析結果を整理する。

最小直径 ϕ 6.25mm の時の応力分布を Fig.13a ~ Fig.13f に示す。凡例の単位は全て M Pa である。ここでも解析結果の反力合計をモデルの最小断面積で除した値をノミナル応力とし、ノミナル応力値/最大応力値を応力比として整理した (Fig.14)。また各方向の応力分布結果から得た CFRP 部分の最大応力値を Table3 に示し、併せて面外応力最大値 S_{33} とその他の応力最大値との比も示した。この各応力成分の比の算出は多軸応力状態を検討するためである。

・応力分布図からの考察

Fig.13a ~ f から接着層近傍での応力集中が少ないことが確認され、円柱供試体に比べて正確な試験が可能であることが推定された。Fig.13c に示すように、面外方向応力は板厚中心部分の最小断面部で応力集中が発生しており、最小断面部での破断が予測された。一方で最小断面部で応力集中が発生するのは面外応力 (S_{33})、面内 0° 応力 (S_{11})、面内 90° 応力 (S_{22})、面内せん断応力 (S_{12}) であることが Fig.13a, Fig.13b, Fig.13d から推定された。

・面外応力 (S_{33}) と他の応力 (S_{11}, S_{22}, S_{12}) の比と、最小断面部直径の関係についての考察

Table3 より $S_{11}/S_{33}, S_{22}/S_{33}$ と S_{12}/S_{33} は最小断面部直径に伴い減少することが推定された。これは最小断面部直径の減少により応力状態が 1 軸応力状態に近づいていることを示唆している。

・面外せん断応力についての考察

Fig.13d, Fig.13e (面外せん断応力分布図) から、最大応力が供試体のくびれ R 部で発生しており、この R 部寸法と発生せん断応力に関係があることが示唆された。

・円柱形状供試体との比較

スプール形状供試体 (Fig.13c) と円柱形状供試体

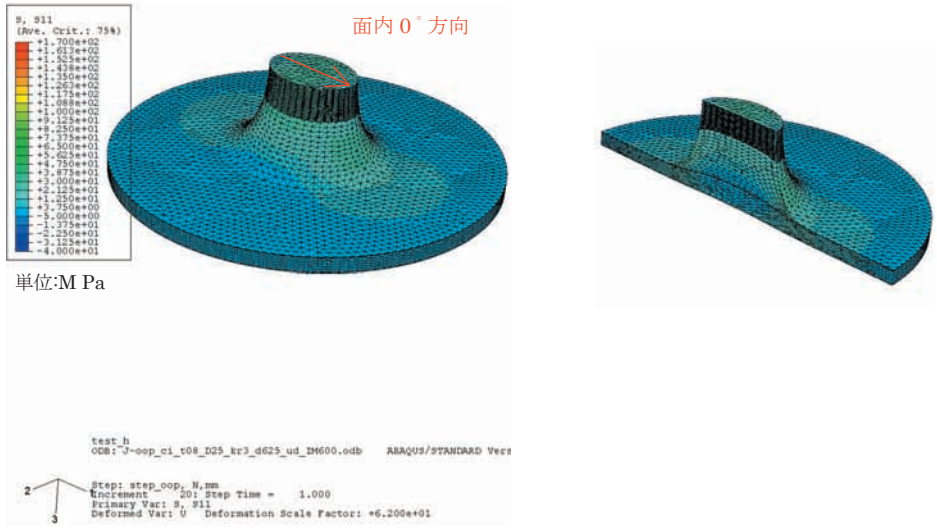


Fig.13a スプール形状供試体・t8mm・φ 6.25mm の面内 0° 方向応力分布

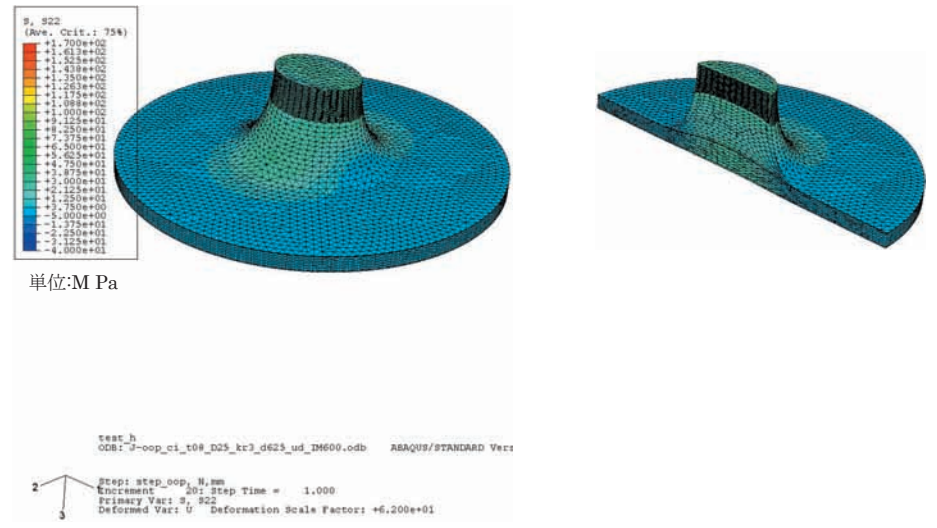


Fig.13b スプール形状供試体・t8mm・φ 6.25mm の面内 90° 方向応力分布

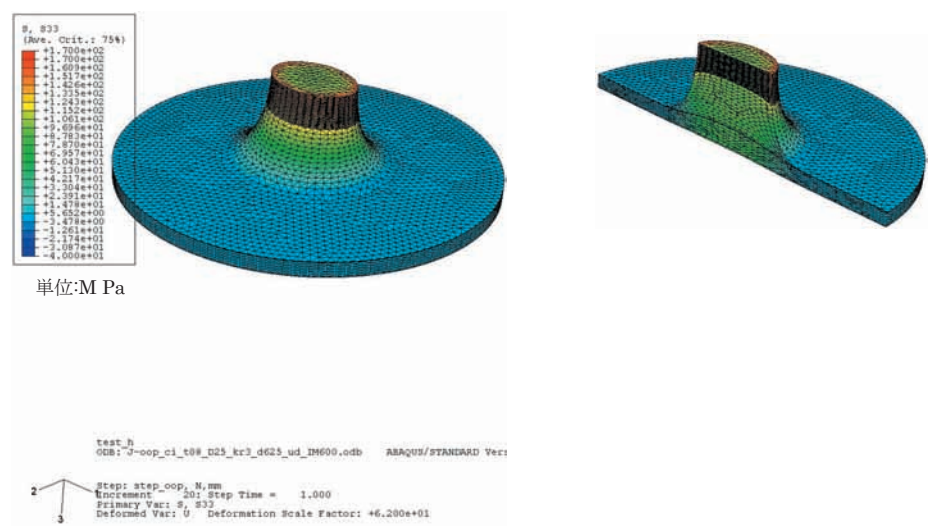


Fig.13c スプール形状供試体・t8mm・φ 6.25mm の面外方向応力分布

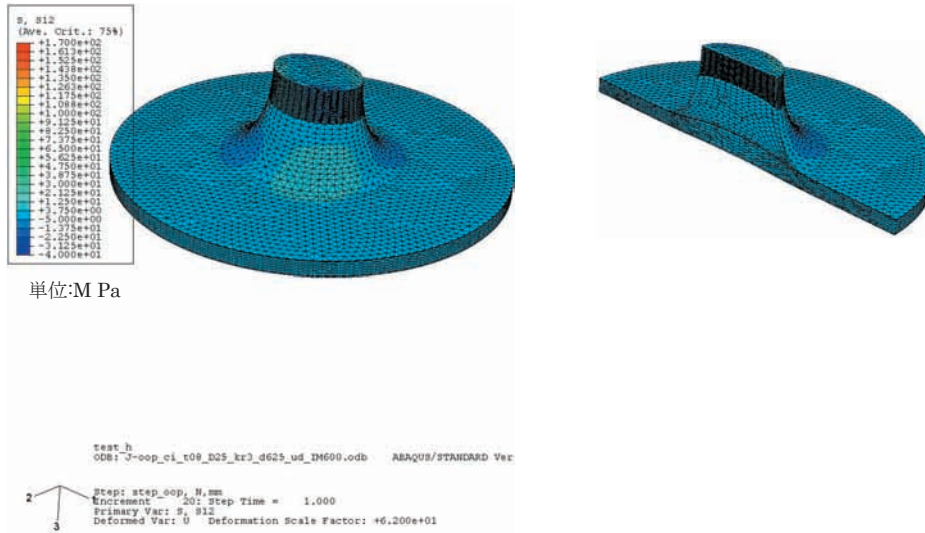


Fig.13d スプール形状供試体・t8mm・φ 6.25mm の面内せん断応力 (12 方向) 分布

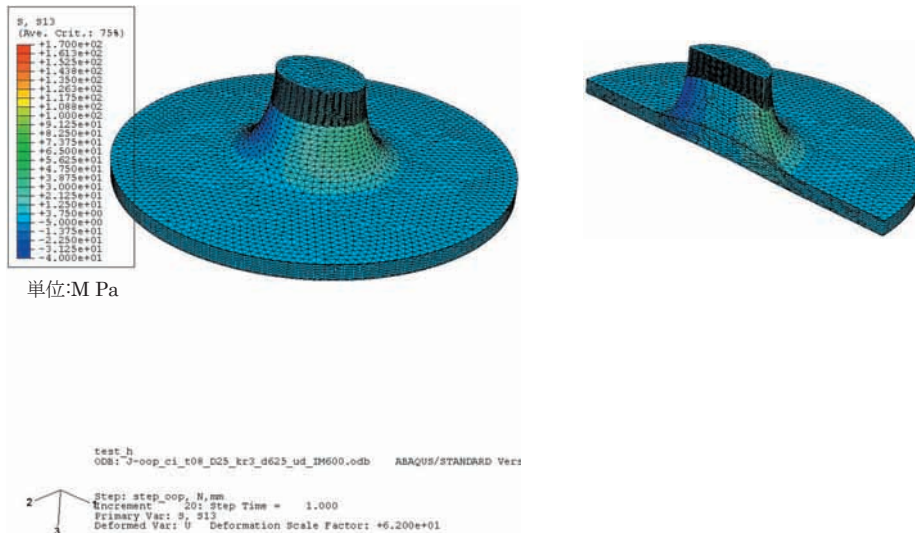


Fig.13e スプール形状供試体・t8mm・φ 6.25mm の層間せん断応力 (13 方向) 分布

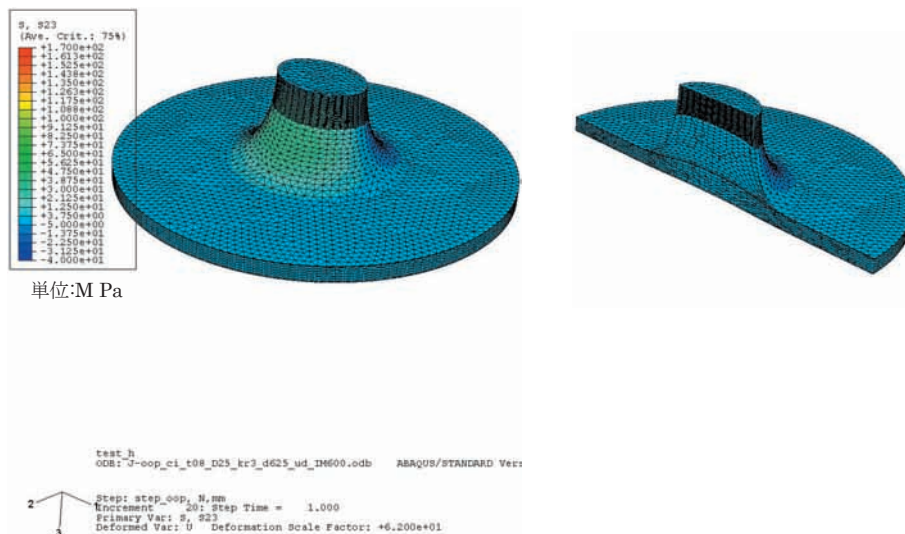


Fig.13f スプール形状供試体・t8mm・φ 6.25mm の層間せん断応力 (23 方向) 分布

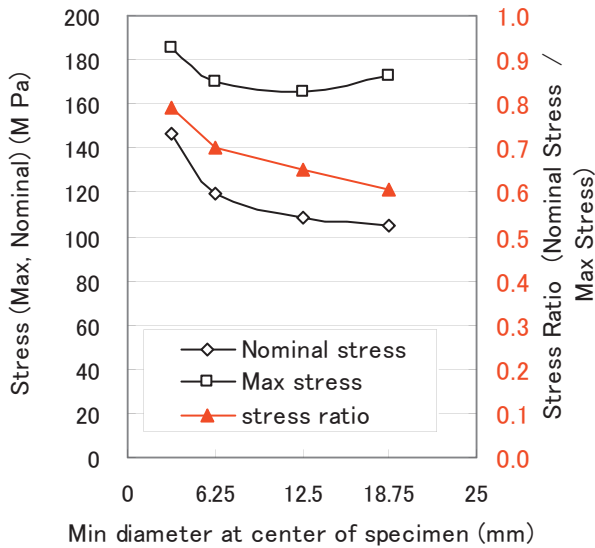


Fig.14 供試体中央部の最小直径と応力比・ノミナル応力・面外最大応力の関係

(Fig.7c) の面外応力分布図の比較から、スプール形状供試体の最大面外応力は円柱形状のような特定の位置で発生しないことが推定された。

・ Fig.14 から最小断面直径が減少すると応力比が 1 に近づくこと（最小断面の面外応力分布に偏りが少なくなる）が解析結果から推定された。

4. 試験

4.1 供試体材料

供試体は IM600/#133 の一方向プリプレグを用いて成形した。(プリプレグ CF 目付 145gr/m²) 板状の供試体母板を成形後、機械加工を行い供試体形状に加工した。また加工後に治具と供試体を接着剤 AF163 で接着した。

4.2 円柱形状供試体の試験

Fig.16 t8mm 直径 25mm 供試体の破断面

供試体の寸法は直径 25mm × 板厚 t8mm とした。供試体を接着剤 AF163-2k (3M 社製) を用いて試験治具に接着した。本報告では接着工程は以下の手順で実施した。

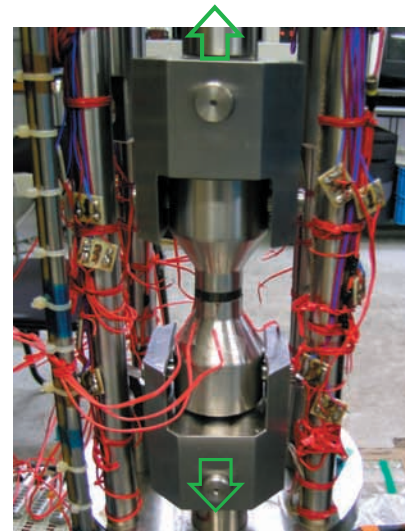


Fig.15 試験状況

1) 治具と供試体の接着面にブラスト処理を施した。研削材は白色アルミナの粒度 #120 (粒度範囲 90 ~ 125 μm, モース硬度約 9.0) を使用した。

2) ブラスト処理した接着面をエタノールで洗浄し微粉を除去した。

3) 接着面間にフィルム接着材をはさみ、一定圧力を与えた状態で、一定温度環境 (120℃) に保持し、接着処理を完了した。

試験の状況を Fig.15 に示す。二回の試験結果は破断応力は 36.0M Pa, 32.0M Pa, 平均 34.0M Pa であった。破断状況を Fig.16 に示す。供試体について試験を実施したが、両方とも接着面の剥離を含み、瞬時に破壊した。(図中ピンク色が接着材である) 接着面剥離及び接着層近傍での破壊を示したことはこの方法の本質的な欠点であり、今後はより高強度の接着材を探すなどこの方法での試験の可能性を更に追求してゆく予定である。

供試体 (t8mm 供試体 -#2) の側面にゲージ長 2mm の歪ゲージを接着し、試験負荷中の歪を計測した。歪ゲージ位置は板厚方向に供試体中央部、側面の角度方向は 45° ずつ 8 点の歪を測定した。応力 - 歪線図を Fig.17 に示す。また、ノミナル応力 5M Pa 毎の歪量を Fig.18 に

Table 3 各応力の最大応力値とその比

最小断面直径	CFRP 最大応力						最大応力の比 (S _{xx} /S ₃₃)				
	S ₁₁	S ₂₂	S ₃₃	S ₁₂	S ₁₃	S ₂₃	S ₁₁ /S ₃₃	S ₂₂ /S ₃₃	S ₁₂ /S ₃₃	S ₁₃ /S ₃₃	S ₂₃ /S ₃₃
mm	M Pa						%				
3.125	26.2	34.4	185.5	10.3	39.6	42.1	14	19	6	21	23
6.25	33.8	43.1	170.0	11.8	36.6	39.2	20	25	7	22	23
12.5	37.6	51.7	165.8	14.5	36.9	42.3	23	31	9	22	26
18.75	41.4	62.9	173.1	16.4	37.4	41.7	24	36	9	22	24



Fig.16 t8mm 直径 25mm 供試体の破断面

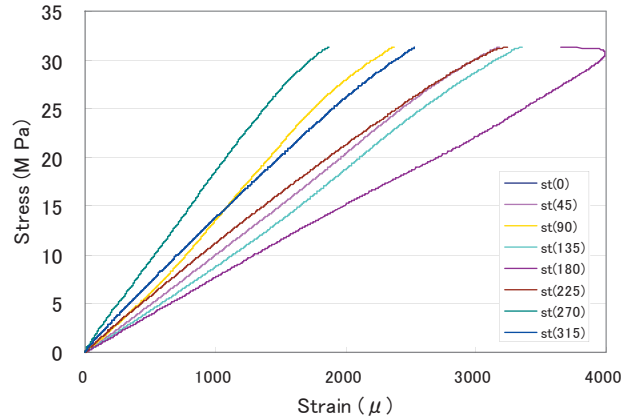


Fig.17 t8mm 直径 25mm 円柱供試体の応力 - 歪線図

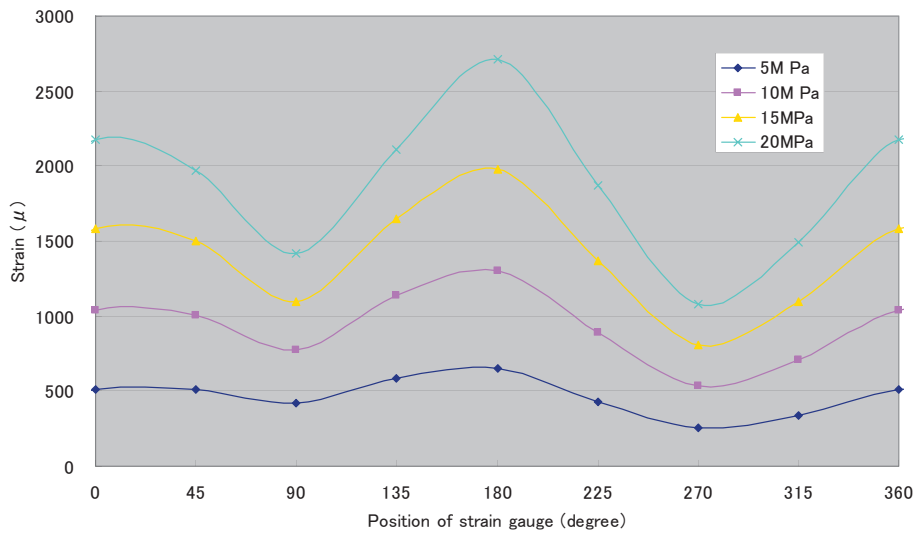


Fig.18 t8mm 直径 25mm 円柱供試体の角度位置と歪量

Table 4 円柱供試体 (t8mm・直径 25mm) の各計測位置の歪み量とノミナル弾性率

計測位置 (°)	0	45	90	135	180	225	270	315
ノミナル応力 5 M Pa の歪量 (μ)	512	513	417	583	654	430	254	341
ノミナル応力 10 M Pa の歪量 (μ)	1039	1006	778	1139	1304	890	535	712
ノミナル弾性率 (G Pa)	9.489	10.14	13.8	8.999	7.692	10.9	17.8	13.5
ノミナル弾性率の 供試体対称を考慮した平均 値 (G Pa) *1	8.591	10.87	15.8					
解析で計算された ノミナル弾性率 (G Pa)	9.22	10.98	14.3					

*1) 供試体対象を考慮した平均値とは、位置関係が同じノミナル弾性率の平均値
 0° 弾性率：0° と 180° の弾性率平均
 45° 弾性率：45° ,135° ,225° ,315° の弾性率平均
 90° 弾性率：90° ,270° の弾性率平均

示す。(0° と 360° の歪量は同じである) また, Fig.18 の 5M Pa 時と 10M Pa の各歪み量から計算した各位置のノミナル弾性率を Table4 に示す。

歪発生に偏りが見受けられるものの、計測位置と歪

み量の大小の傾向は解析結果と同様のものが確認された。また解析でもとめた解析モデル t8mm のノミナル弾性率 (Fig.9) と、試験で得たノミナル弾性率を比較したところ、おおむね傾向が一致した。なお、同じ測定位



Fig.19 t8mm 最小断面部直径 18.75mm 供試体の試験後状況

置であってもゲージ長が異なる場合は測定される歪みが異なると考えられることからノミナル弾性率が変わるため、注意が必要である。

4.3 スプール形状供試体の試験

解析を実施した4種類の形状のうち、最小断面部直径が6.25mm / 12.5mm / 18.75mmのスプール形状供試体を製作し、試験を行った。試験後の状況をFig.19に示す。面外強度のみを測定する目的を考慮すると、①CFRP部分での破断、②多軸応力状態より1軸応力状態に近づくこと、③同じ1軸応力状態でも応力分布に偏りが無い(解析での応力比が1に近づく)こと、の条件を満足する試験が理想的と考えられる。またスプール形状供試体の試験結果から得られる主な情報は①破断位置、②破断荷重(ノミナル強度)、③最小断面部の直径を変更したときのノミナル強度の変化である。これらの情報を中心に結果を整理する。

図示のように供試体は全て中心部のくびれ部分で破断した。

試験結果をTable5に示す。破断荷重を、最小断面部の直径で除した値をノミナル強度とした。また板厚中心部分の最小断面部の直径とノミナル強度の関係をFig.20に示す。最小断面部の直径が減少するにつれ、ノミナル強度は増加した。

供試体中央部で破断したことは、解析からも予測された

Table 5 スプール形状供試体の破断応力

	中心直径 ϕ (mm)	6.25	12.5	18.75
ノミナル破断応力 (M Pa)	No.1	53.5	50.5	45.6
	No.2	50.8	49.9	41.8
	No.3	49.9	44.2	41.5
	実験値 (平均値)	51.4	48.2	43.0

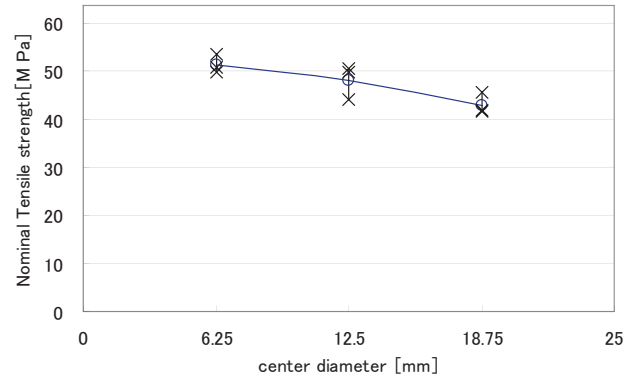


Fig.20 供試体中央部の最小直径と試験結果

通りであり、供試体材料の面外引張特性(強度)評価としてはスプール供試体がより適していると考えられる。また最小断面部直径の減少とノミナル強度の増加についても、解析で推定された傾向と一致しており、応力集中が緩和されていること(応力比が1に近づいていること)が示唆された。

円柱形状供試体の試験結果と比較した場合、破断位置からスプール形状供試体の試験は実施の安定性があることが確認できた。また同じ8mm板厚の供試体という観点から破断強度を比較すると、円柱供試体のノミナル強度は34.0M Paであり、スプール形状供試体のノミナル強度よりも大幅に低い値を示している。これは解析で予測された多軸応力状態により、低いノミナル応力で供試体が破断に至ったことによる可能性が考えられる。

5. 結論(供試体形状の違いと解析・試験結果の比較)

- ・円柱形状供試体では、板厚を薄くすることで応力比を1に近づけることができた。一方、全ての応力状態を考慮した場合、板厚を薄くすると多軸応力状態が甚だしくなってしまうため、薄い円柱形状供試体試験にもさらなる検討が必要であることが分かった。
- ・薄い板厚の円柱形状供試体では応力比が大きく変化しており、この変化を利用して面外強度を外挿するといった方法での層間引張強度評価の可能性が示唆された。
- ・円柱形状供試体では接着面近傍で応力集中が解析により予測され、試験でも接着面を含む破壊が起こっており、高強度接着剤の探索などの課題が残された。
- ・円柱形状供試体では多軸応力状態が示唆されたが、逆に試験データとしては安全側の数値を示すこともスプール形状供試体の試験結果との比較から確認された。
- ・円柱形状供試体の負荷時における歪み発生は解析結果と同様の傾向を示し、 0° 方向の歪み量が大きくなった。
- ・スプール形状供試体と円柱形状供試体では、破断時の

応力集中が異なることが解析により予測され、試験においてもそれぞれ応力集中を示した位置での破断が確認された。

- ・円柱形状とスプール形状供試体の試験を比較した場合、スプール形状の試験がより1軸応力状態に近い状態で面外強度が測定されているものと考えられる。
- ・更にスプール形状供試体で比較した場合、最小断面部の直径減少により面外方向の1軸応力状態の割合が増加すること、応力比が1に近づくこと、の2点が解析により予測され、試験結果の強度からも同様の傾向を得た。

6. 今後の課題

今後の課題として、下記があげられる。

- ・本報告で提案・実施した試験データの追加
- ・高強度接着材の探索（円柱形状供試体では接着面で破壊が起こっているため）
- ・供試体材料を変更した場合の感度に関する調査
- ・円柱形状とスプール形状の試験結果の関連性についてのより詳細な調査・考察（破損則適用検討）
- ・スプール形状を変化させた場合の調査（異なる板厚・本報告範囲外の最小断面部の直径の場合）
- ・最小断面部の直径を連続させた形状（ドッグボーン形状）の挙動の調査（解析・試験）
- ・積層構成を変更した場合（擬似等方積層材・クロスプライ積層材・3次元複合材）の挙動の調査（解析・試験）
- ・断面形状を変更した場合の解析・試験
- ・GFRP材料など面内特性値の割合が本報告と大きく異なる材料の試験方法の検討
- ・薄い板厚の供試体の試験方法に関する検討

参考文献

- 1) MIL-HDBK-17, vol.1.6.8.3.2, pp.6-97-6-102
- 2) American Society for Testing and Materials, ASTM C 297, Tensile Strength of Flat Sandwich Constructions,
- 3) 武田, 高坂, 高分子基複合材の強度試験法 - V 層間強度試験法, 日本複合材料学会誌, 24, 1998, pp.163-168
- 4) Tarnopol' skii, Y., M. & Kincis, T., Static Test Methods for Composites, 1984, pp.74-77, Van Nostrand Reinhold Co., Ltd., New York
- 5) Jackson, W., C. & Martin, R., H., Composite Materials, Testing and Design (11th Vol.), ASTM1206 (1993), pp.333-354.
- 6) Ifju, P., G., Masters, J., E. & Jackson, W., C., The Use of Moire Interferometry as An Aid to Standard Test-Method Development for Textile Composite Materials, Composites Science and Technology, 53, 1995, pp.155-163
- 7) American Society for Testing and Materials, ASTM D 6415-99, Standard Test Method for Measurein the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite
- 8) Cui, W., Liu, T., Len, J. & Ruo, R., Interlaminar tensile strength (ILTS) measurement of woven glass/polyester laminates using four-point curved beam specimen, Science Direct Composites Part A, 27A, 1996, pp.1097-1105
- 9) Hiel, C., C., Sumich, M. & Chappell, D.P., A Curved Beam Test Specimen for Determining the Interlaminar Tensile Strength of a Laminater Composite, J. Composite Materials, vol.25, 1991, pp.854-868
- 10) Harris, A., Orringer, O. : Investigation of Angle-Ply Delamination Specimen For Interlaminar Strength Test, J.Composite materials, vol.12(July 1978), p.285
- 11) Mao, T.H. & Owen, M.J., Through-the-thickness tensile strength of fibre-reinforced plastics, Comoposite Materials Testing and Design (Sixth Conf.), ASTM STP 787, American Society for Testing and Materials, 1982, pp.5-18
- 12) 日本工業規格, JIS A 1163 コンクリートの割裂引張強度試験方法, 1951
- 13) ASTM D30 Committee, WK10234 Test Method for Flatwise Tensile Strength and Through-Thickness Elastic Modulous of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Material, website (<http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK10234.htm?L+mystore+gsdl7814+1173806341>), 2006
- 14) Advanced Composites Database System: JAXA-ACDB; Ver.06-1, <http://www.jaxa-acdb.com/>

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-06-025

発行 平成 19年 3月 30日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 弘久写真工業(株)

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

