

強化樹脂の低温疲れに関する研究

三 木 教*・石 田 武*

Studies on the Fatigue-Behavior of Glass Fiber Reinforced Polyester in Low Temperature

Satoshi MIKI and Takeshi ISHIDA

Abstract

Fatigue behavior of glass fiber reinforced polyester under a repeated tensile stress on the flat specimen or a repeated rotating bending stress on the specimen of circular bar in low temperature ($-100^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$) were investigated.

And effects of the reinforce by glass fiber to polyester at low temperature ($-100^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$) were investigated.

1. 緒 言

本文はガラス繊維強化樹脂について低温領域 ($-100^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$) で繰返し引張または回転曲げによる疲れ破壊挙動を調べ、特に疲れおよび疲れ亀裂の発生と進行、ガラス繊維による強化効果などを明らかにした結果について述べたものである。

2. 実験材料および実験方法

2.1 実験材料

本実験に用いた材料は2種のポリエステル単量体を等量に混合し、これに同重量のガラス繊維を一方向に含浸して硬化したものである。試験片は Fig. 1 に示したような形状・寸法で、ガラス繊維に3つの方向性 (0° , 45° , 90°) を与えたものを用いた。

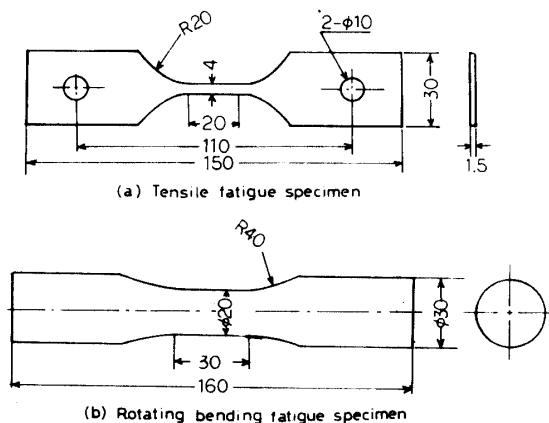


Fig. 1 Forms and dimensions of specimens

2.2 実験方法

帯板試片の低温引張疲れ実験には三元冷却による低温槽内で試片に繰返し引張を与えた。このときの繰返し数は毎分1200回、温度はそれぞれ 15°C , 0°C , -50°C , -100°C で実験を行った。

丸棒試片の回転曲げ疲れ試験には高速小野式回転曲げ試験機を用いて毎分10000回の繰返し数で行った。試片部分は冷却管内で一定の低温状態に保持し、この温度はそれぞれ 25°C , -50°C であった。

試片の疲れによる温度上昇はサーモペイントによって測定し、伸びまたはたわみは伸び計によって測定した。

3. 低温引張疲れの実験結果と考察

3.1 静的特性

繰返し疲れ実験に先立って、静的引張試験を行った。この実験は温度がそれぞれ 15°C , 0°C , -50°C , -100°C の各雰囲気温度で、引張ひずみ速度は $\dot{\epsilon}=1.2 \times 10^{-3}/\text{sec}$ で行った。これによって得た結果を Fig. 2 に示した。なお、比例限、引張強さ、ヤング率および伸び率と温度との関係を Fig. 3 に示した。これらより明らかなように、ガラス繊維が軸に平行に入っている試片 (0° 方向) は破断まで応力とひずみがほぼ直線関係にあり、他の方向材に較べて引張強さが高い。他の繊維方向試片では -100°C までの低温においてそれぞれ引張強さと比例限の比が約2倍となった。

* 生産機械工学科

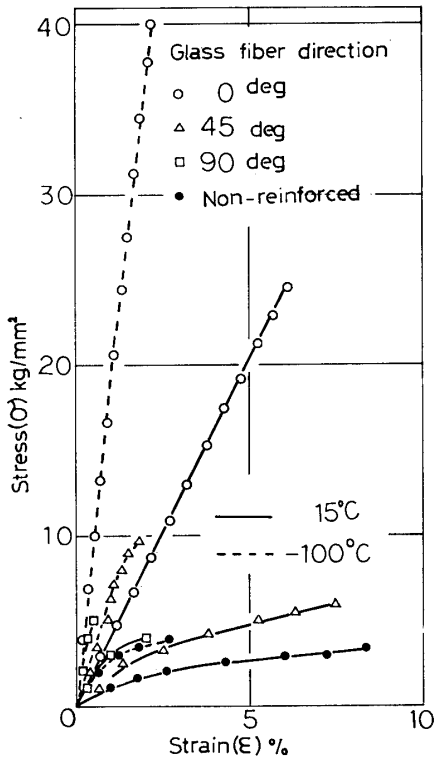


Fig. 2 Stress-strain diagrams of G. F. R. P.

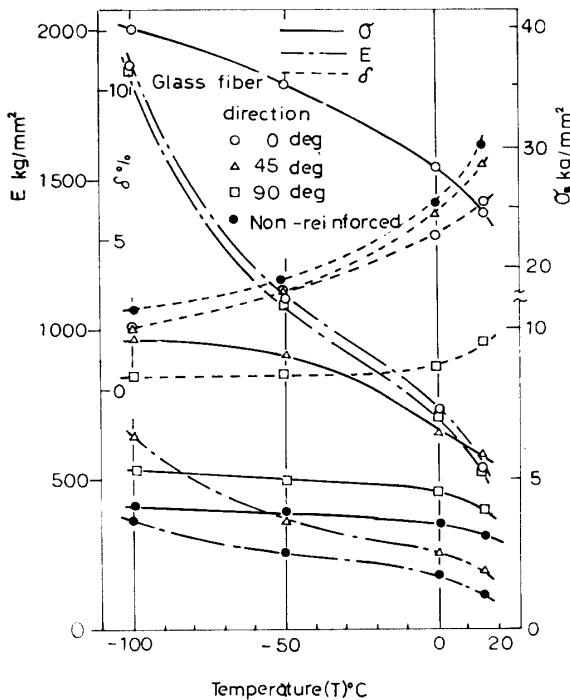


Fig. 3 Tensile strength (σ_B), Young's modulus (E) and elongation (δ) of G. F. R. P. in low temperature

ガラス繊維が軸と直角方向の試片では、ほとんど強化効果が認められないが、繊維が45°方向に交叉した試片(45°方向)では強化効果が約2倍、繊維が軸方向(0°方向)の試片では強化効果は約10倍となっ

た。さらにヤング率は各方向材とも低温になるほど大きくなり、強化しない母材試片では15°Cで約220kg/mm²で、-100°Cで約350kg/mm²であるが、繊維が軸平行試片(0°方向)では常温で約600kg/mm²、-100°Cでは約2000kg/mm²となり、他の繊維方向のものに比較して最大であった。伸び率は母材試片と繊維が軸と45°方向の試片とは各温度において、ほぼ等しく、次に繊維が0°方向のものが小さくなり、90°方向のものが最小となった。

3.2 疲れの発生と進行

繊維方向が軸平行のものについて、温度-50°Cと-100°Cの場合、応力繰返しによる疲れひずみの変化をFig. 4に示した。このとき、低温雰囲気の種類にか

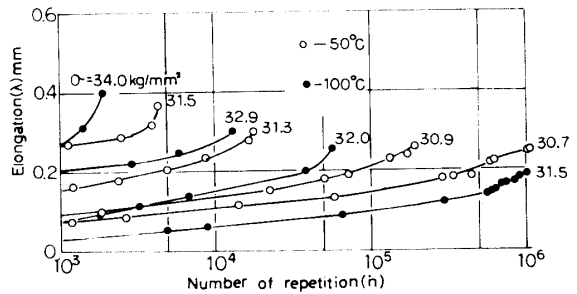
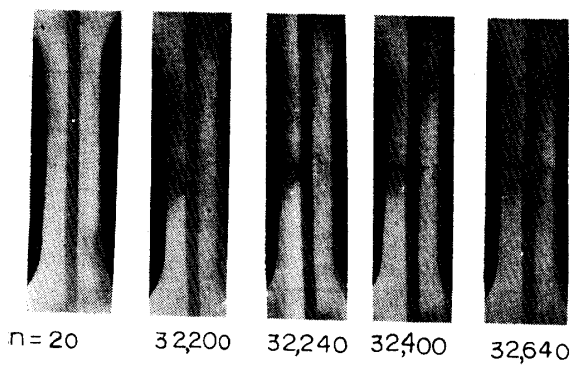


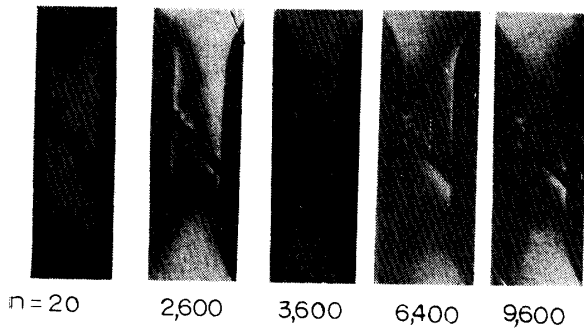
Fig. 4 Elongation of specimens during the repeated stress

かわらず疲れひずみは応力が大きいものほど大きい、その変化過程の繰返し数は少なくて破断する。例えば、-100°Cでは応力34.0kg/mm²で繰返し数が2×10³で破断し、そのときの伸びは約0.4mmであるが、応力が32.0kg/mm²では繰返し数が6×10⁴で破断し、そのときの伸びは0.25mmとなった。この傾向は繊維の方向にかかわらず同様であった。なお、実験中の試片の温度上昇は認められなかったが、このことは熱の発生が直ちに放熱冷却するためであると考えられる。

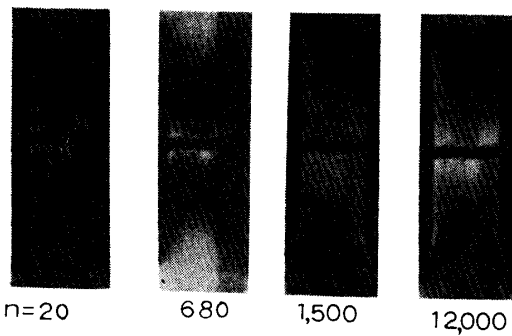
ガラス繊維による強化効果を調べるために、ガラス繊維を1本、試片軸に平行、45°方向および直角方向に入れて繰返し引張を行ったが、その際の疲れ亀裂進展中の光弾性写真をFig. 5, Fig. 6に示した。常温においては、ガラス繊維が試片軸に入った場合は、繊維による強化効果が大きく母材ポリエステルの応力分担は少ない。Fig. 5(a)に示したように、この繊維方向が平行材試片では繰返し数が32000回で亀裂の発生が樹脂部で認められ、それが逐次進行し、繰返し数32240回でガラス繊維を横切って一時停滞して、ついに32640回で破断している。これに較べて繊維方向が直角の試片では、ガラス繊維による強化効果はなく、



(a) $\sigma = 1.80 \text{ kg/mm}^2$



(b) $\sigma = 0.50 \text{ kg/mm}^2$



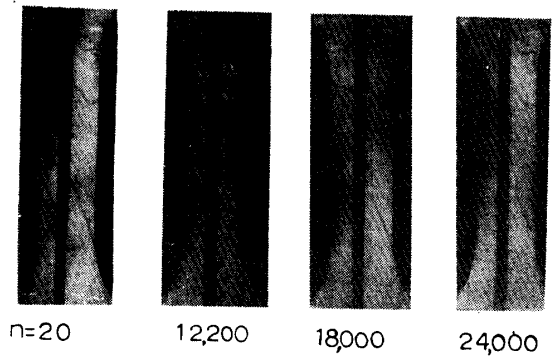
(c) $\sigma = 0.45 \text{ kg/mm}^2$

Fig. 5 Isochromatic fringe patterns of G. F. R. P. under a repeated tensile stress ($T=15^\circ\text{C}$)

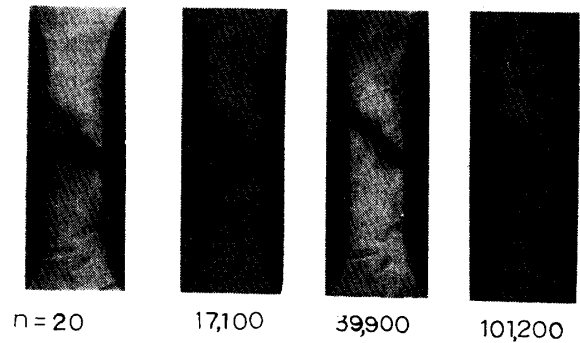
Fig. 5(c) に示したように繰返しによってほとんど変化を示さず亀裂の発生を認めることなく、ガラス繊維の部分で割裂きによって直ちに破断した。繊維が 45° 方向の試片では、Fig. 5(b) からわかるように、この繊維と樹脂との境界縁に応力集中を生じ、そこから亀裂が発生し、試片軸に直角に進展して破断した。

この二者、即ち、繊維方向が 0° と 45° の材料については亀裂発生は先ず繊維の割裂きによって生ずるものと思われる。従って、ガラス繊維方向が軸と平行なものは強化効果が大きいことになる。

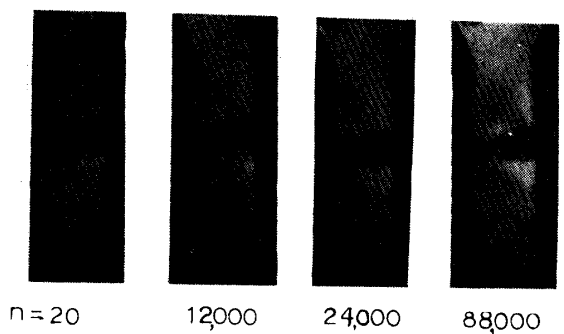
Fig. 6 は -50°C における場合であり、(a)が 0° 方向、(b)が 45° 方向、(c)がガラス繊維 90° 方向のものであ



(a) $\sigma = 2.40 \text{ kg/mm}^2$



(b) $\sigma = 0.30 \text{ kg/mm}^2$



(c) $\sigma = 0.20 \text{ kg/mm}^2$

Fig. 6 Isochromatic fringe patterns of G. F. R. P. under a repeated tensile stress ($T=-50^\circ\text{C}$)

る。平行に入った場合は常温の場合と同じく、ガラス繊維の強化効果が大きいため、母材樹脂の応力分担は少なくなるが、低温のため、母材が相当脆くなり、繰返しによってもほとんど変化を示さずに破断した。また、繊維が 45° 方向および 90° 方向の試片も樹脂には繰返し引張によって変化を認めることなく、ガラス繊維との境界縁より試片軸に直角に破断した。低温になると樹脂の弾性係数が大きくなるから特に繊維が 0° 方向のものでは強化効果の割合はやや低下するが、全体的には強くなる。

3.3 疲れ強さ

低温繰返し引張疲れ実験における繰返し応力と破断繰返し数との関係を示したのがFig. 7であり、Fig. 8に一応繰返し数 10^6 にあける疲れ強さを示した。またFig. 9には疲れ強さと引張強さとの比を各低温について示した。さらに、これらの数値を Tab. 1 に示した。疲れ強さは繊維方向が軸に平行な試片が -100°C までの低温では最も強く、次が繊維が 45° 方向試片で、

繊維が 90° 方向試片と母材試片とはほぼ等しく最小となった。また疲れ強さと引張強さの比も同様に、繊維が 0° 方向材が最も大きく、常温においてほぼ 70% 、 -50°C 以下ではほぼ 80% となり、繊維が 45° 方向材では常温で約 25% 、 -50°C 以下で約 60% 、繊維が軸に直角のものと同母材試片は -100°C までほぼ同じ値を示し、 $25\sim 30\%$ であった。

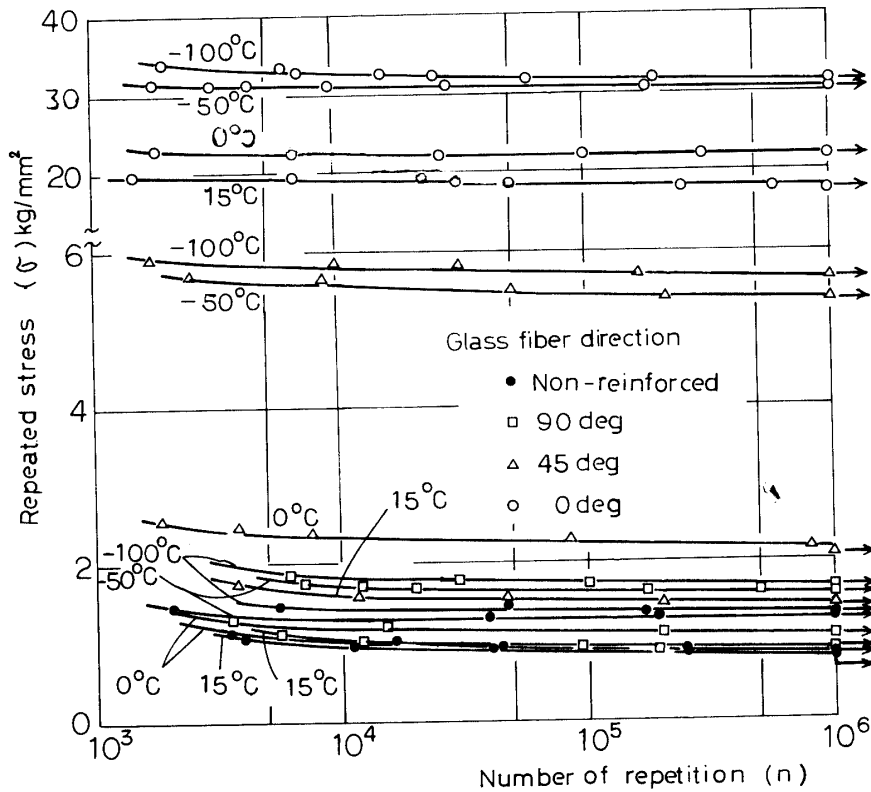


Fig. 7 S-n diagrams of G. F. R. P. under a repeated tensile stress in low temperature

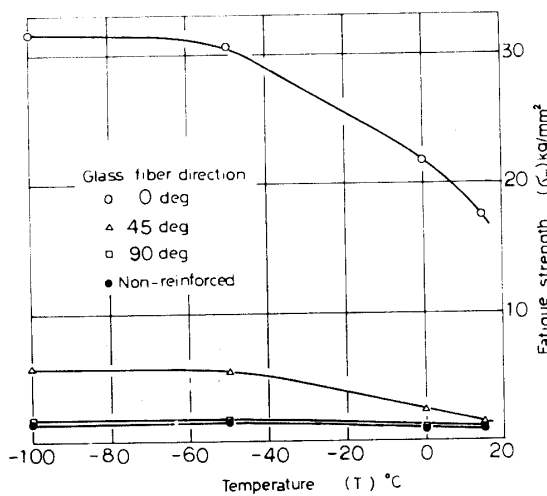


Fig. 8 Fatigue strength at the number of repetition 10^6 of G. F. R. P. in low temperature

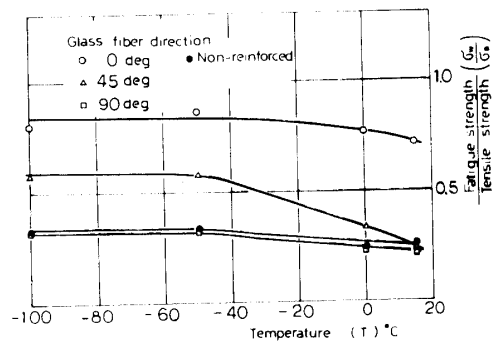


Fig. 9 Ratio of fatigue strength ($n=10^6$) (σ_w) to tensile strength (σ_B) of G. F. R. P. in low temperature

Tab. 1 Tensile strength (σ_B), Fatigue strength (10^6) (σ_w) under a repeated tensile stress and σ_w/σ_B of G.F.R.P. in low temperature

Temperature (T) °C	Glass fiber direction deg	Tensile strength (σ_B) kg/mm ²	Fatigue strength (10^3) (σ_w) kg/mm ²	$\frac{\sigma_w}{\sigma_B}$
15	Non-reinforced	3.18	0.80	0.25
	0	24.60	17.50	0.71
	45	6.00	1.43	0.24
	90	4.05	0.84	0.21
0	Non-reinforced	3.60	0.85	0.24
	0	28.40	21.70	0.76
	45	6.50	2.15	0.33
	90	4.70	1.05	0.22
-50	Non-reinforced	4.00	1.33	0.33
	0	35.30	30.60	0.87
	45	9.20	5.35	0.58
	90	5.00	1.60	0.32
-100	Non-reinforced	4.18	1.37	0.33
	0	40.00	31.70	0.80
	45	9.70	5.62	0.58
	90	5.25	1.69	0.32

4. 低温回転曲げ疲れの実験結果と考察

4.1 静的特性

疲れ実験に先立ち、先ず静曲げ実験を行った。温度

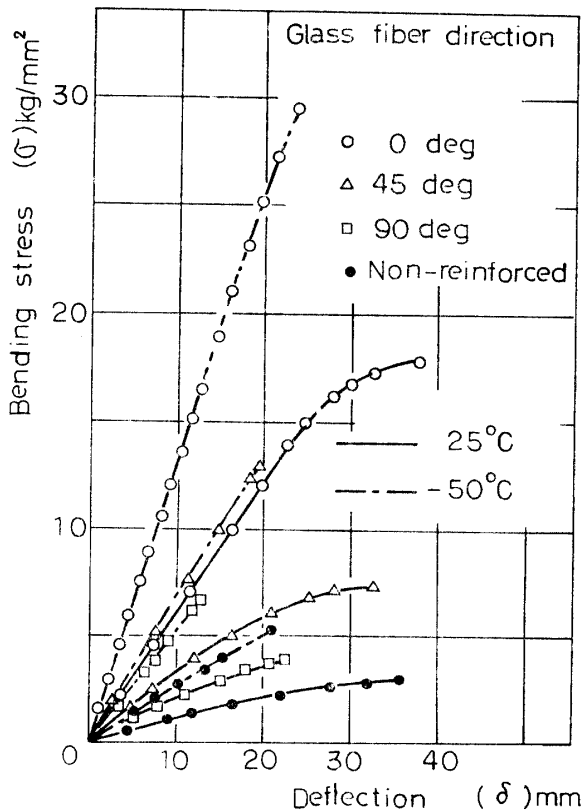


Fig. 10 Stress-deflection diagrams of G. F. R. P. under static bending in low temperature

25°Cと-50°Cの場合について、曲げ応力とたわみの関係を Fig. 10に示した。引張の場合と同様に、母材、繊維が直角方向、45°方向、0°方向の試片の順に強度、弾性定数は大きくなっているのがわかる。また、-50°Cになると強度、弾性定数ともに、常温の場合に比較してほぼ2倍となった。

4.2 疲れの発生と進行

常温および-50°Cで毎分10000回の回転数で疲れ実験を行い、母材試片のみ常温で2500rpmでも行った。この S~n 関係を Fig. 11に示した。繊維強化材が低温においても繰返し数 10^7 で明瞭な疲れ限を示さなかったが、一応繰返し数 10^7 における強さを採用、比較することになると、繊維方向が0°、繊維方向が45°、繊維方向が90°、母材の順で弱くなる。また、-50°C

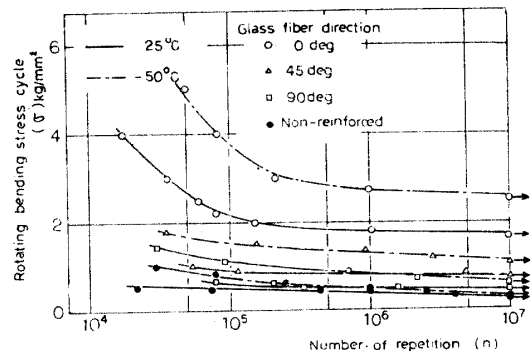


Fig. 11 S-n diagrams of G. F. R. P. under rotating bending stress cycles in low temperature

では常温に比較して約1.5倍の大きさの値となった。

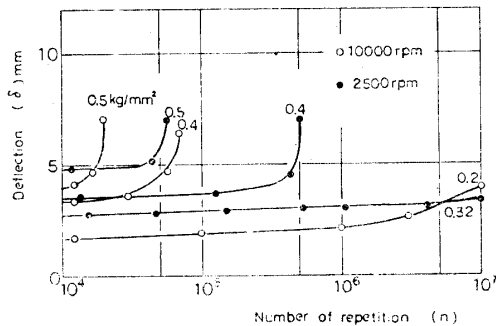


Fig. 12 Deflection of specimens during the rotating bending stress

また、疲れ進行中の試片のたわみを測定したが、Fig. 12に一例として常温における母材試片の場合を示した。これより明らかなように、疲れたわみは応力が高いものほど大きいが、その変化過程の繰返し数は少なくして破断する。また、毎分回転数が変わっても破断直前のたわみには大差なかった。

応力繰返しと疲れの両者によって試片の温度は上昇するが、この試片温度の繰返し数による変化を Fig. 13 に示した。試片に繰返し回転曲げ応力を加えると、試

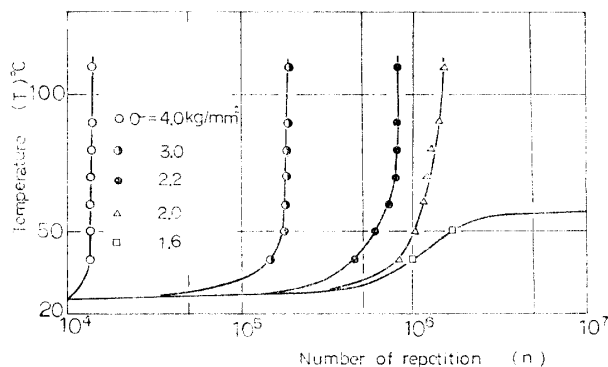


Fig. 13 Temperature of specimens during the repeated rotating bending stress in low temperature

片の温度は上昇を始め、次に疲れが発生するとその部分の温度がリング状に上昇し、そのリング中が長手方向に拡大しながら、さらに疲れ起点の温度が上昇するが、繊維が軸と平行な試片では破断部の温度は大抵 120°C 程度になった。試片の破断時の温度分布を Fig. 14 に示したが、これによると明らかに繰返し数が 10^7 において破断しなかった試片においても 60°C 近くまで温度が上昇していることが認められる。

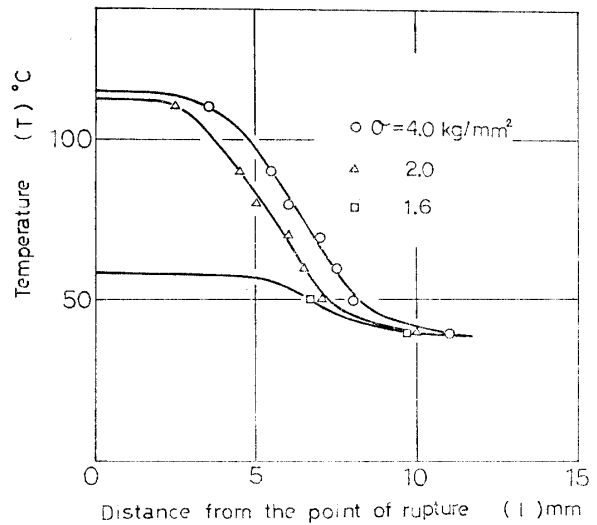


Fig. 14 Temperature distributions of specimens at broken down

5. 結 論

常温より -100°C までの低温領域において、ガラス繊維強化樹脂の繰返し引張疲れ実験および回転曲げ疲れ実験を行い、次のようなことが明らかとなった。

- 1) ガラス繊維による強化効果は繊維が応力軸と平行なものが最も大であり、他の繊維方向材ではガラス繊維の境界縁で割裂きにより破断するため、繊維が 45° 方向材が次に強く、繊維が 90° 方向材が最小となった。
- 2) -100°C までの低温においては、ガラス繊維による静的強化効果は繊維方向 0° 材が10、繊維方向 45° 材が2、繊維方向 90° 材が1となった。
- 3) -100°C までの低温におけるガラス繊維の繰返し引張応力のもとでの強化効果は、繊維方向 0° 材で20、繊維方向 45° 材で2~4となり、繊維方向 90° 材で1となった。また、疲れ強度と引張強度の比は繊維方向 0° 材で0.8、繊維方向 45° 材で0.25~0.6、繊維方向 90° 材および母材で0.3となった。
- 4) -100°C におけるガラス繊維強化材の強度と常温におけるガラス繊維強化材の強度の比は、静的強度を比較すると、各繊維方向材とも約1.5であるが、繰返し引張疲れ強度を比較すると、母材、繊維方向 0° 材および繊維方向 90° 材で約2、繊維方向 45° 材で約4となった。
- 5) 疲れおよび疲れ亀裂の発生と進行状態がガラス繊維の方向性によって異なる挙動が明らかとなった。