赤外線熱画像法による GFRP 材の疲労損傷評価法に関する研究*
(第1報, 疲労温度上昇曲線)倉 鋪 憲^{*1}, 倪 慶 清^{*1}
前 坂 敏 彦^{*2}, 岩 本 正 治^{*1}A Study on Evaluation of Fatigue Damage of GFRP
by Infrared Thermography
(1st Report, Fatigue Temperature Rise Curves of GFRP)Ken KURASHIKI^{*3}, Qing-Qing NI,
Toshihiko MAESAKA and Masaharu IWAMOTO^{*3} Kyoto Institute of Technology, Dept. of Mechanical and System Engineering,
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto city, Kyoto, 606-8585 Japan

FRP materials show a rather complex damage behavior under cyclic loading, for example, matrix cracking, fiber-matrix debonding, void growth, fiber breakage, etc. Therefore, it is very difficult to evaluate the fatigue damage and remaining life of the FRP. Heat generation is often observed due to damping in the material, which has hysteresis loss, subjected to cyclic load. A part of the heat accumulates with the number of fatigue cycles in the material. FRP materials show temperatures rise remarkably under fatigue test, since the matrix resin is viscoelasticity. It is considered that there is the relation on this fact with the fatigue damage. In this study, we attempted to evaluate the fatigue damage of the glass fiber mat reinforced CP-resin composites by the infrared thermography. Fatigue thermal curves with the various conditions are represented with one line by means of correction according to the stress and the frequency.

Key Words: GFRP, Fatigue, Fatigue Damage, Infrared Thermography, Fatigue Thermal Curve, Cumulative Damage

1. 緒 言

材料が繰返し応力またはひずみを受けて、引き起こされる疲労破壊は実用上重要な特性である。特に FRP では、母材が粘弾性体であるため、繰返し変形の熱蓄積の効果が大きく、また繊維および樹脂の特性の違いに起因する多様な損傷、破壊があることより、疲労特性の定量的評価を困難にしている。また、FRP を一次強度部材として高信頼下で使用するための問題点として、長時間データの不足と、劣化を予測するための迅速試験法の未設定な事が指摘され⁽¹⁾、疲労信頼性に強い関心が持たれている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。

複合材料の母材である熱硬化性および熱可塑性樹脂

は、繰返し応力下で温度上昇することがよく知られている。疲労試験中の温度上昇に影響を与える因子は多くあり、繊維強化複合材においては、母材の粘弾性挙動に基づく内部摩擦、繊維同士の摩擦、繊維と母材界面での摩擦等が考えられる。外力による材料組織の微視的変形は与えられたエネルギーを内部エネルギーとして蓄えるのではなく、そのほとんどが微視的組織に伴って熱エネルギーすなわち広義の摩擦熱に変化し、材料の温度を上昇させる⁽⁶⁾と考えられる。

疲労試験中に発生した損傷部、さらに損傷が進展し成長したき裂の先端部は他の部分より大きなエネルギー損失が生じることより温度上昇が激しい⁽²⁾、このことより、損傷の評価にこの温度上昇を利用できるものと思われる。

本研究では、疲労負荷過程中的の GFRP 材の発熱現象に着目し、供試材の損傷と表面温度の関係を追究する。試験片表面の最高温度を赤外線サーモグラフィで計測し、繰返し数と温度上昇の関係を求め、粘弾性材料で

* 原稿受付 1999 年 8 月 23 日。

^{*1} 正員, 京都工芸繊維大学工芸学部 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。^{*2} 京都工芸繊維大学大学院 [現: (株) 豊田自動織機製作所]。
E-mail: kurasiki@ipc.kit.ac.jp

示されている疲労中の温度上昇の式⁽⁷⁾を適用し、疲労損傷の定量的評価の指針を得ることを試みた。

2. 実験

2.1 実験試料および試験片 供試材は架橋ポリエステルアミド樹脂⁽⁸⁾ (Cross-linked Polyesteramide, CPレジンと略す) をスパイラル状の連続ガラス繊維マットで強化した複合材である。

この母材樹脂には主要原料として 1,3PB0[2,2-(1,3-Phenylene)Bis-2-Oxazoline の略称]に反応ポリマーとして (脂肪族ジカルボン酸 + P オキシ安息香酸) の H タイプの熱硬化性樹脂を用いた。強化基材は連続ガラス繊維 (直径 19 μ m, E ガラス) を渦巻き状に何層か重ねて、さらに繊維が互いに交差する部分を結合材で結合し、マット状にしたものである。

供試材は繊維マットに上述の樹脂を複合させ、触媒として亜リン酸を 1.0wt.% 添加し、200℃で 10 分硬化したトレイであり、繊維含有率は 60wt.% とした。本供試材の機械的性質を表 1⁽⁹⁾に示す。

本供試材は母材の伸び特性に着目し、FRP の母材効果を明らかにする一連の研究⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾に使用している材料であり、本材は他方に対し脆性的性質を示す母材による FRP である。延性的母材による FRP に対しては別途報告の予定である。

試験片は損傷領域を限定するため、図 1 に示す形状寸法とした。

Table 1 Mechanical properties of the material.

Elastic modulus E, GPa	Tensile strength σ_B , MPa	Poisson's ratio ν
16.7	199	0.32

Fig.1 Geometry of specimen.

試験片表面には赤外線の放射率を高めるため黒色塗料 (アサヒペン耐熱塗料) を塗布している。塗料は疲労強度に影響を与えないことを確認している。

2.2 実験装置 疲労試験機は電気油圧式サーボ試験機 (島津製作所製, サーボパルサー) を用いた。損

傷様相と損傷過程は AE 計測装置 (島津製作所製, SAE-1000A), AE センサー (富士セラミック製, 広帯域型 S-20DSA) を用いて評価した。試験片の伸びはチャック間をレーザー式変位センサー (キーエンス製, LB-080) を用いて測定した。

表面温度の測定には赤外線サーモグラフィ (日本電子製, 赤外線応力画像システム JTG-8010x) を用いた。本装置では、領域を指定した場合その領域内の最高温度、最低温度及び平均温度を表示できるので、試験片表面の最高温度を測定した。本装置の温度分解能は 30℃黒体に対し 0.05℃以下である。

2.3 実験方法

2.3.1 疲労試験と AE 計測 疲労試験は負荷応力を引張り強さの約 50%程度で応力比 0.1, 応力波形は三角波の片振り引張り, 繰返し速度は 2, 3, 5, 7, 9Hz で行った。AE 計測においては繰返し速度は 2Hz とし, AE センサーを図 1 に示す位置の 2ヶ所に取り付け, 総合利得を 60dB, しきい値電圧を 0.5mV で測定した。本研究では, イベントカウント法で得られるパラメーターのうち, AE 振幅分布と AE 事象率から損傷様相とその過程について検討する。

2.3.2 赤外線による温度測定 試験片表面の最高温度は赤外線サーモグラフィにより, 所定の繰返し数毎に温度画像を取り込み, 最高温度を測定した。その際の 1 画面のスキャン時間は 0.60 秒である。

実験は恒温恒湿室内 (20 $\pm$ 2℃, 60 $\pm$ 5%RH) で行っているが, さらに正確を帰するため, 無負荷のダミー試験片も同時に測定し変動がある場合には補正を行った。

2.4 繰返し負荷による発熱現象 本供試材の GFRP 複合材は, 母材を樹脂としているため, 粘弾性挙動を示す。このような粘弾性を示す材料を変形させる時には, エネルギーの一部が位置エネルギーとして蓄えられ, 一部が熱として散逸する。疲労試験の際には, 熱の部分はヒステリシス損失として示される。

Fig.2 Hysteresis loops.

図 2 はチャック間変位と荷重の関係で、疲労試験初期と破断直前のヒステリシスループであり、荷重（繰返し応力）と伸び（ひずみ）の間に位相のずれであるヒステリシス損失を生じている。疲労初期と破断直前では、損傷によりループの傾きと面積が少し変化しているのがわかる。このヒステリシス損失でのエネルギーは、繰返し負荷で材料に与えられたエネルギーのうち摩擦熱として散逸するエネルギー損失を示し、材料内の組織を変化させ疲労試験における温度上昇の原因となる。ここでは、損傷様相（樹脂割れ、界面はく離、繊維破断）の発生過程は考えず、ヒステリシス損失でのエネルギーのみによる試験片の温度上昇を考える。

線形粘弾性を仮定し、正弦波負荷を受けているとすると、散逸エネルギーによる単位体積・単位時間当たりの熱発生量 W ($J/sec \cdot m^3$) は、最大繰返し応力を $\Delta \sigma$ (MPa)、周波数を f (Hz) として、次式⁽⁷⁾のように示される。

$$W = \pi f C'' \Delta \sigma^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 C'' は損失コンプライアンス (MPa^{-1}) であり、周波数と材料温度の関数である。

試験片周囲に熱拡散を考えなければ、単位体積・単位時間当たりの温度上昇 ΔT_0 (K/sec) は

$$\Delta T_0 = \frac{\pi f C'' \Delta \sigma^2}{\rho C_p} \dots \dots \dots (2)$$

となる。ただし、 ρ は材料密度 (kg/m^3)、 C_p は比熱 ($J/kg \cdot K$) を示す。材料温度は時間（繰返し数）に依存することから、試験片の温度上昇 ΔT は

$$\Delta T = \frac{\pi f \Delta \sigma^2}{\rho C_p} F_f(t) \dots \dots \dots (3)$$

となる。 $F_f(t)$ は損失コンプライアンスの時間に対する積分値である。

式 (3) は粘弾性材料の内部粘性に基づいた式であるので、FRP 材の種々の損傷に起因する項は考慮されていない。従って、この式を FRP 材の損傷評価に適用可能か検討する必要がある。本研究では、FRP 材の損傷を損失コンプライアンスに含めていることより、大きな熱発生を伴う現象を含む場合の適用には問題があるものと考えられる。特に、破壊が突発的あるいは加速的に進行する領域では式 (1) は適用できない。しかしながら、損傷の進展

が緩やかである場合、損傷が損失コンプライアンスに影響を与える要因とし、式 (3) の適用も可能であるとして扱うこととする。

実際の疲労試験においては、散逸エネルギーにより試験片内部に熱が発生しても試験片表面から外部に熱が逃げるため、測定温度は計算値よりはるかに小さくなる。式 (2)、式 (3) において、損傷過程は含まれていないが、損失コンプライアンスは損傷の進展にともない大きく変動する。式 (3) から、周波数 f と最大繰返し応力 $\Delta \sigma$ に関しても温度上昇を制御する要因であることもわかる。そこで周波数 f 、繰返し応力 $\Delta \sigma$ と温度上昇 ΔT の関係について検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 負荷応力と温度変化 疲労試験と温度変化の関係は試験開始と共に最小断面部の試験片表面で、温度の高い領域が観察された。さらに、繰返し数の増加に伴い顕著な最高温度の箇所が見られた、この箇所は応力画像でも最高応力を示し、その箇所を起点として最終破断に至った。

図 3 は周波数一定 (5Hz)、負荷応力 100, 90, 80MPa における繰返し数に対する試験片表面の最高温度変化を示す。応力の高い方は温度上昇が早い事がよくわかる。

Fig. 3 Fatigue temperature increment curves.

Fig. 4 Fatigue thermal curves for number of repetition ratio.

FRP の破断寿命は一般的に、バラツキが大きい事より、図 3 の温度上昇曲線での比較は困難である。そこで、この温度曲線を繰り返し数比 (繰り返し数 N) / 破断繰り返し数 (N_f)) で表したのが図 4 である。この曲線を以後、疲労温度上昇曲線と呼ぶこととする。

図 4 において、各疲労温度上昇曲線は温度上昇率の変化より、いずれも 3 領域に分けられる。負荷開始と共に温度が急激に上昇し、上昇率が低下を示す繰り返し数比 $N/N_f = 0.0 \sim 0.15$ の領域 I、温度がほぼ一定で増加している $N/N_f = 0.15 \sim 0.80$ の領域 II、加速的に温度が上昇し破断に至る $N/N_f = 0.80 \sim 1.0$ の領域 III と分けられる。

同時に測定した試験片のチャック間 (80mm) の伸びを図 5 に示し、材料の変形と温度上昇の関係を検討する。負荷と共に弾性係数に従って伸びが観察されるが、その後は温度上昇のような顕著な変化は見られない。

剛性率の変化から損傷量の評価も考えられるが、温度変化の方が激しいことより、損傷評価により良いと思われる。図 4 と図 5 から領域 I では、材料の変形に伴う摩擦熱による激しい温度上昇、領域 II および領域 III の破断直前までは、ほぼ伸び率一定で損傷進展に伴う伸びの増加および温度上昇と思われる。

3.2 AE による損傷様相と損傷発生過程 疲労試験中の内部損傷の様相および損傷過程を AE 法の振幅分布と AE 事象数により検討した。

図 6(a), (b) は寿命長さ、すなわち負荷応力の違いによる AE 振幅分布を示す。(a) は破断繰り返し数 N_f が $N_f < 10^4$, (b) は $10^5 < N_f$ における場合である。AE 振幅分布は寿命長さにより、AE 事象数に差異があるが、分布状態は一樣であることから、本供試材の繰り返し数比に対する内部損傷の様相は、負荷応力に関わらず一樣であることがわかる。

AE 振幅と損傷様式の関係は低振幅域が樹脂割れ、

Fig. 5 Relation between elongation and fatigue cycles ratio.

(a) For the test of $N_f < 10^4$.

(b) For the test of $10^5 < N_f$.

Fig. 6 AE amplitude distribution.

高振幅域が繊維破断、中振幅域が樹脂と繊維の界面はく離に対応することが知られている⁽¹²⁾。そこで、内部損傷の発生過程を AE 振幅分布から検討した⁽¹³⁾。低振幅域 (0.0 ~ 3.2 mV)、中振幅域 (3.2 ~ 5.4 mV) において AE は試験開始直後からカウントされるが、繰り返し数比約 0.15 位までに減少し、その後繰り返し数比約 0.8 まで徐々に増加し、破断直前に急増している。高振幅域 (5.4 mV 以上) では、疲労初期は AE はほとんどカウントされず繰り返し数比 0.2 付近から増加し、破断直前に急激に増加していた。

2.4 節で指摘したように式 (1) の FRP への適用は、損傷進展が緩やかである場合は可能としたが、本研究の場合伸び変化および AE の結果とも、破断直前に大きな変化は見られるものの全体として緩やかな変化であるので、式 (1) ~ (3) の適用は可能であると考えられる。

3.3 疲労温度上昇曲線の応力依存性 図 3、図 4 から疲労試験中の温度上昇は最大 10K 程度であるので、試験片の密度 ρ および比熱 C_p は試験中一定であるとする、式 (3) において温度上昇は試験条件である応力および周波数、損傷を含んだ損失コンプライアンスに依存することがわかる。そこで、図 4 の疲労温度上昇曲線を負荷応力の二乗で除した曲線を図 7 に示す、3Hz、7Hz、9Hz についても併記している。7Hz の

データに多少バラツキが見られるが、負荷応力によらず各周波数に応じた一つの曲線で示される事より、寿命長は異なっても損傷過程は同じであると考えられる。また、測定温度は弾性変形に基づく温度の重畳も考えられるが、その影響は小さいことがわかる。

3・4 疲労温度上昇曲線の周波数依存性 図 8 に応力一定(100MPa)とし、周波数を 3, 5, 7, 9Hz としたときの繰返し数比に対する温度変化を示す。負荷速度の早いほうが、全域にわたり温度レベルが高いことがわかる、また疲労寿命も短かった。この図を 3・3 節と同様に周波数の影響を除くため、図 8 の各データを負荷周波数で除したものを図 9 に示す。応力 80MPa, 90MPa の場合についても併記している。

図 9 においても、周波数の影響があまり見られず、応力に依存した曲線が得られることがわかる。

3・5 応力および周波数を考慮した疲労温度上昇曲線 応力および周波数の影響について、個別に検討したが両方を考慮した図を図 10 に示す。これは図 9 の周波数で補正した疲労温度上昇曲線を負荷応力の二乗で除して描いたものであり、応力、周波数の影響を除いた、損傷量に対応する損失コンプライアンス

Fig. 7 Relation between modified temperature increment by the stress and fatigue cycles ratio.

Fig. 8 Relation between temperature increment and Fatigue cycles ratio.

の積分値を意味します。多少バラツキは見られるが、試験条件（応力、周波数）に関わらず一つの曲線で示されることがわかる。このことから、同一繰返し数比に対する供試材の損傷様相、様式は試験条件に関わらず同じと考えられる。AE の結果で得られた AE 振幅分布、AE 事象率は寿命長さおよび負荷応力に依存しないことと一致する。

Fig. 9 Relation between modified temperature increment by the frequency and Fatigue cycles ratio.

Fig. 10 Fatigue thermal curves.

Fig. 11 Standard fatigue thermal curve.

本研究では、試験片表面の最高温度を測定していること、応力波形が三角波および式(3)は均質な高分子材料を対象として導かれていることから、FRP の損傷評価にこの式の適用が可能であるか疑問ではあるが、図 10 で示されるように試験条件の異なる疲労温度上昇曲線が補正により 1 本の曲線で表せる事より、本研究の範囲内ではこの温度上昇曲線から損傷程度を評価することが可能であると思われる。

図 10 の温度曲線を平均化したものを図 11 に示し、この曲線を基準疲労温度上昇曲線と呼ぶこととする。図 11 の曲線は式(3)より、繰返し数比に対する損失コンプライアンスにも相当し、損傷の進展状態を示す。図中の実線は、領域Ⅱ ($N/N_f = 0.15 \sim 0.80$)での温度変化を線形増加とした近似直線式から描いている。このように領域Ⅱにおいては、式(4)により損傷の進展状況 F_f を温度変化によって定量的に評価することができると考えられる。

$$F_f(N/N_f) = 0.52(N/N_f) + 0.26 \cdots (4) \\ 0.15 \leq (N/N_f) \leq 0.80$$

4. 結 言

GFRP 材の疲労損傷評価を行うための指針を得るために、疲労過程での試験片表面の最高温度を測定した。別途 A E 測定も行い損傷様相および損傷過程との対応についても検討を行った。その結果を以下に示す。

(1) 試験片表面で観察される最高温度の箇所は最終破断の起点となり、最高温度測定は疲労損傷評価に有効であることがわかった。

(2) 繰返し数比に対する温度上昇曲線を応力の二乗および周波数の補正をすることにより、基準となる 1 つの基準疲労温度上昇曲線が得られた。

(3) 疲労温度上昇曲線は温度上昇率から 3 領域にわけられ、領域Ⅱにおいては繰返し数比に対し、ほぼ線形増加する事より、領域Ⅱに限定すれば損傷の進展状態を定量的に評価することができると思われる。

本研究の実験試料を提供して頂いた武田薬品工業(株)化成品研究所、及び試験片の作成に協力して頂いた本学技術職員の松田憲明氏、川崎晃氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) Martin, R. and Campion, R., The effects of ageing on fibre reinforced plastics, Materials World, (1996), 200.

- (2) 鈴木秀人・中沢淳一・中村雅史・原口忠男, 炭素繊維ナイロン 46 の疲労信頼性に及ぼす切欠形状の影響, 機論, 61-591, A(1995), 2375.
- (3) 中村雅史・原口忠男・鈴木秀人, 先進 CFRTP の高温疲労信頼性に及ぼすメゾき裂形成段階の影響, 機論, 62-600, A(1996), 1773.
- (4) Miyano, Y., Nakada, M., McMurray, M. K., Muki, R., Prediction of flexural fatigue strength of CFRP composites under arbitrary frequency, stress ratio and temperature, J. Compos. Mater., 31-6(1997), 619-638.
- (5) 鈴木秀人・中村雅史・渡辺裕・原口忠男, 炭素繊維強化 PEEK 材の高温疲労設計法の構築に関する基礎的研究, 機論, 64-625, A(1998), 2339-2345.
- (6) 樋口正一・今井康文, 熱可塑性樹脂の引圧疲労の発熱係数, 九州大学応用力学研究所所報, 41, (1974), 13-23.
- (7) Ferry, J. D., Viscoelastic Properties of Polymers, (1961), 609, John Wiley & Sons.
- (8) 古宮清・中村利貞・佐野安雄・早川雄三, 新しい FRP-繊維強化 CP レジン, 強化プラスチック, 33, (1987), 224.
- (9) 倉鋪憲・岩本正治・荒木栄敏・安偉, 連続繊維マット強化 CP レジン複合材の静的力学および破壊特性に及ぼす母材および繊維含有率の影響, 材料, 43-486(1994), 248-253.
- (10) 倉鋪憲・岩本正治・荒木栄敏, 連続繊維マット強化 CP レジン複合材の疲労き裂伝ば特性に及ぼす母材および繊維含有率の影響材料, 45-5(1996), 490-495.
- (11) IWAMOTO, M., KURASHIKI, K., ARAKI, S., SAITO, K., Effects of the elongation property of matrix resin on mechanical properties and fracture behavior of CP-resin composites, Proceeding of ICCM-10, 6(1995), 405-412.
- (12) 鈴木恵・中西博・岩本正治・自念栄一・前川善一郎・小池清, A E 法によるクラス A-SMC の破壊機構に関する研究, 材料, 36-402(1987), 229-235.
- (13) 岩本正治・倉鋪憲・荒木栄敏・堀之内秀行, FRP 材の疲労損傷における母材の伸び特性効果, 機講論, 964-1(1996-3), 331-332.