円孔を有する平織りガラス布強化 GFRP の 疲労特性に及ぼす環境温度の影響†

網 島 貞 男* 藤 井 透*
大 窪 和 也** 松 岡 寿 浩**

Influence of Environmental Temperature on Fatigue Property of Center Hole Notched GFRP Reinforced by Plain Woven Glass Cloth

by

Sadao AMIJIMA*, Toru FUJII*, Kazuya OHKUBO**
and Toshihiro MATSUOKA**

The influence of environmental temperature on fatigue property of center hole notched GFRP reinforced by plain woven glass cloth was studied. In this paper, first, the fracture surface of GFRP after fatigue failure was observed by SEM photograph, and the difference of microscopic fracture style caused by the difference of environmental temperature was investigated. The matrix crack density produced in the fatigue process was measured, and the relation between crack density and modulus decay was confirmed. Then, the static and fatigue notch factors defined as the ratio of strength of the unnotched specimen to that of the hole notched specimen at a certain number of cycles were measured at various test temperatures. The temperature dependence of macroscopic fatigue process for the hole notched specimens with different hole diameters was considered.

As the result, the following conclusions were obtained. When the environmental temperature rose, the microscopic fracture style shifted to the interface fracture from the cohesive fracture. Lower the environmental temperature, lower the stiffness modulus of the unnotched specimen under the fatigue process. Especially it was remarkable in the middle stage of the fatigue process, because the matrix is brittle and many matrix cracks are produced at low temperatures.

For the hole notched specimen, the notch factor decreased with an increase of number of loading cycles for the whole range of hole diameter, because the stress concentration is relaxed by local modulus decay. However, at a low temperature and for small notched diameter, the fatigue notch factor increased with number of cycles, because of brittleness of matrix and remarkable propagation of matrix cracks from the vicinity of hole to its periphery. At high temperatures, it also increased because stress relaxation with local modulus decay does not progress so much comparatively.

Key words : GFRP, Fatigue, Hole, Temperature, Matrix crack, Modulus decay, Notch factor

1 緒 言

近年 GFRP は様々な産業分野で広く用いられるようになった。従来、プラスチックは温度変化に敏感であり、常温環境下で使用されるのが一般的である。しかし用途の広がりに伴い、比較的高温や低温環境下で使用される GFRP 製品のニーズも広がりつつあり、例えばバスタブやなどは長い使用実績を持つ¹⁾。

一般に GFRP の母材は高分子材料から成っており、使用条件により環境温度が変化すると母材および母材と繊維の接着性が変化するので、機械的特性は大きく影響を受けると予想される。温度が GFRP の特性に及ぼす影響については、これまでに数多くの研究がな

されており、強度や弾性率が温度の関数として示されている²⁾。また微視的な損傷に及ぼす環境温度の影響について調べられた例も多く、疲労損傷について述べられている例もある³⁾⁻⁶⁾。ところで、実際の部材として GFRP を用いる場合、ボルトやリベットによる締結や配管などのために円孔を設けることが多い。環境温度が変化する場合、樹脂および界面の状態の変化により有孔材の円孔周辺部での荷重伝達のメカニズムも変化し、巨視的な特性は常温環境下とは大きく異なると予想される。特に疲労荷重下では、環境温度は有孔部材の疲労寿命を左右すると考えられ、また穴径の違いによっても温度の影響の程度は異なると予想される。

† 原稿受理 平成元年 6 月 6 日 Received June 6, 1989

* 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区今出川烏丸, Faculty of Engineering, Doshisha University, Imadegawa-Karasuma, Kamigyo-ku, Kyoto

** 学生会員 同志社大学大学院 京都市上京区今出川烏丸, Graduate Student, Doshisha University, Imadegawa-Karasuma, Kamigyo-ku, Kyoto

しかしながら現段階では、環境温度の変化が円孔を有する部材の特性に及ぼす影響について調べられた例はほとんど見あたらない。

そこで本研究では、まず平織ガラス布で強化された GFRP の疲労破断後の破面を観察し、温度による微視的な損傷様式の違いを明らかにした。また疲労損傷にともなう生じる母材中のクラック密度を測定し、平滑材の剛性低下との関連を調べた。つぎに 4 種類の穴径を有する有孔試験片を製作し、静的ならびに動的切欠係数に及ぼす温度の影響を調べた。最後に温度の違いによる有孔材の損傷過程の違いについて考察した。

2 試験片および実験方法

試験片の素材と機械的特性をそれぞれ Table I, Table II に示す。試験片材料には、強化材として平織ガラス布、母材として不飽和ポリエステル樹脂（大日本インキ：FG-284）を用いた。積層はいわゆる手積法で行ない、積層後 24 時間常温硬化させた後、80°C で 4 時間のアフターキュアを行った。ガラス布の枚数

Table I. Materials of specimen.

Matrix	Polyester resin (Polylite FG-284)
Reinforcement	Plain woven glass cloth (MG-252)
Catalizer	Methyl ethyl keton per oxide
Hardner	Cobalt naphthenate 0.6% solution

Table II. Mechanical properties of specimen.

Temperature °C	Young's modulus E_y GPa	Poisson ratio ν_{xy}	Tensile strength σ_t MPa
0	17.2	0.16	208
23	16.7	0.14	213
50	15.9	0.14	192
80	14.4	0.12	179

Fig. 1. Geometry of center hole notched specimen.

Fig. 2. Geometry of unnotched specimen.

Fig. 3. Diagram of testing system.

は 12 枚とし、繊維の体積含有率は約 33% である。

平滑試験片および有孔試験片の形状を Fig. 1, Fig. 2 に示す。それぞれの試験片は繊維の方向が引張方向と一致するように切り出し、側面を砥石で仕上げた。有孔試験片の場合、穴開け加工にはダイヤモンドホールソーを用い、両端には厚さ 1 mm のアルミニウムタブを接着した。穴径は 5, 10, 15, 25 mm の 4 種類とした。試験温度は 0, 23, 50, 80°C の 4 種類とし、恒温槽を用いて制御した。

静的試験および疲労試験の実験システムを Fig. 3 に示す。試験機は島津サーボバルブ（形式 EHF-EB5, 定格 5 t）を使用した。静的引張試験での公称引張応力速度は 0.98 MPa/s とし、疲労試験での繰返し荷重は正弦波完全片振り（応力比 $R=0$ ）、繰返し速度は 2 Hz とした。ただしここで言う公称応力 σ とは荷重を正味断面積で除した値、すなわち次式で算出する値である。

$$\sigma = \frac{P}{t(B-D)} \quad (1)$$

P : 負荷される荷重, t : 試験片厚さ

B : 試験片幅, D : 試験片の穴径

各温度条件下での疲労破面の観察には走査型電子顕微鏡（SEM）を用い、倍率は 5000 倍とした。疲労荷重下での剛性を測定するには標点間距離が 25.4 mm の変位計を用いた。また疲労損傷と共に発生する母材中のクラック密度は、平滑材に繰返し最大応力を 98 MPa として期待寿命の 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 まで繰返し荷重を負荷し、断面を研磨の後、光学顕微鏡で測定した母材中のクラック本数を観察面積で除して求めた。観察断面は Fig. 1 に示す Y-Z 平面とし、倍率は約 15 倍、観察面積は約 35 mm² とした。

3 結果および考察

3・1 平滑材の疲労強度に及ぼす温度の影響

Fig. 4に $S-N$ 曲線の一例を示す。 $S-N$ 曲線は両対数目盛上で表わし、縦軸には繰返し応力の最大値を静的強度で除した値を、横軸には疲労破断までの繰返し数を取った。他の温度条件下でのデータのばらつきはFig. 4と同程度である。図より実験データは直線状に分布することがわかる。疲労強度に及ぼす温度の影響を明白にするために、Fig. 5に温度をパラメータとした平滑材の $S-N$ 曲線を示す。ただし実験データのプロットは省略した。図よりわかるように、80℃ 以外の場合には、温度が変化しても静的強度で無次元化した疲労強度や、 $S-N$ 曲線の傾きには大差がない。しかし、80℃ の場合には $S-N$ 曲線の傾きは他の温度条件下のそれとは異なった。本研究で用いた樹脂のガラス転移温度は約 65℃ であり、樹脂がガラス転移温度を越えて特性が変化したためと思われる。

3・2 平滑材の微視的な損傷形態の観察結果

Fig. 6(a), (b)に 0℃ と 80℃ の場合の疲労破面を示す。ただし繰返し最大応力は 78.4 MPa とした。図よりわかるように、温度が低い場合には繊維に樹脂が付着した凝集破壊状態が観察でき、温度が高い場合には繊維が露出した界面破壊状態が観察できた。静的破壊形態は環境温度の上昇に伴い凝集破壊から界面破壊に

Fig. 4. Example of $S-N$ diagram of unnotched specimen at room temperature.

Fig. 5. $S-N$ diagram of unnotched specimen at various temperatures.

(a) At 0°C.

(b) At 80°C.

Fig. 6. SEM photograph of fracture surface.

移行することが述べられている⁷⁾、疲労破壊の場合も静的の場合と同様であると言える。

つぎに、疲労損傷と共に生じる母材中のクラックの密度の測定結果を Fig. 7 に示す。ただし、母材クラックとは、繊維布間に生じる樹脂内のクラックである。図において縦軸は単位観察面当りのクラック数で定義される母材中のクラック密度であり、横軸は繰返し数と期待寿命の比である。図よりわかるように、クラック密度は繰返し数と共に増加するが、温度が低い場合ほどその値、勾配共に大きくなった。特に温度が高い

Fig. 7. Relation between matrix crack density and number of cycle at various temperatures, observed on Y-Z plane.

Fig. 8. Relation between modulus decay ratio and number of cycle ratio at various temperatures when cyclic maximum stress is 98.0 [MPa].

場合には母材クラックの発生は極めて少なく、繰返し数が増加してもほとんど変化がなかった。これは、温度が低い場合には母材はぜい性化しわずかな変形でも母材クラックを生じるが、温度が高い場合には母材は柔軟化し大きな変形が可能となったためと思われる。

3.3 平滑材の剛性低下に及ぼす温度の影響

Fig. 8に各温度条件下での平滑材の剛性低下曲線を示す。ただし繰返し最大応力は78.4 MPaとした。図において縦軸には疲労荷重下での剛性率を静的荷重下での剛性率で除した値を、横軸には繰返し数を疲労寿命で除した値をとった。図よりわかるように、どの温度条件下でも繰返し数に伴う剛性率の変化は3つの段階に分けられる。すなわち、初期に急激に低下する段階、ほぼ一定値をとる段階、そして破断直前に急激に低下する3つの段階である。剛性低下に及ぼす温度の影響を見ると、疲労初期での低下率はどの温度条件下でもほぼ等しいが、疲労中期では温度が低いほど剛性は大きく低下することがわかる。3.2節の結果を参照すると、温度が低い場合には多くの母材クラックが発生しており、つまり疲労中期の剛性の低下は母材クラックが原因であると言える。

3.4 切欠係数におよぼす温度の影響

Fig. 9に有孔材のS-N曲線の一例を示す。図より有孔材の場合も平滑材の場合と同様にデータは直線状

Fig. 9. Example of S-N diagram of notched specimen at room temperature (ratio of diameter to Breadth D/B is 0.1).

Fig. 10. Relation between average of static notch factor and D/B at various temperatures.

Fig. 11. Relation between fatigue notch factor and D/B when number of cycle is 10^6 at various temperatures.

に分布する。また他の穴径または温度条件下でのデータのばらつきは同程度である。疲労強度に及ぼす穴径の影響を調べるために、疲労寿命が n サイクルとなる繰返し最大応力をS-N曲線から算出し、切欠係数を導入した。切欠係数は次式で定義する。

$$\text{切欠係数} = \frac{\sigma_{max}(n)_{D=0}}{\sigma_{max}(n)_{D=D}} \quad (2)$$

$\sigma_{max}(n)$: 繰返し最大応力

温度をパラメータにとり、静的切欠係数、繰返し数が 10^6 のときの動的切欠係数をそれぞれ Fig. 10, Fig. 11に示す。ただし図において縦軸は式(2)より計算される切欠係数であり、横軸は穴径 D と試験片幅 B の比 (D/B) である。図よりわかるように、どの穴径比に対しても 23°C と 50°C の場合の切欠係数は疲労と共に低下する結果が得られた。しかし 80°C の場合、切欠係数は疲労損傷後もあまり低下しなかった。疲労損傷に伴う切欠係数の変化が環境温度によって変化する理由は以下のように考えられる。

温度条件にかかわらず有孔材の場合、疲労が進行すると円孔周辺部が特に顕著に損傷を受け、他の部分に比べて剛性が低くなる。円孔周辺部での局所的な剛性低下が十分であれば、円孔周辺部での荷重分担は軽減され、その結果応力集中が緩和されて切欠係数は低下すると思われる。

しかしながら高温環境下の場合、3.2節に述べた

ように、剛性低下の原因となる母材クラックの発生は少なく、局所的な剛性低下による応力集中の緩和の効果が少なかったために、切欠係数が疲労と共にあまり低下しなかったものと考えられる。

一方、温度が低く穴径が小さい場合、例えば 0°C で穴径比が ($D/B=0.1$) の場合、切欠係数は疲労と共に大きくなった。温度が低い場合には、母材はぜい性化し極めて多くの母材クラックが生じる。母材クラックによって他の温度条件下と同様に応力集中の緩和を促進する効果も考えられるが、むしろ円孔近傍から発生した多くのクラックが合体成長し、円孔から離れた領域にまで達して、擬似き裂的に小さな負荷レベルで破断を引き起こすのではないかとと思われる。

4 結 言

(1) 本研究で対象とした温度範囲では、静的強度で無次元化した疲労強度はガラス転移温度以下では大差がないが、ガラス転移温度を越えると疲労寿命および $S-N$ 曲線の傾きは前者と異なる。

(2) 微視的破壊形態は環境温度が上昇すると凝集破壊から界面破壊に移行する。

(3) 温度条件が低いと母材がぜい性化し、母材クラックが多く発生することにより、剛性低下率が大きくなる。

(4) 有孔材の場合、疲労と共に生じる局所的な剛性低下により応力集中が緩和され、切欠係数は繰返し数

と共に減少する。しかし、樹脂が柔軟化して母材クラックがほとんど生じないような高温環境下では、応力集中の緩和の効果は少なく切欠係数の低下は少ない。また極めて多くの母材クラックが発生するような低温環境下でも、著しいクラックの成長のために切欠係数の低下は少なく、むしろ大きくなる。

最後に本研究を遂行するにあたり多大なご協力を賜った大日本インキ化学工業(株)に謝意を表する。

(平成元年3月16日 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 強化プラスチック技術協会編, 強化プラスチックハンドブック, 224 (1967).
- 2) 例えば, A. Bhatnagar, S. C. Lakkad, Fiber Science and Technology, **14**, 213 (1981).
- 3) 例えば, 西本 洋, 早川雄三, 強化プラスチック, **26**, 346 (1980).
- 4) 福田武人, 逢坂勝彦, 藤井太一, 高田政宏, 日本機械学会論文集, A-**53**, 1018 (1987).
- 5) G. P. Sendecky, H. D. Stalnaker and R. A. Kleismit, Fatigue of filamentary Composite Materials, ASTM STP 636, 123 (1977).
- 6) K. Schulte, K. Friedrich and G. Horstenkamp, Journal of Material Science **21**, 3561 (1986).
- 7) 金光 学, 川本芳久, 宮野 靖, 國尾 武, 材料システム, **2**, 71 (1981)