き裂材の累積疲労被害*

小林 英 男** 中 沢 一**

Cumulative Fatigue Damage of Cracked Specimens

by

Hideo KOBAYASHI and Hajime NAKAZAWA

(Tokyo Institute of Technology, Tokyo)

Cumulative fatigue damage of circumferentially cracked 0.35% carbon steel specimens under two step alternating stresses was investigated in rotating bending. Virgin cracked specimens of 0.16 mm depth were made of sharp notched specimens by machining away the notch and annealing in vacuum after the fatigue crack was initiated at the notch root. The fatigue limit of the virgin cracked specimens σ_{1w} , based on the net area, was 17.8kg/mm² (the fatigue strength reduction factor $\beta=1.44$). The fatigue crack propagation in the virgin cracked specimens at three first stresses $\sigma_1=23.5$, 21.0 and 18.5kg/mm² that were higher than σ_{1w} was examined, and the virgin cracked specimens were subjected to n_1 cycles at σ_1 , a process known as overstressing, until the crack propagated from 0.16 to 0.30mm depth. Then, the numbers of cycles of life remaining n_2 and the fatigue limits σ_{2w} of the cracked specimens of 0.30mm depth at various second stresses σ_2 were examined. The results obtained are as follows :

- (1) The cumulative cycle ratio $\sum n/N$ has values of 1.32~0.71 when $\sigma_2 > \sigma_{1w}$. Though $\sum n/N$ appears to be greater than 1 when $\sigma_2 > \sigma_1$ and less than 1 when $\sigma_2 < \sigma_1$, we could say that the linear damage law is nearly substantiated.
- (2) The fatigue limit σ_{2w} is reduced by the first stressing (overstressing effect) because the crack propagates at the first stress σ_1 . Though it appears that the higher is σ_1 , the smaller is the reduction of σ_{2w} , i.e. $\sigma_{2w}=15.6$ when $\sigma_1=23.5$, $\sigma_{2w}=14.6$ when $\sigma_1=21.0$ and $\sigma_{2w}=14.3$ kg/mm² when $\sigma_1=18.5$ kg/mm² for the same 0.30mm crack depth, σ_{2w} is evaluated by means of the crack depth if σ_1 is not so high.

(Received Oct. 13, 1967)

1 序 言

疲労破壊がき裂の発生とその進展によってなされることはよく知られている。従来の研究は主として破断のみを対象としているが、特に、き裂の進展の過程が寿命に大きな割合を占める切欠き材や、欠陥材の累積疲労被害はき裂の発生までの過程と、その進展の過程とに分けて考える必要がある。き裂の進展の過程における累積疲労被害の研究は、航空機構造の fail safe 設計に関連して諸外国で特に盛んであるが、それらのほとんどは引張圧縮もしくは平面曲げの応力繰返しを受ける軽合金の板状試験片についてなされたものであり、車軸の設計に関連した回転曲げの応力繰返しを受ける構造用炭素鋼についての研究はわが国で二、三報告されているにすぎない^{6,7)}。また、これらの研究はいずれも切欠き材についてなされたものであり、平滑材についての研究は、き裂の発生個所および進展状態を明確に認知することが困難なために見あたらな

いようである。き裂の発生までの過程は別にして、き裂の進展の過程における累積疲労被害は、き裂を発生させた切欠き材の切欠き部を切削・除去したき裂材について調べることが可能である。著者らは前に作製後真空焼なまししたき裂材について、き裂の深さとそれを進展させるに必要な繰返し応力の関係を回転曲げにより明らかにしたが⁸⁾、ここでは一歩進んでこのようなき裂材に、二段二重の変動応力を回転曲げにより加えてその累積疲労被害を調べた。

また、き裂先端の状態は応力の大きさとき裂の深さのみによって決まるから、作製後真空焼なましした状態で一次応力を加えてある程度進展したき裂は、最初から一次応力で作製されたものとみなすことができる。したがって、このような真空焼なまししたき裂材についての二段二重の累積疲労被害の研究は、同時にき裂を作製した繰返し応力(一次応力)のき裂を進展させるに必要な繰返し応力(二次応力での疲労限度)への影響を調べていることにもなる。このような観点から、ここでは繰返し数比ではなくき裂深さを基準とし、異なる

* 原稿受理 昭和42年10月13日

** 正 会 員 東京工業大学 東京都目黒区大岡山

一次応力によって同じき裂深さとしたき裂材の二次応力での残りの寿命と疲労限度の変化に注目し、き裂深さが累積疲労被害のめやすになるかどうかを明らかにした。

2 材料および実験方法

実験に供した材料は、住友金属工業(株)より寄贈された疲労部門委員会共同研究用の構造用炭素鋼 S 35C であり、その化学成分を Table I に、JIS 2 号引張試験

Table I. Chemical composition (% wt).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
0.35	0.25	0.80	0.035	0.019	0.10	0.15

Table II. Tensile properties.

Upper yield point (kg/mm ²)	36.1
Lower yield point (kg/mm ²)	33.1
Tensile strength (kg/mm ²)	57.0
Actual breaking point (kg/mm ²)	101.4
Elongation (%)	24.7
Reduction in area (%)	54.2

片に加工して 830℃ で 40 分間真空焼なましした後の機械的性質 (2 本の平均) を Table II に示す。

使用した試験機は繰返し速度約 2800rpm の 10kg・m 小野式回転曲げ疲労試験機であり、試験片は納入状態の 25mmφ の丸棒から Fig. 1 (a) に示すような平滑材と (b) に示すような切欠き材に加工した。

Fig. 1. Dimensions of specimens (mm).

(a) は疲労限度を調べるために平滑材として用いたが、厳密には Peterson の表による形状係数 $\alpha=1.05$ の切欠き材であり、エメリー紙で仕上げた後に 830℃ で 40 分間真空焼なましして疲労試験に供した。

き裂材は、(b) の Neuber の三角則による形状係数 $\alpha=5.0$ の切欠き材から次のような手順で作製した。まず、機械加工したままの切欠き材でのき裂の進展を疲労限度以上の適当な公称応力 19.5kg/mm² のもとで調

べた。き裂深さは、試験片を縦に四つ割りにし、さらに樹脂に埋込んでその断面を高速鏡面仕上げ機により WA600 のといしで研磨し、400 倍の光学顕微鏡により測定した。したがって、以下にいうき裂深さとはこの四割所の平均である。この方法によれば、腐食をせずに 0.01 mm 程度の深さまでのき裂を認知することが可能である。き裂材のき裂深さとしては、あまり小さいものは切欠き部を切削・除去する際の機械加工の精度が影響し、大きくなるとき裂深さそのもののばらつきが無視できなくなるので、前の報告より考えて 0.20 mm を選んだ。公称応力 19.5kg/mm² でこの深さまでのき裂を入れるのに必要な繰返し数は 1.2×10^4 回である。次に、切欠き材に公称応力 19.5kg/mm² を 1.2×10^4 回繰返して切欠き底に 0.20 mm の深さのき裂を入れた後に試験機より取りはずし、Fig. 1 (c) に示すように切欠き部を切削・除去した。切欠き底の直径は 13.08 mm であったから、13.00mmφ のき裂材に加工することにより、実際にはき裂深さは 0.16 mm となった。このようにして作製したき裂材は、機械加工した後にすべて 830℃ で 40 分間真空焼なましした。真空焼なましによりこのき裂を作製した 19.5kg/mm² の応力履歴および加工の影響は除かれたと考えられる。以下これを処女き裂材と称することにする。

累積疲労被害の実験は、処女き裂材の S-N 線図を求め、その傾斜部分の適当な三段階の応力で応力繰返しに伴うき裂深さの変化を調べ、これを一次応力としてほぼ同じ深さまでのき裂を入れた後に、荷重を手により二次応力に変え、二次応力での残りの寿命と疲労限度の変化 (二次応力での S-N 線図) を調べた。疲労限度は荷重 1kg の up down 法により 6~8 本の試験片を用いて決定した。10⁷ 回で破断しなかった試験片は、切断してき裂深さを調べ、最初に入れたき裂深さのばらつきを検討する資料とした。

3 実験結果

3・1 平滑材の疲労限度

Fig. 2 に平滑材の S-N 線図を示す。疲労限度は $\sigma_{wo} = 24.4\text{kg/mm}^2$ 、形状係数をかけた値は $\alpha\sigma_{wo} = 25.6\text{kg/mm}^2$ である。

Fig. 2. S-N plots of smoothed specimens.

Fig. 3. S - N plots of virgin cracked specimens ($l=0.16\text{mm}$).

3・2 処女き裂材の S - N 線図

Fig. 3 に処女き裂材(き裂深さ $l=0.16\text{mm}$)の S - N 線図を示す。疲労限度は $\sigma_{1w}=17.8\text{kg/mm}^2$ である。応力はき裂が引張応力も圧縮応力も負担しないと仮定してき裂底の断面積から計算した値

$$\sigma = \frac{\text{Bending moment}}{\frac{\pi}{32} \times (13.00 - 2 \times 0.16)^3}$$

を用いている。以下、特に断わらないかぎり応力と称するものはみなこれである。

3・3 処女き裂材でのき裂の進展

Fig. 3 の処女き裂材の S - N 線図の傾斜部分より、

Fig. 4. Crack propagation curves of the virgin cracked specimens.

一次応力として $\sigma_1=23.5$ (破断繰返し数 $N_1=11.3 \times 10^4$ 回), $21.0(24.0 \times 10^4)$ および $18.5\text{kg/mm}^2(51.0 \times 10^4)$ を選んだ。Fig. 4 にこの三段階の応力の繰返しに伴うき裂深さの変化を示す。一次応力で入れるき裂深さは、前述のようにあまり大きいものはばらつきが無視できなくなるので、 0.30mm とした。Fig. 4 よりこの深さに対応する一次応力繰返し数はそれぞれ $n_1=4.3 \times 10^4$ (一次応力繰返し数比 $n_1/N_1=0.38$), $8.2 \times 10^4(0.34)$ および 19.5×10^4 回(0.38)である。

3・4 二次応力でのき裂材の S - N 線図

Fig. 5, 6 および 7 に三段階の異なる一次応力繰返しによりそれぞれ 0.30mm のき裂深さとしたき裂材の二次応力 σ_2 のもとでの S - N 線図を示す。点線は直

Fig. 5. S - N plots of cracked specimens ($l=0.30\text{mm}$) after first stressed 4.3×10^4 cycles at 23.5kg/mm^2 .

Fig. 6. S - N plots of cracked specimens ($l=0.30\text{mm}$) after first stressed 8.2×10^4 cycles at 21.0kg/mm^2 .

Fig. 7. S - N plots of cracked specimens ($l=0.30\text{mm}$) after first stressed 19.5×10^4 cycles at 18.5kg/mm^2 .

線被害則から計算される残りの寿命を示し、直線被害則では疲労限度は変化しないから、点線の疲労限度は処女き裂材の疲労限度である。黒丸は一次応力 σ_1 のレベルを示し、それより上は $\sigma_2 > \sigma_1$ すなわち応力上昇の場合であり、それより下は $\sigma_2 < \sigma_1$ すなわち応力下降の場合である。 S - N 線図の処女き裂材の疲労限度以上の傾斜部分は、Fig. 5 では累積繰返し数比 $\sum n/N=1.32 \sim 0.77$, Fig. 6 では $\sum n/N=1.06 \sim 0.80$ および Fig. 7 では $\sum n/N=1.27 \sim 0.71$ であり、いずれの

場合も詳細にみれば応力上昇の場合は $\Sigma n/N > 1$, 応力下降の場合は $\Sigma n/N < 1$ なる傾向はあるが, 直線被害則はほぼ成立しているといえる。しかしながら, 疲労限度 σ_{2w} はいずれも処女き裂材の疲労限度よりもかなり低下している。低下のしかたは一次応力の大きいものほど少なく, その値は一次応力の大きい順に $\sigma_{2w} = 15.6, 14.6$ および 14.3 kg/mm^2 となっている。なお, 一点鎖線は処女き裂材の $S-N$ 線図の傾斜部分を疲労限度以下に延長し, それに適用した直線被害則から計算される残りの寿命を示している。 $S-N$ 線図の処女き裂材の疲労限度以下の傾斜部分は, Fig. 5 では $\Sigma n/N = 0.89$, Fig. 6 では $\Sigma n/N = 0.92$ および 1.11 , Fig. 7 では $\Sigma n/N = 1.62$ および 1.14 であり, 一次応力が小さいほど $\Sigma n/N$ は大きくなる傾向はあるが, やはりこのように考えた直線被害則はほぼ成立しているといえる。

4 考 察

4・1 処女き裂材でのき裂進展速度

疲労き裂の進展速度は一般に

$$\frac{dl}{dn} = K \cdot \sigma^q \cdot l^r \quad (1)$$

なる形で表わされ, r の値としては $0, 1, 1.5$ および 2 などが報告されている。Fig. 4 の結果を(1)式と比較すれば $r = 1, 1.5$ および 2 のいずれの場合もよく一致しているようである (図省略)。ただし, q の値は Table III に示すように, 破壊力学の考え方から期待

Table III. Values of q and r in Eq. (1).

r	q
1	3.84
1.5	4.10
2	4.67

される $q = 2r$ よりも大きく, $r = 1$ の場合は Frost の結果 $q = 3$ よりも大きくなっている。このことは, 同じ S 35 C 材についての前の報告で, き裂深さ l とそれを進展させるに必要な繰返し応力 σ との関係

$$\sigma^m \cdot l = c \quad (2)$$

の m の値が, Frost の結果 $m = 3$ よりも大きくなったことに関連しているのかもしれない。いずれにしても, 疲労き裂の進展速度が(1)式のような形で表わされることは, 変動応力下のき裂進展の解析的な取り扱いが可能になるという意味で興味深い。本実験では二次応力でのき裂の進展は調べていないが, これについては今後の課題としたいと考えている。

4・2 寿命に関する累積疲労被害

Fig. 8 に Fig. 5, 6 および 7 の二次応力での $S-N$ 線図の傾斜部分をあわせてプロットした結果を示す。図から明らかなように, 一次応力で入れたき裂の深さが

Fig. 8. $S-N$ plots of cracked specimens ($l = 0.30 \text{ mm}$).

同じ 0.30 mm でも一次応力の大きさによって二次応力での残りの寿命はかなり異なっており, 一次応力が小さいほど二次応力での残りの寿命が長くなる傾向がうかがわれる。一次応力で入れた 0.30 mm のき裂深さに対応する一次応力の繰返し数比は, $\sigma_1 = 23.5 \text{ kg/mm}^2$ の場合には $n_1/N_1 = 0.38$, $\sigma_1 = 21.0 \text{ kg/mm}^2$ の場合には $n_1/N_1 = 0.34$ および $\sigma_1 = 18.5 \text{ kg/mm}^2$ の場合には $n_1/N_1 = 0.38$ であるから, 本実験ではき裂深さが等しいことはほぼ繰返し数比が等しいことを意味している。すなわち, 二次応力での残りの寿命に対するめやすという点ではき裂深さも繰返し数比も同じであり, 一次応力で入れたき裂の深さが同じでも一次応力が小さいほど二次応力での残りの寿命が長くなるという傾向は, 前述のような応力上昇の場合には $\Sigma n/N > 1$, 応力下降の場合には $\Sigma n/N < 1$ なる傾向に対応している。

二段二重の変動応力のもとでのき裂進展に及ぼす応力干渉効果を調べた実験では, 一般に応力上昇の場合は二次応力でのき裂進展速度は(1)式で表わされるか, もしくはそれよりも大きくなり, 応力下降の場合は, 二次応力でき裂が進展を開始するまでにある繰返し数を要するが, その後の進展速度は(1)式で表わされるという結果が多く, これはき裂先端での一次応力による残留応力の影響として説明されている。そうであるなら, 応力上昇の場合は寿命は直線被害則に等しいか, もしくはそれより減少し, 応力下降の場合は増加するはずであるが, 本実験の結果はその逆である。回転曲げにより切欠き材のき裂進展を調べた青木らの実験でもやはり逆の結果が得られており, 本実験の結果と傾向は一致している。ここでは本実験の結果を説明するために次のように考えた。き裂材といえども応力繰返しを受けてすぐにき裂が進展を開始するのではないことは Fig. 4 を見れば明らかであり, 応力繰返しに伴いき裂先端に被害域が徐々に形成され, やがて進展の開始に至ると考えられる。同様に, 応力上昇の場合にはき裂先端に一次応力によって形成されている被害域

δ_1 は、二次応力によってすぐにそれに対応する被害域 $\delta_2 (> \delta_1)$ になるのではなく、応力繰返しに伴い徐々に δ_2 に近づいていくと考えられる。疲労き裂の進展速度は被害域の大きさ δ に依存するから、二次応力での進展速度はある繰返し数までは(1)式よりも小さく、寿命は増加することになる。また、応力下降の場合はき裂先端に一次応力により形成されている被害域 $\delta_1 (> \delta_2)$ の影響がなくなるまでは二次応力での進展速度は(1)式よりも大きく、寿命は減少することになる。Weertman²¹⁾ によって計算されているように、疲労き裂進展の criterion をき裂先端での繰返し塑性変位の総和とすれば、被害域の大きさを繰返し塑性変位の総和で置き替えて、同様な考え方をすることができる。

4.3 疲労限度に関する累積疲労被害

き裂材では疲労限度以上の十分な応力繰返しを受ければき裂は必ず進展するから、二次応力での疲労限度が低下するのはいわば当然である。疲労限度の低下のしかたは一次応力の大きいものほど少なく、前述のように寿命は一次応力が小さいものほど増加しているが、これとは逆の傾向を示している。これはき裂先端での一次応力による残留応力等の影響であろうが、その差は本実験での一次応力の範囲程度ではあまり大きくなく、後述のようにほぼき裂深さのみで評価しうるようである。平滑材や切欠き材では、き裂の発生以前には必ずしもこのかぎりではないが、き裂が発生すればことからは同様であり、直線被害則ではこのようなき裂の進展に伴う疲労限度の変化は考慮されていないから、いわゆる、疲労限度以下の応力を含むプログラム荷重²²⁾もとの累積疲労被害の直線被害則とのへだたりに、このようなき裂の進展に伴う疲労限度の低下に起因するものもあると考えられる。

4.4 き裂を進展させるに必要な繰返し応力

著者らは前に作製後真空焼なましした S 35 C き裂材について、き裂深さ l とそれを進展させるに必要な繰返し応力 σ の関係を回転曲げにより調べ、(2) 式の定数 m, c の値が $m=3.3, c=1350$ であることを明らか

Fig. 9. Alternating stress required to propagate a crack.

にした。⁸⁾ Fig. 9 に $l=0.16\text{mm}$ の処女き裂材の疲労限度 17.8kg/mm^2 , および三段階の一次応力で $l=0.30\text{mm}$ としたき裂材の二次応力での疲労限度を $l=0.30\text{mm}$ のき裂底での応力に計算し直した値 16.7, 15.6, 15.3 kg/mm^2 と(2)式との比較を示す。特に, $l=0.30\text{mm}$ のものはいずれも一次応力の履歴が残っており、真空焼なまししたき裂材についての結果である(2)式とは直接の比較はできないが、かなり近い値を与えているようである。また、一次応力をき裂を作製した繰返し応力とみなせば、同じき裂深さに対してき裂を作製した繰返し応力が大きいほどき裂を進展させるに必要な繰返し応力も大きくなっている。しかしながら、その差はあまり大きくなく、一次応力が $\sigma_1 = 19.5\text{kg/mm}^2$ と最も小さい場合の $l=0.30\text{mm}$ のき裂を進展させるに必要な繰返し応力は、ほぼ $l=0.30\text{mm}$ の真空焼なまししたき裂を進展させるに必要な繰返し応力に等しいと考えてよいようである。

5 結 言

真空焼なましした S 35 C 処女き裂材 ($l=0.16\text{mm}$) について、三段階の異なる一次応力で同じき裂深さ ($l=0.30\text{mm}$) とした後に、二次応力での残りの寿命と疲労限度の変化を回転曲げにより調べた。得られたおもな結果は次のとおりである。

- (1) 二次応力が処女き裂材の疲労限度以上ならば、累積繰返し数比は $\sum n/N = 1.32 \sim 0.71$ であり、応力上昇の場合は $\sum n/N > 1$, 応力下降の場合は $\sum n/N < 1$ なる傾向はあるが、直線被害則はほぼ成立する。
 - (2) 一次応力による疲労限度の低下は同じき裂深さに対しては一次応力が大きいほど少ないが、一次応力があまり大きくなければほぼき裂深さのみで評価することができる。
- なお、日産自動車(株)中篤行氏には実験の一部を担当していただいた。ここに記して謝意を表わしたい。

(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)

参 考 文 献

- 1) Hudson, C.M., and H.F. Hardrath, NASA TN, D-960 (1961).
- 2) Schijve, J., and D. Broek, Aircraft Engng, **34**, 314 (1962).
- 3) Hudson, C.M., and H.F. Hardrath, NASA TN, D-1803 (1963).
- 4) Stulen, F.B., J.H. Redfern, and W.C. Schulte, NASA CR, 246 (1965).
- 5) Plunkett, R., and N. Viswanathan, Trans. ASME, Ser. D, **89**, 55 (1967).
- 6) 青木逸郎, 国尾武, 中村宏, 日本機械学会論文集, **32**, 1762 (1966).

- 7) 青木逸郎, 国尾武, 中村宏, 材料, **15**, 39 (1966).
- 8) 小林英男, 中沢一, 日本機械学会論文集, **33**, 1 529 (1967).
- 9) たとえば, 中沢一, 小林英男, 日本機械学会機械工学年鑑, 32 (1966).
- 10) Weibull, W., Acta Metallurgica, **11**, 745 (1963).
- 11) Frost, N.E., and D.S. Dugdale, J. Mech. Phys. Solids, **6**, 92 (1958).
- 12) Liu, H.W., Trans. ASME, Ser. D, **83**, 22 (1961).
- 13) Head, A.K., Phil. Mag., **44**, 925 (1953).
- 14) McEvily, A.J., and R.C. Boettner, Acta Metallurgica, **11**, 725 (1963).
- 15) Paris, P.C., and F. Erdogan, Trans. ASME, Ser. D, **85**, 528 (1963).
- 16) Klöppel, K., Stahlbau, **34**, 65 (1965).
- 17) Lardner, R.W., J. Mech. Phys. Solids, **14**, 141 (1966).
- 18) Lardner, R.W., J. Mech. Phys. Solids, **14**, 281 (1966).
- 19) Scharton, T.D., and S.H. Crandall, Trans. ASME, Ser. D, **88**, 247 (1966).
- 20) Christensen, R.H., Proc. 1st Int. Conf. Fracture, **3**, 1 507 (1966).
- 21) Weertman, J., Intern. J. Fracture Mechanics, **2**, 460 (1966).
- 22) たとえば, 中沢一, 材料, **17**, 84 (1968).