

GFRP 向けガラスマット材 0° /90° 異方性が引張特性に与える影響

背景

GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastics）は、規定長さにカットされたチョップ材をランダムに配向したガラスマットを強化繊維に、マトリックス樹脂に不飽和ポリエステルを用いた複合材料である。ランダムに配向したガラスマットは易成形性に加え、異方性も少ないとされている。しかし、現場での経験からガラスマットには、ガラスマットのロールの引き出し方向とその垂直方向で異方性があることがわかっている。ただし、その異方性について定量的に評価を行ったことは無いのが現状である。

目的

ガラスマットをロールの引き出し方向と、その垂直方向を長手方向に配向させた引張試験片をそれぞれ用い、引張強度、引張弾性率、破断伸度、ポアソン比の引張特性データを比較し、異方性存在有無を定量的に判断する。

結論

引張強度、引張弾性率、ポアソン比は強化繊維の配向による明確な異方性を示すことが、t検定から明らかとなった。ガラスマットの引き出し方向に配向した引張試験特性は、その垂直方向と比較し、強度と弾性率の平均値で12から13%程度高く、同ポアソン比は10%低い数値となった。

概要

ガラスマットの引き出し方向である0°方向（MD）とその垂直方向である90°方向（TD）を長手方向に配向させた引張試験片について、それぞれ、n=5で引張特性を評価した。試験は23±3°C、Dryの環境で実施した。強化繊維の配向を右図に示す。引張試験の結果、強化繊維の配向によって引張特性に差異が認められた。一例として引張強度を縦軸に、横軸に0°方向と90°方向をそれぞれ青と黄のプロットデータとして表示したグラフを右図に示す。0°方向に積層した試験片が、90°方向に積層したものよりも高いデータを示していることがわかる。平均値の同等性を定量的に判断するためt検定を行った結果、引張強度に加え、引張弾性率、ポアソン比のp値は有意水準の0.05を下回り、強化繊維の配向による違い、すなわち異方性を示すことが明らかとなった。

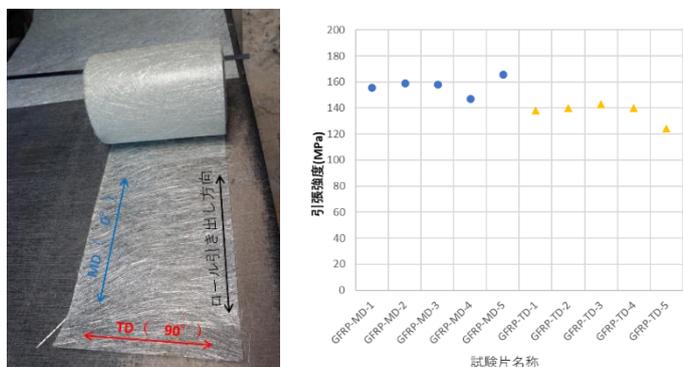
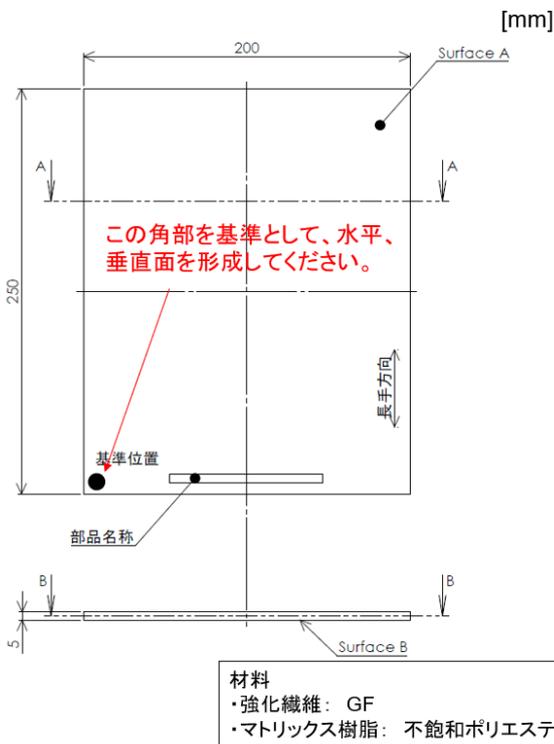


図 ガラスマットの方向性（左）と引張試験結果の比較（右）

評価準備と評価方法

試験片用 FRP 平板製作

E ガラスチョップドストランドマット（以下、ガラスマット）のロールから、引き出し方向（0° 方向）、または同方向から垂直方向（90° 方向）が、それぞれ平板の長辺方向に配向できるような寸法で材料を切り出した。切り出したそれぞれのガラスマットに不飽和マトリックス樹脂を含浸の上、平板の長辺方向が 0° 方向、同方向が 90° 方向となるよう FRP 平板をハンドレイアップで製作し、それぞれ GFRP-MD、GFRP-TD とした。使用したマトリックス樹脂はどちらも同一ロットの主剤、硬化剤からなる不飽和ポリエステルである。当該平板は、5.0mm 厚みを狙い、縦 250mm、横 200mm を狙い寸法とした。平板の図面を下図に示す。



Note:

- 外寸は参考値。
- 厚みは狙い値であり、公差は無し。
- 長手方向はサンプル名称記載部分を底面にした際の垂直方向とする。長手方向を示す矢印、並びに基準となる角部に**黒塗り丸印**と「**基準位置**」という文字を油性マジック等で記載すること。
- サンプルの表面仕様は Table A、GF積層配向はTable Cによる。
- サンプル名称はTable Bの定義に基づき、図中の指定領域に消えないような手法で記載すること。

Table A: 基本構成

Surface A	Surface B
型成形	解放面

Table B: サンプル名称定義

共通	変動条件XX
GFRP	MD or TD

Table C: GF積層配向

MD	TD
長手方向がロール引き出し方向	長手方向がロール引き出しと垂直方向

* [X]内の値はTable Bによる

部品名称:
GFRP- [XX]

図 試験片用 FRP 平板図面

ガラスマットのロールと硬化中の平板の外観写真を以下に示す。0° 方向と 90° 方向の定義は画像中に示した。成形後の FRP 平板はトリミングを行った後、寸法を計測した。

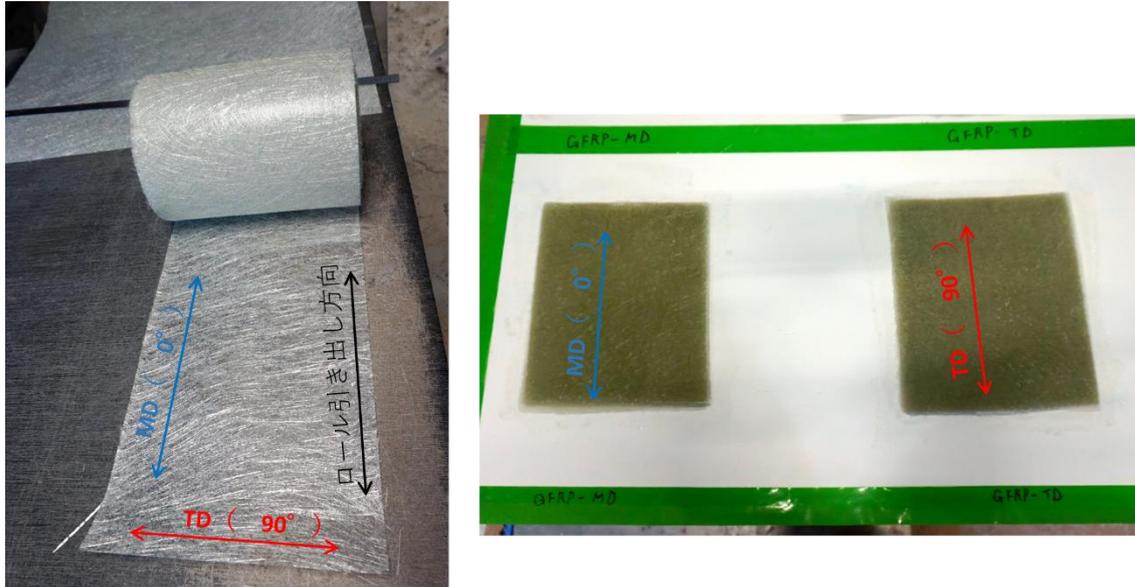


図 ガラスマットのロール (左) 硬化中の平板 (右)

引張試験片加工

作製した FRP 平板である GFRP-MD、GFRP-TD から、寸法 200×25 mm の短冊形状試験片を罫線にて定義の上 (左下図)、複合材料裁断機 (AC-500CF) を用いて切り出しを行った (右下図)。切り出した試験片は、その後端面を平面切削盤 (TS-84) にて研削砥石#150 を用い、端面を研磨した。加工した試験片数は総計 10 本であり、試験片名称は切り出した FRP 平板の名称に応じ、GFRP-MD-1~5、GFRP-TD-1~5 とした。加工後の試験片については、幅公差±0.5mm にて全数寸法検査を行った。厚みは FRP 平板厚みに由来するため、公差は設定せず断面積算出のため 3 か所の実測計測を行った。



図 試験片の切り出し位置



図 加工時の状況

引張試験

JIS K7164 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。引張強度、引張弾性率、破断伸び、ポアソン比は n=5 の平均値を算出した。

表 引張試験概要

項目	概要
試験規格	JIS K7164-2005 プラスチック-引張特性の試験方法-第4部：等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件
試験本数	10本 (GFRP-MD、GFRP-TD それぞれ5本)
試験温度	23°C±2°C,
試験雰囲気	大気中
試験速度	1.0mm/min
エメリー布	#150
データ取得項目	最大荷重、強度、弾性率、ポアソン比
サンプリング周期	20Hz

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。試験前後で、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
グリップ	MTS	647.10A	N/A	N/A
動ひずみ測定器	東京測器	DA-17A	N/A	N/A
ひずみゲージ	東京測器	FCA-6-11-3LJBT	N/A	GL:6mm GF:2.10 接着剤:CN

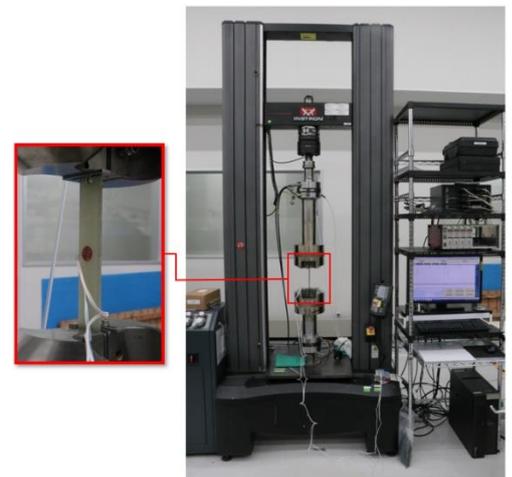


図 試験機の外観と試験片拡大写真

試験片の破壊状況は ASTM¹⁾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¹⁾

第1特性 First Character		第2特性 Second Character		第3特性 Third Character	
破断モード Failure Mode	コード Code	破断エリア Failure Area	コード Code	破断位置 Failure Location	コード Code
角度あり Angled	A	グリップ/タブより内側 Inside grip/tab	I	下部 Bottom	B
エッジ層間剥離 edge Delamination	D	グリップ/タブ部 At grip/tab	A	上部 Top	T
グリップ/タブ部 Grip/tab	G	<グリップ/タブより1Wの位置 <1W from grip/tab	W	左 Left	L
横方向 Lateral	L	評定部 Gauge	G	右 Right	R
複合モード Multi-mode	M	複数のエリア Multiple areas	M	中央 Middle	M
長手裂け long. Splitting	S	多様 Various	V	多様 Various	V
爆発的 eXplosive	X	未知 Unknown	U	未知 Unknown	U
その他 Other	O				

引張強度、引張弾性率、ポアソン比、破断伸度は以下の方法にて求めた。

表 引張試験特性算出法

項目	算出方法
引張強さ	試験片が破断するまでに耐えた最大の荷重を、試験片の初期断面積で除することで求めた。
引張弾性率	ひずみゲージで計測した縦ひずみを用いて算出
ポアソン比	ひずみゲージによる縦ひずみと横ひずみで測定
破断伸度	破断した引張試験片の標点間の伸び量 (L - L ₀) を標点間距離L ₀ で割り、百分率で表した値

結果

試験片用 FRP 平板製作

成形時に特筆すべき硬化不良は起こらなかった。また目視検査にて、樹脂の未含浸領域、繊維の飛び出し、剥離等の問題は見られないことを確認した。GFRP-MD、GFRP-TD の縦横寸法を確認した結果、GFRP-MD はそれぞれ 251.4mm、202.7mm、GFRP-TD は同 251.9mm、201.9mm であった。板厚は GFRP-MD は 5.16mm、GFRP-TD は 5mm であった。



図 FRP 平板外観写真 (左：GFRP-MD 右：GFRP-TD)

引張試験片加工

加工後の試験片の外観写真を下図に示す。多くの試験片において、加工後に端面に層間剥離と考えられる変色が認められた。GFRP-TD-1 の試験片を一例に加工端部の損傷状況を下図に示す。黄色の点線で囲まれた領域に複数の変色箇所が存在する様子を確認できる。同様の事象が他の試験片にも生じていた。

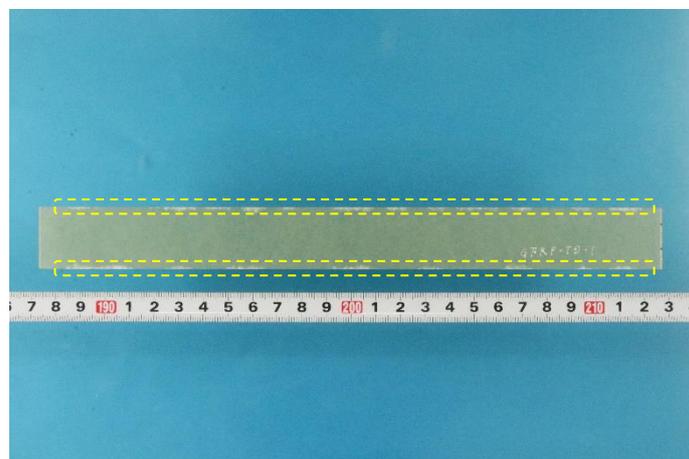
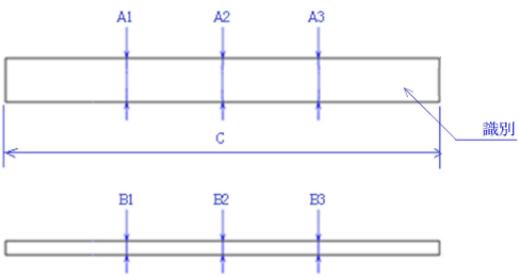


図 試験片の加工端面に認められた変色 (写真の試験片は GFRP-TD-1)

引張試験片の寸法検査と外観検査の結果を下表に示す。幅寸法については、公差要求を満たしていた。厚みは 4.7 から 5.3mm の変動値を示した。また、外観検査から加工端面での剥離、または空隙がすべての試験片で生じていることが明らかとなった。

本損傷はほぼすべての試験片に対して存在しており、また今回の評価は異方性を評価する相对比较であることを踏まえ、試験片はそのまま評価することとした。

表 引張試験用試験片の寸法検査と外観検査結果一覧

依頼番号	O21-0119-01		 <p>検査機器:外側マイクロメータ(M)「管理No.65310187」「管理No.59127918」ノギス(N)「管理No.1186869」目視(I)</p>															
管理番号	204600																	
品名	引張試験片																	
図面番号	-																	
材質	GFRP																	
数量	10																	
室温	23℃																	
測定位置	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C	外観										
公差	±0.5	±0.5	±0.5	-	-	-	-	-										
規格	25	25	25	実測値	実測値	実測値	≥250	-										
識別	検査機器	M	M	M	M	M	M	N	I									
GFRP-MD-1	25.043	25.046	25.036	5.155	5.245	5.276	252.71	空隙有り										
GFRP-MD-2	25.044	25.047	25.039	5.311	5.358	5.315	252.63	剥離有り										
GFRP-MD-3	25.058	25.060	25.053	5.106	5.427	5.354	251.83	空隙有り 剥離有り										
GFRP-MD-4	25.061	25.056	25.047	5.204	5.260	5.230	251.58	空隙有り 剥離有り										
GFRP-MD-5	25.061	25.062	25.059	5.133	5.119	5.177	251.42	空隙有り 剥離有り										
GFRP-TD-1	25.061	25.058	25.052	4.907	4.933	4.612	251.73	空隙有り										
GFRP-TD-2	25.058	25.063	25.050	4.956	4.952	4.878	251.64	空隙有り										
GFRP-TD-3	25.059	25.057	25.055	4.862	4.828	4.795	251.30	空隙有り 剥離有り										
GFRP-TD-4	25.057	25.050	25.059	4.793	4.780	4.792	251.34	空隙有り 剥離有り										
GFRP-TD-5	25.063	25.066	25.070	4.978	4.823	4.864	251.65	空隙有り 剥離有り										

引張試験

引張強度、引張弾性率、ポアソン比、破断伸度の各物性データについて、GFRP-MD、GFRP-TD の生データをそれぞれ青色、黄色のポイントデータとしてプロットしたグラフを以下に示す。引張強度は GFRP-MD、GFRP-TD でそれぞれ 147 から 166MPa、124 から 143MPa、引張弾性率は同 11.0 から 12.2GPa、9.58 から 10.3GPa、ポアソン比は同 0.32 から 0.36、0.3 から 0.31、破断伸度は同 1.64 から 1.91%、1.65 から 1.93%の値を示した。GFRP-MD と GFRP-TD の比較により、前者の方が引張強度、引張弾性率、ポアソン比で高い傾向を示し、異方性の存在が示唆された。

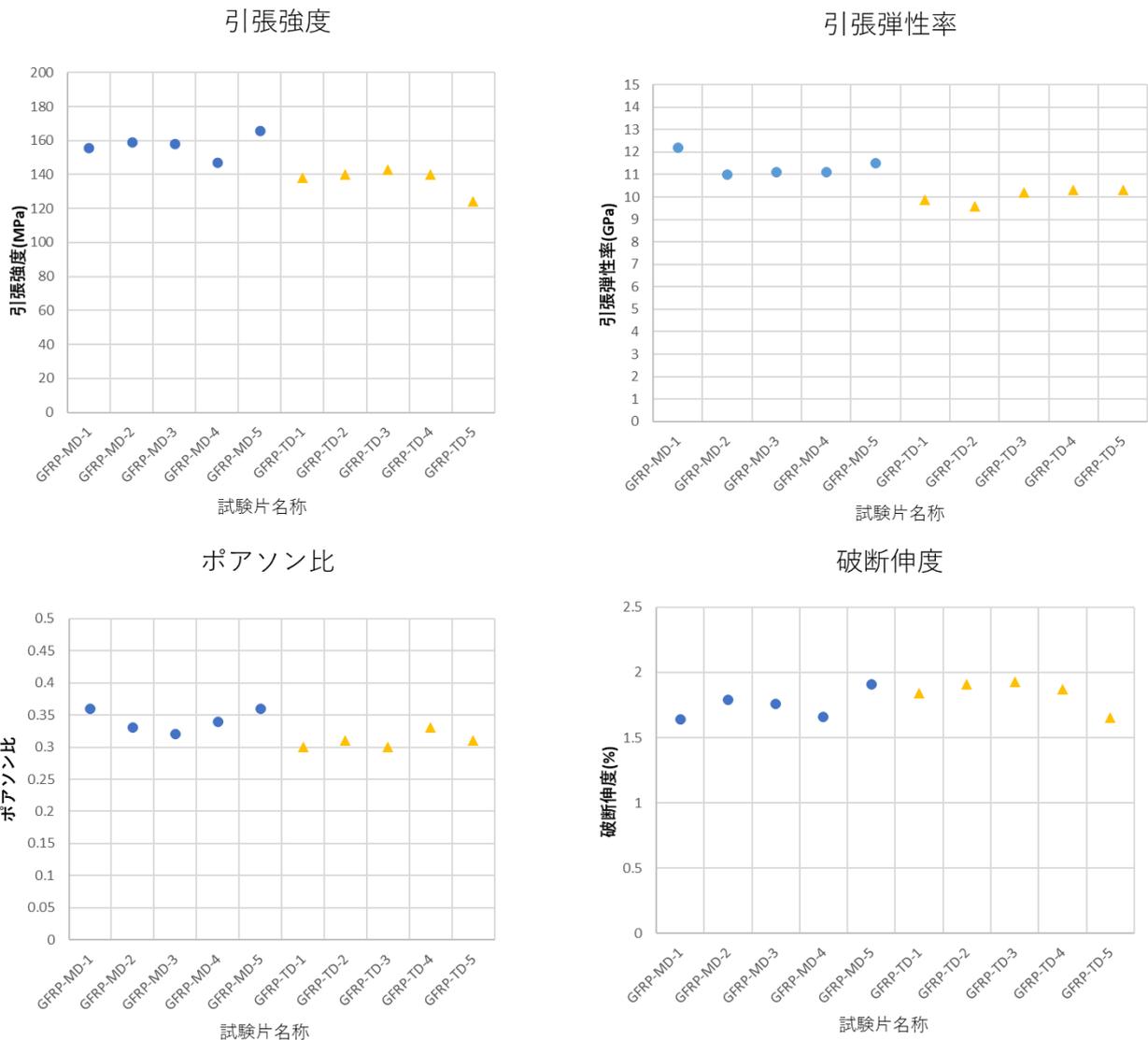


図 引張試験結果概要

試験後の GFRP-MD 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、層間剝離を伴う破壊が評定部及びタブ寄りの位置で発生している様子を確認した。本破断モードは試験片破壊モード判定一覧表¹⁾から「MGM」及び「MWB」であると判断した。

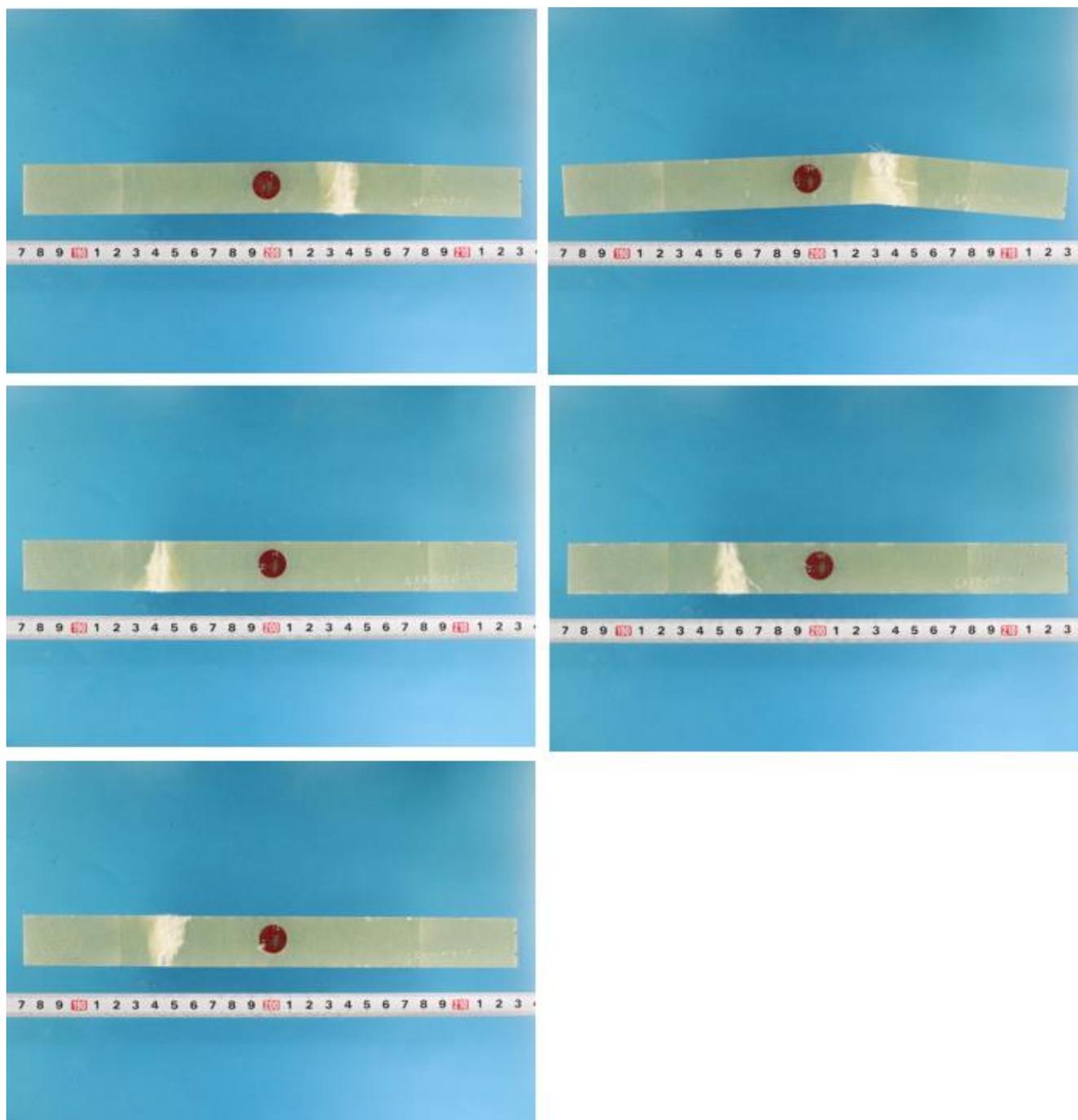


図 試験後の GFRP-MD 試験片外観写真

(上段：GFRP-MD-1、2 中段：GFRP-MD-3、4 下段：GFRP-MD-5)

試験後の GFRP-TD 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、GFRP-MD 同様、層間剝離を伴いながら評定部及びタブ寄りの位置で破断している様子を確認した。本破断モードは「MGM」及び「MWB」、「MWT」であった。

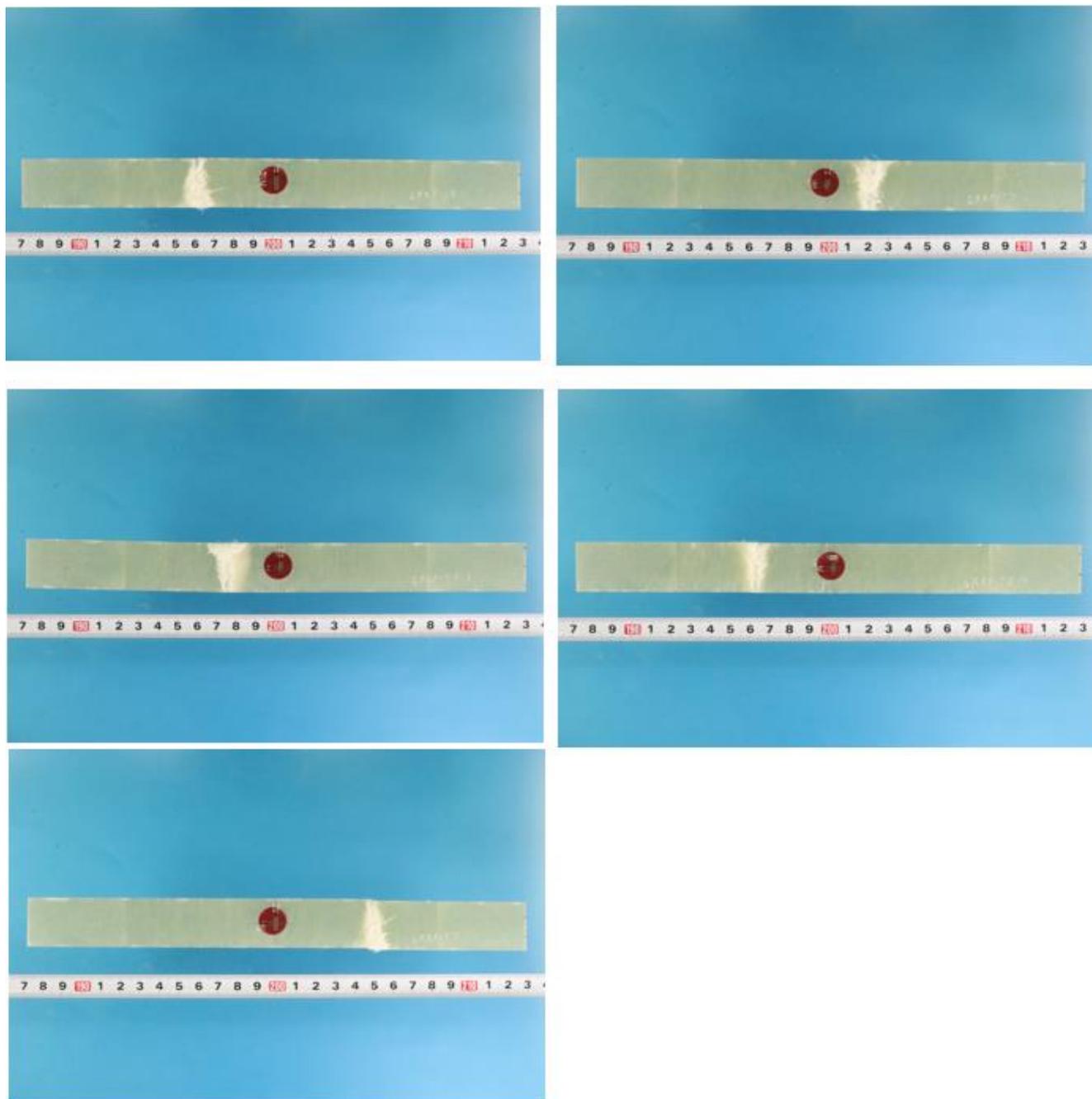


図 試験後の GFRP-TD 試験片外観写真

(上段：GFRP-TD-1、2 中段：GFRP-TD-3、4 下段：GFRP-TD-5)

考察

ガラスマットの切り出し方向の違いによる異方性の存在有無について

今回評価を行った GFRP の強化繊維であるガラスマットは、ロールに対して長手方向である 0° 方向とその垂直方向である 90° 方向が試験片の引張方向になるよう切り出したものである。この強化繊維の切り出し方向の違いが、FRP 材料特性の違いとして表現されているかを客観的に判断するため、GFRP-MD と GFRP-TD に関して各データに関する等分散を F 検定で確認後、引張強度、引張弾性率、破断伸度、ポアソン比の t 検定（両側検定）を有意水準 $\alpha=0.05$ にて実施した。検定には Excel のデータ分析の「t 検定：等分散を仮定した 2 標本による検定」を用いた。算出した p 値の結果を下表に示す。

この結果から、引張強度、引張弾性率、ポアソン比において平均値に有意差が存在すると判断された。判定した 4 項目のうち、3 項目の平均値にガラスマットの切り出し方向による有意差が生じたことから、当該方向による異方性は存在すると考えられる。

表 t 検定の結果得られた p 値

GFRP-MD と GFRP-TD 比較項目	p 値（両側）
引張強度	0.0021**
引張弾性率	0.0010**
破断伸度	0.2430
ポアソン比	0.0108**

このような異方性の存在を確認した以上、積層の段階でランダム配向、すなわち異方性は無いと思われがちなガラスマットであっても繊維配向に配慮をすることが求められる。例えば高応力のかかる方向に 0° 方向でガラスマットを積層するといったことが一案である。そして、積層方向を合わせることで同じ目付のガラスマットを積層したとしても強度や弾性率を高めることが可能となる。本アプローチは材料使用量の削減はもちろん、GFRP の異方性を考慮した設計思想の最適化にもつながる。

異方性の生じた原因

ガラスマットはその切り出し方向によって異方性があるということは、経験的には知られていたことであったが、今回の定量評価によりその存在が明確となった。ここでは異方性発生の原因について考えてみたい。

ガラスマットは、下図示すようにランダムに配向したものをロール状に巻き取ったものである。



図 ガラスマットの拡大写真

ガラスマットは、ガラスの連続繊維をある程度の長さで切断したガラスチョップから構成される。これを、振動させる、回転軸に接触させるなどしてランダムに配向させ、そのまま一方向に移動するベルトコンベアの上に落とす。その後、バインダーで仮接着してできるのがガラスマットである。しかし、ガラスチョップが移動するベルトコンベアと接触する際、繊維がベルトコンベアの移動方向にある程度配向することは避けられない。さらに、ロール状にする際にもロールの引き出し方向には何かしらの引張荷重がかかるため、これも同配向を助長する。繊維が配向した方が強度、弾性率は高くなり、その垂直方向の弾性率は相対的に低下するため、ポアソン比（右図参照）も変化する。例えば引張荷重がかかる場合、その荷重方向に繊維が配向していたとする。結果として、相対的に引張方向と垂直な方向の弾性率が低いため、当該方向の変形が大きくなる。これは右図で示すポアソン比が大きくなる事と同等である。この結果は本報のポアソン比の比較評価でも結果として示されており、この考察を支持している事実の一つであると考えられる。

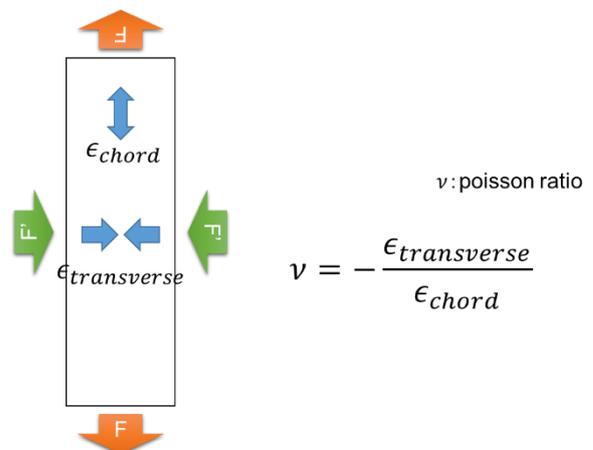


図 ポアソン比のイメージと算出式

最終破壊箇所の破壊形態と異方性の関係について

試験片の破壊形態詳細を確認するため、試験片正面からの撮影画像に加え、側面の観察を行った。右図に示すように試験片の側面が正面になるよう、撮影と観察中は、定盤上に固定したマグネットホルダに固定されたステップクランプで、当該試験片を保持した。撮影にはデジタルカメラ、レンズはそれぞれα5000 (SONY)、SEL30M35 (SONY) を使用した。最終破壊箇所の接写画像を下表に示す。GFRP-MD、GFRP-TD に関わらず、最終破壊箇所を中心に層間（面外）に材料が盛り上がる破壊形態を示しており、破壊形態に関し、異方性による明確な違いは確認できなかった。

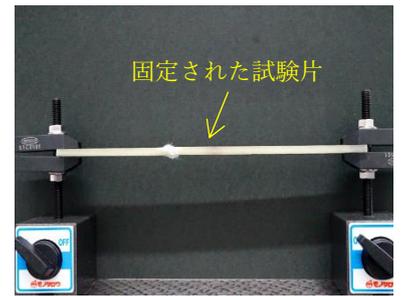


図 側面撮影の様子

表 最終破壊箇所の側面の接写画像（最左列の番号は試験片の末番を示す）

	GFRP-MD	GFRP-TD
1		
2		
3		
4		
5		

層間が盛り上がるようにして生じた破壊形態を示した要因はいくつか考えられるが、可能性の一つは応力開放である。強化繊維として用いたガラスマットは、従来は層間方向に厚みのある材料である。このガラスマットにマトリックス樹脂を含浸させて濡れた状態にした上で、脱泡ローラを使って圧力をかけ層間方向に圧縮した状態として FRP とする。そのため、ガラスマットは FRP になった時点で厚み方向である層間方向に強制的に押さえつけられた状態にある。ここで FRP が破壊すると層間方向への変形を押さえつける応力が破壊端面で解放され、当該端部が開口するような力が生じると考えられる。さらにこの事象を助長するのが破壊の瞬間に生じる破壊端部への圧縮荷重である。引張荷重がかかり続けて破壊が生じた場合、破壊端面は慣性の法則により引張荷重方向に短時間だが移動を持続する状態となる。これは引き延ばしたゴムが切れた場合、その方向に破壊端面が移動を継続するのと同じ事象である。ゴムと異なり FRP は剛性のある材料であるため、破壊端部は引張荷重方向に移動し続けることができず抗力を受ける。これが結果として破壊端面に圧縮荷重を負荷することと同じとなり、この端面を開口させる力を与えることになると考えられる。

試験片端面に生じた剥離を疑わせる変色箇所の発生について

加工後の試験片端部に生じた変色域は、層間剥離が疑われた。しかし、目視や拡大接写による観察からは該当領域の中間層での層間剥離は確認されず、表層の剥離に限定されていた。表層のみが剥離した様子を示す画像を下図に示す。本画像は試験片加工後の FRP 平板の残材の加工端面であり、図中矢印で示した領域に表層のみの剥離が生じていることがわかる。

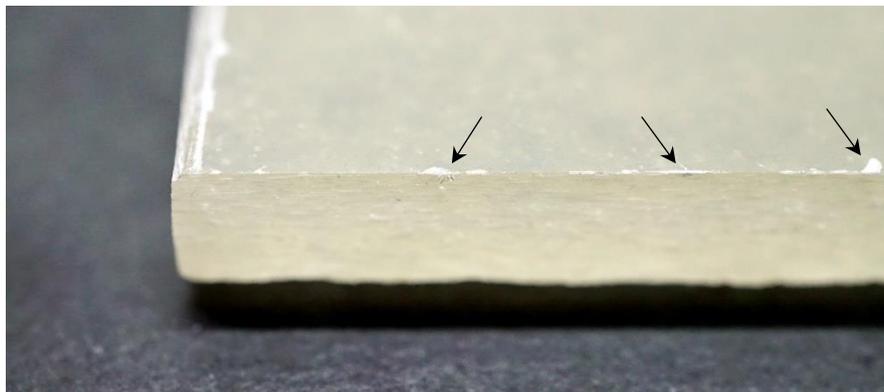


図 加工端部の変色箇所に該当する部分の拡大写真

既述の通り本評価では相対比較であり、更にこの変色がほぼすべての試験片に生じていたことを踏まえ、試験片は追加工せずそのまま評価を継続した。しかしながら、試験後の試験片端面詳細を確認した結果、表層の剥離が破壊の起点となっている可能性が示唆されていた。下図は試験後の試験片の拡大画像である。角部は応力が集中しやすいため試験中に当該箇所が破壊起点となった可能性は否めない。そのため、加工時に生じた変色箇所が破壊の起点となっているかは断定できないが、表層の剥離（下図中の矢印箇所付近）が中間層への層間剥離につながる、という破壊挙動を見ることができる。

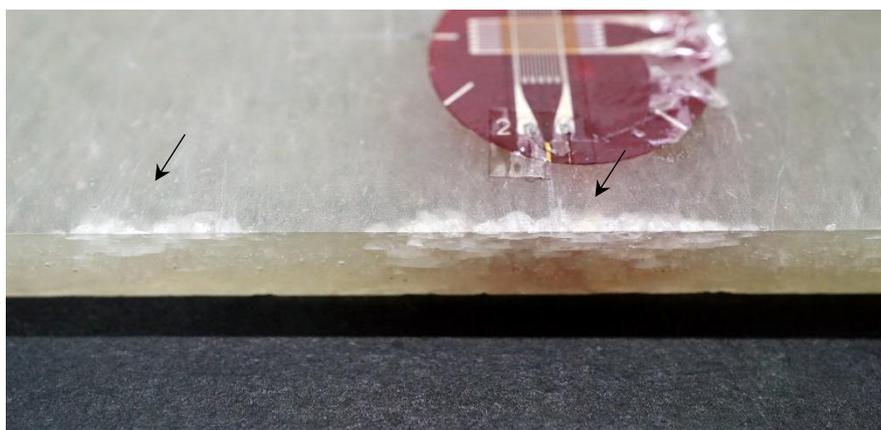


図 表層の剥離が層間剥離につながっていると考えられる領域の拡大画像 (GFRP-TD-01)

以上の検証結果から、より安定した材料特性をデータとして取得するためには、試験片端部の層間剥離を疑わせる変色は避けることが肝要である。よって、これらの状況の更なる検証と今後の対策について考察する。

GFRP-MD と GFRP-TD を比較した場合、後者の方が変色領域は多くなる傾向が示された。試験片の外観写真を下図に示す。試験片端部の変色について、GFRP-MD よりも GFRP-TD が目立つのがわかる。

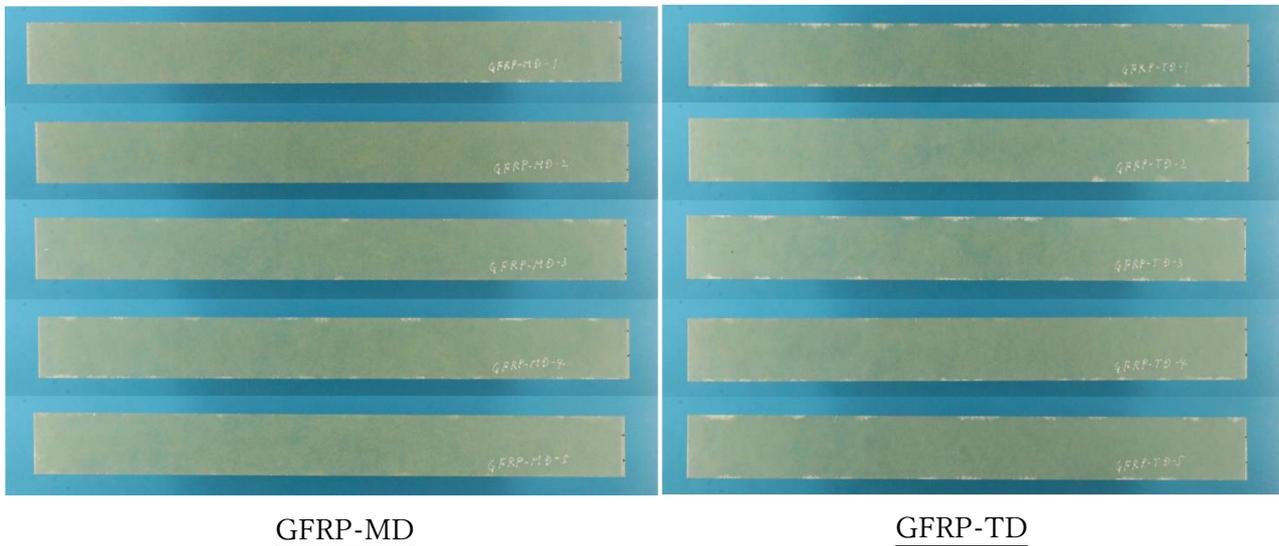


図 引張試験前の試験片の外観写真

この変色領域を定量的に比較するため、引張試験前の試験片画像に対し、Excel のマクロで作成されたフリーソフト「長さ・面積測定」を用いて変色箇所の面積の算出を行った。各試験片について、変色箇所の面積を縦軸に、横軸に試験片名称を示したグラフを以下に示す。

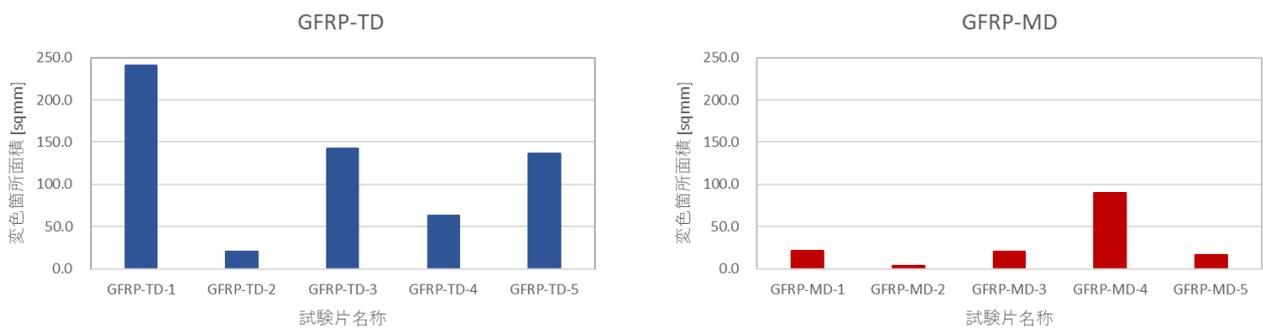


図 変色箇所の面積算出結果

本面積の算出においては画素数の限界により、 0.2mm^2 以下の算出精度には誤差が含まれているが、GFRP-MD と GFRP-TD の総面積を比較すると、それぞれ 151.9mm^2 、 603.6mm^2 であり GFRP-MD を基準とすると GFRP-TD では 4 倍の数値を示しており、有意差が認められたと判断できる。

この原因としては異方性による材料特性の違いが一因として考えられる。今回引張試験に用いた試験片加工は、基本的にせん断加工で実施している。具体的には切り出しの後、研磨という 2 段階で加工を行っているが、どちらもせん断の応力が加工端面に発生している。そして、加工後の残材確認と試験片の確認結果から、今回生じた変色は主に研磨の工程で発生したことがわかっている。研磨時に端面の GFRP には、長手方向に回転する研磨砥石が接触することになるが、GFRP-MD ではせん断荷重の方向が繊維の配向方向と平行、GFRP-TD では同方向が繊維配向と垂直方向になる。今回得られた結果から、GFRP-MD と GFRP-TD では 10%程度の強度と弾性率の差が生じており、後者の方が低い。この特性差が、表層の破壊有無に影響を与え、それが結果として変色の発生しやすさの違いという事象として認められたと考えられる。

本事象発生の回避への対策としては、研磨で行う際、加工時の押し付け荷重を低減すること、研磨の番手を今回行った#150 よりも高いものを用いることが一案である。また、切り出し加工も含め、加工工程における加工速度を遅くすること、更に FRP 積層時に樹脂含浸が促進されるよう硬化時に加圧することで、FRP 平板製作時の樹脂含浸状態を改善させる、といった対策が考えられる。加工だけでなく、FRP の成形においても改善が必要である。

まとめ

一般的には面内方向には異方性が無い、と考えられているガラスマットを強化繊維とした GFRP について、強化繊維の方向をロールの引き出し方向、並びにその垂直方向に当該繊維を配向させた引張試験の結果から、強度、弾性率、ポアソン比について異方性が存在することを定量的判断によって明らかにすることができた。本成果は当社におけるガラスマットの積層配向を含む積層手順の最適化に向けた極めて重要な成果と捉えており、本結果と実測の材料試験データ、並びにシミュレーションを併用しながら GFRP 設計技術の向上につなげていきたい。

参照文献

1) D 3039/D 3039M – 07, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

以上