GF RTP の破壊特性とメカニズム*

蛭 川 寿^{*1}, 轟 章^{*2}
小 林 英 男^{*2}, 中 村 春 夫^{*2}

Fracture Characteristics and Mechanisms of GF RTP

Hisashi HIRUKAWA, Akira TODOROKI,
Hideo KOBAYASHI and Haruo NAKAMURA

Tensile and fatigue characteristics of GF RTP were examined in the longitudinal (L) and transverse (T) directions. Young's modulus E and tensile strength σ_B were higher in the L -direction than those in the T -direction. As a result, fatigue strength σ_a showed a higher value in the L -direction. The relation σ_a/σ_B and number of cycles to failure were coincident in both directions.

Key Words: Fracture, Tensile Strength, Fatigue Strength, Fracture Mechanism, Glass Fiber Reinforced Thermoplastic

1. はじめに

最近、FRP は軽量、高強度等の利点から航空機や自動車部品などに広く用いられるようになってきている。その中でも熱可塑性樹脂をマトリックスとし、ガラス繊維を配合したガラス繊維強化複合材料 (GF RTP) は、比較的安価で製造技術的にも大量生産が可能であり、耐食性、耐衝撃性等も良好であることから化学プラント、自動車の構造材として使用されている。しかし、それらの製品を設計、製造するために必要な強度評価や損傷機構の解明はまだ十分ではない。

本研究では、GF RTP の強度評価や損傷機構の解明を行う基礎データとして、引張試験、疲労試験並びに破面観察を行い、ガラス繊維の強化メカニズムを解明する。

2. 実験方法

供試材は、図 1 に示すようにポリプロピレンシート

2 層 (PP シート) と、長繊維をらせん状にしてランダムに入り組ませたガラス長繊維マット 2 層 (GF シート) 及び溶融ポリプロピレン (PP) を熱間で配合し、作成した GF RTP 平板 (商品名: X シート, 出光 NSG 株式会社製) である。繊維の体積含有率は約 40%、ボイド率は 3~5% である。

供試材表面の研磨面の走査型電子顕微鏡写真を図 2 に示す。図中の白い線のように見える部分が、ガラス長繊維の表面上の一部であり、繊維はほぼランダムに分布している。

図 1 GF RTP 平板の製造方法

* 平成 3 年 3 月 30 日 第 68 期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成 3 年 10 月 16 日。

^{*1} 正員、金属材料技術研究所 (〒153 東京都目黒区中目黒 2-3-12)。

^{*2} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

引張試験と疲労試験に用いた試験片形状を図3に示す。つかみ部の応力集中を避けるため、試験片つかみ部に厚さ4 mmのアルミ板を貼り付けた¹⁾。試験片の採取方位は圧延方向と直角方向の2種類とした。以下、圧延方向をL方向(L: Longitudinal)、直角方向をT方向(T: Transverse)と呼ぶ。

引張試験と疲労試験は容量150 kNの油圧サーボ試験機を用いて行った。

引張試験の試験条件は、変位速度を1.2 mm/minとし、ひずみはゲージ長50 mmのクリップゲージで測定した。疲労試験の試験条件は、応力比 $R = 0.1$ の引張-引張負荷、周波数は10 Hz、試験波形は正弦波とした。また、試験終了後破断した試験片につ

いて、破面と破面近傍の表面の様相を光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡で観察した。

3. 実験結果

3. 1. 引張試験結果

引張試験結果を表1に、応力-ひずみ曲線の例を図4に示す。表1の引張試験結果中のそれぞれの値は、7本ずつ試験した平均値と分散を示している。本材料はガラス長繊維をランダムに配向させているので、方向性はないと考えられるが、表1と図4からわかるよ

表1 引張試験結果と総繊維長さ

	Tensile tests data			Total length of fibers
	E (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ (%)	
Longitudinal	7500±700	82±6	1.5±0.2	85.8
Transverse	6200±900	71±6	1.8±0.2	69.4
Long./Trans.	1.21	1.15	1/1.2	1.23

図2 ガラス長繊維の表面上の分布状態

図3 試験片形状

図4 応力-ひずみ曲線

図5 S-N特性

うに、平均値で比較すると、縦弾性係数 E と引張強さ σ_B は L 方向の方が高く、破断ひずみは T 方向の方が大きい。

3. 2. 疲労試験結果

L 方向試験片 (○) と T 方向試験片 (◇) の S-N 特性を図 5 に示す。表 1 の縦弾性係数と引張強さの方位依存性に対応して、疲労強度は L 方向の方が T 方向に比較して高い。

3. 3. 破面観察結果

引張試験片の破面の走査型電子顕微鏡写真の一例を図 6 に示す。図 6 (a) と (b) はそれぞれ、L 方向試験片と T 方向試験片の破面を表面側から観察したマクロな様相である。両者を比較すれば、特に顕著な差

(a) L 方向試験片の表面側から観察した様相

(b) T 方向試験片の表面側から観察した様相

(c) L 方向試験片の破面のマトリックス部の様相

(d) L 方向試験片の破面の繊維引抜きの様相

図6 引張試験片の破面様相

異は認められないが、L 方向では荷重軸に沿う繊維が多く、T 方向では荷重軸に対して 90° 方向に近い繊維が多い。また、破面の観察によると大部分は繊維が密集しており、一部でマトリックス部が観察された。図 6 (c) と (d) は L 方向試験片の破面のマトリックス部のミクロな様相である。高倍率では図 6 (c) のように凹凸の激しい破面を呈している。図 6 (d) からわかるように繊維は引き抜かれた後、破断している。

疲労試験片の破面を表面側から観察したマクロな様相を図 7 (a) と (b) に示す。図 5 に示した疲労強度の方位差の結果を反映して、図 7 (a) の L 方向の方が (b) の T 方向よりも荷重軸に沿う繊維が多い。また、破面も大部分繊維が密集しており、一部でマトリックス部が観察された。図 7 (c) と (d) は L 方

向試験片の破面のマトリックス部のミクロな様相である。図 7 (c) では、疲労に特有なストライエーション状の縞模様が認められる。縞模様は $10\mu\text{m}$ 程度の間隔と、その間に $1\mu\text{m}$ 程度の間隔で規則的な 2 種類が存在した。本材料について、疲労き裂進展速度と応力拡大係数範囲が得られていないので、以下では定性的にストライエーション間隔の妥当性を検討する。

試験条件は板幅 $w = 25\text{mm}$ 、最大応力 $\sigma_{\max} = 2\sigma_s = 50\text{MPa}$ であるから、疲労き裂進展の最終き裂長さ a_f は、次式のように表示できる。

$$a_f = (1 - \sigma_{\max} / \sigma_s) w \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_s (= 82\text{MPa})$ は引張強さである。式

(a) L 方向試験片の表面側から観察した様相

(b) T 方向試験片の表面側から観察した様相

(c) L 方向試験片の破面のマトリックス部の様相

(d) L 方向試験片の破面の繊維引抜きの様相

図 7 疲労試験片の破面様相

(1) から、最終き裂長さは $a_f \approx 10 \text{ mm}$ となる。
この a_f を破断繰返し数 $N_f = 2 \cdot 1 \times 10^4$ で除すと約 $0.5 \mu\text{m}$ となる。したがって、ストライエーション間隔は $1 \mu\text{m}$ 程度が妥当であり、応力繰返しごとに形成されたストライエーションと判断される。また、引張試験片の破面と同様に図 7 (d) のような繊維が引き抜かれた破面も観察された。

4. 考察

一方向繊維強化複合材料のように、繊維がすべて引張り方向に平行に並んでいると仮定し、応力 σ を作用した場合のひずみを ε 、繊維の体積含有率を V_f 、マトリックスの縦弾性係数を E_m 、繊維の縦弾性係数を E_f とすれば、複合則から弾性域における応力 σ とひずみ ε の関係は次式となる²⁾。

$$\sigma = \{ (1 - V_f) E_m + V_f E_f \} \varepsilon \quad (2)$$

また、本研究で用いた GF RTP のように、マトリックスの縦弾性係数が繊維の縦弾性係数に比較して十分に小さい場合には、式 (2) は次式で近似できる。

$$\sigma = (V_f E_f) \varepsilon \quad (3)$$

(a) L方向引張りの場合 (b) T方向引張りの場合

図 8 L方向から角度 θ 傾いている繊維を引張方向に平行な繊維に置き換える方法

上記の複合則を本供試材のように繊維がランダムに分布している場合の L 方向、T 方向の引張試験と疲労試験の結果に適用するため、図 8 に示すようなモデル化を行った。図 8 (a) の L 方向引張りの場合には、長さ l の繊維が L 方向に対して角度 θ 傾いているとき、引張方向である L 方向にこの繊維を投影し、 $l \cos \theta$ の有効長さを持つ繊維に置き換える。同様に、図 8 (b) の T 方向引張りの場合には、T 方向に投影し、 $l \sin \theta$ の有効長さを持つ繊維に置き換える。試験片表面上で繊維の長さと角度を測定した結果に対して、このようなモデル化を行い (繊維の本数で約 150 本)

(a) L方向引張りの場合

(b) T方向引張りの場合

図 9 引張方向に平行な繊維の長さと角度の分布

、L 方向あるいは T 方向に平行な繊維のみを持つ材料とみなす。

上述のモデル化により得られた引張方向に平行な繊維の有効長さや角度の分布を図 9 に示す。図 9 (a) の L 方向引張りの場合には、引張方向の 0° 方向に近づくにつれて、図 8 (a) のようにみなした繊維の有効長さは長くなる。逆に、図 9 (b) の T 方向引張りの場合には、 90° に近づくにつれて、繊維の有効長さは長くなる。図 9 (a) と (b) を比較すれば、両者の分布差に明確な差異はない。引張試験の結果と併せて繊維の有効長さの総和を表 1 に示す。繊維の有効長さは L 方向引張りの場合に 85.8 mm、T 方向引張りの場合に 69.4 mm であり、明瞭な差異が認め

図 10 $\sigma_a / \sigma_B - N_f$ 曲線

図 11 $\sigma_a / E - N_f$ 曲線

図 12 GF RTP 平板と金属材料の $\sigma_a / \sigma_B - \sigma_B$ 関係

られる。繊維の有効長さの総和の L 方向と T 方向の比は 1.23 となり、引張試験データの縦弾性係数、引張強さ、ひずみの比とはほぼ一致する。すなわち、繊維は L 方向に多く方位していることになり、引張方向に投影した繊維の体積含有率が、式 (3) の複合則に従って縦弾性係数、引張強さ、破断ひずみを支配していると結論される。

上記の原因として、図 1 で示した本供試材の製造方法において、製造前にランダムであった繊維が、圧延により L 方向に偏向したことが考えられる。

金属材料では引張特性、特に引張強さは疲労強度と良い相関があることが知られている³⁾。図 5 に示した S-N 曲線の縦軸の応力振幅 σ_a を実測した引張強さ σ_B の平均値で基準化した結果を図 10 に示す。 σ_B で基準化すると、両方位の S-N 曲線はほぼ一致する。同様に、図 11 に示すように、応力振幅 σ_a を実測した縦弾性係数 E で基準化すると、疲労強度の方位依存性はなくなる。このことは、引張特性に及ぼすガラス長繊維の強化メカニズムが、疲労強度にも反映されていることを示している。

GF RTP の疲労限度と引張強さの比 σ_a / σ_B と引張強さ σ_B の関係を、金属材料技術研究所疲労データシートより引用した鋼 (応力比 $R = 0$) のデータ⁴⁾、同所疲労データシート ($R = 0$)⁵⁾ と軽金属車両委員会、鉄道車両用アルミニウム合金の標準的機械的性質報告書 (昭和 58 年度版、 $R = 0$) より引用したアルミニウム合金のデータ⁶⁾ と比較した結果を図 12 に示す。鋼の $\sigma_a / \sigma_B \approx 0.4$ 、アルミニウム合金の σ_a

$\sigma_B \approx 0.25$ に対して、GF RTP は $\sigma_w / \sigma_B \approx 0.25$ となり、GF RTP の疲労限度に対する引張強さの比は、アルミニウム合金とほぼ同じであることがわかる。しかし、アルミニウム合金は $\sigma_w \approx 80 \text{ MPa}$ で、GF RTP の $\sigma_w \approx 20 \text{ MPa}$ より高い。

上述の疲労限度の特性はガラス短繊維強化プラスチックの場合とほぼ同様である⁷⁾。また、破面観察の結果も疲労限度に及ぼす樹脂の影響が大きいことを示している。しかし、図 10, 11 からわかるように、本材料は特に短寿命側で、長繊維強化プラスチックに類似した疲労特性の繊維方向依存性を示すことは注目に値する。

本材料はガラス長繊維を強化材に用いており、最終破断は繊維破断である。このことが、疲労特性の繊維方向依存性の原因と推察されるが、詳細は今後の課題である。

4. 結言

市販の GF RTP 平板について、L 方向と T 方向に採取した試験片を用いて、引張試験と疲労試験を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 引張試験において、縦弾性係数と引張強さは L 方向の方が T 方向に比較して高くなり、破断ひずみは逆に小さくなった。

- (2) 疲労試験において、疲労強度は L 方向の方が T 方向に比較して高くなった。
- (3) このような、引張特性と疲労特性の採取方位依存性は、ガラス繊維の L 方向への偏向に起因している。

5. 参考文献

- (1) P. K. Mallick, Fiber Reinforced Composites, (1988), 178, Marcel Dekker, INC
- (2) D. Hull, 宮入裕夫・他 2 名訳, 複合材料入門, (1984), 74, 培風館
- (3) JIS 機械構造用鋼の基準的疲労特性, 金属材料技術研究所疲労データシート資料 5, (1989)
- (4) 金属材料技術研究所疲労データシート, No. 1~4, (1978), No. 8~10, (1979) No. 16, No. 17 (1980), No. 24, No. 25, (1981)
- (5) 金属材料技術研究所疲労データシート, No. 64, (1990)
- (6) 軽金属車両委員会, 鉄道車両用アルミニウム合金の標準的機械的性質報告書, (1983)
- (7) Ken L. Reifsnider, Composite Materials Series Volume 4, Fatigue of Composite Materials, (1991), Chapter 7.