

## ASTM D5379 によるガラスマット強化 GFRP の面内せん断特性評価

### 背景

FRP (Fiber Reinforced Plastics: 繊維強化プラスチック) は強化繊維とマトリックス樹脂から構成される複合材料である。一次構造材に用いる FRP の強化繊維は、異方性の顕著なガラスロービングやカーボンストランドなどの連続繊維材料が適用される。しかしながら、FRP で一般汎用材料として用いられるのは、既定の繊維長にて切断後、ランダムに配向されたガラスチョップ繊維からなるガラスマットを強化繊維にした FRP である。当該材料の構造部材への適用が進んでいることから、シミュレーションニーズも高まっている一方、これらの計算に必要な材料特性を評価した事例は少ない。シミュレーションの一つである応力解析には引張や圧縮だけでなく、異方性を考慮したせん断モードでの弾性率やポアソン比といった物理特性を把握することが不可欠であるが、現段階ではこれらのデータを取得できていない。この状況を踏まえ、ガラスマットと不飽和ポリエステルをそれぞれ強化繊維、マトリックス樹脂とした GFRP について面内せん断特性を取得する。

### 目的

ASTM D5379 に基づき Double V-notch 型試験片を用いた GFRP の面内せん断試験を行い、強度、0.2% オフセット強度、弾性率、破断ひずみ、ポアソン比のデータを取得する。

### 結論

強度、0.2% オフセット強度、弾性率、破断ひずみ、ポアソン比は平均値で、それぞれ 92.8MPa、65.9MPa、3.17GPa、3.99%、0.46 であった。

### 概要

試験片はガラスマットを強化繊維、不飽和ポリエステルをマトリックス樹脂とした GFRP を用い、試験は  $23 \pm 3^\circ\text{C}$ 、Dry の環境にて  $n=5$  で行った。取得された SS 線図と試験の状況を下図に示す。SS 線図からはひずみ 1~1.5% を超えると非線形を示すことが明らかとなった。また、試験後の試験片はすべて右上から左下にかけて破壊が生じており、破壊モード判定から本試験が面内せん断試験として成功していることを確認した。

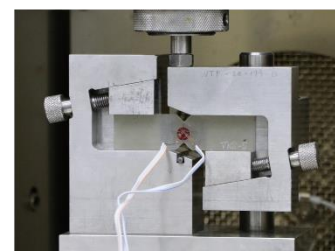
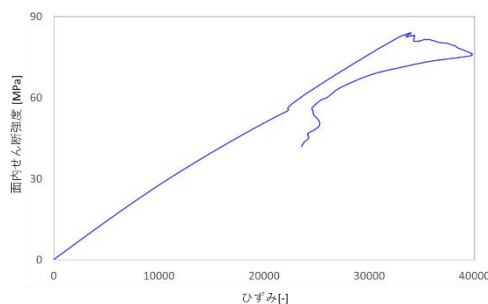


図 面内せん断試験の SS 線図 (左) と試験中の試験片拡大写真 (右)

## 評価準備と評価方法

### 試験片用 FRP 平板製作

すべて同一の不飽和ポリエステル樹脂とガラス繊維を用い、3.5mm 厚みを狙って縦 300mm、横 200mm の寸法でハンドレイアップにて 1 枚製作した。当該平板の図面を下図に示す。

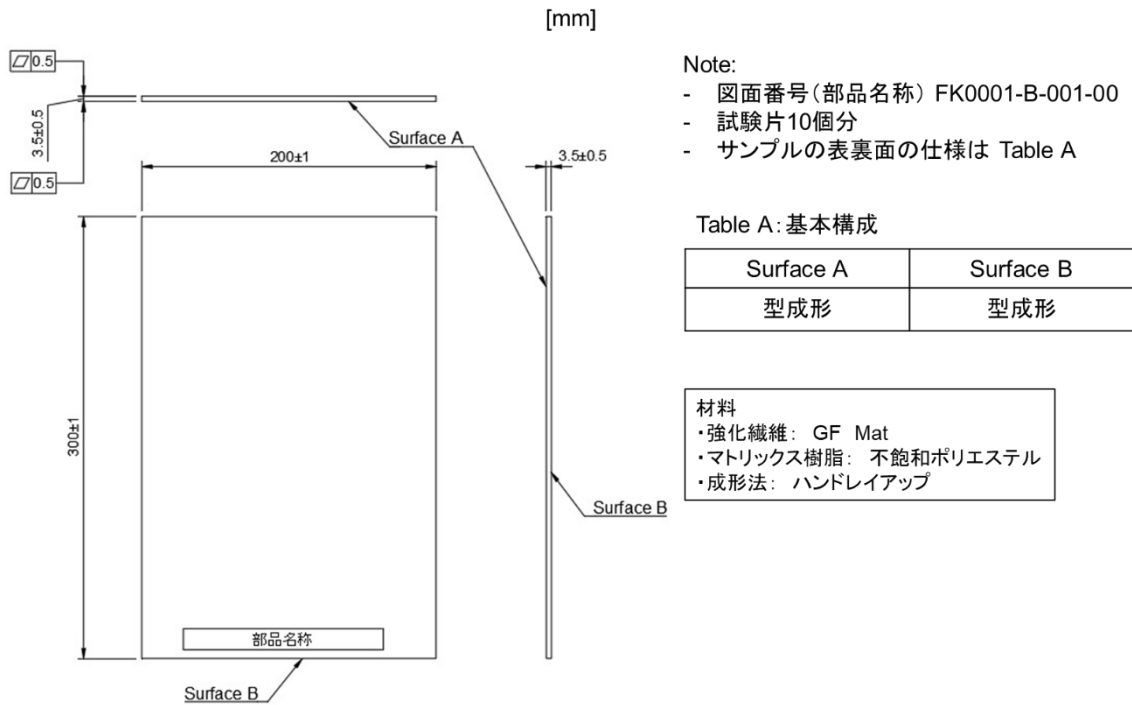


図 試験片用 FRP 平板図面

面内せん断試験片加工

面内せん断用試験片の形状図面を下図に示す。本試験片形状は ASTM D5379<sup>1)</sup>に準拠したものである。

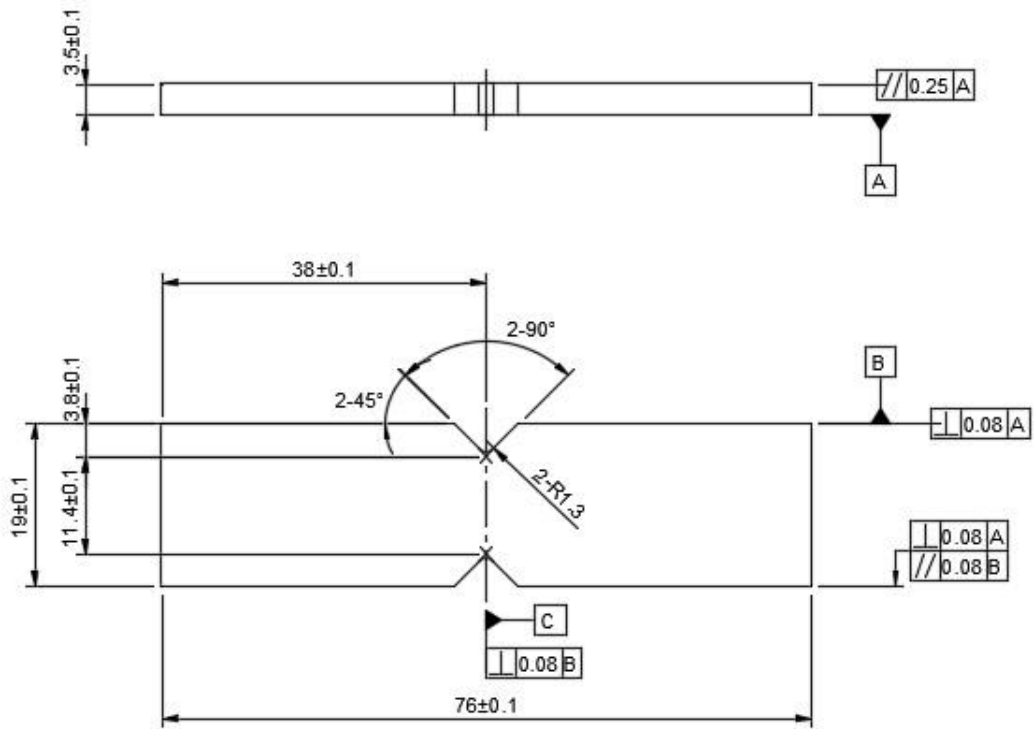


図 面内せん断用試験片図面

試験片の大きかな切り出し位置を罫線にて定義の上、複合材料裁断機 (AC-500CF) を用いて矩形での切り出しを行った (左下図)。切り出した矩形体は、マトリックス樹脂の硬化収縮による面変形が生じていたため、平面研削盤 (UPZ525NC II) にて面加工を行った。その後、プロフィール研削盤 (UPZ210Li II) を用いて試験片中央部にノッチ加工を行った (右下図)。加工した試験片数は 5 本であり、試験片名称は VNS-1~5 とした。

加工後の試験片は上図の図面に基づき全数検査した。

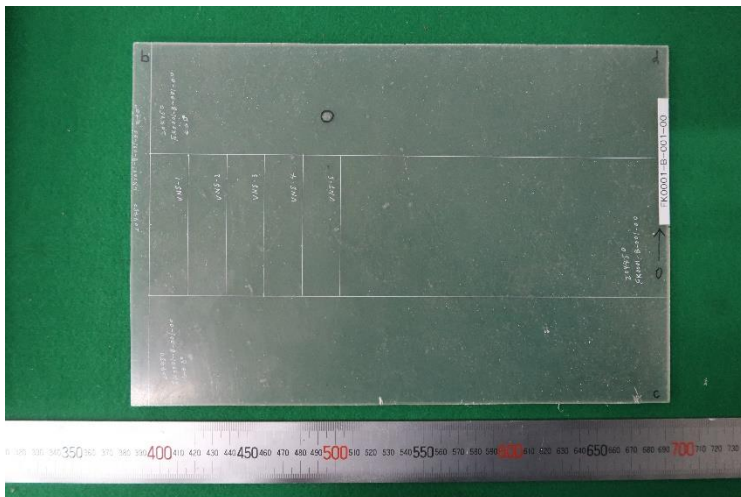


図 試験片の切り出し位置

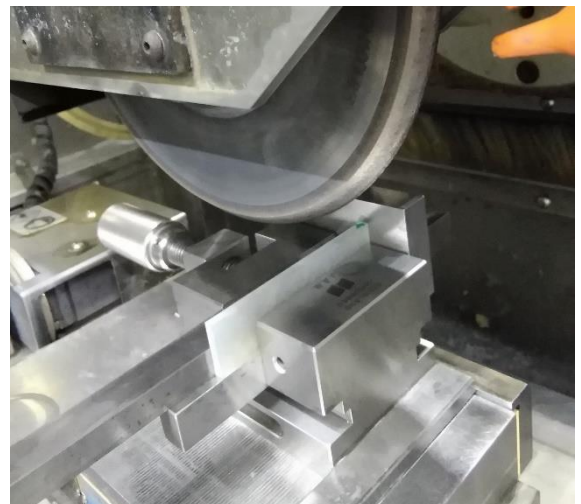


図 ノッチ加工時の状況

## 面内せん断試験

ASTM D5379<sup>1)</sup>に準拠して実施した。試験数、環境、試験条件、取得データ、計測条件に関する概要を下表に示す。面内せん断強度、0.2%オフセット面内せん断強度、面内せん断弾性率、せん断ひずみ、ポアソン比は n=5 の平均値を算出した。

表 面内せん断試験概要

項目	概要
試験規格	: ASTM D5379 <sup>1)</sup>
試験本数	: 5 本
試験温度	: 23°C±3°C
試験雰囲気	: 大気中 (DRY 条件のため環境浸漬時間なし)
試験速度	: 1.27mm/min
データ取得項目	: 面内せん断弾性率、0.2%オフセット面内せん断強度、最大荷重、面内せん断強度、せん断ひずみ、ポアソン比、破断モード、ねじれ
サンプリング周期	: 20Hz

試験片は二軸ゲージ (東京測器) を CN (ひずみゲージ用瞬間接着剤) にて貼付した。また試験結果の妥当性を確認するため、5 本の試験片のうち 1 本については表裏両面に二軸ゲージを貼り付け、ASTM D5379<sup>1)</sup>の Section 6.4 にあるねじり変形有無の評価を実施した。ねじり変形については、ひずみ 0.004 (4000  $\mu\epsilon$ ) における表裏の面内せん断弾性率 ( $G_f$ 、 $G_b$ ) が下式を満たす場合に無視できると判断した。

$$\frac{|G_f - G_b|}{(G_f + G_b)} \times 100 \leq 3$$

試験設備に関する概要情報、並びに試験の様子を以下に示す。試験終了後、試験片の写真撮影を行った。

表 試験設備概要

設備名称	メーカー名	設備型番	容量	その他
試験機	INSTRON	INSTRON 5982	±100kN	N/A
ロードセル	INSTRON	2580-301	±100kN	N/A
ひずみゲージ	東京測器	FCA-2-11-3LJBT-F	N/A	GL:2mm GF:2.08 接着剤:CN

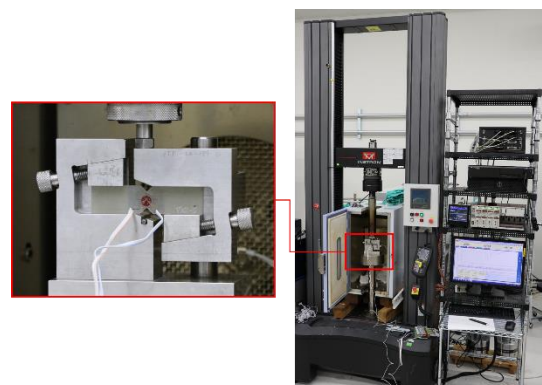


図 試験機の外観と試験治具拡大写真

試験片の破壊状況は ASTM<sup>1)</sup>中に示された表に基づいて判断を行った。

表 試験片破壊モード判定一覧<sup>1)</sup>

First Character		Second Character		Third Character	
Failure Type	Code	Failure Area	Code	Failure Location	Code
Horizontal cracking	H	Gage section	G	Bottom	B
Vertical cracking	V	Notch region	N	Top	T
Angled cracking	A	Side region	S	Left	L
Edge crushing	E	Multiple areas	M	Right	R
Multi-mode	M(xyz)	Various	V	between Notches	N
Other	O	Unknown	U	Adjacent to notches	A
				top and/or bottom Edge	E
				Various	V
				Unknown	U

ポアソン比は ASTM D5379 では算出に関する記述が存在しないため、下式にて算出することとした。

$$\nu_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

上式中のひずみは下図のように定義した。

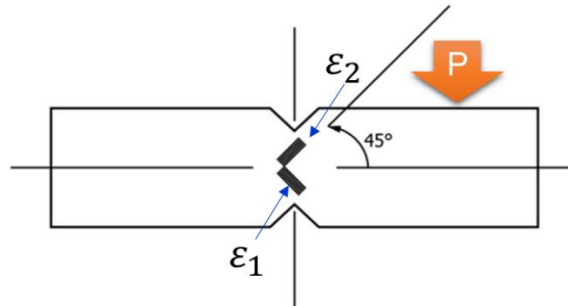


図 ポアソン比算出方法

## 結果

### 試験片用 FRP 平板製作

平板を目視確認した結果、直径 10mm 程度のボイドがあった。試験片切り出し加工時は本ボイドを回避の上、加工を行った。

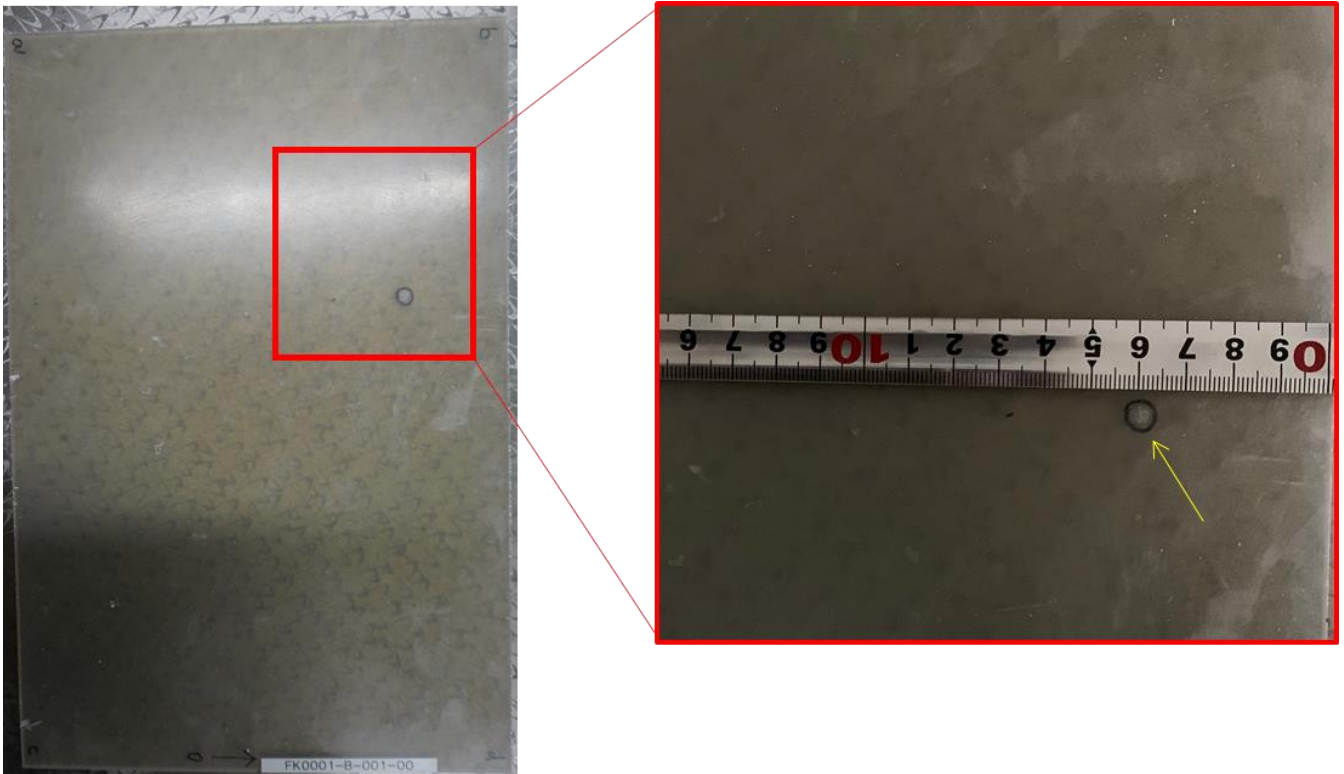


図 試験片用 FRP 平板の外観写真

寸法検査結果の概要を述べる。縦横寸法について、それぞれ 303mm、203mm であり、公差上限よりも 2mm 大きくなっていることを確認した。板厚はマイクロメーターで計測し、3.303~4.331mm となり公差上限よりも最大で 0.8mm 程度厚めになった。またダイヤルゲージで計測した結果、平板の平面度は 1.715mm であり図面要求を満たせなかった。平面度が大きくずれたことから定盤の上に FRP 平板を置き、平板端面の「浮き量」をシックネスゲージで確認したところ（右図参照）、最大で 1.8mm の浮きを確認した。

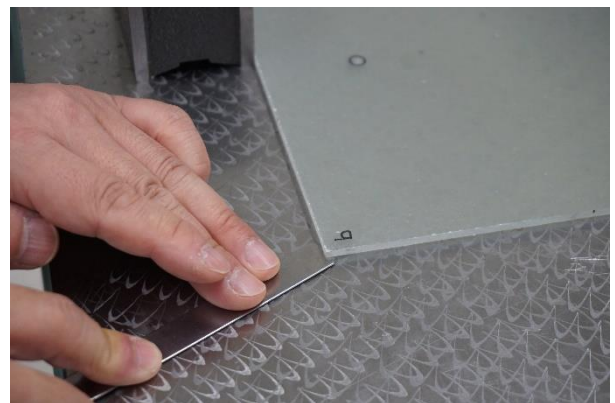


図 FRP 平板の浮き量の確認

面内せん断試験片加工

加工後の試験片の外観写真を右図に示す。加工後に端面の損傷や層間剥離は認められなかった。

面内せん断試験片の寸法検査結果一覧（一部外観検査結果含む）を下表に示す。すべての寸法について図面要求を満たしていた。

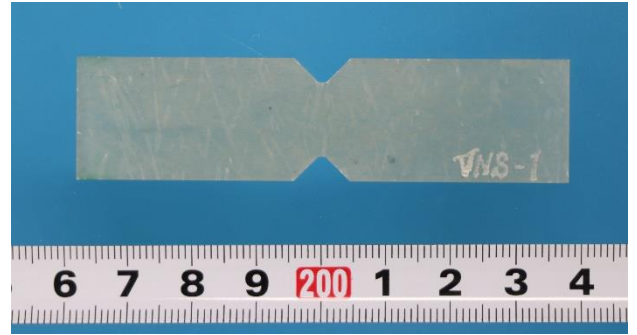


図 面内せん断試験用試験片の外観写真

表 面内せん断試験用試験片の検査結果一覧

依頼番号	-															
管理番号	204450															
品名	面内せん断試験片															
図面番号	-															
材質	GFRP															
数量	5															
室温	23℃															

測定位置 公差 規格 識別	検査機器	V	V	V	V	M	M	M	V	V	V	V	V	V	V	M	
	VNS-1	37.987	38.000	0.013	11.382	3.575	3.573	3.572	1.330	1.331	90° 09'	89° 59'	45° 05'	44° 55'	3.827	3.826	19.034
	VNS-2	38.009	38.012	0.003	11.403	3.554	3.554	3.556	1.325	1.335	89° 51'	89° 57'	44° 58'	44° 58'	3.815	3.813	19.026
	VNS-3	38.008	38.010	0.002	11.404	3.551	3.548	3.547	1.331	1.340	89° 59'	90° 01'	45° 12'	44° 59'	3.816	3.812	19.033
VNS-4	38.007	38.030	0.023	11.407	3.551	3.552	3.557	1.330	1.315	90° 01'	89° 58'	45° 08'	45° 12'	3.805	3.810	19.024	

測定位置 公差 規格 識別	検査機器	V	V	V	V	V	V	I	I							
	VNS-1	76.04	0.001	0.009	0.008	0.001	0.039	良好	良好							
	VNS-2	76.04	0.011	0.015	0.006	0.001	0.012	良好	良好							
	VNS-3	76.04	0.001	0.028	0.003	0.006	0.013	良好	良好							
VNS-4	76.04	0.012	0.001	0.001	0.002	0.030	良好	良好								

測定位置 公差 規格 識別	検査機器	V	V	V	V	M	M	M	V	V	V	V	V	V	V	M	
	VNS-5	38.013	38.021	0.008	11.402	3.549	3.547	3.545	1.342	1.297	90° 06'	90° 03'	45° 16'	44° 58'	3.809	3.816	19.027
	以下余白																

測定位置 公差 規格 識別	検査機器	V	V	V	V	V	V	I	I								
	VNS-5	76.04	0.004	0.002	0.007	0.006	0.037	良好	良好								
	以下余白																

面内せん断試験

n=5 の平均値である面内せん断試験結果を下表に示す。

表 面内せん断試験の結果

項目	単位	結果 (平均値)
面内せん断弾性率	GPa	3.17
0.2%オフセット面内せん断強度	MPa	65.9
面内せん断強度	MPa	92.8
破断ひずみ	%	3.99
ポアソン比	-	0.46

試験後の試験片の外観写真を下図に示す。すべての試験片について、右上から左下に破壊領域が分布している様子を確認した。本破壊モードは、ASTM D5379<sup>1)</sup>でランダムに繊維の配向した SMC 材の適切な当該モードとして定義された「AGN」に該当した。

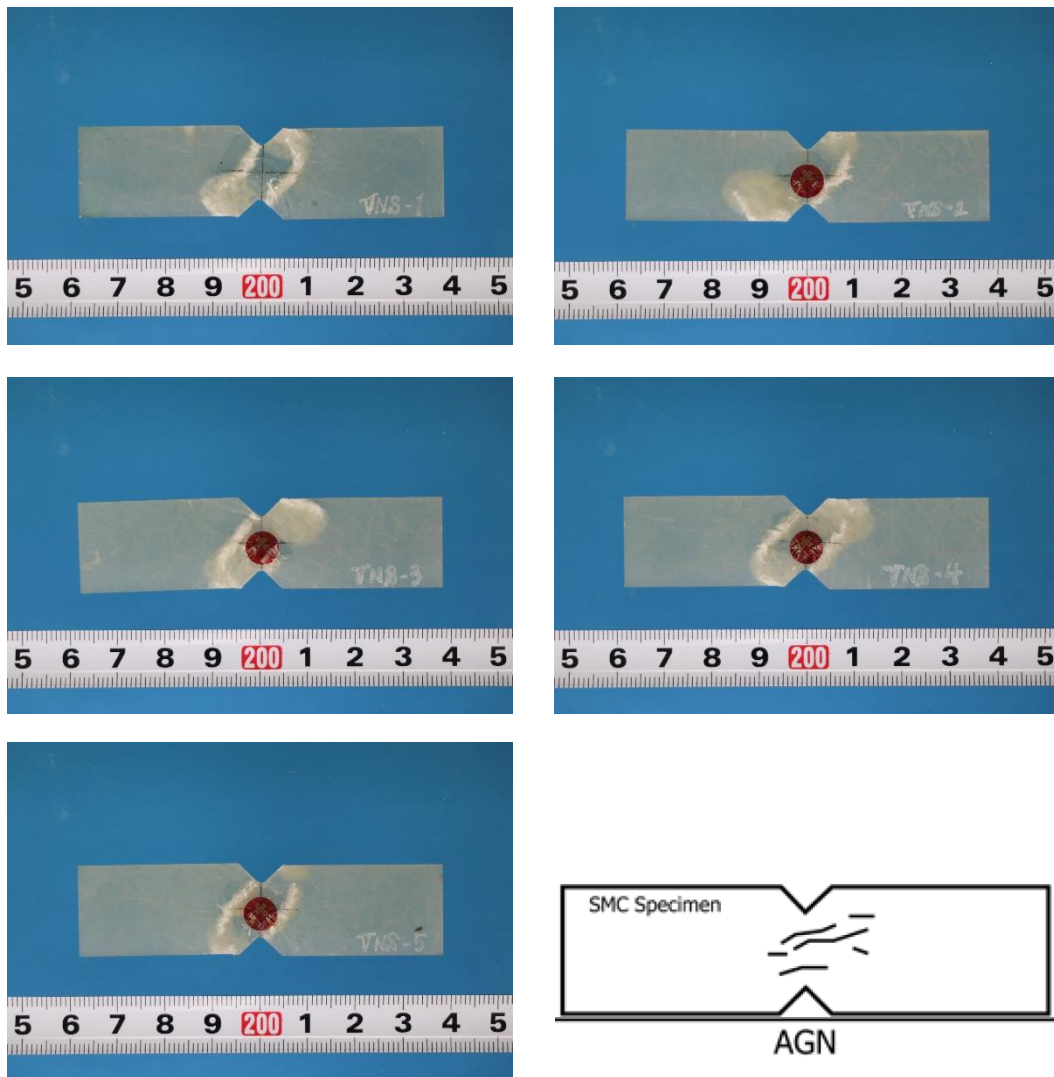


図 試験後の試験片

(上段：VNS-1、2 中段：VNS-3、4 下段：VNS-5、ASTM 定義の破壊モード<sup>1)</sup>)



ねじり有無を確認するため、表裏のひずみから算出した面内せん断弾性率の誤差割合を算出した結果、0.7%となり3%よりも低いことから、ねじりモードの変形は本試験中に生じていないことが明らかとなった。

また代表的な SS 線図を下図に示す。図中、青線で示しているのは近似直線であり、X 軸右側にシフトしているのが 0.2% オフセット面内せん断強度を算出するための近似線である。どの試験片についても、およそひずみ 1% 超から非線形を示していることが明らかとなった。また試験片のうち数本は、歪み 2.2% から 3.2% という最大応力を示す前段階で初期破壊に由来する線図の変形を確認した。

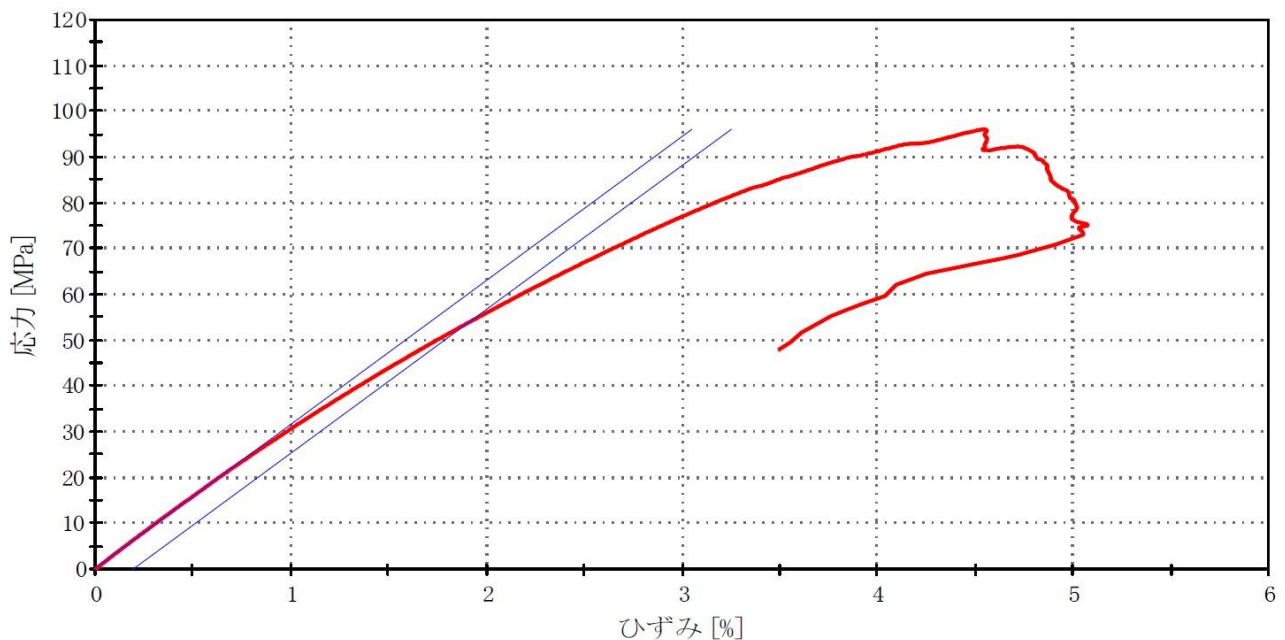
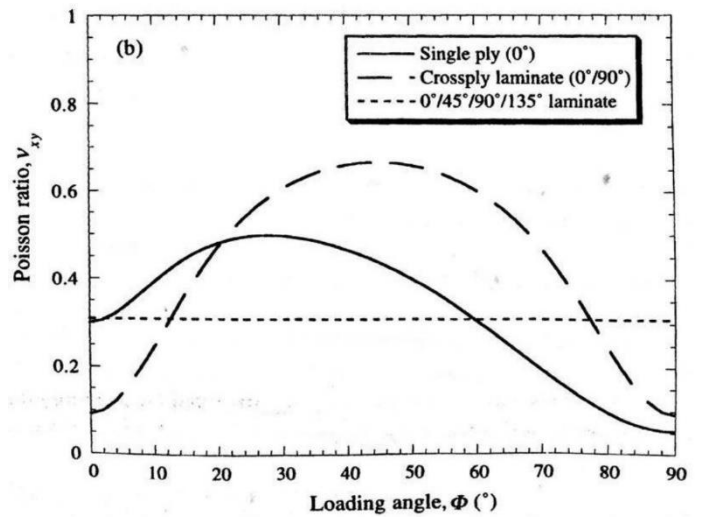


図 面内せん断試験における SS 線図 (試験片名称: VNS-2)

## 考察

### ポアソン比の値について

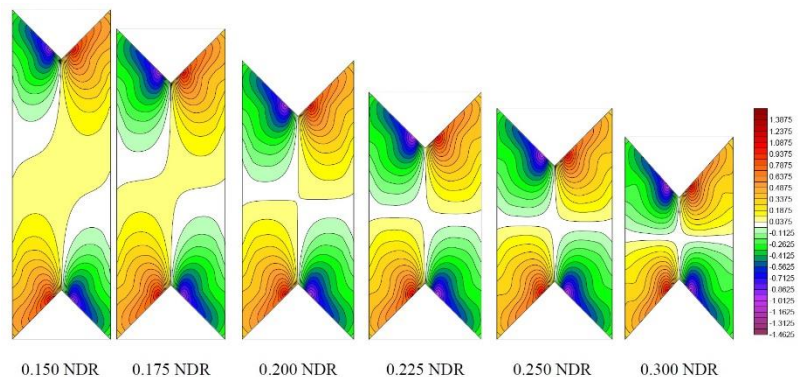
疑似等方に積層された連続繊維を強化繊維とした FRP ではポアソン比は 0.3 程度、 $0^\circ$  と  $90^\circ$  のみに連続繊維が配向した直交積層や、特定の方向 ( $0^\circ$ ) のみに連続繊維が配向したものでは、力のかかる方向によって当該値はそれぞれ 0.05~0.5、0.1~0.7 程度を示すことがわかっている<sup>2)</sup>。この関係を縦軸に面内のポアソン比、横軸に力がかかる角度を相関図として示したものを右図に示す。



今回評価した GFRP は不飽和ポリエステルをマトリックス樹脂として、強化繊維には規定長さにカットされたガラス繊維をランダムに配向したガラスマットを強化繊維としている。ランダム配向であるため、疑似等方と同等の 0.3 程度を示すと想定されたが、今回はそれよりも大きな値となった。本相違点の主因について考察する。

図 複数パターンで積層された FRP について異なる角度で力のかけた場合のポアソン比の変動<sup>2)</sup>

既述したポアソン比の評価<sup>2)</sup>では、矩形の試験片を引張ることによって求めているため、応力集中が殆ど存在しない理想的な状況での評価になっていると考えられる。その一方で今回評価した GFRP は強化繊維がランダムに配向していることから矩形体での面内せん断特性評価が不可能であるため、double V-notch という形状タイプの試験片を用いている。本試験片形状では V-notch をつけることにより応力集中を回避し、評価範囲においてできる限り均一に応力が分布するように設計されている。過去にはノッチ先端の R、ノッチ間の距離、ノッチ角度等が検証されていた<sup>3)</sup>。ノッチ間距離の最適化検討の一例を右図に示す（評価対象は連続繊維を疑似等方積層したもの：



[0/+45/-45/90]<sub>2s</sub>)。本検討においては、右図中 0.2、及び 0.225NDR が評価領域における応力分布が一定であるという判断がされている。

図 double V-notch 試験片形状検討においてノッチ先端間の距離の異なる形状での面内せん断応力分布比較<sup>3)</sup>

面内せん断応力分布図を見るとわかるように、 $+45^\circ$  方向と $-45^\circ$  方向でそれぞれ引張、圧縮という異なる荷重モードが生じていることがわかる（本図中は ASTM D5379 とは違い、ノッチの右側を上引張り上げるといふ荷重を想定していることに注意）。これらの事前情報を踏まえ、今回得られたポアソン比について考察する。

一つの可能性が、材料そのものの有する異方性によるものである。今回評価した GFRP では、一般的には均質材と想定されている。しかしながら、引張弾性率と比較して圧縮弾性率が低いと想定すると、同じ荷重が引張と圧縮でかかった場合、異方性の無い均質材と比較し、圧縮ひずみが引張よりも大きくなる。これはポアソン比の上昇となり、均質材で 0.3 程度と予想された当該値の増加の可能性の一つとなる。試験後の試験片をみると、実際に圧縮方向での破壊（右上から左下へ破壊）が進行していることから圧縮破壊が優先的に進行しており、本推測を支持する一事象と考えられる。本事象の裏付けは圧縮試験を行うことで圧縮弾性率を取得し、引張弾性率と比較するというのが一案である。

もう一つの可能性として、試験片に貼り付けたゲージ角度の誤差という可能性が考えられる。ゲージの角度がずれることで評価領域の圧縮と引張という応力分布状況に変化が生じ、例えば引張領域を計測するひずみゲージがより圧縮領域に、同様に逆のことがもう一つのひずみゲージに生じることでポアソン比が等方材料よりも大きくなったというものである。本仮説の妥当性は詳細な応力解析によって検証していきたい。

## 不飽和ポリエステルを用いた GFRP 圧縮系試験における形状精度実現の重要性

試験片を用いた材料試験では試験片の形状精度がポイントである。引張試験と比較し、圧縮試験では特に試験片形状の精度が大変重要となる。これは、圧縮系試験では試験片の精度が低いと、試験中に試験荷重が軸心からずれる偏荷重が生じ、試験データの正確性が低下することに加え、試験治具や試験機に試験荷重が伝わることで当該治具や試験機が破損する恐れがあることに由来する。

評価した FRP のマトリックス樹脂として用いた不飽和ポリエステルは、硬化時に体積が低下する硬化収縮が大きい。この影響から試験片加工用 FRP 平板は、平面度が 1.7mm を超え、定盤に置いた際に最大 1.8mm の浮きが生じるなど、FRP 平板成形精度に課題があった。プレス機による成形でこの成形精度は改善できる可能性もあるが、今回評価したいのは「ハンドレイアップで成形した GFRP」であるため、プレス機等のハンドレイアップとは異なる均一荷重はかけられない。ハンドレイアップ成形では一般的には片面は成形面にできる一方、裏面は強化繊維由来の凹凸のある解放面であるのが一般的である。そのため、両面を成形面とするには成形時に FRP 平板を一度裏返す必要があるなど、高精度の GFRP 平板の成形は困難であった。このような背景もあり、成形後の FRP 平板は試験片寸法に近い矩形に切り出した後、成形面を追加工することにより今回適用した面内せん断試験に使用できる形状精度を実現した。

上述の加工工程の見直しによる試験片形状精度実現により、結果でも述べた通り試験中にねじりが生じていないことを確認できていることから、今回得られた面内せん断試験データは妥当であると考えられる。

面内せん断特性における SS 線図の解釈について

面内せん断試験によって得られた SS 線図（ひずみ-応力線図）を右下図に示す。各試験片の当該線図を色分けして示し、0.2%オフセット面内せん断強度、面内せん断強度の平均値を破線として示している。

各試験片の SS 線図を拡大して検証した結果、ひずみが概ね 1.0~1.5%を超えたあたりから非線形領域が出現する傾向にあった。これに対し、ヒステリシスを示さないといわれる 0.2%オフセット面内せん断強度を示したひずみは 2~2.5%であり、上記のひずみより 1%程度大きな値となっている。LCF (Low Cycle

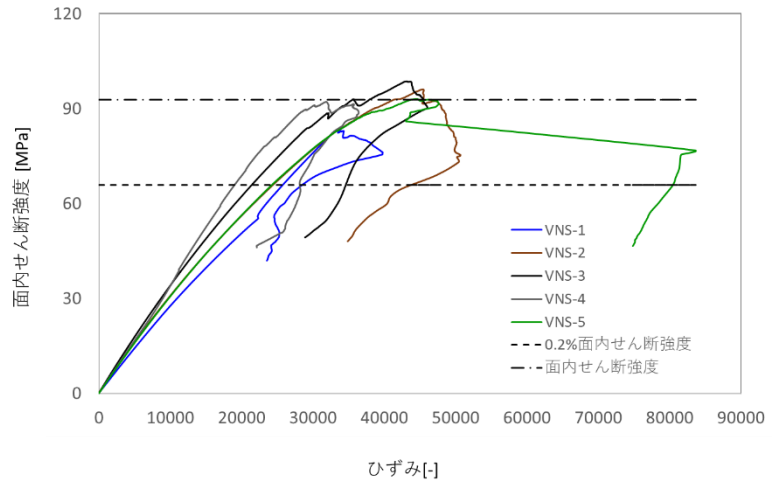


図 面内せん断試験の SS 線図

Fatigue) のような実使用上で日に数回程度の荷重負荷であれば、0.2%オフセット荷重とその際のひずみを設計許容値として用いるのは大きな問題は無いと考えられる。しかし、1分間に数

回から数十回の負荷というような HCF (High Cycle Fatigue) を想定するのであれば、SS 線図上で非線形が生じない歪み 1.0~1.5%程度を荷重上限として想定すべきと考えられる。いずれにしても、FRP はヒステリシスを示さないのはもちろん、弾性域で使用するのが一般的であり、かつ長期寿命の評価には繰り返し疲労負荷に対する応答挙動評価が重要である。よって、今回得られた材料データだけで設計許容値を判断するのではなく、複数水準の応力比による動的疲労試験を実施することは不可欠であると考えられる。

また、VNS-5 が高ひずみ領域で示した線図の挙動を考察する。右上図で見てもわかるように、VNS-5 のみが 50000  $\mu st$  以上の領域でひずみ軸にほぼ平行に線図が推移する、すなわち応力が増加せずに変形だけが進行するという状況がみられる。本状況を検証するため、せん断ひずみ ( $\epsilon_1 + \epsilon_2$ ) が 50000  $\mu st$  を超えた領域での  $\epsilon_1$  と  $\epsilon_2$  の関係をグラフとして示したのが右図である。尚、 $\epsilon_1$  と  $\epsilon_2$  については本報の 5 頁の式を参照のこと。右図中では時間経過に伴い、 $\epsilon_1$  の軸に対し、右側から左側にひずみデータが移動

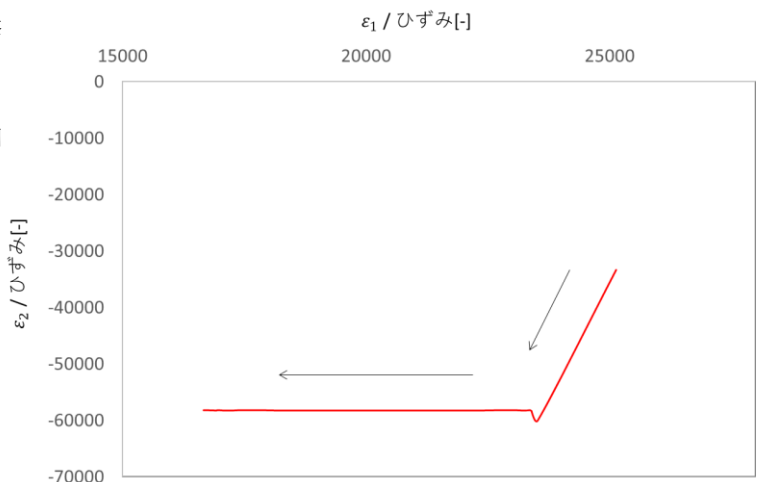


図 VNS-5 の  $\epsilon_1$  と  $\epsilon_2$  の関係

する（右図中の矢印の方向）。これは、試験の進行に伴い、引張に該当するひずみが緩和され、圧縮ひずみは維持されることを意味している。本事象を説明するには ASTM D5379 という材料試験自体の特徴を理解する必要がある。

ASTM D5379 は高ひずみ領域で強いひずみ分布を示すことが知られている。Matthew らはこのひずみ分布の状況を DIC (Digital Image Correlation) によって明らかにした画像を紹介している。当該評価結果を右図に示す<sup>3)</sup>。評価した材料は異方性の無い PU (ポリウレタン) 樹脂である。右図を見ると、せん断ひずみは試験変位増加に伴い右上から左下にかけて圧縮による高いせん断ひずみ分布を示していることがわかる。このような特徴的なせん断ひずみ分布が前頁で示したような圧縮ひずみが優先的に高まるという事象につながっていると判断する。

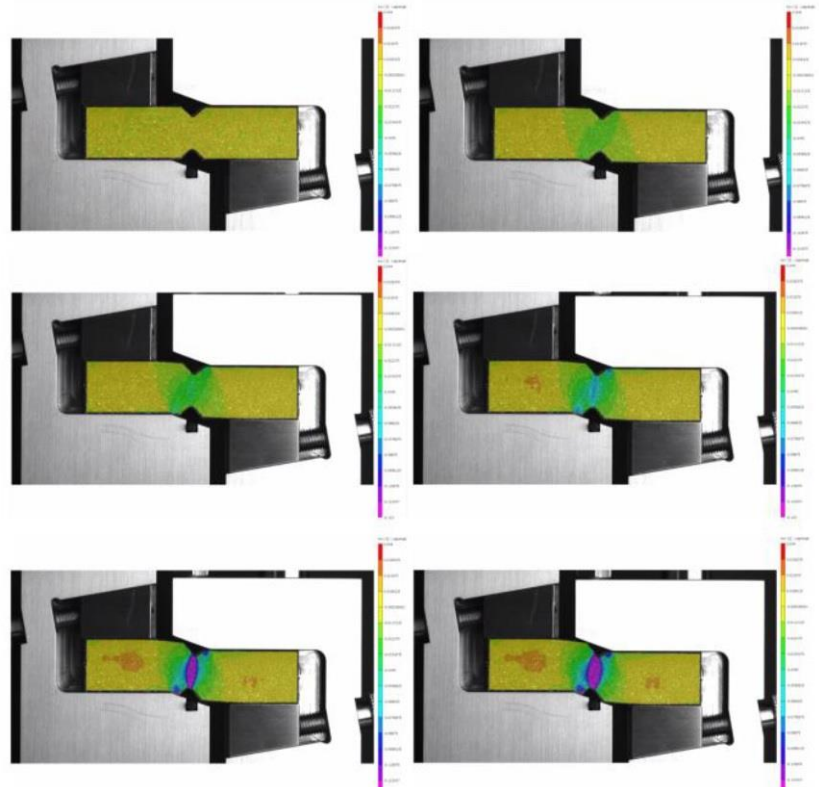


図 DIC による PU 樹脂の試験中のせん断ひずみ分布変化<sup>3)</sup>

以上の通り、ある程度以上のせん断ひずみがかかると、せん断試験で回避すべきひずみ分布が顕著になり、試験としては不適切になっていると考えるべきである。よって ASTM D5379 においては、高ひずみ領域の評価データをせん断荷重モードのデータとして扱うのは不適切であり、およそ 50000  $\mu\text{st}$  以上のせん断ひずみの生じる領域でのデータの解釈には注意が必要である。

## まとめ

ガラスマットを強化繊維、不飽和ポリエステルをマトリックス樹脂としてハンドレイアップで成形した GFRP について、面内せん断試験を実施し、面内せん断特性として強度、弾性率、ポアソン比、0.2%オフセット強度のデータ取得に成功した。今回得られた結果から、当該 GFRP は面内せん断モードの荷重負荷に対して異方性を示している可能性が高く、応力解析等のシミュレーションには今回取得したデータを用いることが必要であると考えられる。歴史の長いガラス繊維マットを強化繊維とした GFRP のせん断特性評価として大きな一歩であり、今後、当該試験手法を用いて GFRP の層間せん断特性の取得を進めていく。

## 参照文献

- 1) ASTM D5379/D5379M-12, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.
- 2) Hull, D., Clyne, T. W. (1996). *An Introduction to Composite Materials* (2nd Editioned.). Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge.
- 3) Matthew Crossan, Jeffrey T. Wood, (1996). *Mechanical Characterization and Shear Test Comparison for Continuous-Fiber Polymer Composites*. The University of Western Ontario.

以上