研究論文

擬似等方積層 CFRP の圧縮試験において計測される
ポアソン比に及ぼす試験片断面寸法の影響原 栄一^{*1}, 加藤 久弥^{*1}, 岩 堀 豊^{*2}, 横関 智弘^{*3}

(2018 年 8 月 28 日受付)

Influence of Specimen Geometry on Apparent Poisson's Ratio Evaluated
under the Compressive Loading of Quasi-Isotropic CFRP LaminateEiichi HARA,^{*1} Hisaya KATO,^{*1} Yutaka IWAHORI^{*2} and Tomohiro YOKOZEKI^{*3}

(Received August 28, 2018)

Abstract: The effects of specimen geometry on the Poisson's ratio of a quasi-isotropic carbon fiber reinforced polymer laminate under compression tests were examined experimentally. In particular, the divergence of the apparent Poisson ratio from the theoretical value was measured experimentally for a decreasing specimen width/thickness ratio (b/t). The observed tendency was then confirmed by simulations using finite element analyses (FEAs). FEAs using a 3D model of the specimens were performed to investigate the strain and stress distribution. Moreover, it was confirmed that the width-direction strain in evaluating the apparent Poisson's ratio varies with the condition of a low b/t specimen. It was confirmed from the FEA results that the cause of an increasing or reducing width strain was sectional deformation under compressive loading, resulting from differences in the layer angles and stiffness between the outermost and inner layers.

Key words: Composite materials, Quasi-isotropic laminate, Compressive test, Poisson's ratio

1. 緒 言

1.1 圧縮試験方法の種別

CFRP 積層板の面内圧縮試験法には, ASTM を始め, JIS, ISO など多くの試験法が存在する。

ASTM D 695¹⁾ を元にした端部負荷方式の圧縮試験規格^{2~4)} は, 治具構成が簡便なものの, 強度試験においてタブ材を接着した試験片が要求される。これは, タブ無し平滑試験片の評定部と端部において等しい圧縮荷重が与えられ, 圧縮試験の最終破壊前に試験片の端部に局所

破壊が発生するためである。この端部破壊を抑制するタブ接着はコスト増加をもたらすため, タブ接着無しでも端部破壊の生じにくい面内圧縮試験法が求められている。また, 端部負荷方式とせん断負荷方式を混合させた combined loading compression 方式の試験法⁵⁾ が規格化されたが, 高強度高靱性化した擬似等方積層板の面内圧縮試験においては試験片端部において破壊する⁶⁾ ことも確認されている。

一方, Ogasawara らにより提案された NAL-II 法は, 擬似等方積層板のタブ無し面内圧縮試験における優位性

^{*1} 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構航空技術部門構造・複合材技術研究ユニット (181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1)

Structures and Advanced Composite Research Unit, Aeronautical Technology Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 6-13-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

^{*2} 明治大学理工学部機械工学科 (214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1)

Department of Mechanical Engineering, School of Science and Technology, Meiji University, 1-1-1 Higashi-Mita, Tama, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan

^{*3} 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻 (113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

Department of Aeronautics and Astronautics, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

Table 1 Parameters of experiment, specimens, test fixture, grid length of strain gauge.

#	Specimen type	Number of ply	Specimen dimensions [mm]			Distance between support fixtures (L) [mm]	Width/thickness ratio (b/t)	Test fixture type	Grid length of strain gauge [mm]
			Nominal thickness (t)	Overall length (l ₀)	Width (b)				
1	QI08-b10	8	1.55	110	10	10	6.5	Regular	1
2	QI08-b15	8	1.55	115	15	15	9.7	Regular	2
3	QI16-b10	16	3.1	110	10	10	3.2	Regular	1
4	QI16-b15	16	3.1	115	15	15	4.8	Regular	2
5	QI32-b7	32	6.2	107	7	7	1.1	Regular	1
6	QI32-b10	32	6.2	110	10	10	1.6	Regular	1
7	QI32-b15	32	6.2	115	15	15	2.4	Regular	2
8	QI32-b25	32	6.2	125	25	25	4.0	Large	2
9	QI32-b38	32	6.2	138	38	38	6.1	Large	2
10	QI48-b7	48	9.3	107	7	7	0.8	Regular	1
11	QI48-b10	48	9.3	110	10	10	1.1	Regular	1
12	QI48-b15	48	9.3	115	15	15	1.6	Regular	2
13	QI48-b38	48	9.3	138	38	38	4.1	Large	2
14	QI32-CAI	32	6.2	150	100	(134)	16.1	(ISO 18352)	2

QI: Quasi-Isotropic.

が示されている⁷⁾。著者らはこの方法を標準化するため、試験片寸法及び治具寸法の検討^{6,8-10)}を行い、ISO 14126¹¹⁾に関連する JIS K 7018 : 1999¹²⁾を JIS K 7018 : 2019 として改正する活動を実施している。

1.2 擬似等方積層板のポアソン比計測

擬似等方積層板のポアソン比は古典積層理論から導出される式 (A24) に一方向材の特性値を代入することで計算することが一般的である。一方、本研究において擬似等方積層板の試験片からポアソン比を計測した理由は、一方向材の各特性値（繊維方向弾性率、繊維直交方向弾性率、ポアソン比、せん断弾性率）を計測せずに評価できる点、擬似等方積層複合材を等方性材と仮定した概略構造設計に使用できる点から実務上有用であるためである。また、ポアソン比の計測は引張試験規格にも記載されているが、圧縮試験からも計測可能である方が有用であると考え。しかし、著者らにより異なる試験片寸法によって大きな差異のあるポアソン比が計測されたことが報告された¹⁰⁾。このような現象の報告は著者らの調査範囲において見当たらず、先行研究⁷⁾においてもポアソン比と試験片寸法についての詳細な検証は実施していない。そこで古典積層理論から導出されるポアソン比（理論ポアソン比）に近い値を計測可能な条件について検討するため、本論文では4種類の板厚の異なる積層構成の積層板からそれぞれ2～5種類の試験片寸法を選択し、計13種類の試験片から計測したポアソン比と、試験片を三

次的にモデル化した有限要素解析結果から算出した長手方向歪み、幅方向歪み、ポアソン比を比較、報告する。その他、有限要素解析結果から確認した圧縮負荷時の試験片の変形挙動から、ポアソン比が変化することについて考察する。なお、本論文で取り扱う擬似等方積層板の試験片評定部の表裏面で計測されたポアソン比（apparent Poisson's ratio）をポアソン比と記載する。

2. 実験

2.1 供試材料

試験片は代表的高靱性 180°C 硬化 CFRP である東レ社製 T800S/3900-2B プリプレグの積層板とした。積層構成は、擬似等方積層とし、4 板厚条件とした [(45/0/-45/90)_n]_s (n=1, 2, 4, 6)。

2.2 圧縮試験片

上記4板厚条件の積層板から2～5種類の寸法条件の試験片を選定し、合計13条件の試験片を加工した。後述する試験治具の種別を含め、試験条件を Table 1 に示す。議論のため、試験片幅/試験片板厚の比（以後、 b/t と記載する）もあわせて示した。試験片数は各5体である。

2.3 圧縮試験治具と試験手順

Fig. 1(a) に試験治具と試験片の構成を示す。試験片の端部により直接圧縮荷重を与える端部負荷方式を採用した。Fig. 1(b) に示すように、本研究では試験片幅約 15 mm まで対応可能な Regular 治具と試験片幅約 38 mm

Fig. 1 Test fixture for compressive test.

Fig. 2 Test set up for compression test (QI32-b15 specimen/regular test fixture).

まで対応可能な Large 治具の 2 種類の試験治具を使用した。試験片の端部を拘束する長さは 2 種類の試験治具とも 50 mm である。この端部拘束長さは試験治具のサポート・リテーナ・スペーサによって試験片が支持される長さであるため、サポート長さ (length supported: LS) として Fig. 1 に示す。試験片端部を面外拘束する 2 つのサポートと試験片の軸心位置を合わせるため、Fig. 1(b) に示す試験片セット治具 (setting fixture) に、試験治具部品のサポートとリテーナを納めた状態で試験片を締結した。本研究では締結トルクをほぼ 0 N・m とした。この時、サポートと試験片の間にスペーサを挿入することで、試験片積層中立面とサポートの中心軸をあわせた。試験片をセット治具内でサポートに締結した後、円筒形状のスリーブに納め、試験機圧盤上に置き、サポート上面に試験速度 1 mm/min で強制変位を与え、試験片面内方向の圧縮力を与えた。圧縮力はポアソン比計算に必要な歪みを計測するまで与えた。試験写真を Fig. 2 に示す。試験機はインストロン社製ねじ式試験機を用いた。

Fig. 3 ISO 18352 test fixture and CAI size specimen.

2.4 その他の圧縮治具による試験 (CAI 試験片寸法の圧縮試験)

構造物に適用されているほとんどの CFRP は、2.2 で示した圧縮試験片よりも面内寸法、 b/t が大きい。そこで 2.2 の圧縮試験片よりも面内寸法が大きい CAI (compression after impact) 試験治具を用いて 32 ply 積層板の圧縮試験を実施した。試験片寸法、歪みゲージのグリッド長を“QI32-CAI”として Table 1 に示す。歪みゲージは試験片表裏面の中央に接着した。Fig. 3 に試験治具と試験片を示す。衝撃試験を実施せずに CAI 圧縮治具 (ISO 18352) を用いて圧縮試験を行った。CAI 試験治具と本研究の圧縮試験治具は異なるものの、端部負荷方式である点、 b/t が高い点、試験片の平面寸法が大きい点、試験片の端部拘束長さが短い点から、古典積層理論の仮定に近い条件でポアソン比が計測されるものと考えた。試験片数は 2 体である。

2.5 歪み計測

試験片の表裏面の中央に 2 軸直交歪みゲージを接着し、試験片長手方向と幅方向の歪みを計測した。共和電業製の KFGS-2-120-D16 (グリッド長 2 mm) と KFGS-1-120-D16 (グリッド長 1 mm) の 2 種類の歪みゲージを使用した。Table 1 に、各試験片に使用した歪みゲージのグリッド長を示す。

2.6 ポアソン比の計算

ポアソン比 ν は、式(1)を用いて計算した。

$$\nu = \frac{\Delta \epsilon_T}{\Delta \epsilon_L} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta \epsilon_T$ は、試験片幅方向の歪みの増加分、 $\Delta \epsilon_L$ は、試験片長手方向の歪みの増加分である。ポアソン比を計

“(1) ~ (5)” are boundary conditions of FEA models.

Fig. 4 Concept of FEA, definitions of coordinate systems, 5 boundary conditions.

算する歪みの範囲は、ISO 14126 : 1999 の弾性率計算範囲を参考に、試験片長手方向歪みの 0.05 % ($500 \mu\epsilon$) と 0.25 % ($2,500 \mu\epsilon$) とした。

3. 有限要素解析

圧縮された試験片から計測されるポアソン比を推定するため、線形弾性解析を実施した。商用の数値解析ソフト ABAQUS2016 を用いた。六面体の三次元ソリッド要素 (C3D8) を用いて、試験片全体をモデル化した。有限要素解析の概要を Fig. 4 に示す。

実験における試験片への負荷条件を再現するため、解

Table 2 Material mechanical properties.

Property	unit
E_L	135 GPa
E_T	9 GPa
G_{LT}	4 GPa
ν_{LT}	0.36 —
E_Z	9 GPa
G_{LZ}	4 GPa
G_{TZ}	2.5 GPa
ν_{LZ}	0.36 —
ν_{TZ}	0.55 —

Table 3 Parameters of finite element analysis (FEA) models.

#	Model name	Number of ply	Specimen dimensions [mm]			Distance between support fixtures (L) [mm]	Width/thickness ratio (b/t)
			Nominal thickness (t)	Overall length (l_0)	Width (b)		
1	QI08-b10	8	1.56	110	10	10	6.4
2	QI08-b15	8	1.56	115	15	15	9.6
3	QI08-b25	8	1.56	125	25	25	16.0
4	QI16-b10	16	3.12	110	10	10	3.2
5	QI16-b15	16	3.12	115	15	15	4.8
6	QI16-b25	16	3.12	125	25	25	8.0
7	QI16-b38	16	3.12	138	38	38	12.2
8	QI32-b7	32	6.24	107	7	7	1.1
9	QI32-b10	32	6.24	110	10	10	1.6
10	QI32-b15	32	6.24	115	15	15	2.4
11	QI32-b25	32	6.24	125	25	25	4.0
12	QI32-b38	32	6.24	138	38	38	6.1
13	QI48-b7	48	9.36	107	7	7	0.7
14	QI48-b10	48	9.36	110	10	10	1.1
15	QI48-b15	48	9.36	115	15	15	1.6
16	QI48-b25	48	9.36	125	25	25	2.7
17	QI48-b38	48	9.36	138	38	38	4.1
18	QI32-CAI	32	6.24	150	100	(134)	16.0

QI: Quasi-Isotropic.

析モデルに以下の境界条件を与えた。

- 1) 試験片の端面に、圧縮方向の強制変位を与えた。強制変位量は、それぞれの試験片全長の0.1% ($1,000 \mu\epsilon$) 分とした。
- 2) 試験片の逆の端面の長手方向変位を0とした。
- 3) 項目2)の端面上の板厚方向中心・幅方向中心の節点のXYZ方向変位を拘束した。
- 4) 項目2)の端面上の板厚方向中心・幅方向端部の節点のXZ方向変位を拘束した。
- 5) 試験片の表裏面にサポート及びリテーナに接する面のZ方向変位(試験片板厚方向変位)を0とした。

六面体要素の平面(XY方向)寸法は0.5 mm、厚み(Z方向)寸法は0.195 mmとした。試験片と同様に、積層毎に積層角度をつけた。有限要素解析で用いた材料特性値(弾性率、ポアソン比)をTable 2に示す。有限要素解析でモデル化した試験片のリストをTable 3に示す。

有限要素解析結果から、以下の方法でポアソン比を計算した。

実験で用いた直交歪みゲージのグリッド長さに相当する試験片表面の節点と節点の相対距離(1 mm又は2 mm)とその変化量から、長手方向の歪みと幅方向の歪みをそれぞれ計算した。

幅方向歪みを長手方向歪みで除して、ポアソン比を計算した。

CAI型試験片の有限要素解析も実施した。ただし、側面ナイフエッジ(Fig. 3のSliding edge)拘束を除いたFig. 4と同様の境界条件とした。

4. 結果

4.1 実験結果

実験で計測した応力-歪み線図の一例として、Fig. 5を示す。Fig. 5のFL, BLはそれぞれ試験片のFront面とBack面の長手方向歪み, FT, BTはそれぞれFront面とBack面の幅方向歪みである。試験治具のリテーナに接する面がFront面, サポートに接する面がBack面とした。Fig. 1において試験片のFront面を示した。ポアソン比を試験片幅で整理した図をFig. 6に示す。エラーバーは計測値の最大・最小値である。更に、ポアソン比を b/t で整理した図をFig. 7に示す。Fig. 7にあわせて示した理論値(theory)は、古典積層理論から導出したポアソン比の式(A24)に、Table 2の特性値を入力したものである。試験片幅が大きくなるにつれポアソン比が理論ポアソン比(以後、理論値と記載する)近傍に近づくこと、 $b/t > 4$ の条件では理論値に近い値であることが確

Fig. 5 Example of stress-strain curves (QI08-b15).

Fig. 6 Experimental apparent Poisson's ratio as a function of specimen width b .

Fig. 7 Experimental apparent Poisson's ratio as a function of width/thickness ratio (b/t).

認された。

4.2 有限要素解析結果

上記のポアソン比を試験片幅で整理した図をFig. 8に、 b/t で整理した図をFig. 9に示す。有限要素解析結果の試験片幅方向歪みと長手方向歪みを b/t で整理した結果をFig.10(a), (b)に示す。Fig. 8から、試験片幅

Fig. 8 Apparent Poisson's ratio by FEA as a function of specimen width b .

Fig. 9 Apparent Poisson's ratio by FEA as a function of specimen width/thickness ratio b/t .

が小さくなるとポアソン比が増加すること、同じ試験片幅で、試験片板厚が増えるとポアソン比が増加することが確認された。Fig. 9 から、 b/t が減少するとポアソン比が増加することが確認された。同程度の b/t では、積層数が多い条件下のポアソン比が理論値に近かった。Fig. 10 から、ポアソン比が b/t によって変化する主な要因は試験片幅方向歪みの増加であることが示唆された。

5. 考 察

5.1 実験結果と有限要素解析結果の比較

実験結果と有限要素解析結果を比較した図を Fig. 11 に示す。実験結果、有限要素解析結果とも、試験片幅が小さくなると、ポアソン比が増加することが分かった。実験結果は有限要素解析結果のポアソン比より低い値を示すものの、全体的な傾向は一致した。特に $b/t < 4$ ではポアソン比が顕著に増加した。同程度の b/t では、積層数が多い条件下のポアソン比が理論値に近かった。これは試験片の断面がより多くの層で分割されることにより、負荷前の垂直な断面が負荷後も維持されると仮定した古典積層理論の条件に近づくためと考えられる。

(a) Strains in the width direction.

(b) Strains in the longitudinal direction.

Fig. 10 Strains in the width and longitudinal direction of FEA results.

Fig. 11 Apparent Poisson's ratio by FEA and experiments as a function of specimen width/thickness ratio b/t .

CAI 型試験片のポアソン比は理論値に近い値を示した。これは、CAI 試験片は、 b/t 比が大きいこと、試験片長さが圧縮試験片より長いことから、試験片断面の変形が古典積層理論の仮定に近いためと考えられる。

Fig. 12 Contour of displacement in the Z direction on cross section of center-plane (QI48-b10).

5.2 試験片評定部の断面（幅/板厚断面）の変形がポアソン比に与える影響

一例として、QI48-b10の断面の板厚方向変位分布図をFig. 12に示す。Y方向が試験片の幅方向に、Z方向が試験片の板厚方向に相当する。この図から以下の変形が確認された。

- (1) 試験片幅方向の両端面（自由縁）において、幅方向の凹凸が発生する。特に“90° lamina”として示した90°層の幅方向の変形が小さい。
- (2) 試験片の幅方向中央で板厚方向の変形 (Dz1) が大きく、幅方向両端の板厚方向の変形 (Dz2) は小さい。

自由縁の凹凸は、積層の拘束がなくなること、それぞれの層の面内ポアソン比に差があることが原因である。90°層の幅方向変形が小さいのは、ポアソン比 ν_{TL} が小さい⁹⁾ためである。

Fig. 12のように試験片の板厚方向変位に差が発生するため、試験片表裏面の幅方向の長さが伸ばされる。この幅方向長さが伸ばされることは、古典積層理論で想定

Fig. 13 Deformation degree as a function of specimen width/thickness ratio b/t .

した歪みよりも高い幅方向歪みを発生させる原因となる。これが、積層構成 $[(45/0/-45/90)_n]_s$ の試験板から有限要素法に加工された圧縮試験片のポアソン比が理論値よりも高く計測される原因と考えられる。

積層構成 $[(45/0/-45/90)_n]_s$ の試験片評定部の幅/板厚断面の変形の度合いが試験片形状に依存し、 b/t が小さいほど断面変形が大きくなることが予想されたため、異なる寸法の試験片の断面変形の度合いを比較するために以下に示す指標を定義した。試験片断面の変形の指標として、Fig. 12に示す変形角度を $Dz1$, $Dz2$, 仮想点 $Dz2'$ によって計算する。点 $Dz1$ を通る XY 平面に、点 $Dz2$ から垂線を引き、交点を $Dz2'$ と定義する。この垂線の距離 ΔDz は、

$$|(Dz2)(Dz2')| = \Delta Dz = \Delta Dz1 - \Delta Dz2 \quad (2)$$

により計算できる。一方、点 $Dz2$ は幅方向にも変形している。幅方向の幅方向変位を $Dy2$ とすると

$$|(Dz1)(Dz2')| = b/2 + Dy2 \quad (3)$$

により計算できる。この2つ長さを式(4)に代入し、試験片断面の変形角度を計算する。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{|(Dz2)(Dz2')|}{|(Dz1)(Dz2')|} \right) \quad (4)$$

変形角度 θ を b/t で整理した図を Fig. 13に示す。 b/t が小さいほどこの変形角度 θ が大きい。つまり試験片寸法により幅方向の歪みが強められる効果が、有限要素解析結果から示唆された。 b/t が大きくなるほど変形角度が減少したものの、0に収束はしなかった。これは変形角度 θ を試験片幅方向の自由縁の節点を用いて計算しているためである。

Table 4 Parameters of experiment, additional specimens, test fixture, grid length of strain gauge.

#	Specimen type	Number of ply	Nominal thickness (t)	Overall length (l_0)	Width (b)	Distance between support fixtures (L) [mm]	Width/thickness ratio (b/t)	Test fixture type	Grid length of strain gauge [mm]
15	QI32_R+45-b7	32	6.2	107	7	7	1.1	Regular	1
16	QI32_R+45-b15	32	6.2	115	15	15	2.4	Regular	2
17	QI32_R+45-b38	32	6.2	138	38	38	6.1	Large	2

Table 5 Parameters of additional finite element analysis (FEA) models.

#	Model name	Number of ply	Specimen dimensions [mm]			Distance between support fixtures (L) [mm]	Width/thickness ratio (b/t)
			Nominal thickness (t)	Overall length (l_0)	Width (b)		
19	QI08_R+45-b10	8	1.56	110	10	10	6.4
20	QI08_R+45-b15	8	1.56	115	15	15	9.6
21	QI08_R+45-b25	8	1.56	125	25	25	16.0
22	QI16_R+45-b10	16	3.12	110	10	10	3.2
23	QI16_R+45-b15	16	3.12	115	15	15	4.8
24	QI16_R+45-b25	16	3.12	125	25	25	8.0
25	QI16_R+45-b38	16	3.12	138	38	38	12.2
26	QI32_R+45-b7	32	6.24	107	7	7	1.1
27	QI32_R+45-b10	32	6.24	110	10	10	1.6
28	QI32_R+45-b15	32	6.24	115	15	15	2.4
29	QI32_R+45-b25	32	6.24	125	25	25	4.0
30	QI32_R+45-b38	32	6.24	138	38	38	6.1
31	QI48_R+45-b7	48	9.36	107	7	7	0.7
32	QI48_R+45-b10	48	9.36	110	10	10	1.1
33	QI48_R+45-b15	48	9.36	115	15	15	1.6
34	QI48_R+45-b25	48	9.36	125	25	25	2.7
35	QI48_R+45-b38	48	9.36	138	38	38	4.1

QI: Quasi-Isotropic.

5.3 表面層の試験片幅方向剛性が高い擬似等方積層板のポアソン比ならびに変形角度 θ と b/t の関係

前項までの実験ならびに考察から、試験片の表裏面の積層（表面とそれよりも内側の層）の幅方向の剛性が断面変形、ポアソン比に影響を与えることが示唆された。そこで擬似等方積層かつ試験片最外層の幅方向の剛性が $[(45/0/-45/90)_n]_s$ と異なる積層構成の試験片から計測されるポアソン比について検証した。特に試験片幅方向剛性が高い条件では断面変形が異なると予想された。そこで試験片幅方向の剛性が高くなるように、 $[(45/0/-45/90)_4]_s$ を $+45^\circ$ 回転させた $[(90/45/0/-45)_4]_s$ の試験片の追加圧縮実験を行い、ポアソン比を計測した。Table 4 に示す 3 つの形状の試験片の実験を各 5 体実施した。また、積層構成 $[(90/45/0/-45)_n]_s$ ($n=1, 2, 4, 6$) の 17

種類の試験片の圧縮試験を模擬した有限要素解析を実施した。試験片寸法を Table 5 に示す。積層構成 $[(90/45/0/-45)_4]_s$ は $[(45/0/-45/90)_4]_s$ を $+45^\circ$ 回転 (rotated) させたものであることから、試験片の名称を QI32_R+45-b15 等と記載する。実験及び有限要素解析の条件は、2 章、3 章に記載した条件と同じである。

4 章で示した結果も含め、追加実験で取得したポアソン比を b/t で整理した図を Fig. 14 に示す。エラーバーは計測値の最大・最小を示す。有限要素解析結果から計算したポアソン比を b/t で整理した図を Fig. 15 に示す。5.2 同様、QI48_R+45-b10 の中央断面の板厚方向変位分布図を Fig. 16 に示す。さらに、試験片断面の変形角度を b/t で整理した図を Fig. 17 に示す。積層構成 $[(90/45/0/-45)_n]_s$ の場合、試験片表面が、Fig. 12 で定義し

Fig. 14 Experimental apparent Poisson's ratio as a function of width/thickness ratio (b/t).

Fig. 15 Apparent Poisson's ratio by FEA as a function of specimen width/thickness ratio b/t .

た変形角度 θ と逆の方向に変形したため、変形角度 θ をマイナスで示した。

[(90/45/0/-45)_s]。試験片のポアソン比は、 b/t が小さくなると、理論値よりも低下した。これは、長手方向に圧縮された試験片に Fig. 16 に示された試験片表面層が縮まる断面変形が発生することによって、理論値から計算される幅方向歪みが低減されたと考えられる。試験片表面層が縮まる断面変形の度合いを、5.2 で定義した断面の変形角度 θ とポアソン比の比較から、変形角度とポアソン比の減少傾向が一致することが確認された。

6. 結 言

擬等方積層試験片圧縮試験において、理論値に近いポアソン比を計測するための試験片寸法条件を検討するため、圧縮試験ならびに有限要素解析を実施した。

(1) 実験と有限要素解析の結果から、試験片寸法の幅と板厚両方が計測されるポアソン比に影響することを確認した。

(2) 計測ポアソン比は、試験片寸法の幅/板厚の比(b/t)

Fig. 16 Contour of displacement in the Z direction on cross section of center-plane (QI48_R+45-b10).

Fig. 17 Deformation degree as a function of specimen width/thickness ratio b/t .

t) が小さくなると、古典積層理論による計算値(理論値)から外れることが実験的に確認された。低 b/t 条件下のポアソン比の変化は、試験片の積層構成に依存することが確認された。[(45/0/-45/90)_n]_s の場合は理論値より高くなり、[(90/45/0/-45)_n]_s の場合は理論値より低くなることが実験的に確認された。有限要素解析結果も同

様の傾向を示した。

(3) 低 b/t 条件の試験片から計測されるポアソン比が理論値から外れる原因は、試験片幅方向の歪みの増加・低減であることを、有限要素解析結果から推定した。実験においてこの推定を示唆する結果を確認した。

(4) この試験片幅方向歪みが理論値からの推定よりも増加・低減した原因は、試験片表面と内部の積層構成の幅方向剛性の差異とそれぞれ層の面内ポアソン比の差異がもたらす幅方向の変形量の差による試験片の断面の変形現象であることを、有限要素解析結果から推定した。

(5) 本論文で取り上げた材料と積層構成、積層数においては、 $b/t \geq 4$ 条件下の試験片のポアソン比が古典積層理論に近い値を示した。有限寸法である圧縮試験片において計測される積層板のポアソン比が理論値に近づく b/t は、試験片幅、試験片板厚、層厚といった寸法の比のみならず、各層、特に最外層とその内側の層の剛性関係から影響を受けることが有限要素解析結果から示唆された。

参 考 文 献

- 1) ASTM D 695 : Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics (2015).
- 2) SACMA Recommended Test Method for Compressive properties of oriented fiber-resin composites, Suppliers of Advanced Composite Materials Association (SACMA) (1994).
- 3) JIS K 7076 : 炭素繊維強化プラスチックの面内圧縮試験方法.
- 4) prEN 2850 : Aerospace series Carbon thermosetting resin, unidirectional laminates—compression test parallel to the fibre direction.
- 5) ASTM D 6641 : Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminates Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture (2001).
- 6) 原 栄一, 加藤久弥, 岩堀 豊 : JCCM8 (2017), 3A-13.
- 7) T. Ogasawara & T. Ishikawa: *Adv. Compos. Mater.*, 25, S1 (2016), 131-145.
- 8) 原 栄一, 加藤久弥, 岩堀 豊 : JSCM41 (2016), 2A-08.
- 9) 原 栄一, 加藤久弥, 岩堀 豊 : JSASS-2017-3077, 第 59 回構造強度に関する講演会講演集 (2017), pp. 219-221.
- 10) 原 栄一, 加藤久弥, 岩堀 豊, 北條正樹, 齊藤博嗣 : JCCM-9 (2018), 1B-02.
- 11) ISO 14126 : Fibre-reinforced plastic composites—Determination of compressive properties in the in-plane direction (1999).

12) JIS K 7018 : 繊維強化プラスチック—積層板の面内圧縮特性の求め方.

附録 1 古典積層理論による面内ポアソン比, 面内弾性率の式の導出

一方向材料の座標系を L - T - Z 座標系とする。 L は繊維方向, T は面内繊維直交方向, Z は板厚方向である。歪み, 応力を

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} \quad (A1)$$

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} \quad (A2)$$

とくと, 一方向材の面内に関する歪み-応力関係式は

$$\begin{bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} \quad (A3)$$

と表すことができる。ここで, $S_{11}=1/E_L$, $S_{12}=-\nu_{LT}/E_L$, $S_{22}=1/E_T$, $S_{66}=1/G_{LT}$ である。任意の座標系 X - Y - Z 座標系とし, X 方向から L 方向への回転角を θ とおく。歪みと応力それぞれの角度変換式は

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} = [T_\epsilon][\epsilon_1] \quad (A4)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta \\ -2\cos \theta \sin \theta & 2\cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_X \\ \epsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{bmatrix}$$

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = [T_\sigma][\sigma_1] \quad (A5)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2\cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2\cos \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{bmatrix}$$

である。式 (A4) と式 (A5) から X - Y - Z 座標系での歪み-応力関係式は,

$$[\epsilon_1] = \begin{bmatrix} \epsilon_X \\ \epsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{bmatrix} = [T_\epsilon]^{-1} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} [T_\sigma] \begin{bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{bmatrix} \quad (A6)$$

$$= [T_\epsilon]^{-1} [S] [T_\sigma] [\sigma_1] = [S_{11}][\sigma_1]$$

である。積層角 θ により $[S_{11}]$ が決定される。

次に積層板の全体平均応力と歪みの面内成分を任意の座標系 X - Y - Z 座標系を用いて

$$[\bar{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_I \\ \bar{\varepsilon}_O \end{bmatrix} \quad (A7)$$

$$[\bar{\sigma}] = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_I \\ \bar{\sigma}_O \end{bmatrix} \quad (A8)$$

とする。ここで、 I は面内成分を、 O は面外成分を示し、

$$[\bar{\varepsilon}_I] = \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_X \\ \bar{\varepsilon}_Y \\ \bar{\gamma}_{XY} \end{bmatrix} \quad (A9)$$

$$[\bar{\sigma}_I] = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_X \\ \bar{\sigma}_Y \\ \bar{\tau}_{XY} \end{bmatrix} \quad (A10)$$

$$[\bar{\varepsilon}_O] = \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_Z \\ \bar{\gamma}_{XZ} \\ \bar{\gamma}_{YZ} \end{bmatrix} \quad (A11)$$

$$[\bar{\sigma}_O] = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_Z \\ \bar{\tau}_{XZ} \\ \bar{\tau}_{YZ} \end{bmatrix} \quad (A12)$$

であるとする、積層板全体の応力と歪みには

$$\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_I \\ \bar{\varepsilon}_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{II} & \bar{S}_{IO} \\ (\bar{S}_{IO})^T & \bar{S}_{OO} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_I \\ \bar{\sigma}_O \end{bmatrix} \quad (A13)$$

の関係がある。ここで $\bar{S}_{II}$, $\bar{S}_{IO}$, $\bar{S}_{OO}$ は、対応する 3×3 のサブマトリクスである。ply 数 N 層の積層板全体の歪みと応力は各層の歪みと応力に次の関係がある。

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{k=1}^N \nu^k \varepsilon^k \quad (A14)$$

$$\bar{\sigma} = \sum_{k=1}^N \nu^k \sigma^k \quad (A15)$$

$$\sum_{k=1}^N \nu^k = 1 \quad (A16)$$

ここで ν^k は k 番目の層の体積分率を示す。添字 k は k

層目を示す。面内歪み及び面外応力は各層等しく、全体の面内歪み及び面外応力と等しいとすると、

$$\varepsilon_I^k = \bar{\varepsilon}_I \quad (A17)$$

$$\sigma_O^k = \bar{\sigma}_O \quad (A18)$$

積層板の各層についても歪み-応力関係は

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_I^k \\ \varepsilon_O^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{II}^k & S_{IO}^k \\ (S_{IO}^k)^T & S_{OO}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_I^k \\ \sigma_O^k \end{bmatrix} \quad (A19)$$

と示される。式(A19)と式(A17)から次式が導出される。

$$\sigma_I^k = (S_{II}^k)^{-1} (\bar{\varepsilon}_I - S_{IO}^k \bar{\sigma}_O) \quad (A20)$$

これを式(A15)に代入、整理すると

$$\bar{\sigma}_I = (\sum_{k=1}^N \nu^k (S_{II}^k)^{-1}) \bar{\varepsilon}_I - (\sum_{k=1}^N \nu^k (S_{II}^k)^{-1} S_{IO}^k) \bar{\sigma}_O \quad (A21)$$

式(A21)と式(A13)との比較から

$$\bar{S}_{II} = [\sum_{k=1}^N \nu^k (S_{II}^k)^{-1}]^{-1} = (\bar{Q}_{II})^{-1} \quad (A22)$$

となる。 $\bar{Q}_{II}$ は積層板の面内剛性マトリクスである。

本論文で取り扱う擬似等方積層の場合、 $\bar{S}_{II}$ は式(A23)のようになる。

$$[\bar{S}_{II}] = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & 0 \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \quad (A23)$$

面内 0° 方向 (X 方向) 弾性率は $\frac{1}{\bar{S}_{11}}$, ポアソン比 ν_{XY} は $\frac{\bar{S}_{12}}{\bar{S}_{11}}$ により導出される。本論文で取り上げた $[45/0/-45/90]_s$ の面内ポアソン比, 弾性率は

$$\nu_{XY} = \frac{4G_{LT}(\nu_{LT}^2 E_T - E_L) + (6\nu_{LT} + 1)E_L E_T + E_L^2}{4G_{LT}(\nu_{LT}^2 E_T - E_L) - (2\nu_{LT} + 3)E_L E_T - 3E_L^2} \quad (A24)$$

$$E_X = \frac{E_L \{4G_{LT}(\nu_{LT}^2 E_T - E_L) + E_L E_T (2\nu_{LT} + 1) - E_L^2\} (2\nu_{LT} E_T + E_T + E_L)}{\{4G_{LT}(\nu_{LT}^2 E_T - E_L) - E_L E_T (2\nu_{LT} + 3) - 3E_L^2\} (E_L - \nu_{LT}^2 E_T)} \quad (A25)$$

である。