高温における線材の定ひずみ塑性ねじり疲労*

藤 谷 景 三** 元 津 彰 夫***

The Low-Cycle Torsional Fatigue of Piano Wires under Constant Strain Amplitude at Elevated Temperatures

by

Keizo FUJITANI

(Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kyoto)

and Akio GENTSU

(Kobe City Technical College, Kobe)

In this paper is presented a report of tests of constant strain low cycle torsional fatigue that were carried out on 0.81% C piano wires at room temperature and at elevated temperatures 270°C, 300°C and 400°C respectively, with a view to the investigation of the plastic fatigue phenomena. Three kinds of torsions were worked for the tests, completely reversed, fluctuating and pulsating, under the test speed of 1 rpm. The main results obtained are as follows.

(1) There is larger effect of temperature on the fatigue life than that of the mean strain. Let the strain amplitude stand as it is, there is longer fatigue life at 270°C and shorter fatigue life at 400°C than room temperature, the former case being considered to be the annealing effect.

(2) The time-strength diagram shows linear decrease in strain amplitude γ_a against increase in the mean strain γ_m which the latter represents the number of cycles from the initiation of macrocrack $N'=50$ to its fracture $N=200$ or $N=1000$.

(3) The test result shows that there exists linear relationship between the total plastic strain $\gamma_{p, \text{total}}$ and N' or N , when they are plotted on a log-log scale. It is found also that the same relationship holds for the total hysteresis energy W , the not-total hysteresis w' and the strain amplitude γ_a . In the completely reversed tests, $\gamma_{p, \text{total}}$ and W are defined as $\gamma_{p, \text{total}} = 4 \sum_{n=1}^{N'} \gamma_p + \gamma_{mf}$ and $W = w \cdot N$, in which γ_p and γ_{mf} are the plastic strain amplitude and the mean strain just before fracture, respectively.

(Received Dec. 13, 1971)

1 緒 言

最近、各種の機械要素や機械構造物は塑性領域での応力あるいはひずみ状態で使用されることが少なくない。このような場合、当然大きな繰返し塑性ひずみを伴い、この塑性ひずみの蓄積が疲労寿命を支配することは、すでに塑性領域での疲労現象を解明するにあたって、Coffin, Manson らをはじめ国の内外の多くの研究者による種々の研究結果からも明らかである。

先に筆者の一人も種々の素炭鋼について主に塑性ねじり疲労試験を行ない、疲労過程での応力-ひずみの関係と疲労寿命ならびに平均応力の影響などについて探究してきた。しかし最近では高温のふん囲気の下で諸機械が使用されることが多いので高温における塑性疲労挙動も注目すべき問題の一つである。ところが、こ

の種の研究報告は数少なく実際の設計に適用しうる段階にはいたっていないようである。また本実験に用いたピアノ線は、ある温度範囲では冷間引抜加工時に材料の内部に生じた残留応力が減少して、じん性が失われ疲労寿命が短くなるが、ある温度範囲では疲労寿命が長くなることもある。

そこで本実験では、各種の温度範囲において、平均ひずみを種々変化させた場合について一連の定ひずみ塑性ねじり疲労試験を実施した。これらの実験結果から、ここでは主として両振り疲労試験では塑性ひずみの総和ならびにヒステリシスエネルギーの総和と繰返し数との関係、さらに平均ひずみを与えた場合にはひずみ振幅ならびにヒステリシスエネルギーと繰返し数との関係を調べ各種温度においても直線関係が存在することを確認した。また各種温度における時間強度線図についても検討を加えた。なお、繰返し数としてはき裂の発生が巨視的に認められるまでの繰返し数と破壊ま

* 原稿受理 昭和46年12月13日

** 正 会 員 立命館大学理工学部 京都市北区等持院北町

*** 正 会 員 神戸市立工業高等専門学校 神戸市垂水区舞子台

での繰返し数の両方について調べた。

2 実験材料および実験方法

実験に用いた材料は0.81%Cを含有するピアノ線で、直径 5.5 mm の丸棒線材から数段の引抜き工程を経て直径 3 mm に仕上げたものである。その化学成分および機械的性質をそれぞれ Table I および Table II に示す。また試験片は上述のごとく直径 3 mm で標点距離を 75 mm とした。実験は容量 200 kg・cm の静ねじり試験機を用い、回転速度は毎分 1 回転とした。また高温試験に際しては円筒形の炉心にニクロム線を巻いた電気炉を用いた。温度の制御は試験片試験部の表面から 1 mm のところに熱電対をおき、あらかじめ静止時における試験片表面の温度と設定箇所における温度との関係を求めておき、これから運転時における試験片の温度を推定した。また試験片の標点距離全体にわたって、設定温度とほぼ等しく温度誤差の僅少なことを確認してから自動温度調節器により制御を行なった。試験条件は常温、270°C、300°C、および 400°C の各温度においてひずみ振幅 γ_a は平均ひずみ γ_m を種々変えた場合、すなわち、 $\gamma_m=0$ 、 $\gamma_a=5\gamma_m$ 、 $\gamma_a=3\gamma_m$ 、 $\gamma_a=\gamma_m$ 、 $\gamma_a=0.6\gamma_m$ および $\gamma_a=0.3\gamma_m$ のそれぞれについて比較的大応力が作用する場合について、定ひずみ塑性ねじり疲労試験を行なった。また応力ならびにひずみはそれぞれねじりモーメントならびにねじれ角より弾性式を用いて計算した。

Table I. Chemical compositions of the material (%).

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
0.81	0.45	0.23	0.012	0.005	0.07	0.02	0.02

Table II. Mechanical properties of the material

Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Torsional strength τ_B (kg/mm ²)	Charpy impact value (kg・m/cm ²)
173.6	140.0	10.9

3 実験結果および考察

3・1 定ひずみ両振り塑性ねじり疲労試験の場合

Fig. 1 は線材の静的ねじり試験の結果を縦軸にせん断力 τ 、横軸にせん断ひずみ γ をとって示したものである。Fig. 2 は定ひずみ両振り塑性ねじり疲労試験の結果を縦軸にひずみ振幅 γ_a 、横軸に点線でき裂の発生が巨視的に認められるまでのひずみ繰返し数 N' (以後き裂発生繰返し数とよぶ) と実線で破壊までのひずみ繰返し数 N をとって示したものである。なお、 N' は常温では肉眼によるき裂の発生点ととり、これはひずみ繰返し試験中に応力振幅が急減しはじめる点と一致したので、高温でもこのひずみ繰返し試験中に応力振幅が急減しはじめる点をき裂の発生点とみなした。

Fig. 1. Results of static torsional test.

Fig. 2. γ_a - N' or N diagram.

図より明らかなように、同一ひずみ振幅に対してき裂発生繰返し数で整理した場合、常温の場合が長い疲労寿命を示し、270°C、300°C および 400°C の順に順次疲労寿命が短くなる傾向が現われた。また破壊までの繰返し数で整理した場合、270°C の場合が長い疲労寿命を示し、常温、300°C および 400°C の順に順次疲労寿命が短くなる傾向が現われ、点線および実線の常温および 270°C の場合に異なった傾向を示した。このことは、270°C の場合には青熱ぜい性の温度範囲にあり、繰返し応力が作用すると温度と応力の重量作用、すなわち、²⁾せい熱ぜい性の効果とさらに応力が加わる応力時効とによって材質が強化されたためであり、400°C の場合には高い温度のために冷間引抜き加工時に材料の内部に生じた残留応力が減少して疲労強度が低下したためである。

Fig. 3 は Fig. 2 のひずみ振幅 γ_a を Fig. 1 の τ - γ 線図からそれに対応する応力振幅 τ_a に書き直して表わしたものである。図のように点線、実線とも常温では長寿命を示し、270°C、300°C および 400°C の順に疲労寿命が短くなり、Fig. 2 の実線の場合とは多少異なった傾向が現われた。このように実線において 270°C よりも常温の場合が長寿命を示したのは、Fig. 1 から明らかなように降伏点の近傍では同一せん断ひずみに対して高いせん断応力を示しているからである。

Fig. 3. τ_a - N' or N diagram.

Fig. 4. Variations of stress amplitude and mean stress with number of strain cycles.

Fig. 4は縦軸に応力振幅 τ_a と平均応力 τ_m , 横軸にひずみ繰返し数 n をとってひずみ繰返し試験中に試験片に作用する応力の変化の一例を 300°C の場合について示したものである。図より応力振幅の変化は 270°C, 400°C の場合と同様に繰返し開始後まもなく増加し, 常温では繰返し開始後まもなく減少したのちいずれもわずかの間一定値を保ちき裂発生と同時に急激に減少して破壊にいたっている。これらの繰返し初期の応力振幅の増加ならびに減少は材料の硬化および軟化を示すものである。また破壊までの同一疲労寿命に対して, き裂発生繰返し数は 400°C の場合が他の温度に比べて最も長く, き裂発生から破壊までの繰返し数は 270°C の場合が最も長く, 400°C の場合が最も短くあらわれた。これらは前述と同じ理由による。繰返し数に対する平均応力の変化の様子は試験片に作用するひずみ振幅および試験温度によっては影響は少なく顕著に現われなかった。

Fig. 5は縦軸にき裂発生ならびに破壊までの塑性ひずみの総和 $\gamma_{p, total} = 4 \sum_{n=1}^{N' \text{ or } N} \gamma_p + \gamma_{mf}$, 横軸に点線でき裂発生繰返し数 N' と実線で破壊までの繰返し数 N との関係を各温度について両対数目盛りに図示したものである。ここに γ_p は各サイクルにおける塑性ひずみ振幅, γ_{mf} は破壊直前の平均ひずみである。図より明らかなように, これらの関係は定応力両振り塑性ねじり疲労試験³⁾でえられた結果と同様にはほぼ直線関係が成り立った。これらの関係を $\gamma_{p, total} = C \cdot N^\alpha$ なる式で表わせば図示のような定数 α , C の値がえられ, 各温度によってそれぞれ異なった値を示した。また塑性ひず

Fig. 5. Relations between total plastic strain and number of cycles to the initiation of crack or fracture.

みの総和は同一繰返し数に対しては点線および実線の場合ともほぼ 400°C, 常温, 300°C および 270°C の順に順次減少する傾向にある。塑性ひずみの総和が 400°C の場合他の温度に比べて大きく現われたのは, 前述のように破壊までの同一疲労寿命に対しては, 他の温度に比べてき裂発生までの繰返し数が最も長く, き裂発生から破壊までの繰返し数が最も短く, しかも試験片に作用する同一応力振幅に対して 1 サイクルあたりの塑性ひずみ振幅が大きくなるためである。これに対して塑性ひずみの総和が 270°C の場合他の温度に比べて小さく現われたのは, 破壊までの同一疲労寿命に対してき裂発生繰返し数が他の温度に比べて短く, き裂発生から破壊までの繰返し数が長く, き裂発生と同時に急激に塑性ひずみ振幅が減少するためである。

Fig. 6は縦軸にき裂発生ならびに破壊までのヒステ

Test temp.	Crack	Fracture
	----- $W = C \cdot N'^\alpha$	----- $W = C \cdot N^\alpha$
● Room temp.	$= 0.218 N'^{0.608}$	$= 0.215 N^{0.618}$
○ 270°C	$= 2.08 N'^{0.054}$	$= 3.00 N^{0.068}$
● 300°C	$= 0.843 N'^{0.285}$	$= 0.843 N^{0.285}$
⊖ 400°C	$= 0.185 N'^{0.583}$	$= 0.185 N^{0.583}$

Fig. 6. Relations between total hysteresis energy and number of cycles to the initiation of crack or fracture.

Fig. 7. Schematic diagram of hysteresis loop.

リシスエネルギーの総和 W ，横軸に点線でき裂発生繰返し数 N' と実線で破壊までの繰返し数 N との関係を各温度について両対数目盛りで示したものである。き裂発生ならびに破壊までのヒステリシスエネルギーの総和については，前報の方法と同様にFig. 7の斜線で示した応力振幅 τ_a と塑性ひずみ振幅 γ_p の積から求まる平行四辺形ABCDの面積 $w=4\tau_a \cdot \gamma_p$ を各サイクルごとに近似的に求め，それをき裂発生ならびに破壊までの繰返し数についてそれぞれ総和したものである。実際には，図の曲線で囲まれる面積で与えられるから，この斜線で示したヒステリシスエネルギーの値に補正係数を考慮に入れなければならない。しかし，この係数の値は疲労試験中にヒステリシスループの形状が著しく変化しないかぎりあまり変化を示さないから，ヒステリシスエネルギーの総和と繰返し数との関係を考察するにあたって，その一般性は失なわれないものと考えてよい。図の直線関係を $W=C \cdot N^\alpha$ なる式で表わせば図示のような定数 α ， C の値となり，Fig. 5の塑性ひずみの総和で表わした場合とほぼ近い値を示した。図より W の値は同一繰返し数に対して，点線では270℃を除いてほぼ常温，300℃および400℃の順に減少する。400℃で W の値が小さく現われたのは前述のFig. 3のごとく応力振幅で表わした場合，き裂発生までの疲労寿命が短いためである。また実線ではほぼ常温，400℃，300℃および270℃の順に減少する。この場合常温で W の値が大きく現われたのは，Fig. 3のごとく応力振幅で表わした場合破壊までの疲労寿命が長いからである。

3・2 平均ひずみを与えた場合

Fig. 8は平均ひずみを種々変化させて試験を行ない，縦軸に最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ ，横軸に点線でき裂発生

Fig. 8. $\gamma_{\max}$ - N' or N diagram.

生繰返し数 N' と実線で破壊までの繰返し数 N との関係の一例を300℃について表わしたものである。図にみられるように点線，実線とも平均ひずみの大なるほど長い疲労寿命を示した。また常温，270℃および400℃についてもこれと同様な傾向を現わした。いま，最大せん断ひずみのかわりにひずみ振幅 γ_a をとって表わせば，Fig. 9, 10に示すようになり，常温の場合は400℃と同様にき裂発生ならびに破壊までの繰返し数とも平均ひずみの影響が明らかに現われずほぼ一本の直線で表わされる。300℃の場合はき裂発生繰返し数

Fig. 9. γ_a - N' or N diagram. Fig. 10. γ_a - N' or N diagram.

で表わせば平均ひずみの大きいときに長寿命を示し、破壊までの繰返し数で表わせば平均ひずみの影響はあまり顕著にあらわれなかった。常温ならびに 300℃ についてこれらの関係を $\gamma_a \cdot N^\alpha = C$ なる式で表わすと図示のような定数 α , C の値がえられ、その値としてはあまり大きい差はなかった。一般に定ひずみ塑性疲労試験においては塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ と破壊までの繰返し数 N との間には $\Delta\epsilon_p \cdot N^\alpha = C$ が成り立ち、高塑性域では、この式の $\Delta\epsilon_p$ をひずみ振幅 ϵ_a で表わしても大きな差はなく、この場合定数 α はほぼ 0.3~0.8 の値をとると論じられている。本寿験の場合にも図示のように定数 α の値は 0.303~0.406 であるから上記の範囲内に存在することがわかった。

各温度において定ひずみ片振り繰返し試験を行なった結果を Fig. 11 に示す。図は縦軸にひずみ振幅 γ_a 、横軸に点線でき裂発生繰返し数 N' と実線で破壊までの繰返し数 N をとって表わしたものである。図にみられるように破壊までの寿命は 270℃ が長く、き裂発生までの寿命は 270℃ が一番短く現われた。これはせい

Fig. 11. γ_a - N' or N diagram.

熱ぜい性の効果による材料の硬化のためにき裂が早く発生するが、同時にき裂先端近傍で著しい塑性変形が生じ、硬化が起こるからき裂の進展がおそくなったのである。

以上の実験結果を縦軸にひずみ振幅 γ_a 、横軸に平均ひずみ γ_m をとって表わしたものが Fig. 12 で、図は点線でき裂発生繰返し数 $N'=50$ 回と一点鎖線ならびに実線でそれぞれ破壊までの繰返し数 $N=200$ 回および $N=1000$ 回における時間強度線図を描いたものである。図より明らかなように同一疲労寿命に対しては、河本らが常温について行なった実験結果と同様に高温においてもひずみ振幅は平均ひずみの増加とともにほぼ直線的にわずかな減少する傾向を示した。これらの現象は各温度について繰返し数が 2 回目のヒステリシスエネルギー w を面積計で求めて縦軸に示し、横軸に各平均ひずみ γ_m をとって表わした Fig. 13 から明らかなように、

Fig. 12. γ_a - γ_m diagram

Fig. 13. w - γ_m diagram.

1 サイクルあたりのヒステリシスエネルギーは平均ひずみの存在により少ないながらも直線的に減少するからである。

つぎに、前述の w と繰返し数との関係を常温および 300℃ の場合について両対数目盛りで表わすと Fig. 14, 15 のようになる。図の横軸は点線でき裂発生繰返し数 N' と実線で破壊までの繰返し数 N を表わす。常温の場合はき裂発生ならびに破壊までの繰返し数とも平均

Fig. 14. Relations between hysteresis energy and number of cycles to the initiation of crack or fracture.

Fig. 15. Relations between hysteresis energy and number of cycles to the initiation of crack or fracture.

ひずみの影響が著しく現われずば一本の直線で表わされる。300°C の場合はき裂発生までの寿命は平均ひずみが大なるほど長寿命を示し、破壊までの寿命は平均ひずみの影響はあまり顕著に現われなかった。これらの関係を $w \cdot N^{\alpha} = C$ なる式で表わすと図示のような α , C の値がえられた。

また参考までに各温度において定ひずみ片振り繰返し試験を行なった結果を Fig. 16 に示す。図の縦軸は繰返し数が2回目のヒステリシスエネルギー w , 横軸は点線でき裂発生繰返し数 N' と実線で破壊までの繰返し数 N をとって表わしたものである。図より破壊までの寿命は270°C が長く、き裂発生までの寿命は270°C が一番短く現われた。いずれについても、温度による相違は顕著である。ただし、ヒステリシスループが安定したところでは、300°C は常温よりもいくらか長寿命側にかたよる傾向を示している。また回転曲げ塑性疲労試験において定ひずみ試験では、疲労寿命はヒステリシスエネルギーよりも温度が大きく影響をおよぼすものと判断されている。本実験においても Fig. 14~16

Fig. 16. Relations between hysteresis energy and number of cycles to the initiation of crack or fracture.

から同様にヒステリシスエネルギーは温度による差は顕著に現われるが、平均ひずみによってはあまり影響されなかった。よって、定ひずみ塑性ねじり疲労試験では平均ひずみの存在よりも温度が大きく影響をおよぼすことがわかる。

4 結 言

0.81%C を含有するピアノ線を用いて繰返し速度 1 rpm の下で定ひずみ塑性ねじり疲労試験を行なった。それらの試験条件としては常温、270°C、300°C および 400°C において両振り、部分両振り、片振りなどの平均ひずみを与えた場合について塑性疲労挙動を検討した。なお、ひずみ繰返し数としてはき裂の発生が巨視的に認められるまでの繰返し数および破壊までの繰返し数の両方について調べた。

えられたおもな結果はつぎのとおりである。

(1) 定ひずみ両振り繰返し試験中に試験片に作用する応力振幅の変化は、常温では繰返し開始後まもなく減少し、高温では繰返し開始後まもなく増加したのち、いずれもほぼ一定値を保ちき裂発生と同時に急減して破壊にいたる。また、ひずみ繰返し数に対する平均応力の変化の様子は、試験片に作用するひずみ振幅および試験温度によっては影響は少なく顕著に現われなかった。

(2) 両振り繰返し試験では同一ひずみ振幅に対して破壊までの繰返し数で整理した場合、270°C が最大の疲労寿命をもち、以下常温、300°C、400°C の順に短くなる。またき裂発生繰返し数で整理した場合、常温が最大の疲労寿命をもち、以下 270°C、300°C、400°C の順に短くなる。

(3) 平均ひずみを与えた繰返し試験において、ひずみ振幅と繰返し数で整理した場合、平均ひずみの影響は各温度とも顕著に現われなかった。またヒステリシスエネルギーと繰返し数で整理した場合、ヒステリシスエネルギーは平均ひずみにはあまり影響されず、温度が大きく影響をおよぼすようである。

(4) 実験結果を両振り繰返し試験では、塑性ひずみの総和ならびにヒステリシスエネルギーの総和と繰返し数、平均ひずみを与えた繰返し試験では、ひずみ振幅ならびにヒステリシスエネルギーと繰返し数との関係などを両対数日盛りに表わすと、いずれも直線関係が成り立つ。

(5) き裂発生繰返し数 $N' = 50$ 回と破壊までの繰返し数 $N = 200$ 回および 1000 回との時間強度線図に対してひずみ振幅は平均ひずみの増加とともにほぼ直線的に減少する傾向を示した。

(昭和46年3月20日 日本機械学会関西支部第46期定時総会講演会にて講演)

参考文献

- 1) たとえば, 河本 実, 藤谷景三, 日本材料試験協会第11期講演会前刷, 107 (1962); 河本 実, 藤谷景三, 第38期日本機械学会通常総会講演会前刷, No. 37, 118(1961); 河本 実, 藤谷景三, 山本英雄, 第40期日本機械学会全国大会前刷, No. 77, 147 (1962).
- 2) 藤谷景三, 立命館大学研究所紀要, 5, 111(1960).
- 3) 藤谷景三, 元津彰夫, 材料, 20, 1132 (1971).
- 4) 川田雄一, 河本 実, 横堀武夫, 宮川松男, “材料強度工学ハンドブック”, p. 494 (1966) 朝倉書店
- 5) 河本 実, ほかに3名, 日本材料学会第18期総会学術講演会前刷, 122 (1969).
- 6) 河本 実, 伊吹幸彦, 中村秀夫, 日本機械学会論文集, 29, 1653 (1963).

書 評

The Thermodynamics of Simple Materials with Fading Memory Springer Tracts in Natural Philosophy Volume 22

William Alan Day 著

(16cm×24cm, 134頁, 1972年, Springer-Verlag)

Truesdell によって提唱され彼自身およびその随伴者によって20年来急速に進展させられてきた連続体の有理力学 (Rational Mechanics) の中で最も注目に値する画期的進展として, Coleman と Noll による減退記憶をもつ物質と Coleman による有理熱力学の導入が挙げられる. 前者は過去の履歴が現在に影響することを表わすために, 応力テンソルが過去から現在までの変形テンソルの汎関数として定式化され, 後者はクラウジウス・デュエムの不等式を熱力学の第2法則の定式化としてとらえ, 物質の構成式を仮定する際の指針を与えるものであり, 多くの応用を生みだしている.

この本では上に述べたのとは異なる有理熱力学の定式化が記述されている. Coleman の熱力学はエントロピーの概念を始めより仮定しているのに対し, 著者は応力テンソル, 熱束ベクトルおよび内部エネルギーの概念のみを仮定する. 第2章ではそれらの量により基本となる熱力学不等式が構成され, 第3章では目的とするエントロピーが定義されている. 先ず平衡状態を考え, 二つの状態の間を結ぶクラウジウス積分の上限より平衡エントロピーが定義されている. さらに非平衡状態に歩を進め, クラウジウス・プランクの不等式より回復エントロピーが導出され, 一般のエントロピーはこの両者の差として与えられている. 第4章では前章の仮定が熱弾性体, 微分型物質および粘弾性体に適用されているが, 著者もいうごとく具体的なエントロピーの決定はきわめてむずかしい課題である. 第5章では Coleman による有理熱力学の概要が簡単に紹介され, 著者の方法と比較されている. 最終章では等温線型粘弾性体に対する熱力学からの制限について述べられている.

このように主内容は連続体の立場からエントロピーを他の巨視的量より決定する厚理を示したものであり, 高度に抽象的, 数学的である. それゆえ読者が連続体の熱的性質を具体的に解析する際この本を参照しても直接役に立つ道具を読者に与えるものではない. 第1章には, ベクトル, テンソル, 平衡方程式等が単に紹介されているがこれのみではまったく不十分であり, この本の理解には有理力学の基礎概念と数学の知識が要求される.

(京都大学工学部 徳岡辰雄)