

研究論文

ボイドが CFRP 積層板強度に及ぼす影響の負荷方向による
差異についての微視的観点からの考察新玉 重貴^{*1}, 橋爪 良輔^{*2}, 古賀 貢史^{*2}, 西川 雅章^{*3}, 北條 正樹^{*4}

(2016 年 9 月 5 日受付)

Microscopic Analysis of Effect of Voids on the Strength of
CFRP Laminates in Relation to the Loading DirectionShigeki ARATAMA,^{*1} Ryosuke HASHIZUME,^{*2} Koshi KOGA,^{*2}
Masaaki NISHIKAWA^{*3} and Masaki HOJO^{*4}

(Received September 5, 2016)

Abstract: This study investigates the effect of voids as manufacturing defects on the matrix-dominated strengths of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) by coupon level testing. Specimens were cut from CFRP laminates prepared with different void volume fractions, V_v , by intentionally changing the curing conditions during their fabrication. The transverse tensile strength and the inter-laminar shear strength were evaluated by transverse-tensile testing and short-beam shear testing, respectively, using unidirectional flat specimens. The inter-laminar tensile strength was evaluated by performing four-point bending tests using unidirectional L-shaped curved specimens. The test results showed that these strengths decreased with increase in V_v and the ratio of decrease in strength to the increase in V_v varied according to the loading direction. The X-ray computed micro-tomography of the samples taken from the laminates used for the strength tests revealed the microscopic features of the shapes and the distributions of the voids in the CFRP laminates. The effect of voids on the strengths of CFRP laminates considering the stress concentrations around the voids is discussed based on the microscopic features of the voids and the internal loading directions in the critical regions.

Key words: Carbon fiber reinforced plastic, Void, Matrix-dominated strength, X-ray computed tomography

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (carbon fiber reinforced plastics; CFRP) は, その名のとおり炭素繊維と合成高分子樹脂からなる材料であり, 繊維方向の引張強度や弾性率が繊維直交方向に対して非常に高いというように,

その力学的特性は強い異方性をもっている。このため, 典型的な熱硬化樹脂であるエポキシ樹脂を適用した CFRP の場合, プリプレグを所定の層構成で積層した後, オートクレーブを用いて高い温度と圧力をかけることで樹脂を硬化させ, 所望の材料特性をもつようにした積層板として使用されることが多い。このオートクレーブ成形において, 温度条件は主に樹脂の化学反応を制御し, 圧力条件は主に余剰の樹脂を押し出して層どうしを密着させるように作用する。これらの組み合わせの時間に沿ったサイクルは, ボイド含有を最小にすることを含めて信頼できる部品を継続的に製造できるよう, 材料系に合わせた硬化条件 (キュアサイクル) として設定される。ボイドの原因としては樹脂中に溶け込んだ水分¹⁾, 積層中やプリプレグ製造時の樹脂の含浸中に取り込まれた

^{*1} 川崎重工業株式会社航空宇宙カンパニー 基幹職 (509-8710 岐阜県各務原市川崎町 1)

Senior Staff Officer, Aerospace Company, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

^{*2~*4} 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻
Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University

^{*2} 修士課程 Graduate Student, ^{*3} 准教授 Associate Professor, ^{*4} 教授 Professor

空気などがあるが²⁾、ほとんどのボイドはオートクレープで高い圧力をかけることにより排出することができ、高い内部品質のCFRP積層板を製造することが可能である。

このような利点をもつオートクレープ成形であっても、不時の原因により十分な圧力をかけられないなど、硬化中の温度や圧力が所定の公差から外れた場合には、樹脂中にボイドが発生することがあり、圧縮強度、層間せん断強度といった樹脂支配型の強度が大きく低下する³⁾。CFRP積層板強度に及ぼすボイドの影響に関するこれまでの研究では、主にボイド体積含有率 V_v と各破壊モードにおける巨視的な強度特性との関係に焦点が当てられ、ボイドがCFRP積層板の弾性係数⁴⁾、繊維方向圧縮強度⁵⁾、繊維直交方向引張強度や圧縮強度^{6~8)}、曲げ強度^{7~9)}、層間せん断強度^{7,8,10)}などを低下させることが明らかにされ、ボイドによる強度特性低下への影響が V_v の増加に伴って大きくなることも示されている。

微視的な観点からは、近年複合材料分野でも利用が拡大しているX線マイクロCT (computed tomography; コンピュータ断層撮影法。以下、「X線CT」と記す)により直接的に観察したCFRP積層板内のボイドの三次元的な形状、寸法、分布状態などの特徴を踏まえて、ボイドと巨視的な観点での樹脂支配型の強度特性との関係が調べられている。硬化時の温度サイクル (キュアサイクル中の樹脂が低粘度になって余剰樹脂やボイドが押し出される温度での保持時間)の違いにより生成されるボイドについては、ボイドの体積含有率、形状や分布を踏まえて、ボイドと層間せん断強度との関係が評価されている⁴⁾。一方向材L字型曲がり梁試験片を用いた4点曲げ試験と一方向材平板試験片を用いたショートビーム試験からは、ボイドが層間引張強度や層間せん断強度に及ぼす影響が示されている¹¹⁾。これらの成果から、X線CTによる観察が、CFRP積層板内のボイドの微視的特徴を捉えるのに有用であることが理解される。一方で、前者の研究では層間せん断以外の負荷方向での強度特性との関連、後者の研究では前述のようなボイドによる強度の低下が V_v の増加に伴って大きくなる傾向との関連などについて、なお解明の余地がある。従って、CFRP積層板内におけるボイドの微視的な特徴を捉えた上で、ボイドの影響が現れやすい樹脂支配型の強度に関して、 V_v や負荷方向の違いに伴う強度特性の差異を評価することができれば、ボイドがCFRP積層板強度に及ぼす影響についての力学的理解に貢献できるものと考えられる。

本研究においては、意図的にボイドを発生させた

CFRP積層板から切り出した試験片を用いて樹脂支配型の強度へのボイドの影響を試験により評価した。具体的には、一方向材平板試験片を用いた繊維直交方向引張強度試験やショートビームせん断強度試験、並びに、一方向材L字型試験片を用いた4点曲げ試験を実施して、試験片中のボイド体積含有率 (以下、「 V_v 」と記す) による繊維直交方向引張強度、層間せん断強度および層間引張強度への影響を評価した。また、これらの試験片と同じ積層板からサンプルを切り出してX線CTによる観察を行い、CFRP積層板の成形時に生じるボイドの形状や分布に関する微視的特徴についての知見を得た。この結果に基づいて、負荷方向によって異なるボイド周辺の応力状態を推定し、ボイドが各強度に影響を及ぼす機構について検討した。なお、例えば航空機の型式証明においては材料の強度について十分な試験による統計値に基づくことと定められている。このため、本研究の成果はその要件を変えるものではなく、例えば、部材の設計において、ボイドがCFRP積層板の力学的特性に及ぼす不利な影響を避けたり、低減したりといった配慮を行うことによって、より安全性を高められるような寄与を期待するものである。

2. 実験方法

2.1 ボイドの影響を評価するための実験方法の検討

これまでの研究^{4,12)}において、CFRP積層板内に製造時欠陥として生じるボイドは、主に層間樹脂層に存在し、繊維方向に沿った細長い円柱状もしくは楕円球状であることが報告されている。これを踏まえて、本研究では、ボイドによる樹脂支配型の強度への影響について評価する観点から、面内・面外の引張強度 (繊維直交方向) および層間せん断強度についての試験を実施することとした。具体的には、積層板面内の繊維直交方向引張強度 (transverse tensile strength; TTS) については90度引張強度試験、層間せん断強度 (inter-laminar shear strength; ILSS) についてはショートビームせん断強度試験により評価した。また、層間引張強度 (inter-laminar tensile strength; ILTS) については、L字型試験片を用いた4点曲げ試験により評価した。

Fig. 1にはボイドを細長い楕円球状として模式的に表し、90度引張試験による積層面内の繊維直交方向引張応力、ショートビーム試験による層間せん断応力、L字型試験片の4点曲げ試験による積層面外方向の層間引張応力と、これに伴う応力集中が標定となる箇所を併せて示した。ボイドを二次元的な円孔や楕円孔あるいは三次元

的な球状や回転楕円体状の空隙としてみると、図中の A, B, C の位置において各応力に対する応力集中係数が最大になることが知られており、その典型的な値はポイドの形状や荷重形態によって 4.2 項にて後述する Table 3 のようになる。

このような状況を踏まえると、前述の試験で得られる異なる強度に対するポイドの影響は、負荷方向の違いや応力集中係数の違いによって異なる傾向を示すものと考えられる。このため、強度試験どうしの間でポイドに伴う強度低下の傾向を比較するとともに、X 線 CT を用いたポイドの形状や分布の観察結果と関連付けることとした。

2.2 材料および試験片用 CFRP 積層板の製作

本研究における各試験用の試験片には、炭素繊維/エポキシプリプレグ UTS50/#135（東邦テナックス，180℃ 硬化型，一方向材）を用いた。この材料の力学的特性を Table 1 に示す。

TTS および ILSS の試験には、 V_v ごとに 1 枚の積層板（約 330 mm×230 mm の平板）を製作して、両試験用の試験片を切り出した。L 字型試験片の 4 点曲げによる ILTS の試験には、 V_v ごとに L 字型の積層板 1 枚（湾曲部（R 部）の内側半径 6.4 mm）を製作して試験片を切り出した。

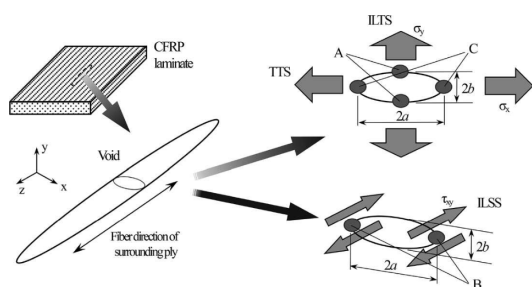


Fig. 1 Schematic relationship between void in CFRP laminate and locations of highest surrounding stress concentrations for various loading. TTS, transverse tensile strength; ILSS, inter-laminar shear strength; ILTS, inter-laminar tensile strength.

層構成は、TTS/ILSS の積層板には $[0_{24}]$ を、ILTS の積層板には $[0_{16}]$ をそれぞれ適用した。これらの公称板厚はそれぞれ 4.56 mm, 3.04 mm である。各積層板を製作する際には、硬化条件を意図的に変化させて、さまざまな V_v をもつ積層板を製作した。

各積層板について、超音波探傷によりポイドが巨視的スケールにおいて面内で一様に分布していることを確認した。ポイド体積含有率 V_v は、積層板のある断面における光学顕微鏡による観察画像を二値化することにより識別されたポイドの断面積合計の当該断面の全断面積に対する比率として定義した。ただし、積層板の製作の際は、ある V_v を目標として硬化条件を変化させるものの、結果として得られる積層板の V_v は超音波探傷で同等にみえていてもコンター表示内の幅をもつ。このため、各積層板について代表的な 2 断面（平板積層板では超音波探傷でみたポイド量が最大と最小の各断面、L 字型積層板では幅方向の中央付近と端部に近い各断面（R 部））における V_v の平均値をその積層板の V_v として表示することとした。 V_v の計測結果は Table 2 に示すとおりで、TTS/ILSS 用の 7 つの平板積層板は $V_v=0, 1.0, 2.1, 2.7, 3.1, 4.6, 7.1\%$ 、ILTS 用の 7 つの L 字型積層板は $V_v=0, 0.1, 1.1, 2.0, 4.3, 5.4, 6.0\%$ （R 部の V_v ）であった。ここで各積層板の V_v は Table 2 に示すような幅があることから、特に平板積層板から各試験用の試験片を切り出す際には、超音波探傷で同等とみえる部分から切り出すように配慮した。ただし、 $V_v=2.1, 2.7, 3.1\%$ のものについては V_v の範囲が重なっており、試験片の切り出し位置によっては強度試験の結果に影響する可能性があるため、試験結果の評価においてはこの点を念頭に置くこととする。なお、L 字型積層板の R 部中央付近の V_v を Leg 部や R 部と Leg 部との接続部と比較したところ、 $V_v=0.1\%$ および 1.1% の積層板では R 部中央付近の V_v が低かったものの、これら以外の積層板においては、R 部の中央付近と Leg 部や Leg 部との接続部の V_v は同等であった。

Table 1 Mechanical properties of UTS50/#135 (UT500UP²²⁾).

Loading	Environment	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Failure strain (%)
Tension in 0 deg.	DRY, 23°C	2,410	131	0.325	1.67
Tension in 90 deg.	DRY, 23°C	60.3	8.61	0.022	0.75
ILSS (in 0 deg.)	DRY, 23°C	105	—	—	—

Table 2 Void volume fractions measured for respective CFRP laminates prepared in this study.
<Flat laminates>

Laminate No.	Measured void volume fractions V_v (%)		
	Location A*	Location B*	Average
F-1	0.00	0.00	0.0
F-2	0.59	1.36	1.0
F-3	1.57	2.67	2.1
F-4	2.35	3.03	2.7
F-5	2.80	3.31	3.1
F-6	4.43	4.75	4.6
F-7	6.72	7.43	7.1

* A and B are the locations where in-plane V_v levels from ultrasonic inspection were seen as the minimum and maximum levels, respectively, in each laminate.

<L-shaped curved laminates>

Laminate No.	Measured void volume fractions V_v (%)		
	Center**	Edge**	Average
L-1	0.00	0.00	0.0
L-2	0.15	0.10	0.1
L-3	1.08	1.04	1.1
L-4	1.97	1.96	2.0
L-5	4.48	4.14	4.3
L-6	5.55	5.35	5.4
L-7	5.89	6.01	6.0

** Center and edge mean the locations of cross-sections for V_v measurements were width-wise center and edge, respectively, of the L-shaped curved laminates.

2.3 試験片および試験方法

(1) TTS

Fig. 2 に TTS の試験片概要を示す。上記の 7 つの V_v の各積層板から、Fig. 2 に示す寸法の試験片を 4 体ずつ切り出して使用した。試験は ASTM D3039¹³⁾ に従って実施し、クロスヘッド速度 1 mm/min で荷重を負荷した。試験機からの負荷荷重と変位の出力および試験片の中央両面に貼付した二軸ひずみゲージからの出力を記録した。

(2) ILSS

ILSS は、ASTM D2344¹⁴⁾ に準拠したショートビーム強度試験により評価した。Fig. 3 に試験片と試験形態の概要を示す。試験片は TTS と同じ 7 つの積層板からそれぞれ 4 体を切り出した。試験片の長さは、試験規格に従って各積層板の板厚実測値 t に基づいた支持ピン間隔

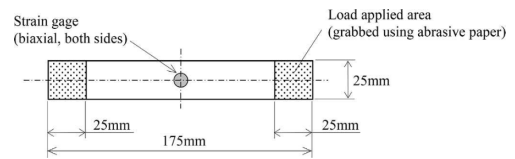


Fig. 2 Outline of specimen for transverse tensile strength (TTS) test.

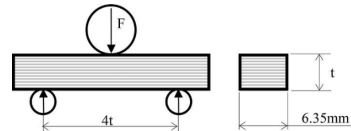


Fig. 3 Outline of specimen and test configuration for short-beam strength test for inter-laminar shear strength (ILSS).

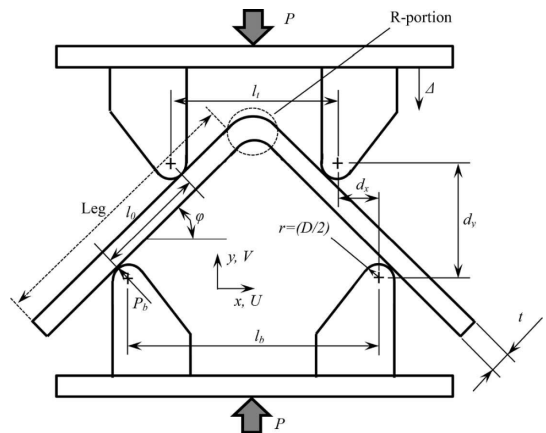


Fig. 4 Outline of curved beam four-point bending test for inter-laminar tensile strength (ILTS). $l_t = 50$ mm, $l_b = 100$ mm, $r = (D/2) = 5$ mm, $t = 3.04$ mm (nominal).

4t に、支持ピン外側へのオーバーハング分を加えることにより決定した。試験片の幅は 6.35 mm、クロスヘッド速度は 1.27 mm/min とし、試験機からの負荷荷重の出力を記録した。

(3) ILTS

ILTS は、一方向材の L 字型試験片を用いた 4 点曲げ試験を、ASTM D6415¹⁵⁾ に準拠して実施することにより評価した。Fig. 4 に試験片と試験形態の概要を示す。試験機からの負荷荷重 P は 4 点の圧子から試験片 Leg 部への垂直の負荷荷重 P_b となり、試験片の上側 2 点の圧子間において純粋曲げ荷重となる。この時、一方向材試験片では R 部において層間引張強度が評価できる。試

験片の寸法は、試験規格に従って R 部の内側半径 $r_1=6.4$ mm, 幅 $w=25$ mm, Leg 部長さ 50 mm とし, L 字型積層板から 3 体ずつ切り出して使用した。試験治具の支持ピン・負荷ピンについては、試験規格に示されるローラベアリングは装備していないが、ピンに替えて削り出しの圧子とすることで剛性を確保するとともに、試験片と接する部分について、表面仕上げへの配慮と PTFE テープ貼付により、目視ではあるが試験中に試験片と圧子との間での引っかかりが生じないことを確認し、摩擦による試験評価への影響の低減を図った。圧子の半径 r は試験規格における支持ピン・負荷ピン直径 $D=10$ mm 相当の 5 mm とした。

なお、予備試験により、上側の 2 つの負荷圧子のスパン l_t を試験規格通りの 75 mm とした場合には、標定である R 部での破壊に至る前に Leg 部の圧子位置において曲げ破壊することが判明した。このため、上側の負荷圧子のスパン l_t を 50 mm に変更し、R 部が標定となって破壊が生じるようにした。試験時には左右それぞれの Leg 部が上下の圧子間で直線状であることを確認し、標定部に作用する曲げモーメントを圧子の相対位置に基づいて計算する後述の式(1)等の適用について問題ないものと判断した。

クロスヘッド速度は 1 mm/min とし、試験機からの負荷荷重 P とクロスヘッド変位 Δ の出力を記録した。ILTS については上記のデータと Fig. 4 の各パラメータから次の一連の式を用いて計算される。

上側の 2 つの圧子間に生じる純粋曲げモーメント M は、式(1)による¹⁵⁾。上述のとおり、この試験における標定部である R 部には、この M のみが作用する。

$$M = P b l_0 = \left(\frac{P}{2 \cos \varphi} \right) \left(\frac{d_x}{\cos \varphi} + (D + t) \tan \varphi \right) \quad (1)$$

層間引張応力 σ_r は式(1)の M を用いて式(2)により計算でき¹⁶⁾、破壊時点における σ_r がこの試験で評価する ILTS である。

$$\sigma_r = - \frac{M}{w r_0^2 g} \left[1 - \frac{1 - \rho^{\kappa+1}}{1 - \rho^{2\kappa}} \left(\frac{r_m}{r_0} \right)^{\kappa-1} - \frac{1 - \rho^{\kappa-1}}{1 - \rho^{2\kappa}} \rho^{\kappa+1} \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^{\kappa+1} \right] \quad (2)$$

g , κ , ρ , r_m は式(3)~(6)に示すとおりであり、 E_θ , E_r は R 部の θ 方向, r 方向の弾性係数, r_1 , r_0 は R 部の内側表面, 外側表面の半径である。

$$g = \frac{1 - \rho^2}{2} - \frac{\kappa}{\kappa + 1} \frac{(1 - \rho^{\kappa+1})^2}{1 - \rho^{2\kappa}} + \frac{\kappa \rho^2}{\kappa - 1} \frac{(1 - \rho^{\kappa-1})^2}{1 - \rho^{2\kappa}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{r_1}{r_0} \quad (4)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \quad (5)$$

$$r_m = \left[\frac{(1 - \rho^{\kappa-1})(\kappa + 1)(\rho r_0)^{\kappa+1}}{(1 - \rho^{\kappa+1})(\kappa - 1)r_0^{-(\kappa-1)}} \right]^{\frac{1}{2\kappa}} \quad (6)$$

2.4 積層板の X 線 CT による観察

CFRP 積層板中のボイドの形状や分布状態を X 線 CT により観察した。TTS/ILSS の積層板からは幅 3 mm, ILSS 用と同じ長さの試験片を、ILTS の積層板からは R 部のみを切り出した試験片(長さ 25 mm (=ILTS 用試験片の幅))をそれぞれ準備した。

X 線画像は高解像度マイクロ CT スキャナ (SkyScan 1172, Bruker) により、管電圧 100 kV, 管電流 41 μ A で撮影した。スキャン画像 (1 枚の X 線投影画像) のサイズは、TTS/ILSS の試験片については 2000 $\times$ 1336 ピクセル, ILTS の試験片については 4000 $\times$ 2672 ピクセルとし、解像度は各試験片について可能な限り細かく 3.12 ~ 5.15 μ m/pixel に設定して観察した。スキャン間の回転角ステップは 0.2 ~ 0.25 度, 180 度もしくは 360 度のスキャン画像を取得した。

円錐形ビームによる X 線投影画像からの断層画像の再構成には、Feldkamp アルゴリズムに基づく画像再構成プログラム (SkyScan NRecon package, Bruker) を用いた。再構成の際の閾値の濃淡レベルはボイドができるだけ明確に識別できるように調整した。再構成された円柱状の画像から観察対象領域を切り出し、Viewer ソフト (DATAVIEWER, Bruker) を用いて評価した。また、ボイドの形状や分布に関する特徴は VGStudio MAX (Volume Graphics 社) を用いて抽出した。

3. 試験結果

3.1 X 線 CT による観察結果

Fig. 5 に、平板積層板および L 字型積層板の R 部についての X 線 CT 画像の典型例を示す。同図の 3 次元透視図から分かるように、ボイドは平板中でも L 字型の R 部中でも繊維方向に長い円柱状や楕円球状である。繊維に沿った 0 度方向の断面でみると細長い形状に、繊維方向に対して 90 度方向の断面でみると円形もしくは楕円形

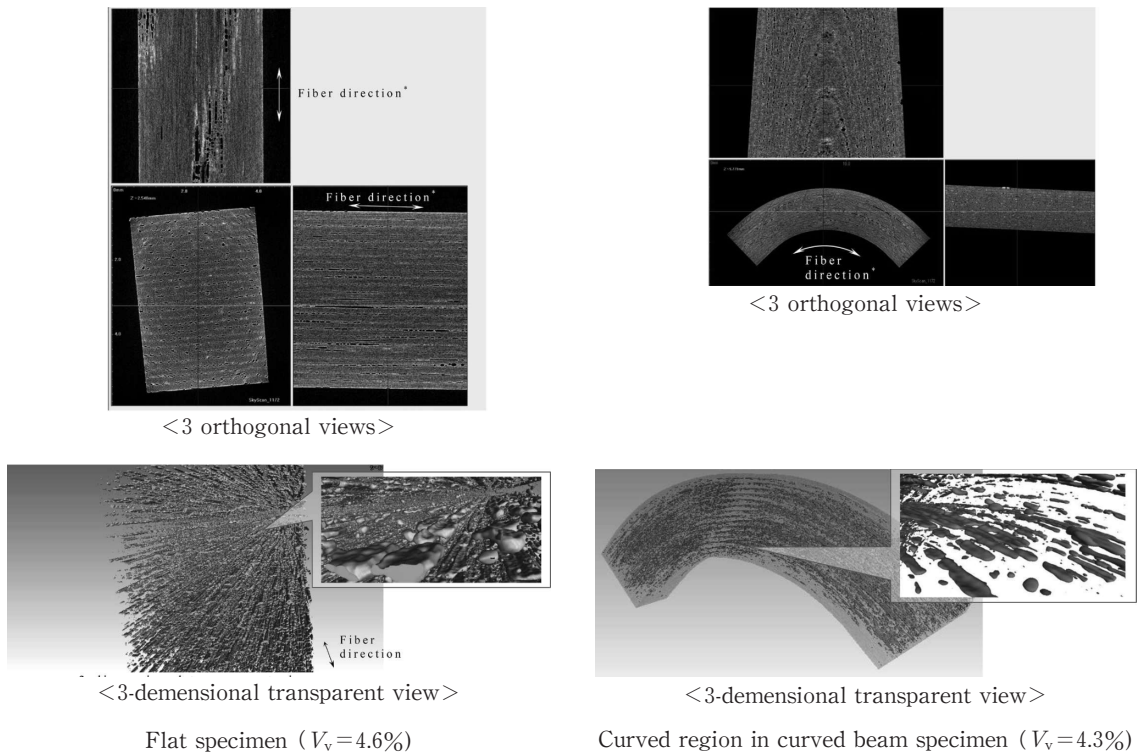
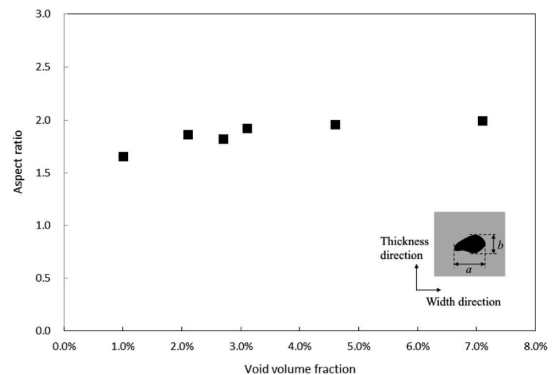


Fig. 5 Typical X-ray CT images of CFRP laminates including voids.

(円の集合体)にみえている。また、断面図からはボイドが基本的には層間樹脂層の中に分布していることが分かる。このようなボイドの形状や分布の様子は、これまでの研究における他のプリプレグを用いた CFRP 積層板でも同様に観察されており^{4,12)}、少なくともプリプレグを適用した CFRP 積層板において一般的なものであると考えることができる。従って、これまでの研究¹²⁾で示されているように、今回の平板積層板や L 字型積層板においても、ボイドは積層時に層間に取り込まれた空気や樹脂中の水分や揮発成分が原因となって細かい初期のボイドが生じ、硬化過程中的樹脂が流動する状態の時にそれらが結合するなどして、上記のような形状や分布になったものと考えられる。

上記の X 線 CT の 3 次元画像から、各平板積層板中の個々のボイドの寸法を VGStudio MAX の解析機能を用いて計測した。ボイド寸法は、試験片 (積層板) の幅方向、板厚方向、繊維方向をそれぞれ X 軸、Y 軸、Z 軸とした時に、ボイドに外接し、かつ、各座標軸に平行な辺をもつ直方体を考え、その直方体の各軸に平行な辺の長さとして順に a , b , c のように定義した。代表例とし

Fig. 6 Means of aspect ratio (a/b) of voids in CFRP laminates.

て、アスペクト比 a/b の V_v ごとの平均値 (X 線 CT での観察範囲での標本平均) を Fig. 6 に示す。同図において、 V_v の増加に伴ってアスペクト比 a/b が若干大きくなる傾向がみられる点については、ボイドが多い場合に板厚方向の寸法 b はあまり変わらないのに対し、幅方向の寸法 a の大きいボイドが現れるようになったものと理解される。それ以外は V_v による特段の傾向はみられ

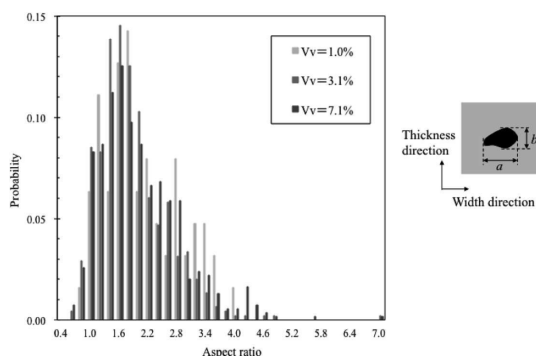


Fig. 7 Probabilistic distributions of aspect ratio (a/b) of voids in CFRP laminates.

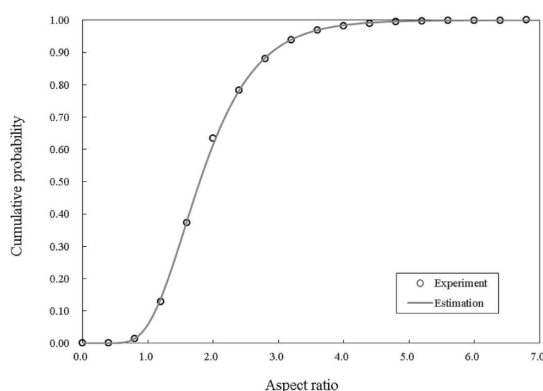


Fig. 8 Cumulative probability of aspect ratios (a/b) from X-ray CT observation of voids in CFRP laminates ($V_v = 3.1\%$) and estimated cumulative distribution function assuming lognormal distribution.

なかった。また、Fig. 7 には、代表的な3種類の V_v について、繊維方向に直交する断面におけるポイド形状を楕円形とみた場合の長軸/短軸のアスペクト比 a/b の確率分布を示す。結果として、アスペクト比の確率分布についても V_v による特段の傾向はみられなかった。ポイドのアスペクト比の確率分布については対数正規分布となることが報告されている¹⁷⁾ ことから、代表例として $V_v = 3.1\%$ の計測結果について、対数正規分布とみて近似的に計算される累積分布関数と Fig. 7 の確率分布からの累積相対度数分布を比較したものを Fig. 8 に示す。同図よりポイドのアスペクト比の確率分布は先行研究の結果と近い傾向であったとみることができる。

3.2 強度試験結果

Fig. 9～Fig. 11 に TTS 試験時の応力-ひずみ線図、ILSS および ILTS の試験時の荷重-変位線図の代表例

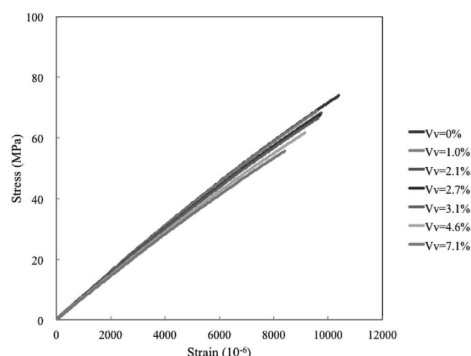


Fig. 9 Typical stress-strain curve of TTS test.

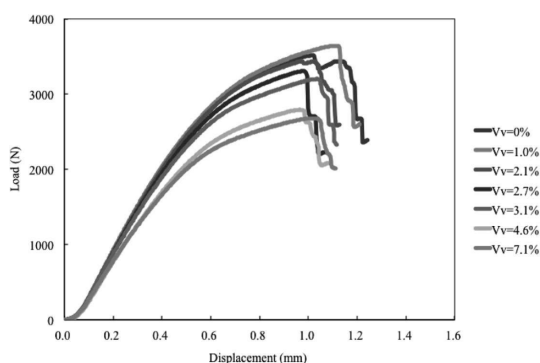


Fig. 10 Typical load-displacement curve of ILSS test.

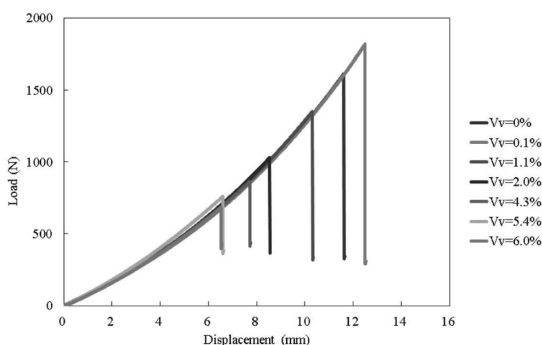


Fig. 11 Typical load-displacement curve of ILTS test.

を示す。いずれも健全材 ($V_v = 0\%$) と比較して同様の曲線形状を示す一方で、破断点には V_v による差異がみられた。試験片は V_v にかかわらず、基本的に、それぞれの試験における適切な標定位置・破壊モードで破壊したことが確認できた。TTS 試験の一部(全 V_v 7 種 28 体中の V_v 5 種 5 体)では試験片把持部の端もしくはその近傍で破壊したものがみられたが、それらの試験結果の破壊

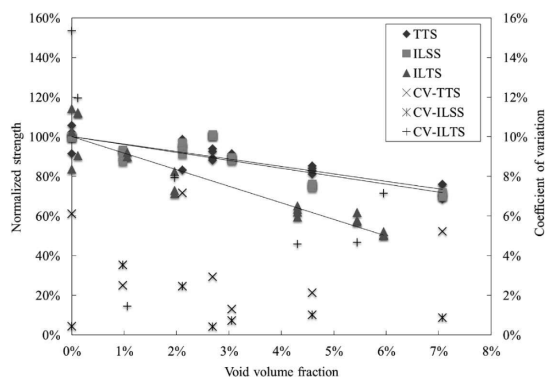


Fig. 12 V_v vs TTS, ILSS and ILTS results with CV of respective strengths. Each test result was normalized using the average of respective results for $V_v=0\%$.

荷重や応力は、必ずしも各 V_v における最小値や特異値ではなく、 V_v の多寡などによる傾向もみられなかった。従って、硬化条件を変化させたことにより樹脂特性が変化する可能性はあるものの、試験片の塑性変形のしやすさや破壊モードを（一見して分かるほど）大きく変えてはいないとみられることから、以降の評価においては、主にボイドの形状等の物理的な観察結果に基づいて、それらの強度への影響を評価することとする。

Fig. 12 に、 V_v に対する TTS, ILSS, ILTS の各強度の試験結果を変動係数 (coefficient of variations; CV) とともに示す。同図では、 V_v に伴う強度低下の様子が各強度どうしで相互に比較できるように、各強度の $V_v=0\%$ での試験結果の平均値を基準値として無次元化した値を示してある。ここで、 $V_v=0\%$ の時の TTS や ILTS の CV が大きめの値となっている点について、試験方法は他の V_v の場合と全く同じであり、結果として得られた強度もこの材料として妥当なレベルであることから、試験片の把持状態などの偶発的な要因によるものと考え、試験片の品質や試験方法は問題ないものと考え。各強度とも V_v が大きいほど強度低下が大きい傾向にあったことから、各強度についての近似直線 ($V_v=0\%$ で強度 100% を通る) を示した。同図から分かるように、TTS および ILSS は V_v の増加に伴ってほぼ同様の傾向で減少し、両者とも $V_v=7.1\%$ では $V_v=0\%$ の場合に対して 30% 近く減少した。一方、ILTS の減少傾向は TTS や ILSS より大きく、 $V_v=6.0\%$ では $V_v=0\%$ の場合に対して 50% 程度の減少であった。TTS や ILSS について $V_v=6.0\%$ の時の減少率を試験結果から内挿すると 25% 程度であることから、ILTS ではその 2 倍程度の低下率

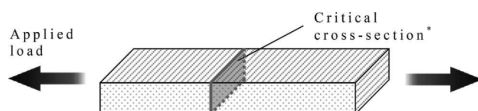


Fig. 13 Schematic of load transfer configuration and critical cross-section in TTS specimen. *Weakest cross-section due to void contents and/or distributions.

であった。

4. 考 察

3.1 項のボイドの形状や分布についての観察結果を踏まえ、3.2 項に示した V_v に伴う CFRP 積層板の強度低下について各強度試験における荷重伝達形態の観点から検討する。

4.1 荷重形態による標定領域に関する考察

(1) TTS

TTS は Fig. 13 に示すような荷重伝達の形態から、どの断面でも同じ引張荷重が作用するため、試験片の荷重方向に垂直な断面のうちの最弱断面で破断すると考えられる。強度試験後の試験片では、破断面とボイド位置の関係が明確には観察できなかったが、ボイドありの場合、ボイド周りにひずみ集中が生じることで強度低下の要因となる¹⁸⁾。3.1 項において、ボイドは主に層間樹脂層の中に分布するものの、板厚方向、幅方向、繊維方向のいずれの方向も特定の箇所に集中せず、全体的にばらつく状況が確認されており、ボイドがランダムに分布した結果、局所的なボイドの密度や配置等が強度に不利な状態となった断面が最弱断面になると考えられる。一方、ボイドなしの場合は樹脂リッチ領域などがひずみ集中を生じる要因になるため¹⁸⁾、局所的な樹脂リッチ領域の密度や配置等が強度に不利な状態となった断面が最弱断面になると考えられる。

(2) ILSS

ILSS では 3 点曲げ試験形態の支点と負荷点の間の材料領域全体でせん断荷重を受け、せん断応力はこの領域の中で板厚方向に放物線状に分布して板厚方向中心付近で最大になるため、Fig. 14 のハッチ部が強度上の標定領域となる。3.1 項の観察結果から、ボイドの有無にかかわらず、試験片の層どうしの間にある薄い層間樹脂層が存在する。ボイドありの試験片ではその樹脂リッチ領域にボイドが入っているようにみられる。このため、ILSS については板厚方向中心付近の層間樹脂層が強度上の標定領域になると考えられる。

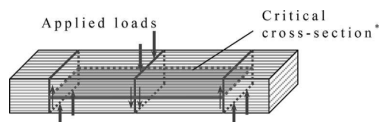


Fig. 14 Schematic of loading configuration and critical cross-section in ILSS specimen.
*Resin layer between plies around thickness-wise mid-plane.

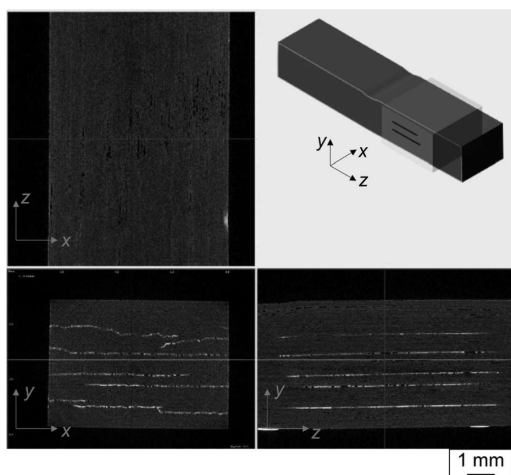


Fig. 15 Typical X-ray CT images of ILSS specimen after failure ($V_v=2.1\%$).

ILSS 試験片について、試験で生じた亀裂に造影剤(ヨウ化亜鉛溶液)を浸透させて X 線 CT により観察した結果 ($V_v=2.1\%$ の例) を Fig. 15 に示す。また、同じ ILSS 試験片について、亀裂の生じた箇所を切り出して破面を露出させ、走査型電子顕微鏡 (SEM; JSM-6510, 日本電子) により観察した結果 ($V_v=2.1\%$ の例) を Fig. 16 に示す。Fig. 15 から、亀裂が層間に発生し、かつ、ポイドを通過していることが観察された。亀裂の発生順は不明であるが、ある層間の亀裂が別の層間に移る箇所でもポイドを通過しているようにみられる。Fig. 16 では亀裂が繊維と樹脂の界面を進展したことが観察され、樹脂が残っている箇所ではハレーションが起きていることが確認できる。ポイドが層間の樹脂の多い領域に形成されやすいため、ポイド付近では樹脂が残っている部分が多く観察された。また、樹脂の塑性変形がみられ、ハックルと呼ばれる樹脂の突起状の変形が形成されていることから、せん断破壊が生じていることが考えられる。亀裂が複数の層間樹脂層にまたがって斜めに進展している箇所については層間樹脂層内を進展している箇所と比べての

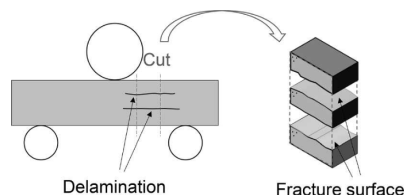


Fig. 16 SEM image of ILSS fracture surface ($V_v=2.1\%$).

特徴の違いはみられなかった。

強度とともに、Fig. 12 に示した CV については、TTS の CV が ILSS の CV より全体的にかなり大きい結果となった。この傾向については、例えば、一枚の積層板から試験片を切り出した場合でもポイドや樹脂リッチ領域の偏在のような局所的な差異の影響を受けやすく、CV が大きくなったことが考えられる。一方、ILSS は上記のとおり板厚方向中心付近の層間樹脂層が強度上の標定領域になるが、TTS に比べて偏在のような局所的な差異の影響は受けにくく、CV が小さくなったことが考えられる。なお、 $V_v=1.0\sim 2.1\%$ において CV が他の V_v よりも大きめであったのは、Table 2 で示したように、積層板の代表断面で V_v を計測した結果の値の幅が大きめであったことから、積層板の代表値の V_v と試験片ごとの V_v が若干ながら異なることなどに起因するものと考えられる。

(3) ILTS

Fig. 4 に示した L 字型積層板の 4 点曲げ試験では、4 点の圧子のうちの内側にある上側の負荷圧子の間において純粋な曲げモーメントが負荷される状態となり、今回適用したような一方向材の試験片では標定となる円弧状の R 部において、面外方向の引張応力を評価できる¹⁵⁾。この引張応力は板厚方向に分布があって板厚方向中心よりやや内側付近で最大になるため、ここが強度上の標定領域となる¹⁶⁾。

Table 3 Typical stress concentration factors around circular or elliptical holes and spherical or spheroid cavity.

No.	Hole/cavity shape	Loading	Stress concentration factor α^{*1}	Definition of α , conditions, etc. ^{*1}	Remarks ^{*2}
1-1	2D	In-plane uniform	$\alpha=5$ for $a/b=2$	$\alpha=1+2a/b$	Fig. 1 C
1-2	elliptical hole	tension	$\alpha=2$ for $a/b=0.5$		Fig. 1 A
2	3D spherical cavity	Uniform tension	$\alpha=2.045$ for $\nu=0.3$	$\alpha=(27-15\nu)/(14-10\nu)$	Fig. 1 A, C
3	3D spherical cavity	Uniform shear	$\alpha=1.91$ for $\nu=0.3$	$\alpha=15(1-\nu)/(7-5\nu)$	Fig. 1 B
4	3D spheroid cavity	Uniform tension	$\alpha=3.33$	$a/b=2$	Fig. 1 C
5	3D spheroid cavity	Uniform shear	$\alpha=2.84$	$\nu=0.3$	Fig. 1 B
6	3D spheroid inclusion	Uniform tension	$\alpha=1.544$	$EI/EM=0.5, a/b=2$	

^{*1} α : stress concentration factor, a, b : major or minor axis of elliptical cross-section of void ν : Poisson's ratio, EI : Young's modulus of inclusion, EM : Young's modulus of matrix.

^{*2} Critical locations of similar (corresponding) stress concentrations are shown in Fig. 1.

このように標定領域がILSSに似ている状況を踏まえると、CVについてはILSSと同様にボイドの偏在の影響は受けにくいと考えられるが、試験片のR部の板厚などの寸法誤差に伴うばらつきも影響しうることから、TTSやILSSに比べてCVが大きめになったものと考えられる。

4.2 ボイド周りの応力集中係数に関する考察

3.1項のボイドの形状や分布についての観察結果からFig. 1に示したボイドの模式図が概ね妥当であることが確認できた。これを踏まえて、応力集中係数についての文献値^{19,20)}から、ボイド周りの状況に近いものをTable 3にまとめた。ここで、CFRP積層板に荷重を負荷した際の微視的なひずみ分布において、ボイドがある積層板についてボイド周りのひずみ集中が実際に観察されたことに加え、ボイドがない積層板の場合でも繊維配置の微視的な乱れや樹脂リッチ領域に伴うひずみ集中も観察されている¹⁸⁾。このため、Table 3にはボイドのような孔や空隙に伴う応力集中係数(No. 1-1~5)に加えて、弾性率に差のある介在物(樹脂リッチ領域相当)に伴う応力集中係数(No. 6)も示した。

前述のボイド形状の観察結果に基づくボイドを破壊力学における亀裂(先端半径 $\rho \rightarrow 0$)としてみる必要はないと考えられるが、CFRP積層板中の微小な欠陥であることから、ここで破壊力学の観点からみた場合の応力集中の状況を確認しておく。即ち、仮にボイドを有限値の切欠き先端半径 ρ をもつ鋭い切欠きとみた場合、Fig. 1

のCとBの荷重状態に相当するモードIおよびモードIIIの切欠き先端の最大応力、 $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$ はそれぞれ近似的に応力拡大係数 K_I 、 K_{III} および切欠き先端半径 ρ を用いて次のように表される²¹⁾。

$$\sigma_{\max} \approx 2K_I / \sqrt{\pi\rho} \quad (7)$$

$$\tau_{\max} \approx K_{III} / \sqrt{\pi\rho} \quad (8)$$

この切欠き長さが $2a$ で、無限遠方においてそれぞれ一様応力 σ_y^∞ 、 τ_{yz}^∞ を受けるものとする応力拡大係数 K_I 、 K_{III} は次のとおりとなる。

$$K_I = \sigma_y^\infty \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

$$K_{III} = \tau_{yz}^\infty \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

式(9)、(10)をそれぞれ式(7)、(8)に代入すると、最大応力 $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$ は次のように表される。

$$\sigma_{\max} \approx 2\sigma_y^\infty \sqrt{a/\rho} \quad (11)$$

$$\tau_{\max} \approx \tau_{yz}^\infty \sqrt{a/\rho} \quad (12)$$

式(11)、(12)は最大応力 $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$ と無限遠方における一様応力 σ_y^∞ 、 τ_{yz}^∞ との関係を示し、係数 $2\sqrt{a/\rho}$ と $\sqrt{a/\rho}$ がそれぞれの応力状態に対する応力集中係数にあたる。この関係から、同一の孔周りでもモードI的な荷重に対する応力集中係数はモードIII的な荷重に対する応力集中係数の2倍程度であることが分かる。これはFig. 1のCとBのように同じボイドの同じ位置における荷重形態の違いによる応力集中係数の違いに相当する

が、これらの応力集中係数の典型的な値は Table 3 の No. 1-1 と No. 3 のとおり 2 倍程度の関係になっている。この状況から、破壊力学的な観点からみた場合でも、ボイド周りの応力状態について Table 3 に示したような応力集中係数を用いた検討が概ね妥当であると考えることができる。

(1) TTS と ILSS の強度低下率に関する評価

TTS と ILSS の試験結果の比較においては、同一の積層板から切り出した試験片を使用していることから、両試験結果は V_v の強度低下率への影響度も含めて、荷重形態の違いに伴うものと考えることができる。

4.1 項の考察から、TTS と ILSS について、標定となる領域やボイドの分布に伴う影響の受け方は異なるものの、基本的には標定領域内にある V_v に比例して強度が低下するものと考えられた。また、Table 3 より、TTS と ILSS に近いと考えられる三次元球状空窩や三次元回転楕円体状空窩についての一様引張と一様せん断に対する応力集中係数（それぞれ No. 3 と 5, No. 4 と 6）が似通った値になっていることから、 V_v と応力集中係数を考慮した場合の強度低下率として TTS と ILSS で似通った結果となったことが示唆される。

(2) ILSS と ILTS の強度低下率に関する評価

ILSS と ILTS の試験においては、別々の積層板から切り出した試験片を使用しているものの、X 線 CT の観察結果からボイドの形態や分布に関して概ね共通する状況が確認されていることから、両試験結果についても V_v の強度低下率への影響度も含めて、荷重形態の違いに伴うものと考えることができる。ここでも 4.1 項の考察から ILSS と ILTS について、基本的には標定領域内にある V_v に比例して強度が低下するものと考えられる。また、Table 3 より、ILSS と ILTS に近いと考えられる二次元楕円孔 ($a/b=2$ の場合)/二次元円孔や三次元球状空窩における応力集中係数をみると引張の方がせん断よりも若干高い傾向になっていることから、 V_v と応力集中係数を考慮した場合に ILSS よりも ILTS の方が強度低下率として高い結果となったことが示唆される。

4.3 V_v による強度への影響の原因

3.2 項の試験結果では、各強度とも V_v の増加に伴って概ね線形的に低下する傾向がみられたため、この原因を考察する。まず、ボイドは荷重を伝達すべき材料が V_v の分だけ存在しない領域であるため、ボイドがない場合に比べて $V_v\%$ だけ強度が低下する。あるいは、4.1 項にて述べたように荷重形態によって標定となる局所的な領域がある場合にその領域内での V_v を考えると、積層板全

体で評価した場合の V_v よりも大きい値となるため、結果としてより大きな強度低下になりうる。次に、3.1 項で観察されたボイドの形態から、各荷重形態について Fig. 1 の A~C に示したような位置において最大の応力集中が生じ、その応力集中係数に応じた強度低下につながると思われる。

Fig. 12 に示した TTS, ILSS, ILTS の近似直線の傾きは V_v に伴う強度低下率に相当すると考えることができ、それぞれ、 -3.8 , -4.0 , -8.3 であった。一方、各荷重状態に対応する応力集中係数が 2~5 程度 (Table 3 参照) であることから、まず、上記の強度低下率の半分程度はボイドに伴う応力集中が原因であると考えられる。加えて、ボイドの近傍では応力集中に伴って早期に樹脂の局所的な塑性変形が始まると、引き続いてその箇所ではひずみ集中が生じ¹⁸⁾、 V_v に伴う強度低下を助長すると考えられるため、 V_v に伴う強度低下率のうちの多くの部分がボイド周辺での応力・ひずみ状態に起因することが示唆される。

なお、CFRP 積層板の強度に影響する因子としては、繊維・樹脂界面の強度やボイドよりも小さいレベルの樹脂中の欠陥なども考えられるため、 V_v に伴う強度低下をより詳細に検討するには、これらの因子に対するボイドの影響なども検討する必要があると考えられる。

5. 結 言

本研究では、製造時欠陥として意図的にボイドを発生させた CFRP 積層板を作製し、そこから切り出した試験片を用いて樹脂支配型の強度に関する強度試験と X 線 CT によるボイドの形状や分布に関する観察を行って、CFRP 積層板中のボイドの形状や分布に関する特徴と強度との関連を評価した。

CFRP 積層板が平板か L 字型 (R 部) かにかかわらず、ボイドは繊維方向に細長い円柱もしくは回転楕円体 (円柱の集合体) 状であり、基本的には層間樹脂層に多く分布していた。このようなボイドの形状や分布の様子は、これまでの研究における他のプリプレグを用いた CFRP 積層板と同様であった。

強度はいずれも V_v の増加に伴って低下した。TTS と ILSS の V_v に対する強度低下率はほぼ同様であったのに対し、ILTS の強度低下率は TTS や ILSS より大きかった。これらの強度低下率の差異には、ボイドの形状と負荷方向との関係に起因する応力集中係数の差異の寄与が大きいことが示唆された。

本研究における X 線 CT 観察においては、岐阜大学工学部の三宅卓志教授ならびに竹中一也氏、高田雄太氏のご協力を頂き、岐阜大学機器分析センターの装置を利用させて頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) L.K. Grunenfelder & S.R. Nutt : *Compos. Sci. Technol.*, **70** (2010), 2304-2309.
- 2) S.S. Tavares, V. Michaud & J.-A.E. Månson : *Composites: Part A*, **40** (2009), 1587-1596.
- 3) J.M. Tang, W.I. Lee & G.S. Springer : *J. Compos. Mater.*, **21** (1987), 421-440.
- 4) S. Hernández, F. Sket, J.M. Molina-Aldaregua, C. González & J. LLorca : *Compos. Sci. Technol.*, **71** (2011), 1331-1341.
- 5) N.L. Hancox : *J. Mater. Sci.*, **10** (1975), 234-242.
- 6) B.D. Harper, G.H. Staab & R.S. Chen : *J. Compos. Mater.*, **21** (1987), 280-289.
- 7) P. Olivier, J.P. Cottu & B. Ferret : *Composites*, **26**, 7 (1995), 509-515.
- 8) R. Talreja & C.V. Singh : *Damage and Failure of Composite Materials*, Cambridge University Press (2012).
- 9) L. Ye, K. Friedrich, J. Kästel & Y.-W. Mai : *Compos. Sci. Technol.*, **54** (1995), 349-358.
- 10) N.L. Hancox : *J. Mater. Sci.*, **12** (1977), 884-892.
- 11) Y. Nikishkov, G. Seon & A. Makeev : *J. Compos. Mater.*, **48** (2014), 2131-2144.
- 12) H. Huang & R. Talreja : *Compos. Sci. Technol.*, **65** (2005), 1964-1981.
- 13) ASTM D3039/D3039M-08 : Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA (2008).
- 14) ASTM D2344/D2344M-00 (2006) : Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, ASTM International, West Conshohocken, PA (2006).
- 15) ASTM D6415/D6415M-06ae1 : Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite, ASTM International, West Conshohocken, PA (2006).
- 16) S.G. Lekhnitskii : *Anisotropic Plates*, Gordon & Breach Publishers (1968).
- 17) D.K. Hsu & K.M. Uhl : *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **6** (1987), 1175-1184.
- 18) S. Aratama, Y. Tsumura, M. Nishikawa & M. Hojo : *Proceedings of the 16th US-Japan Conference on Composite Materials*, La Jolla, U.S.A., September 8-10 (2014).
- 19) 西田正孝 : 応力集中増補版, 森北出版 (1973).
- 20) 村上敬宜 : 応力集中の考え方, 養賢堂 (2009).
- 21) 岡村弘之 : 線形破壊力学入門—破壊力学と材料力学講座 1, 培風館 (1976).
- 22) 複合材料強度評価データベース, 日本航空機開発協会.