均一平面曲げ疲労試験における繊維強化 プラスチックの温度上昇について*

吉 田 治 夫** 加 地 秋 好** 石 川 皓 一**

On the Temperature Increase of Fiber Reinforced Plastics under Uniform Plane Bending Fatigue Test

by

Haruo YOSHIDA, Akiyoshi KAJI and Koichi ISHIKAWA

(Osaka Municipal Technical Research Institute, Osaka)

When a material is subjected to repeated loads, mechanical energy is consumed inside of the material by transforming into other types of energy such as heat and sound. As the thermal conductivity of FRP is low, a part of the loss energy is stored inside as heat, and the temperature of FRP increases. Since FRP is a sensitive material to its environmental temperature, it is important to investigate such temperature increase of FRP during fatigue.

If the temperature increase of FRP under repeated loads is caused by the heat equivalent to the internal loss energy, it is affected by such factors as kinds of resin and glass cloth, glass content, constitution of laminate, stress amplitude and cyclic frequency. In this paper, the following problems are discussed. (1) The temperature increase of specimens in the static tensile test, (2) the relations between the constitution of laminates or stress amplitude and the temperature increase of specimens in the fatigue test, (3) the temperature distribution in the inside of specimen in the early period of fatigue test, and (4) the effect of the temperature increase of composite laminate on its fatigue behavior. The temperature measurement was made with an infra-red radiation thermometer, which is capable of measuring surface temperature of objects without mounting sensors on their surface.

(Received May 28, 1977)

1 緒 言

一般に材料が繰返し荷重を受けるとき、材料内部において力学的エネルギーが熱などの他のエネルギーに変化して消費され、その結果ヒステリシス損失を生じることはよく知られている。金属材料は通常使用されている弾性域内ではエネルギー損失は小さく、また仮に熱による温度上昇が生じても強度に影響を受けることは少ない。しかしながら繊維強化プラスチック (FRP) 材料では弾性域が小さく、また粘性仕事ならびにはく離に伴う摩擦仕事などによるエネルギー損失が鋼材などに比べて大きい。ところが FRP 材料は熱伝導率が小さい (銅の約 1/1 000 あるいは鉄の約 1/100 程度である) ために損失エネルギーの一部は熱として材料内に蓄積され、その結果温度上昇を生じる。

FRP 材料の母材として使用される樹脂は温度により材料特性が変化することはよく知られている。した

がって使用時のふん囲気温度に疲労による FRP 材料の温度上昇が加わって、FRP 材料自体の温度が早く母材の熱ひずみ温度に達し、十分な疲労強度を発揮できないことが考えられるので、疲労に伴う FRP 材料の温度上昇について調べておくことは有意義であると考ええる。

繰返し荷重が作用したときの FRP 材料の温度上昇が、内部の損失エネルギーに相当する発熱によって生じるとすれば、それは樹脂およびガラス繊維布の種類、ガラス含有率、積層構成、応力振幅、荷重繰返し速度などの因子によって影響を受けると考えられる。本研究は FRP 材料の静的引張試験における温度上昇、疲労試験途中の温度上昇と積層構成あるいは応力振幅との関係、疲労試験初期の試験片内部の温度分布、および試験片の温度上昇が疲労挙動に及ぼす影響などについて実験および考察を行ったものである。

温度の測定法としては従来から温度ゲージ、熱電対などを被測定物の表面に接着して測定する方法がよく

* 原稿受理 昭和52年5月28日

** 正 会 員 大阪市立工業研究所 大阪市北区北畠町

Table I. Static properties.

Test piece number	Glass content	Tensile test				Bending test				
		Tensile strength	Modulus of tensile elasticity	Fracture strain	Test condition	Three point bending test		Four point bending test		Test condition
						Bending strength	Modulus of bending elasticity	Bending strength	Modulus of bending elasticity	
	(wt %)	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(%)	(°C)	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(°C)
M 1	39.6	15.3	1 145	1.75	33	24.6	1 129	18.1	1 230	20
M 2	38.4	14.9	1 122	1.76		25.5	1 187	19.3	1 239	
M 3	35.5	15.1	1 224	1.77		23.6	1 087	17.6	1 161	
M 4	41.3	16.7	1 237	1.84		29.1	1 241	19.8	1 267	
M 5	41.0	17.2	1 219	1.85		27.4	1 173	19.7	1 313	
M 6	41.9	13.8	1 158	1.61		28.5	1 284	20.1	1 297	
Average	39.6	15.5	1 184	1.76		26.5	1 184	19.1	1 251	
CM 1	39.1	13.0	1 351	1.53	23	23.4	1 279	16.3	1 461	20
CM 2	39.2	13.8	1 391	1.52		25.1	1 401	16.3	1 490	
CM 3	39.8	12.9	1 462	1.46		25.8	1 426	16.7	1 481	
CM 4	39.3	14.4	1 520	1.47		26.4	1 397	17.3	1 526	
CM 5	39.5	12.9	1 447	1.55		26.9	1 375	16.8	1 523	
CM 6	38.0	12.8	1 398	1.52		25.9	1 294	16.3	1 467	
Average	39.2	13.3	1 428	1.51		25.6	1 365	16.6	1 491	
C	46.6	21.9	1 666	2.73	11	25.4	1 336	17.0	1 483	20

用いられている。しかしこれらの方法を FRP 材料に適用した場合、温度ゲージあるいは熱電対の接着が FRP 材料の疲労特性に影響を及ぼすことは充分考えられる。また材料の変形量が大きく、荷重繰返し速度の速い疲労試験の場合には、温度ゲージの断線あるいは熱電対のはく離などのために、試験開始から破断までの試験片の温度変化を正確かつ完全に追跡すること¹⁾は難しいようである。現に Dally および Broutman²⁾あるいは Harn および Kim³⁾らは、これらの方法を用いて引張疲労試験中の FRP 材料の温度上昇を測定しているが、それぞれ少し異った測定結果を発表している。そこで本研究では温度の測定に当っては、前述のような問題点がなく、物体表面の温度を非接触的に測定できる赤外線放射温度計を用いた。

2 試験材料および静的材料特性

試験材料の母材には不飽和ポリエステル樹脂（日本触媒化学工業（株）製エポラック G 503 PTM）を使用し、強化材としてのガラス繊維布はチョップストランドマット（旭ファイバーグラス（株）製 CM 385 FA）およびロービングクロス（日本硝子繊維（株）製 EWR-33）を用いた。

均一平面曲げ疲労試験用として次の 2 種類の積層構成の FRP 板をおのおの 6 枚ずつ準備した：(1)ガラス

マット 4 枚を積層したもの（以下 M 材とよぶ）、(2)ガラスマット 2 枚の両側にガラスロービングクロスを 1 枚ずつ積層したもの（以下 CM 材とよぶ）。また CM 材を構成するロービングクロス層の強度を調べるためにロービングクロス 5 枚を積層したもの（以下 C 材とよぶ）を 1 枚準備した。なお C 材は静的引張試験における温度上昇を調べるのにも用いた。

各板は 350 mm×450 mm×2.5 mm の寸法に成形し、80℃、5 時間のアフタキュアを行った。

静的試験は引張試験、三点曲げ試験の他に、均一平面曲げ疲労試験を行う関係上、四点曲げ試験も行った。各 FRP 板の静的材料特性を Table I に示す。なお、三点曲げ試験の支点間隔は 50 mm、四点曲げ試験の支点間隔および負荷点間隔はそれぞれ 90 mm、40 mm であった。

3 均一平面曲げ疲労試験

島津製作所製 UF-15 型平面曲げ疲労試験機を用いて、平均応力 $\sigma_m = 0$ kg/mm²、荷重繰返し速さ 1 800 回/分の両振均一平面曲げ疲労試験を次の 2 種類の温度条件のもとで行った：(1)ふん囲気温度が一定の場合、(2)試験片表面の温度が一定の場合。

材料は M 材および CM 材を用い、各板から長さ 110 mm、幅 20 mm の短冊形試験片を切り出した。そ

して各板から1本ずつを無作為抽出し、一条件6本を一組として疲労試験に用いた。なおCM材はロービングクロス層の縦糸方向と応力方向とが一致するように試験片を切り出した。

3・1 ふん囲気温度が一定の場合

応力振幅は、M材については11, 10, 9, 8および7 kg/mm²の5段階、CM材については10, 9, 8, 7, 6および5.5 kg/mm²の6段階で疲労試験を行った。

周囲条件はふん囲気温度22±1℃、湿度55±5%とし、疲労試験中における荷重作用点でのたわみ振幅および試験片中央部表面の温度を連続的に記録した。

温度の計測に当っては、非接触的に物体表面の温度を測定できる赤外線放射温度計(旭電子光学研究所製サーモエース TA-60 型、視野角5ミリラジアン、感度0.5℃)を用いた。

3・2 試験片表面の温度が一定の場合

試験片の温度上昇が疲労挙動にどの程度の影響を及ぼすかを確かめるために、疲労試験中の試験片表面の温度が試験開始前の温度(22±1℃)に保たれるように冷風を吹きつけて疲労試験を行った。材料はCM材のみを用い、応力振幅9および8 kg/mm²の応力水準について疲労試験を行った。そして前節の場合と同様に疲労試験中における荷重作用点でのたわみ振幅を連続的に記録した。

4 実験結果および考察

以下に試験片の温度上昇を対象として種々のデータ整理および考察を行っているが、温度上昇としては発熱によって上昇した試験片温度と疲労試験中一定に保たれたふん囲気温度との差を取っている。またFig.5～8の記号は試験片内部の温度を一般的に T で表し、試験片表面の温度を T_s 、ふん囲気温度を T_0 で表している。

4・1 静的引張試験における試験片の温度上昇

C材について4.5 kg/mm²/分の応力上昇速度で静的引張試験を行ったときの試験片表面における温度上昇の一例をFig.1に示す。Fig.1に示すように負荷

Fig. 1. Temperature increase of cloth FRP at static tensile test.

途中ではほとんど温度上昇はなく、破断とともに温度上昇が生じることがわかった。温度上昇および上昇速度は破断速度に依存するようであり、急激な破断が生じた場合には破断部において瞬時に約25℃の温度上昇が生じた。このような破断時の温度上昇は破断時の繊維同志の摩擦および繊維の引抜け摩擦などに起因していると考えられる。

4・2 ふん囲気温度が一定の場合の疲労挙動

以下の4・2・1および4・2・2の各項目は各応力レベルにおけるワイブル分布による平均破断繰返し数に近い破断繰返し数の試験片の場合について考察を行っている。

4・2・1 疲労特性 M材およびCM材のS-N線図をFig.2に示す。時間強度はM材の方が優れている。しかし寿命のばらつきはCM材の方が小さいので、材料の信頼性という点ではCM材の方が勝っている。

Fig.3および4に応力振幅をパラメータとして、疲労に伴う荷重作用点でのたわみの変化を示す。両材料に同一応力振幅を作用した場合、CM材は弾性係数が高いためにM材に比べてたわみは少い。しかしセカント係数の比(200回におけるセカント係数を基準にしたときのセカント係数の比)が低下していくこう配は両材料ともほぼ同程度である。

CM材の曲げ疲労強度が弱い原因としては、弾性係数の異なる両層の境界ではく離が生じやすいこと、両外

Fig. 2. S-N curves of M-FRP and CM-FRP.

Fig. 3. Deflection during fatigue (M-FRP).

Fig. 4. Deflection during fatigue (CM-FRP).

側のロービングクロス層が大きな引張りおよび圧縮応力を受けるため、疲労損傷が主にこの層で生じること、そしてロービングクロス層の圧縮強度が弱いことなどが考えられる。

4・2・2 疲労の進行に伴う試験片の温度上昇 試験片表面温度と繰返し数との関係を応力振幅をパラメータとして表したのが Fig. 5 および 6 である。両材料とも応力振幅が大きいほど初期の温度上昇のこう配は急である。

M材では応力振幅が 7 kg/mm² で 10⁷回以上の疲労寿命を有する場合には、試験開始から一定時間後にはほぼ定常な温度状態に達する。しかしそれ以上の応力振幅では定常状態はなく、応力振幅によって温度の上昇

Fig. 5. Temperature increase at the surface of the specimen during fatigue (M-FRP).

Fig. 6. Temperature increase at the surface of the specimen during fatigue (CM-FRP).

速度はかなり異なり、応力振幅が大きいほど上昇速度も速い。

一方、CM 材では応力振幅が 10 kg/mm² の場合のみ定常状態はなく、温度は破断まで急上昇する。しかしそれより小さい応力振幅の場合には、試験開始から一定時間後にはほぼ定常な温度状態に達し、その温度および期間は応力振幅が小さくなるほど低くまた長くなる。そしてその後、破断が近づくにつれて急激に再上昇する。応力振幅が 5.5 kg/mm² の場合には定常状態のまま 10⁷ 回に達する。

また同一応力振幅における M 材と CM 材の温度上昇を比較すると M 材の方が温度上昇が大きい。

ここで M 材および CM 材の疲労による温度上昇の差について考察する。

疲労に伴う FRP 材料の温度上昇は樹脂と繊維の界面での両者の固体摩擦および樹脂内部の粘性仕事による発熱が原因と考えられ、発熱量は文献にも示されているように繊維方向と荷重の作用方向とがなす角度によって影響を受けると考えられる。

いま、樹脂内に埋込まれた繊維束の方向と荷重の作用方向とが一致する場合を考えると、荷重のかんりの部分を繊維が担い、繊維と繊維の間の樹脂に作用する荷重は小さい。したがって上述のような固体摩擦および粘性仕事による発熱量はあまり大きくないと考えられる。しかし、たとえば荷重の方向に対して 45° の方向に配向した繊維束の場合は、繊維束内では繊維はすべて荷重方向に対して 45° の方向に平行に並んでおり、この方向には大きなせん断応力が発生するために、繊維と樹脂の界面でのすべりおよび繊維間を埋めている樹脂のせん断ひずみは大きくなる。したがって繰返し荷重が作用したときの、繊維と樹脂との固体接触摩擦および繊維間の樹脂の粘性仕事による発熱量は大きくなると考えられる。また繊維束が上記以外の角度に配向した場合には、上述の二つの場合が組合わされたような挙動を示すと考えられる。

そして、このような固体摩擦および粘性仕事による発熱量は応力の増加とともに大きくなると考えられる。

以上のことから本研究の場合には、マット（単繊維 200 本が一方方向に引きそろえられた長さ 50 mm の繊維束（ストランド）があらゆる方向に配向されている）のみを積層した M 材、およびマットとロービングクロス（縦糸方向が応力方向と一致するように使用し、横糸は縦糸に直交している）を積層した CM 材の積層構成を考慮すれば、両材料に同一応力振幅を作用した場合の発熱量は M 材の方が CM 材よりも大きいこと、また両材料とも応力振幅の増大とともに発熱量も大きくなることは容易に推察できる。

表面温度は M 材では疲労の進行とともに上昇する一

方であるのに対して, CM 材のように剛性の低いマッ
ト層の外側に弾性係数の高いロービングクロス層を配
した積層構成とすることによって, ロービングクロス
層がある程度の疲労損傷を受けるまで, 各応力振幅に
応じた一定の低い温度に保ち得ることがわかった。し
たがって温度上昇の面からも CM 材は M 材より信頼性
のある材料であると考えられる。

4・2・3 疲労試験初期の試験片内部の温度分布

疲労試験中の試験片表面の温度上昇のみでなく, 試験
片内部の温度状態を知っておくことも重要である。

本節では均一平面曲げ疲労試験初期の試験片内部の
温度分布を, 厚さ方向に関する一次元非定常熱伝導問
題として解析し, それが時間の経過とともにどのように
に変化するかを考察した。

均一平面曲げ疲労試験では応力およびひずみは中立
軸からの距離によって変化する, エネルギー損失に
基づく内部の発熱量は厚さ方向にある分布を持ってい
ると考え, 実際に近い境界条件の場合について解析を
行った。

試験片の厚さ方向に x 軸を取り, 試験片厚さを $2l$
とする。

問題を簡単にするために次の諸仮定をおく。

- (1) 材料は均質材料である。
- (2) 試験片の内部には損失エネルギーに相当する発熱
がある。
- (3) 単位体積当りの損失エネルギーは応力振幅の二乗
に比例する。したがって単位体積, 単位時間当りの発
熱量は中立軸からの距離 x の二乗に比例し, また時間
には無関係であるとする。
- (4) x 軸に垂直な両表面から空中への熱伝達はニュ
ートンの冷却法則に従うものとし, 試験片からチャッ
クへの熱伝導ならびに両側面およびチャック部から空
中への熱伝達は考えない。
- (5) 熱に関する定数は温度により変化しない。

材料内部に単位体積, 単位時間当り $q(x)$ の発熱量
がある場合の熱伝導方程式は次式のように表される。

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} + \frac{q(x)}{c\rho} \quad (1)$$

初期条件は

$$t=0: \theta(x, 0)=0 \quad (2)$$

境界条件は板厚の中央および表面において

$$x=0: \frac{\partial \theta(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$x=l: \frac{\partial \theta(l, t)}{\partial x} = -h\theta(l, t) \quad (4)$$

また単位体積, 単位時間当りの発熱量 $q(x)$ は

$$q(x) = q_0 \left(\frac{x}{l} \right)^2 \quad (5)$$

ここで $\theta(x, t) = T(x, t) - T_0$

$T(x, t)$: 位置 x , 時刻 t における試験片内部の
温度

T_0 : ふん囲気温度 (初期温度)

κ : 温度伝導率 ($k/c\rho$)

k : 熱伝導率

c : 比熱

ρ : 密度

h : 相対熱伝達率 (α/k)

α : 熱伝達率

q_0 : 試験片表面 (応力最大部) における単
位体積, 単位時間当りの発熱量

この問題の解は次式のように得られる。

$$\theta(x, t) = \frac{q_0 l^2}{12k} \left\{ \left(1 + \frac{4}{hl} \right) - \left(\frac{x}{l} \right)^4 \right\} - \frac{2q_0 l^2}{k} \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp \left\{ - \left(\frac{\lambda_n}{l} \right)^2 \kappa t \right\} \cos \frac{\lambda_n x}{l} \quad (6)$$

ただし

$$C_n = \frac{(1 - 2/\lambda_n^2) \sin \lambda_n + (2/\lambda_n) \cos \lambda_n}{\lambda_n^2 (\lambda_n + \sin \lambda_n \cos \lambda_n)} \quad (7)$$

また λ_n は

$$hl \cot \lambda_n = \lambda_n \quad (8)$$

より求める。

一例として M 材に 8 kg/mm^2 の繰返し応力が作用
した場合について, 試験開始から 500 秒 (15 000 回)
後までの数値計算結果を述べる。計算に当っては各定
数として次のような値を採用した。

$$l = 0.1197 \text{ cm}, \quad T_0 = 22.5^\circ \text{C}$$

$$\kappa = 1.34 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

$$k = 0.639 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ \text{C}$$

$$c = 0.313 \text{ cal/g} \cdot ^\circ \text{C}, \quad \rho = 1.52 \text{ g/cm}^3$$

$$h = 1.195/\text{cm}, \quad q_0 = 0.178 \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{sec}$$

ただし, h および q_0 は試験片の表面位置での温度
の計算結果と実測値とが一致するように定めた。

以上のような各定数を用いて計算した試験片表面
および中央位置での計算結果ならびに実測データを

Fig. 7. Comparison of experimental data and calculated curves relative to the temperature increase in the early period of fatigue test.

Fig. 8. Temperature distribution in the inside of the specimen in the early period of fatigue test.

Fig. 7 に示す。またこのような表面温度のときの試験片内部の温度分布を Fig. 8 に示す。

Fig. 8 から疲労試験開始直後には、試験片表面付近は応力が大きいので中央部よりも高温であるが、試験開始後 55 秒 (1 650 回) くらいで表面と中央の温度はほぼ等しくなり、その後は中央の方が高温となることがわかる。また試験片内部の最高温度は時間の経過とともに試験片表面から中央へと移動することがわかる。応力振幅が 8 kg/mm^2 の場合、計算した範囲内の表面と中央の温度差の最大値は約 0.3°C 程度で、あまり大きな差はないが、これは試験片の厚さが薄いためと考えられる。

4・3 試験片の温度上昇が疲労挙動に及ぼす影響

Fig. 6 からふん囲気温度を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ に保って、CM 材に 8 kg/mm^2 の繰返し応力を作用した場合、試験片表面は約 18 000 回くらいまでは $4 \sim 5^\circ\text{C}$ の温度上昇であるが、破断にいたる 68 000 回までの間 $5 \sim 37^\circ\text{C}$ の温度上昇を示している。したがって試験片表面の温度を試験開始前の温度 ($22 \pm 1^\circ\text{C}$) に保った場合には、上述の上昇温度分を冷却したことになる。

CM 材に 8 kg/mm^2 の繰返し応力を作用し、ふん囲気温度を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った場合および疲労試験中の試験片表面温度を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った場合の荷重作用点でのたわみと繰返し数との関係を Fig. 9 および 10 に、セカント係数の比と繰返し数との関係を Fig. 11 および 12 に示す。

Fig. 9 および 10 より破断繰返し数のばらつきにワイブル分布を適用して求めた平均破断繰返し数を比較すると、ふん囲気温度を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った場合に 61 000 回であったのが試験片表面温度を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った場合には、109 000 回に伸び、増加率は 79% にも達した。

Fig. 9. Deflection during fatigue. (Environmental temperature is constant.)

Fig. 10. Deflection during fatigue. (Surface temperature of the specimen is maintained at $22 \pm 1^\circ\text{C}$.)

Fig. 11. Secant modulus ratio (E_s/E_{s200}) during fatigue. (Environmental temperature is constant.)

また Fig. 11 および 12 を比較すると、セカント係数の比は試験片表面温度を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った場合の方が、ふん囲気温度を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ に保った場合よりも緩やかに低下している。すなわち単に寿命が伸びるだけでなく、たわみの増え方も緩やかになるとともに、たわみがかなり大きくなっても急速には破断にいたらない。たとえば、Fig. 9 よりふん囲気温度が一定の場合にはたわみが 4 mm に達すれば、その後約 4 000 ~ 5 000 回で破断にいたっているのに対して、Fig. 10 より試験片表面の温度が一定の場合には約 10 000 ~ 28 000 回後に破断している。

Fig. 12. Secant modulus ratio (E_s/E_{s200}) during fatigue. (Surface temperature of the specimen is maintained at $22 \pm 1^\circ\text{C}$.)

9 kg/mm² の応力振幅を作用した場合も、平均破断繰返し数はふん囲気温度一定の場合の 20 800 回から 32 400 回に 56% も伸びる。またセカント係数の比およびたわみの変化についても、応力振幅 8 kg/mm² の場合と同様の傾向を示した。

以上のように、FRP 材料では疲労試験中の試験片の温度上昇が、疲労挙動にかなり大きな影響を及ぼしていることがわかる。したがって FRP 材料は温度に敏感であるので、使用するふん囲気温度と疲労による温度上昇を充分考慮して設計に当らねばならない。

5 結 言

静的引張試験および均一平面曲げ疲労試験中の、主として試験片の温度上昇に関して、種々の実験ならびに考察を行ったところ次のことが明らかになった。

(1) 静的引張試験では、負荷途中ではほとんど温度上昇はないが、破断とともに温度上昇が生じる。急激な破断の場合には、破断部において瞬時に約 25°C の温度上昇を生じた。

(2) 疲労強度は M 材の方が大であるが、疲労寿命のばらつきの面から見た材料の信頼性は CM 材の方が優れている。

(3) 均一平面曲げ疲労試験における試験片表面の温度上昇は、M 材および CM 材とも応力振幅が大きいほど大きく、M 材と CM 材とでは前者の方が温度上昇は大きい。したがって温度上昇の面からも CM 材の方が信頼性の高い材料と考えられる。

(4) CM 材のように、剛性の低いマッド層の外側に弾性係数の高いロービングクロス層を配した積層構成とすることによって、温度上昇を低くおさえ得る。

(5) 均一平面曲げ疲労試験中の試験片内部の温度は、試験開始直後では試験片表面付近の方が中央部よりも高温であるが、時間が経過するにつれて中央部の方が高温となる。

(6) CM 材に 9 および 8 kg/mm² の応力振幅を作用して、試験片表面の温度を一定に保って疲労試験を行った場合と、ふん囲気温度が一定の場合とを比較すると、両応力振幅の場合とも前者の方が後者よりそれぞれ 56%, 79% もワイブル分布による平均破断繰返し数は増加し、セカント係数の低下も緩慢である。

したがって FRP 材料の疲労試験中の温度上昇はその疲労挙動にかなり大きな影響を及ぼしていることがわかった。

(昭和 52 年 3 月 24 日 第 6 回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Dally, J. W., and L. J. Broutman, J. Composite Materials, **1**, 424 (1967).
- 2) Harn, H. T., and R. Y. Kim, J. Composite Materials, **10**, 156 (1976).
- 3) 藤井太一, 材料, **16**, 257 (1967).
- 4) 平井恒夫, 吉田治夫, 材料, **23**, 954 (1974).
- 5) Endo, K., and M. Watanabe, Proc. 14th JCMR, p. 120 (1971).
- 6) 林 毅, “複合材料工学”, p. 296 (1971) 日本科学技術連盟