重複繰返し荷重下での高炭素鋼のねじり塑性疲労*

藤 谷 景 三** 元 津 彰 夫***

Low-Cycle Torsional Fatigue of High Carbon Steel under Multiple Repeated Loads

by

Keizo FUJITANI

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

and Akio GENTSU

(Kobe City Technical College, Kobe)

The fracture criterion of low-cycle fatigue based on variable strains, which is represented as $\frac{1}{C_0} \int_0^N \gamma_p^n dn = 1$ for the varying plastic strain amplitude, has been verified experimentally by carrying out the low-cycle fatigue tests under the tension-compression and rotating bending conditions. The low-cycle torsional fatigue tests under multiple repeated loads were made on the 0.84% C piano wires and the applicability of the above mentioned criterion was examined.

The main results obtained are as follows:

(1) The experimental values of the cumulative damage obtained from the above criterion are larger than the values calculated from the linear damage criterion, and they scatter around in the vicinity of unity.

(2) The test results indicate the existence of an exponential relationship between the equivalent stress amplitude τ_{eq} and the equivalent plastic strain amplitude $\gamma_{p,eq}$.

(Received Apr. 21, 1973)

1 緒 言

機械や構造物の高性能化に伴って、工業材料の疲労を考慮した設計がなされるようになり、従来のような永久に破壊しないことを目的とした設計方法から、その機械や構造物の使用年限を考慮に入れた、いわゆる有限寿命設計が試みられるようになってきた。したがって、このような場合には当然耐久限度以上の高いレベルの応力が設計の対象となるので、その応力レベルすなわち塑性領域での工業材料の疲労挙動の解明が必要となる。それゆえに、塑性疲労に関しては巨視的にも微視的にも種々の角度から探求されており、これまでに数多くの成果が報告されてきた。その中で実働荷重をうけた材料の疲労寿命の推定方法として直線被害則がよく用いられてきたが、この法則による疲労寿命は実験値のそれと一致しないことが少なくない。そこで高い作用応力に対して現われる塑性ひずみの累積は

疲労寿命を支配する主要な因子であり、一定振幅試験においては塑性ひずみ振幅と疲労寿命との間には一般に Manson-Coffin の式がよく成り立つことが多くの研究結果より明らかにされている。しかし、変動する塑性ひずみ因子に対しては、疲労損傷の累積が線形になると仮定して導いた、いわゆる塑性ひずみを基準とした疲労破壊則なるものが引張圧縮、回転曲げ試験などについて提唱され、多くの材料、種々の変動ひずみならびに荷重条件のもとでよく成り立つとされているが、平面曲げおよびねじり試験などについてはまだ実験的に実証されていないようである。また、平均ひずみを加えた場合の塑性疲労に関する仮説³⁾もいくつか提案されているが、まだ定説が得られていないようである。

そこで本実験では、ピアノ線を用いて二段および三段多重重複繰返しねじり塑性疲労試験を行なって、疲労進行過程に生ずる試験片のひずみ量の変化を測定した。すなわち本実験のような両振りの定応力試験では応力繰返し中に生ずる塑性ひずみ振幅は一定でない

* 原稿受理 昭和48年4月21日

** 正 会 員 立命館大学理工学部 京都市北区等持院北町

*** 神戸市立工業高等専門学校 神戸市垂水区舞子台

Fig. 1. Testing machine.

から一種の変動塑性ひずみ振幅試験とみなされるので、主として上述の疲労破壊則が本実験結果に対しても成り立つかどうかを検討し、その結果を直線被害則によって求めた推定寿命と比較した。また、応力比とその繰返し数比が疲労寿命に及ぼす影響、ならびに荷重制御およびひずみ制御いずれか一方の試験結果から他方の疲労寿命を推定するときに必要な応力と塑性ひずみの関係についても以上の実験結果を用いて検討した。

2 供試材料および実験方法

実験に用いた材料は0.84%Cを含有するピアノ線で、直径5.5mmの丸棒線材から数段の引抜加工工程を経て直径3mm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 II に示す。また試験片は上述のように直径3mmで標点距離を78mmとし、製作後300℃30分間真空焼なましを行なった。

使用した試験機は二段多重試験では、筆者らが先に試作したもので回転速度は毎分1回転である。また三段多重試験では、新しく試作したもので、その試験機の構造の概略図を Fig. 1 に示す。図において、電動機(15)を回転させると、逆転クラッチ(16)より減速機(17)を

経て試験片(20)がねじられる。荷重の大きさは応力棒(21)に貼り付けた抵抗線ひずみゲージによってひずみを検出し、動ひずみ計(9)を介して電磁オシログラフ(14)に記録させて読み取り、これを応力-ひずみ検定曲線より応力になおす。また、このときの試験片のねじれ角はねじり角測定目盛板(18)で読み取る。負荷方向の切換え制御は動ひずみ計に接続したメータリレー(13)の指針を任意の負荷の大きさに設定しておく、負荷切換え時に逆転クラッチを操作させる逆転用のリレー(1)が働いて負荷の方向を切り換える。また、各段階の応力振幅に対する繰返し数の切換え操作はメータリレーに接続したオートカウンタ(12)を任意の繰返し回数に設定しておく、①に組みこまれたリレーによって自動的にかつ正確に切り換えることができる。一方、バックテンション(22)は試験片に常に一定の張力を与えるもので、試験片が破断すると応力棒を後方に移動させる。このときマイクロスイッチ(23)が働いて試験機の駆動を自動的に停止させる。なお本試験機の回転速度は毎分2.5回転で、総繰返し回数は電磁積算計(4)で読み取るようにした。したがって、本試験機は以下に述べる実験結果より、先に試作した試験機と同程度の性能を得たので十分に初期の目的を満たしうるものとする。

実施した実験は上述の二段および三段多重重複繰返しねじり塑性疲労試験で、ここでは τ_1 , τ_2 , τ_3 をそれぞれ下段、中段、上段の応力振幅とし、その応力振幅に対する繰返し数を n_1 , n_2 , n_3 とした。また、変動一周期の繰返し数 $n_0=40$ と80回で一定に保ち、応力比および繰返し数が、二段多重試験では $\tau_2/\tau_1=1.1$, 1.2 , 1.3 , $n_1=20$, 36回, $n_2=4$, 20回, 三段多重試験では $\tau_2/\tau_1=\tau_3/\tau_2=1.1$, 1.3 , $n_1=4$, 24, 27, 67回, $n_2=12$ 回, $n_3=1$, 4, 24回として、それぞれを種々組み合わせ、いずれも漸減急増型の応力作用順序で行なった。また実験結果の整理にあたって、ねじり

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

Material	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
Piano wire	0.84	0.51	0.91	0.08	0.009	0.2	0.02	0.05

Table II. Mechanical properties of the material.

Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Number of torsion to fracture
172	46

応力ならびにひずみはすべて弾性式によって算出した。

3 実験結果および考察

Fig. 2は一定応力振幅試験による $\tau-N$ 曲線を表わす。Fig. 3はFig. 2の一定応力振幅試験の結果を縦軸に応力振幅、横軸に塑性ひずみを基準とした疲労破壊則より求めた累積被害を示したものである。以下にこの法則を示す。すなわち塑性領域にて、一定塑性ひずみ振幅試験におけるManson-Coffinの式は

$$\tau_p^a \cdot N = C_0 \quad (1)$$

(1)式で τ_p は塑性ひずみ振幅、 N は破壊までの繰返し数、 a および C_0 は定数である。一方、変動塑性ひずみ試験の場合には、(1)式を拡張して考えると

$$\frac{1}{C_0} \int_0^N \tau_p^a dn = 1 \quad (2)$$

となる。ここで τ_p は変動塑性ひずみ振幅で、 dn はそのひん度を表わし、 N は変動塑性ひずみ振幅下での破壊までの繰返し数である。しかし変動塑性ひずみ振幅の場合、各実験値について(2)式の右辺の値は必ずしも1にならないので

$$D_f = \frac{C_0}{C_0} = \frac{1}{C_0} \int_0^N \tau_p^a dn \quad (3)$$

Fig. 2. $\tau-N$ curve under the fatigue tests of constant stress amplitude

Fig. 3. Relation between stress amplitude and cumulative damage under the fatigue tests of constant stress amplitude.

として累積被害を表わすことにする。ここで $\bar{C}_0$ は一定振幅試験で得られた C_0 の平均値で、 a はそのときの指数を示す。これが変動塑性ひずみ振幅に対する疲労破壊則である。本実験は、応力は試験中一定であるが、塑性ひずみ振幅は一定でないので一種の変動塑性ひずみ試験である。したがって、(2)式に合うように各実験値について C_0 を求め、その平均値 $\bar{C}_0=0.468$ を(3)式に入れて D_f を求めると、図示のようにその最小値は0.714で、最大値は1.14となった。この場合指数 a の値としては1.5が最適である。

Fig 4~6は二段および三段多重試験の結果を縦軸に高いレベルの応力振幅、横軸に累積繰返し数比 $\Sigma(n/N)$ と累積被害を二段多重試験では D_{f1} 、三段多重

Fig. 4. $\tau_2-\Sigma(n/N)$ or D_{f1} diagram.

Fig. 5. $\tau_3-\Sigma(n/N)$ or D_{f2} diagram.

Fig. 6. $\tau_3-\Sigma(n/N)$ or D_{f3} diagram.

験ではそれぞれ D_{f2} , D_{f3} として表示した。図の累積被害の値は、上述の(2)式に各実験値を入れて C_0 を求めそれぞれを C_1 , C_2 , C_3 で表わし、これを(3)式に代入して $D_{f1}=C_1/\bar{C}_0$, $D_{f2}=C_2/\bar{C}_0$, $D_{f3}=C_3/\bar{C}_0$ として計算したものである。ここで(2), (3)式に用いた $a=1.5$, $\bar{C}_0=0.468$ は一定応力振幅試験で求めた値である。Fig. 4 にみられるように、二段多重試験では、 D_{f1} の値は各応力比によっては影響はあまり現われていないが、低いレベルよりも高いレベルの応力振幅に対する繰返し数が少ないほうがわずかに小さい値となっている。また累積繰返し数比についても D_{f1} とほぼ同じ傾向を示すが、その差は幾分大きい。すなわち、 D_{f1} の平均値は 0.90 で図の点線で表わし、 $\Sigma(n/N)$ の平均値は 0.80 で一点鎖線で示した。また、Fig. 5 の三段多重試験では D_{f2} の値は各応力振幅に対する繰返し数によってはその差は僅少で、むしろ応力比が大きい方がわずかに大きな値となるがその差は微小である。全体を平均して図の点線で表わすと、その値は 0.82 となった。また $\Sigma(n/N)$ については応力比が大きくて高い応力レベルでの繰返し数が少ないほうが幾分小さい値となり、その平均値は 0.70 で図の一点鎖線で表わした。つぎに Fig. 6 の三段多重試験では応力振幅 τ_1 , τ_2 は弾性限度より小さい値で一定とし、 τ_3 のみを種々変化した場合について示したものである。図から明らかなように、 D_{f3} の値については応力比ならびにその応力レベルに対する繰返し数の影響はほとんど現われていないが、 $\Sigma(n/N)$ は応力振幅 τ_3 が大きいほどわずかに小さくなっている。ゆえに D_{f3} および $\Sigma(n/N)$ を平均するとその値は 0.82 および 0.67 で、それぞれを図の点線および一点鎖線で示した。以上から累積被害は累積繰返し数比よりもやや大きな値を示したが、その平均値は両者とも 1 より小さい。その原因は累積繰返し数比については、漸減急増型の応力作用順序によるため、繰返しの初期にうけた疲労被害は作用応力レベルを低くしても回復されないためである。また、試験片に作用する応力が、低いレベルの応力よりも高いレベルの応力に対する繰返し数が少ないほど寿命はわずかに短くなる傾向にある。このことについてはさらに詳細な研究を必要とするが、使用した材料が冷間引抜加工時に生じた残留応力と疲労硬化などがともに影響を及ぼしているものと思われる。

Fig. 7~9 は二段および三段多重試験での累積被害を縦軸にとり、横軸には累積繰返し数比をとって両者を比較したものである。累積被害と累積繰返し数比が等しい値となる場合には、図の点線で示した 45° の線上に各実験値がプロットされるが、累積被害が累積繰返し数比よりも大きい場合には 45° の直線よりも左側

昭和48年11月

Fig. 7. Comparison of the cumulative damage and the cumulative cycle ratio to fracture

Fig. 8. Comparison of the cumulative damage and the cumulative cycle ratio to fracture.

Fig. 9. Comparison of the cumulative damage and the cumulative cycle ratio to fracture.

に、またその逆の場合には右側に各実験値がプロットされる。図からわかるように、いずれの場合においても各実験点は 45° の点線よりも左側に多くプロットされるが、累積被害の値は二段よりも三段多重試験の方が少し小さい値のところでばらついている。したがって以上の実験結果から、累積繰返し数比の値には応力比および各応力レベルに対する繰返し数比の影響がいくらか現われているようであるが、累積被害の値については、この影響がほとんど現われないとみてよいであろうし、また一定応力振幅試験で求めたその値のばらつきの範囲にはほぼ含まれる。

Fig. 10 は応力繰返し試験中の塑性ひずみ振幅 γ_p と平均塑性ひずみ γ_{pm} の変化の一例を二段多重試験について示したもので、図中の一点鎖線、点線は高、低

Fig. 10 Variation of plastic strain amplitude and mean plastic strain under multiple repeated stressing.

両応力振幅に対する一定応力振幅試験下での γ_p と γ_{pm} の変化を示したものである。図より、塑性ひずみ振幅は一点鎖線と点線の間で変化しているが、同じレベルの応力を試験片に与えても繰返し数比によって変化の程度が異なっている。すなわち $n_2/n_0 = 1/10$ では高い応力レベル τ_2 での繰返し数が少ないために $n_2/n_0 = 1/2$ ほど充分な γ_p を生じないので小さく現われている。これらを図の点線と一点鎖線で示した一定振幅試験の γ_p と比較すると、二段多重試験において、低い方の繰返し応力で現われた γ_p は高い方の繰返し応力で生じた γ_p が繰返し応力レベルを下げてても充分回復されないために点線よりも大きく現われ、また高い方の繰返し応力で現われた γ_p は低い方の繰返し応力の影響を受けて拘束されるために一点鎖線よりも小さく現われた。がしかし前者の方が後者よりも疲労寿命に及ぼす影響は大きいように思われる。したがって、Fig. 4~10 でのべたように累積被害の値は本実験では、あまり大差ないことから疲労過程での γ_p の蓄積がある値に達したとき材料が破壊するものと考えられる。ゆえに負荷作用順序の影響が材料の疲労被害の進行に顕著に現われ、いずれの繰返し数比でも $\Sigma(n/N)$ が 1 より小となるのである。平均塑性ひずみは、 n_2/n_0

Fig. 11. Variation of plastic strain amplitude under multiple repeated stressing.

$= 1/10$ ではその値は微小であるが、 $n_2/n_0 = 1/2$ の方はバウシinger効果が大きいため繰返しの初期より大きく現われている。

Fig. 11 は繰返し試験中における塑性ひずみ振幅 γ_p の変化を、そのときまでの累積被害 $D_f = (1/\bar{C}_0) \Sigma \gamma_p^a$ を横軸にとって表わした Fig. 10 と同じ二段多重試験の一例で、図中の一点鎖線、点線はそれぞれ高、低両応力振幅に対する一定応力振幅試験下での γ_p の変化を示したものである。図より、塑性ひずみ振幅は累積被害が約 50% ぐらいまでは各作用応力レベルに相応して点線と一点鎖線の近傍で変化しているが、それ以上になるとき裂の開口が急増するので塑性ひずみ振幅は急激に増加する。これはまた

Fig. 10 からみれば破断直前の少数回の繰返し、すなわち巨視的なき裂発生から破断までの繰返して累積被害は全体の約 50% を占めていることがわかる。

Fig. 12, 13 は二段および三段多重試験と一定応力振幅試験における疲労寿命を比較したもので、縦軸に等価塑性ひずみ振幅

$$\gamma_{p\text{-eq}} = \left\{ \int_0^N \gamma_p^a dn / \int_0^N dn \right\}^{1/a} \quad (4)$$

をとった。(4)式で dn は変動塑性ひずみ振幅のひん度で、指数 a は一定応力振幅試験の結果を(2)式に入れて

Fig. 12. $\gamma_{p\text{-eq}} - N$ diagram.

Fig. 13. $\gamma_{p\text{-eq}} - N$ diagram.

求めた値で 1.5 を用いた。図にみられるように、二段および三段多重試験と一定応力振幅試験での各実験値は多少のばらつきはあるがほぼ一本の直線でまとめられるようで、その直線の傾きは 1.5 となり、前述の(2)式で用いた指数 a の値がいずれの場合にも同じ値となった。ゆえに(2)式が成り立つことを示す。

Fig. 14, 15 は二段および三段多重試験の結果を縦軸に等価応力

$$\tau_{eq} = \{\Sigma(\tau_i^m \cdot n_i) / \Sigma n_i\}^{1/m} \quad (5)$$

横軸に破壊までの繰返し数をとって整理したもので、(5)式の n_i は応力振幅 τ_i の繰返し数で、指数 m は一定応力振幅試験結果を示す $\tau-N$ 曲線から求めた値で 8.3 とした。図より明らかなように各実験値は一定応力振幅試験結果を示す $\tau-N$ 曲線の上にほぼのようである。

Fig. 14. $\tau_{eq}-N$ diagram.

Fig. 15. $\tau_{eq}-N$ diagram.

Fig. 16~18 は二段および三段多重試験の結果を上述の(4), (5)式から等価塑性ひずみ振幅 $\gamma_{p,eq}$ と等価応力 τ_{eq} を求め、それぞれを横軸および縦軸にとって両者の関係を示したものである。各実験値は多少ばらついているが、応力比および繰返し数比には無関係に、いずれの場合でもほぼ一つの線上にあり、両者の間には $r_{p,eq} = -0.0165 \times 1.07 \tau_{eq}$ なる指数関数関係が存在するようである。

Fig. 19 は三段多重試験の結果を、縦軸には高い方

Fig. 16. Relation between equivalent stress and equivalent plastic strain amplitude.

Fig. 17. Relation between equivalent stress and equivalent plastic strain amplitude

Fig. 18 Relation between equivalent stress and equivalent plastic strain amplitude.

の応力振幅 τ_3 をとり、横軸には等価塑性ひずみ振幅 $\gamma_{p,eq}$ をとって一定応力振幅試験の場合と比較したものである。図からわかるように等価塑性ひずみ振幅は一定応力振幅試験の結果よりすべて小さな値を示し、その傾向は応力比が大きくて高い方の応力振幅での繰返し数が少ないときに顕著に現われている。

Fig. 19. τ_3 - $\gamma_{p,eq}$ diagram

4 結 言

重複繰返し荷重下でピアノ線について、ねじり塑性疲労試験を行ない、主として引張圧縮、回転曲げ試験などで提唱され、よく成り立つことが立証されている塑性ひずみを基準とした疲労破壊則が、本実験結果に対しても成り立つかどうかを明らかにした。また荷重制御ならびにひずみ制御いずれか一方の試験結果から他方の疲労寿命を推定するときに必要となる、応力と塑性ひずみの関係についても調べた。以上から、得られたおもな結果は次のとおりである。

(1) 疲労寿命の推定にあたっては、塑性ひずみを基準とした疲労破壊則は直線被害則から求めた値よりもやや1に近い疲労寿命の推定値を与え、また、応力比

および繰返し数比による影響はほとんど認められず、一定応力振幅試験結果得られた値のばらつきの範囲にほぼ含まれる。

(2) 等価応力と等価塑性ひずみ振幅の関係を片対数目盛上に表わすと、両者の間には一つの指数関数関係が成り立つ。

(3) 直線被害則より求めた疲労寿命の推定値はわずかに応力比および繰返し数比の影響をうける。すなわち応力比が大きくて低いレベルの応力よりも高いレベルでの応力の繰返し数が少ないほど寿命は短くなっている。

終わりに本研究を行なうにあたって、実験に終始熱心に協力された当時の立命館大学理工学部の学生諸君に心から感謝の意を表します。

(昭和47年5月29日 日本材料学会第21期総会学術講演会, 昭和48年3月16日 日本機械学会関西支部第48期定時総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば、菊川 真, 大路清嗣, 鎌田敬雄, 城野政弘, 日本機械学会誌, **70**, 1495 (1967).
- 2) たとえば、中川隆夫, 辻 正幸, 日本機械学会論文集, **33**, 1734 (1967), 中川隆夫, 新田重光, 材料, **17**, 145 (1969).
- 3) たとえば、Sachs, G., W.W. Gerberich, V. Weiss, and J.V. Latorre, Proc. ASTM, **60**, 512 (1961).
- 4) 藤谷景三, 元津彰夫, 材料, **20**, 1132 (1971).
- 5) たとえば、大路清嗣, 日本機械学会誌, **70**, 36 (1967).
- 6) たとえば、中村 宏, 堀川 武, 鎌田敬雄, 山地成一, 日本機械学会論文集, **39**, 473 (1973).