平滑材および切欠き材に対するプログラム変動 荷重による累積疲労被害*

中 沢 一**

Cumulative Fatigue Damage under Loading of Programmed Alternating Stresses

by

Hajime NAKAZAWA

(Tokyo Institute of Technology, Tokyo)

A report is given at the outset of a modified rotating-bending fatigue testing machine by means of which the specimens can be submitted to programmed alternating stress cycles. The test material is mild steel with 0.47% C which was annealed in vacuum after machining. The results of the tests are reported, of the plain specimens and of four sorts of notched specimens, and the accumulation of the fatigue damage is discussed.

It is shown that with the plain specimens and with the blunt notched specimens Miner's hypothesis concerning "linear damage law" that the stress cycles are negligible so far as their amplitude is less than the fatigue limit of the specimen in question could agree with the experimental results. But with the specimens with notches the value of whose stress concentrations factor is larger than 1.8 their fatigue life is found in estimation remarkably critical under "the linear damage law".

(Received Oct. 16, 1967)

1 はじめに

実働荷重による累積疲労被害を知る目的で、平滑試験片および切欠き試験片を用いてプログラム変動荷重による回転曲げ疲労試験を行ない、いわゆる直線被害法則の検討を行なうとともに、疲労被害の表示方法について考察を行なった。

2 試験片および試験方法

実験に供した材料は構造用炭素鋼 S45C で、試験片に仕上げて後 850°C で 40 分間の真空焼なましを行なった。Table I は機械的性質である。実験は平滑試験片には砂時計形で最小直径 10mm、最小直径部の曲

率半径 30mm のものを用いており $\alpha=1.05$ である。また、切欠き試験片には環状半円みぞ付試験片 2 種類、(みぞ底直径 10mm、みぞ半径 2.5mm、 $\alpha=1.47$ およびみぞ半径 1.25mm、 $\alpha=1.77$) および円孔付試験片 2 種類、(平行部直径 10mm、円孔直径 3mm、 $\alpha=1.89$ および円孔直径 2mm、 $\alpha=2.03$) の合計 4 種類を用いた。なお、円孔付試験片では回転に伴って断面二次モーメントが変化するが、試験中にこれが原因でたわみの変動や振動を生じたりすることはなかった。

試験機は小野式回転曲げで 3000rpm のものを主として使い、1500rpm の試験機も補助的に使用した。

Table I. Mechanical properties (850°C 40min annealing in vacuum chamber).

Yield point σ_y (kg/mm ²)	Ultimate strength σ_B (kg/mm ²)	Breaking strength of final area σ_T (kg/mm ²)	Reduction of area φ (%)	Elongation δ (%)	Rockwell hardness HR _B
27	38	52	45	27	79

* 原稿受理 昭和42年10月16日

** 正 会 員 東京工業大学 東京都目黒区大岡山

荷重変動のプログラム波形は Fig. 1 に示すとおりである。波形(I)は手で重錘の増減を行なったもので、1 プログラムサイクルの繰返し数 n_0 は、予想される破断寿命の長短によって、破断までに5回以上のプログラムサイクルが繰返されることを目標に、6000～70×10⁴回とした。また、最小応力と最大応力の比 ϕ は、3/7および2/3の波形について実験しており、荷重負荷順序の影響も調べる目的で、プログラム波形中のP点から実験を始めた応力漸増形と、Q点から実験を始めた応力漸減形のプログラム波形について実験を行なった。

波形(II)、(III)、(IV)の応力変動は、重錘にコイルばねとカムを併用して与えたもので、実験中にばねの伸縮を測定し、その値を重錘による荷重に加えて応力を求めている。そして、それぞれの実験シリーズごとに一定のコイルばねとカムを組み合わせて用い、全体の応力レベルを変える場合には重錘のみを変えたので、各実験シリーズごとにそれぞれのプログラムサイクルの応力段差は一定となっている。したがって、変

Fig. 1. Pattern of stress blocks.

動応力の最小値と最大値の比 $\phi = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ は最大応力の値とともに異なっている。また、波形(II)と波形(III)はほぼ反転した形となっており、(II)は応力漸増急減形、(III)は応力急増漸減形の応力変動波形である。そして実験開始応力は繰返し数が最も多い応力段の応力で、またカムの回転速度は1rpm、したがって1プログラムサイクルの繰返し数 n_0 は約3000である。

3 実験結果

実験結果はプログラム波形中の最大応力を用いて整理しており、また応力は切欠き試験片については応力

集中部の公称応力を用いてある。

3・1 平滑試験片

単純繰返し応力およびプログラム応力サイクル(I)による結果をFig. 2(a), (b), (c)に示した。○印はP点から実験を始めた応力漸増形のプログラム、●印はQ点から実験を始めた応力漸減形のプログラムに対する結果であって、破断までの全繰返し数 N_0 にはほとんど差がない。また、図中に示した階段状の点線は単純繰返し応力における疲労限度以上の応力のみを対象として直線被害則を適用し、次式によって求めたS-N曲線である。

Fig. 2. S-N curve for plain specimen.

$$N_0 = N_1 / \sum_{i=1,2,\dots,N_i} \frac{N_i}{N_i} \quad (1)$$

ここで $k_i = n_i/n_0$ 、 n_i は1プログラム波形中に含まれる σ_i の繰返し数、 N_i は単純繰返し応力 σ_i に対する破断繰返し数である。実験点は計算値にかなりよく一致しており、破断までの累積繰返し数比 $D_0 = \sum n_i/N$ の値は、

$$\phi = 0.67 \quad \text{のとき} \quad D_0 = 0.70 \sim 2.41$$

$$\phi = 0.43 \quad \text{のとき} \quad D_0 = 0.85 \sim 1.39$$

である。なお、S-N曲線に示した100分率は、その N_0 中に含まれる疲労限度以下の応力の繰返し数 N_i の割合である。

3・2 環状半円みぞ付試験片

Fig. 3は $\alpha = 1.47$ 、波形はFig. 1の(I)、Fig. 4は同じく $\alpha = 1.47$ 、波形(III)および波形(II)に対する結果で、平滑試験片と同様に、(1)式によって求めた階段状S-N曲線とかなりよく一致している。Fig. 3からは切

Fig. 3. S-N curve for grooved specimen ($\alpha=1.47$). Fig. 4. S-N curve for grooved specimen ($\alpha=1.47$).

欠き材についても応力荷重順序の違いによる寿命の差はなく、また Fig. 3 と Fig. 4 の比較から、負荷方法が手動の場合とカムとばねによった場合に両者の間に差を生じないことがわかる。Fig. 5 は $\alpha=1.77$ の環状半

Fig. 5. S-N curve for grooved specimen ($\alpha=1.77$). Fig. 6. S-N curve for holed specimen ($\alpha=1.89$).

Fig. 7. $S-N$ curve for holed specimen ($\alpha=2.03$).

円みぞ付試験片に対する結果で、(1)式による破断寿命に比較して実験結果は著しく危険側にある。特に ϕ の値が小さくなるとその傾向が著しく

波形 (II) のとき $D_g=0.08\sim0.31$

波形 (IV) のとき $D_g=0.10\sim0.47$

となり、直線被害則による予想寿命の $1/2\sim1/12.5$ となっている。

3.3 円孔付試験片

Fig. 6 は $\alpha=1.89$ の場合で、(1)式による結果とよく一致している。しかし Fig. 7 に示した $\alpha=2.03$ の場合には、破断点は(1)式による予想寿命よりかなり危険側にあり、 ϕ の値が小さくなるとこの傾向は著しい。すなわち、

波形 (II) のとき $D_g=0.13\sim0.29$

波形 (IV) のとき $D_g=0.09\sim0.21$

となり、(1)式による破断寿命の $1/5\sim1/11$ となっている。

4 考 察

4.1 破断寿命について

平滑材や α の小さい切欠き材についての実験結果がよく直線被害則に一致したことは、このような形状の

試験片ではマクロ的疲労損傷の核、たとえば微細なき裂の生成がおそく、またそれに寄与するのは疲労限度以上の応力のみであることを示すものと思う。これに対して、 α の値が大きい切欠き材では疲労き裂は全寿命のうちのかなり初期に発生する。Fig. 8 は $\alpha=1.89$

Fig. 8 Fatigue fractured plane.

の円孔付試験片の破面に見られた疲労き裂の進展模様で、この場合のき裂発生繰返し数を N_{cr} とすれば、しま模様から計算すれば $N_{cr}/N_f < 0.12$ である。初期にこのようなき裂を生ずると、疲労限度は低下し、最初の疲労限度以下の繰返し応力でも疲労被害を生じ、き裂が進展することが考えられる。

次にこのような疲労き裂を生じた場合に、高応力から低応力の繰返しに移行したとき、プログラム変動応力の場合には、き裂の進展速度が充分低下しないうちにふたたび高応力が繰り返されるようになるため、き裂の進展速度としては、高応力が単純に繰り返されたときの進展速度に近い値となることが予想される。これらのことが総合されて、 α の値の大きな切欠き材では D_g の値が小さくなっているものと思う。

4.2 疲労被害の表わし方について

疲労被害は累積繰返し数比とは別に考えられるべきであって、 D_g がどんな値になっても破断したときの累積疲労被害値は 1 と考えたほうが合理的である。そこで任意の疲労被害値を D_F で表わすものとするれば、 D_F は n/N や σ の関数である。そして破断するときは $D_F=1$ であるから次のようにおけるであろう。

$$D_F(\sigma, n/N, p) = 1 \quad (2)$$

ここで p は材料定数と考えた。(2)式を満足する関数形として二段重複疲労試験の結果などを考慮して、最も簡単な形として次のような形が考えられる。

$$D_F = \frac{n}{N} - p \left\{ \frac{n}{N} - \left(\frac{n}{N} \right)^{\sigma_0/\sigma} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_0 = q\sigma_w$ は累積疲労被害値 D_F が累積繰返し数比 n/N と等しくなるような応力であって、 q は二段重複疲労試験によって決まる定数である。(3)式によって得られる、 σ_0/σ をパラメータとした D_F と n/N の関係は、 p の値を適当に選べば二段重複疲労試験に

よって得られる $1-(n_2/N_2)$ と n_1/N_1 の関係を示す曲線とよく似た曲線となる。そして $D_F=1$ のとき、 $\Sigma n/N=D_\theta$ は応力の変動条件によって種々の値をとることができるので、破断時の D_θ を計算するのに参考になるものと思う。

5 結 論

疲労限度以下の応力繰返し数が、全体の繰返し数の 0～95% となるようなプログラム応力波形により、平滑および切欠き試験片の疲労試験を行ない、次の結果を得た。

(1) 平滑材や $\alpha=1.5$ 程度の切欠き材については直

線被害則がよく合う。

(2) $\alpha=2$ に近くなると累積繰返し数比は 1/10 程度になる。

(3) 上記(2)の現象は疲労き裂の発生ならびに進展の挙動に関連がある。

(4) 疲労被害値と累積繰返し数比を別途のものと考え、前者は常にその値が 1 になったら破壊を生じ、一般には、 n/N 、繰返し応力 σ および材料定数 p の関数として表わすことを提案した。

(昭和42年9月22日 実働荷重における疲労に関するシンポジウムにて講演)