

低炭素鋼の2段2重重複応力疲労寿命に及ぼす 時効の影響

Ohkawa, Isao / Misumi, Masaaki / Enomoto, Nobusuke / 大
川, 功 / 三角, 正明 / 榎本, 信助

(出版者 / Publisher)
社団法人日本材料学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)
材料 / 材料

(号 / Number)
385

(開始ページ / Start Page)
1180

(終了ページ / End Page)
1186

(発行年 / Year)
1985-10-15

低炭素鋼の2段2重重複応力疲労寿命に及ぼす時効の影響†

大 川 功* 三 角 正 明** 榎 本 信 助**

Effect of Ageing on Fatigue Life of Low Carbon Steel
under Two-Level Stress Loading

by

Isao OHKAWA*, Masaaki MISUMI** and Nobusuke ENOMOTO**

In the case of two-level cyclic stress loading, it is generally recognized in steels that the cumulative cycle ratio ($\sum N/N_f$) is greater than unity for a low to high stress sequence ($\sigma_L \rightarrow \sigma_H$) but less than unity for a high to low stress sequence ($\sigma_H \rightarrow \sigma_L$). This kind of deviation from the Palmgren-Miner's rule (linear damage rule) is expected to be related to the fatigue damage accumulation process and age-hardening ability.

Two kinds of low carbon steels were prepared; specimen A, in which the age-hardening ability was attained through low temperature quenching, and specimen B, in which the ageing process in specimen A was completed by leaving them at room temperature. In specimen B, the deviation from Palmgren-Miner's rule was a little for both $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ and $\sigma_H \rightarrow \sigma_L$ sequences. On the other hand, in specimen A which had age-hardening ability, the deviation from Palmgren-Miner's rule for $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ sequence was greater than that in specimen B.

The change of internal friction energy and propagation of fatigue crack were observed during cyclic loading. Based on the experimental results of accumulation process of internal friction energy, the following has been assumed.

- (1) A part of the internal friction energy is dissipated for the accumulation of fatigue damage.
- (2) Crack growth corresponds to fatigue damage.
- (3) The accumulation process of fatigue damage is expressed by the Marco-Starkey¹⁾ and Newmark²⁾ models in which an exponent depends on stress amplitude and increases with progress of ageing.

Based on the above assumptions, the cumulative cycle ratio was calculated, and the result showed a similar tendency as the experimental one.

キー・ワード：時効，疲労被害，Miner 則，累積繰返し数比

1 ま え が き

一般に鋼材の変動応力疲労試験結果をみると、2段2重試験では低応力から高応力へと応力を増加した場合、累積繰返し数比 $\sum N/N_f$ は1より大となり、応力減少の場合 $\sum N/N_f$ は1よりも小となる傾向がみられる³⁾。著者らはこのような直線被害則からの偏りは、疲労被害の蓄積過程と時効性に関係があるものと考えた。そこで低炭素鋼に低温焼入れをして時効性を与えた試料と、これを常温放置して時効を終了させた試料とを用いて2段2重重複応力疲労試験を行い、内部摩擦エネルギーの蓄積過程およびき裂の進展過程を調べ、この観点から両材料の累積繰返し数比について比較検討した。

その結果、時効を終了した材料では応力増加、減少の場合とも Miner 則からの偏りは小さいが、時効性をもつ材料では Miner 則からの偏りは非対称的で、

応力減少の場合偏りは時効を終了した材料とほぼ等しく、応力増加の場合かなり大となった。これらの実験結果は、内部摩擦エネルギーの測定結果をもとに、疲労被害を繰返し数比のべき乗則で表し、さらに時効性をもつ場合は時効の進行にともなってべき数が増加し、被害の進行が抑えられると考えると説明できることがわかった。

2 試料および実験方法

供試材はリムド低炭素鋼 CH10R であり、Fig. 1 に示す寸法および形状の片持回転曲げ試験片に切削加工後、熱処理した。試験片の大部分は平滑試験片であるが、一部のはき裂の発生箇所を限定して、その進展挙動の観察を容易にするため、西谷らの方法⁴⁾にならって浅い切欠きを付けた。テーパ部の応力は最大値の98%以内におさまっており、ほぼ一様であるとみなせるが、図中の切欠き部の位置は最大応力を生ずる箇所とし、

† 原稿受理 昭和60年1月11日 Received Jan. 11, 1985

* 正会員 法政大学工学部 小金井市梶野町, College of Engineering, Hosei University, Kajino-cho, Koganei

** 正会員 成蹊大学工学部 武蔵野市吉祥寺北町, Faculty of Technology, Seikei University, Kita-machi, Kissehoji, Musashino

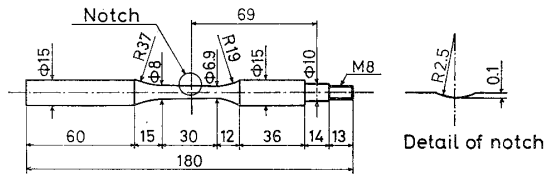


Fig. 1. Specimen configuration.

先端半径 2.5 mm のメタルソーにより加工した。なお、後述のようにこの切欠き試験片の疲労寿命は、平滑試験片の場合と大差がないので、切欠き試験片のき裂進展挙動は、実質的に平滑試験片のそれとみなし得る。

熱処理は、まず 920°C で 1 hr 真空加熱後空冷、さらに時効性を与えるため 710°C で 1 hr 真空加熱後水冷し、これを A 材と名づけた。また、A 材を常温中に放置し、時効をほぼ終了させたものを B 材とした。A 材の低温焼入れ後の時間経過にともなうマイクロビッカース硬さの変化の一例を Fig. 2 に示す。この図から明らかなように、硬さは約 4×10^4 分で飽和することから、B 材をつくるのに必要な常温放置日数を約 1 か月とした。供試材の化学成分および A, B 両材の機械的性質を Table I に示す。

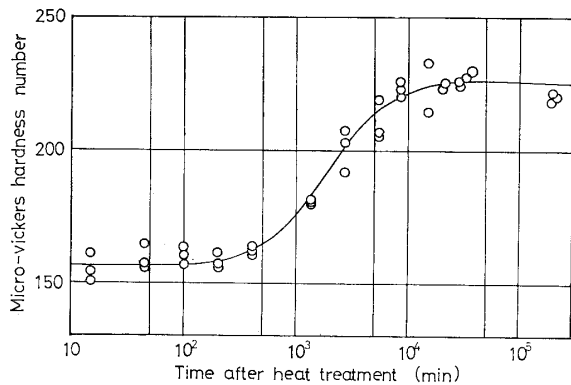


Fig. 2. Variation of hardness after heat treatment.

疲労試験は、繰返し速度 3 000 rpm の片持回転曲げ試験機を用いて、まず A, B 両材の S-N 曲線を求め、これをもとに 2 段 2 重重複応力試験を行った。1 次、2 次応力はいずれも過大応力で、1 次応力繰返し数比

N_1/N_{f1} は応力増加、減少の場合とも、約 0.25, 0.5 および 0.75 とした。その際、疲労過程における時効の進行の度合を知るため、全試料に対し、低温焼入れ直後、疲労試験前、疲労試験後および疲労試験後約 1 か月常温放置した場合のマイクロビッカース硬さ（それぞれ $V_1 \sim V_4$ と表す）を測定し、それぞれ 7 点の測定値の平均で表すものとした。また、疲労被害の進行過程を調べるため、疲労過程における試験片の水平たわみから内部摩擦エネルギーの変化を求めた。

切欠き試験片における表面き裂長さの測定は、所定の繰返し数ごとに採取したレプリカについて行い、表面に沿って測った円周方向の長さをき裂長さとした。また、表面き裂長さからき裂面積を計算するため、加熱着色法を用いて、き裂形状の変化様相を調べた。

3 実験結果および考察

3.1 定応力試験

A, B 両材の S-N 線図をそれぞれ Fig. 3 (a), (b) に示す。A 材の疲労限度は $\sigma_w = 243$ MPa, B 材では 268 MPa であり、常温時効により強化された B 材の S-N 曲線は A 材の S-N 曲線の右上方にある。

Fig. 4 において、○印は疲労試験前後の硬さの変化

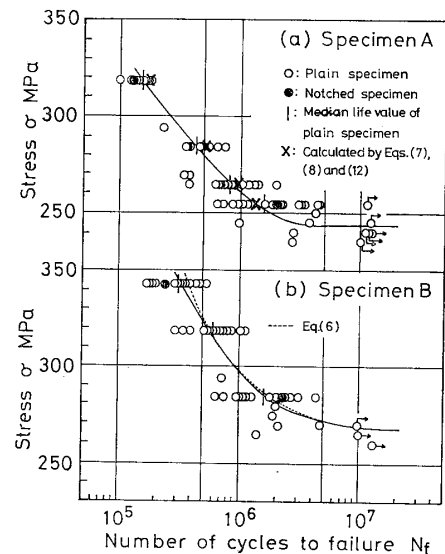


Fig. 3. S-N diagrams.

Table I. Chemical composition and mechanical properties of materials.

| Chemical composition % | C | Si | Mn | P | S |
|------------------------|-------------------------------|------|-------|------|-------|
| | | 0.11 | 0.01 | 0.39 | 0.016 |
| Specimens | | | | A | B |
| Mechanical properties | 0.2 % proof stress | | MPa | 253 | 350 |
| | Tensile strength | | MPa | 402 | 543 |
| | Elongation | | % | 20 | 15 |
| | Contraction of area | | % | 63 | 57 |
| | Micro-vickers hardness number | | H_V | 147 | 219 |

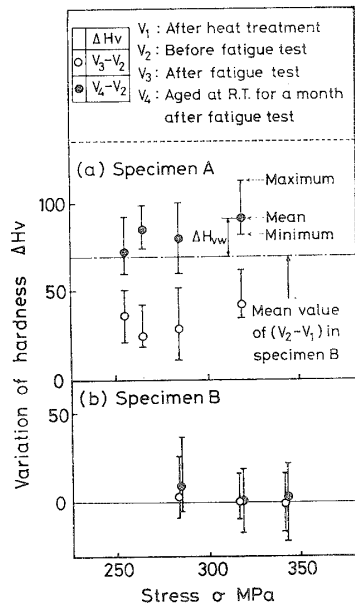


Fig. 4. Variation of hardness under constant stress loading.

(V_3-V_2), ●印はそれからさらに約1か月間常温放置したときの硬さ変化 (V_4-V_2) を示したものである。Fig. 4 (b)は常温放置によりほぼ時効を終了したB材の場合であるが、ほとんど硬さの変化はみられなかった。Fig. 4 (a)は時効性をもつA材の場合で、各応力レベルとも疲労試験前後で硬さは明らかに増加し(○印)、また破壊後の常温放置により、さらに硬さが増加していることから(●印)、試験後も時効能が残留していることがわかる。Fig. 4 (a)中の一点鎖線は、B材の試験前における常温時効完了による硬さの上昇幅 (V_2-V_1) の平均値を示したものであり、A材の●印との差 ΔH_{vw} は加工硬化による硬さの増加を表すものと考えられる。この ΔH_{vw} と○印の値から、A材の破壊時の硬さ増分のうち、加工硬化によるものの割合を推定してみると、 $\sigma=319$ MPa の場合44%、 $\sigma=255$ MPa では3%であった。

3・2 2段2重重複応力疲労試験

A, B 両材の2段2重重複応力における疲労試験の結果を Table II に示す。A, B 両材とも、1次応力 σ_1 と2次応力 σ_2 は、3・1節の定応力試験において寿命統計試験を行った応力レベルを用い、各応力レベルにおける繰返し数比 N/N_f の計算には、破壊確率50%寿命値 N_f を用いた。 σ_1, σ_2 はいずれも過大応力であり、A材の場合319および255 MPa はそれぞれ、31および5%過大応力に相当する。B材の場合、343および284 MPa はそれぞれ28および5%過大応力であり、A, B 両材で応力レベルの過大率はほぼ等しい。

A, B 両材について、1次応力繰返し数比 N_1/N_{f1}

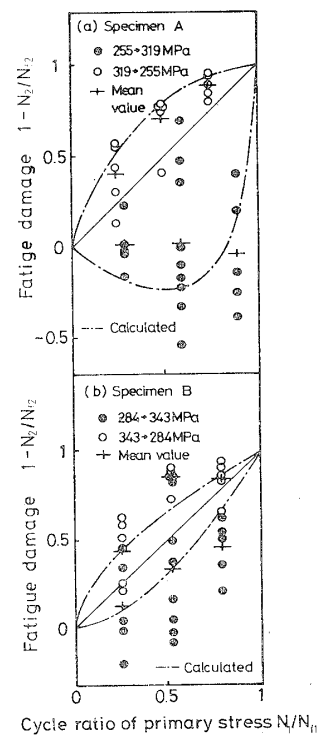


Fig. 5. $(1-N_2/N_{f2})-(N_1/N_{f1})$ diagrams.

Table II. Results of fatigue test under two-level stress loading.

| Specimens | Primary stress σ_1 MPa | Secondary stress σ_2 MPa | Number of cycles to failure at σ_1 N_{f1} | Number of cycles to failure at σ_2 N_{f2} | Cycle ratio at σ_1 N_1/N_{f1} | Number of test piece | Mean value | |
|-----------|----------------------------------|------------------------------------|---|---|---|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | | | | | | Cumulative cycle ratio $\sum N/N_f$ | Fatigue damage $1-N_2/N_{f2}$ |
| A | 255 | 319 | 1.549×10^6 | 1.517×10^5 | 0.29 | 5 | 1.27 | 0.02 |
| | | | | | | 9 | 1.56 | 0.03 |
| | | | | | | 5 | 1.91 | -0.03 |
| | 319 | 255 | 1.517×10^5 | 1.549×10^6 | 0.25 | 5 | 0.84 | 0.41 |
| | | | | | | 5 | 0.79 | 0.71 |
| | | | | | | 5 | 0.86 | 0.89 |
| B | 284 | 343 | 1.633×10^6 | 3.119×10^5 | 0.26 | 5 | 1.12 | 0.14 |
| | | | | | | 8 | 1.18 | 0.35 |
| | | | | | | 5 | 1.32 | 0.47 |
| | 343 | 284 | 3.119×10^5 | 1.633×10^6 | 0.26 | 5 | 0.81 | 0.45 |
| | | | | | | 5 | 0.66 | 0.86 |
| | | | | | | 5 | 0.93 | 0.85 |

と被害 $(1 - N_2/N_{f2})$ の関係を図示したものが Fig. 5 (a), (b)である. B材の場合, 低応力 σ_L から高応力 σ_H へと応力を増加すると累積繰返し数比 $\sum N/N_f$ は1より大, $\sigma_H \rightarrow \sigma_L$ へと応力を減少すると $\sum N/N_f$ は1より小となり, Miner 則 (図中, 傾き1の実線で示す) からの偏りの度合は, 応力増加と減少ではほぼ等しくなった. これに対し, A材では $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ で $\sum N/N_f$ は1より大, $\sigma_H \rightarrow \sigma_L$ で1より小となり, 傾向はB材と同様であるが, $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ の場合, B材と比較すると Miner 則からの偏りはかなり大きく, Fig. 5 (a)に示した線図は非対称形となった. このA材とB材の Miner 則からの偏りの程度の相違は, 時効性の有無に関係があるものと考えられる.

3.3 B材の重複応力疲労寿命について

3.3.1 疲労被害の累積過程 B材の2段2重試験においてみられた Miner 則からの偏りは, 時効性が関与していないことから, 疲労被害の累積過程が応力レベルにより異なることから生ずると考えられる.

Marco-Starkey あるいは Newmark によれば, 疲労被害 D の累積過程は次式で表され,

$$D = (N/N_f)^{m(\sigma)} \quad (1)$$

2段2重試験の場合

$$(N_1/N_{f1})^{m_1/m_2} + (N_2/N_{f2}) = 1 \quad (2)$$

なる関係が成り立つ. ここで m_1, m_2 はそれぞれ1次応力 σ_1 , 2次応力 σ_2 における式(1)中の m の値である.

B材の定応力試験の疲労過程における内部摩擦エネルギーの測定結果より, 繰返し数 N までの内部摩擦エネルギーの総和を W_N , 破壊までの総和を W_{N_f} として, その累積比 W_N/W_{N_f} と繰返し数比 N/N_f の関係を両対数グラフ上にプロットしてみると,

$$W_N/W_{N_f} = (N/N_f)^{a(\sigma)} \quad (3)$$

なる関係が得られた. Fig. 6 にその一例を示す. 式(1)と式(3)の対比から, 内部摩擦エネルギーの累積比 W_N/W_{N_f} が被害 D に対応し, 式(3)によって疲労被害の進行を表すことができるものと考え, 式(2)を用いて2段2重試験における累積繰返し数比 $\sum N/N_f$ を求めることができる. しかし, 定応力試験で得られた式

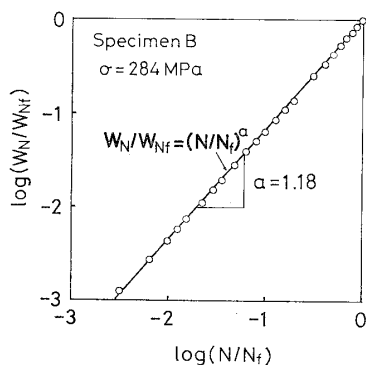


Fig. 6. $\log(W_N/W_{N_f}) - \log(N/N_f)$ diagram.

(3)中のべき数 a の値は, いずれも1に近い値であり, $\sum N/N_f$ の計算値はわずかに1からはずれる程度で, 実験値の Miner 則からの偏りを説明できない.

本実験においては, 疲労限 σ_w 以下の応力でも, 内部摩擦エネルギーの消費と試験片の温度上昇がみられたことから, 内部摩擦エネルギーの一部が疲労破壊(き裂の発生および進展)に使われ, 残りの部分は転位の揺動等により, 大部分が熱として消費されると考えられる. そこで内部摩擦エネルギーのうち, 疲労破壊に寄与する部分の累積比を W'_N/W'_{N_f} とし, 式(3)と同様に繰返し数比 N/N_f のべき乗則にしたがうものと仮定すると,

$$W'_N/W'_{N_f} = (N/N_f)^{a'(\sigma)} \quad (4)$$

となる. ここで破壊に寄与する1サイクル当りのエネルギー w' の, 1サイクル当りの全内部摩擦エネルギー w に占める割合は疲労過程において変化し, 主き裂がある程度成長するとその箇所に対し集中的により多くのエネルギーが費され, したがって w'/w は急速に増加してゆくものと考えられる.

式(4)中のべき数 a' の応力依存性については Z. Hashin, C. Laird の示唆した関係をより一般化し,

$$a'(\sigma) = A/(\sigma - \sigma_w)^c + B \quad (5)$$

とおく. σ_w は疲労限度, A, B および c は定数である. さらに, Fig. 3 (b)中の破線で示したように, B材の $S-N$ 関係を Stromeier の式

$$\sigma = \sigma_w + bN_f^{-d} \quad (6)$$

によって近似すると ($\sigma_w = 268$ MPa, $b = 1.40 \times 10^7$, $d = 0.942$), べき数 a' と破壊繰返し数 N_f の関係は

$$a' = A/(bN_f^{-d})^c + B \quad (7)$$

と表すことができる.

3.3.2 切欠き材のき裂進展特性にもとづく疲労被害の累積過程 いま, 内部摩擦エネルギーの一部が破壊に寄与し, き裂面積の増大に使われると考え, 式(1)の疲労被害 D にはき裂面積比 A_N/A_{N_f} が対応するものとする,

$$A_N/A_{N_f} = (N/N_f)^{a'(\sigma)} \quad (8)$$

と表すことができる. 式(8)中のべき数 a' はB材のき裂進展データより求められる. そこで Fig. 1 に示す形状の切欠き試験片により, き裂の進展特性を調べた. Fig. 3 (b)中の応力レベル $\sigma = 343, 284$ MPa における ●印は切欠き材の寿命を表したものであるが, 平滑材の場合の寿命中央値にほぼ等しく, したがって切欠き材は平滑材のき裂進展特性をほぼ反映していると考えてよいであろう.

Fig. 7 は種々の表面き裂長さ l に対するき裂面形状を加熱着色法により求めたものである. 他の研究者が CH10R⁹⁾ および S45C¹⁰⁾¹¹⁾ について求めたき裂形状比 h/l は, き裂長さ l によらずほぼ一定で 0.3~0.4 である

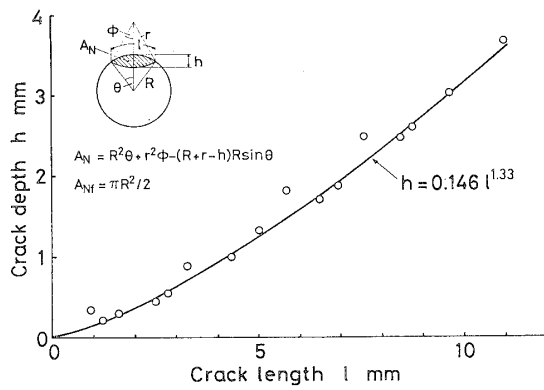
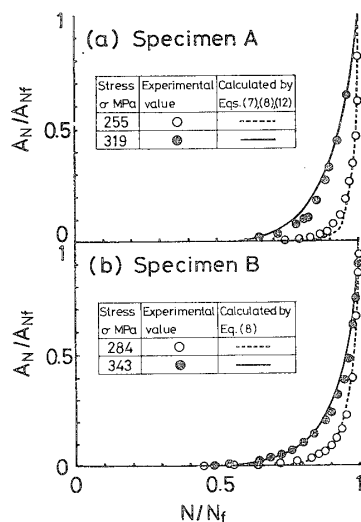


Fig. 7. Shape of crack surface.

が、本実験においては、き裂深さ $h=0.146l^{1.33}$ によりほぼ近似できるようである。き裂前縁の形状を円弧で近似することによりき裂面積 A_N を求め、またき裂深さ h が試験片の半径 R にはほぼ等しくなった時点で急速破断することを考えて、破壊時の面積 A_{Nf} として試験片断面積の半分をとって、き裂面積比 A_N/A_{Nf} を求めた。

Fig. 8 (b)はB材の応力 343, 284 MPa におけるき裂面積比 A_N/A_{Nf} と繰返し数比 N/N_f の関係を示したものである。前述の観点から、式(8)のように A_N/A_{Nf} が N/N_f のべき乗則にしたがうものとして近似曲線を描いたものが Fig. 8 (b)中に示した曲線である。

Fig. 8. $(A_N/A_{Nf})-(N/N_f)$ diagrams.

$\sigma=343$ MPa の場合、式(8)中の a' の値は 12, $\sigma=284$ MPa の場合 20 程度となり、この値を用いて式(2)より 2 次応力繰返し数比 N_2/N_{f2} を求めたものが Fig. 5 (b)中に一点鎖線で示した曲線である。

このように、疲労被害としてはき裂面積比が対応し、き裂面積の増加に内部摩擦エネルギーの一部が使われるとして求めたべき数 a' は、3・3・1項のべき数 a が 1 程度であったのに比較してかなり大きい値となるが、これを用いると時効性をもたないB材の2段2重試験

結果に近い累積繰返し数比を得ることができた。

3・4 A材の重複応力疲労寿命について

3・4・1 疲労過程における時効の進行 Fig. 9 は時効性のあるA材の疲労過程における硬さの変化を示したものである。時効完了時の最大硬化量 ΔH_{Vmax} に対する各繰返し数における硬化量 ΔH_V の比

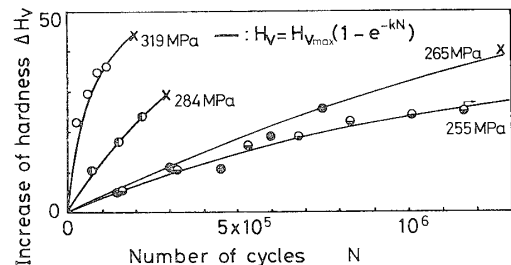


Fig. 9. Variation of hardness during constant stress loading.

$$y = \Delta H_V / \Delta H_{Vmax} \quad (9)$$

の変化を、繰返しにともなう時効の進行を表す式¹²⁾

$$y = 1 - e^{-kN} \quad (10)$$

で近似したものが Fig. 9 中の各曲線である。この硬さの増分には 3・1 節で述べたように、時効硬化のほかに加工硬化によるものも含まれている。そこで Fig. 4 (a)中に示した破壊時の加工硬化の推定値 ΔH_{VW} を差し引いて、時効による硬さ変化分とし、 $\{(V_3 - V_2) - \Delta H_{VW}\}$ と $\{(V_4 - V_2) - \Delta H_{VW}\}$ の比を破壊時の時効の進行度 y_f として

$$k = -\ln(1 - y_f) / N_f \quad (11)$$

より、個々の試料について式(10)中の定数 k の値を求めた。平均値をとると、 $\sigma=255$ MPa の場合 $k=4.35 \times 10^{-7}$, 265 MPa では $k=2.97 \times 10^{-7}$, 284 MPa では $k=6.92 \times 10^{-7}$ および 319 MPa では $k=3.04 \times 10^{-6}$ となり、 σ の大きいほど k の値は大きくなる傾向がみられ、応力繰返しにより時効の進行が促進されていることが明らかである。¹³⁾

3・4・2 疲労被害の累積過程 つぎに、時効性をもつA材において、時効の進行過程が式(10)で表されるとしたとき、3・3節のB材の累積被害則をもとにして、いくつかの仮定のもとに、被害の累積過程を求めてみた。

低温焼入れ後常温放置すると、時効の進行により材料は強化され、時効の進行度 y に対応して材料の強度は変化してゆくと考えられる。いま、時効の進行度を $y_0 (=0)$, $y_1, \dots, y_\infty (=1)$ として、各時効の進行度に対応した材料強度を有する、時効性をもたない材料を仮想的に考える。これらの材料に繰返し応力を与えたとき、Fig. 10 に示す $S-N$ 曲線群 $f_0, f_1, \dots, f_\infty$ が得られるものとする(これらの材料では時効能をもたぬことから、時効の進行度は $y_0, y_1, \dots, y_\infty$ に凍

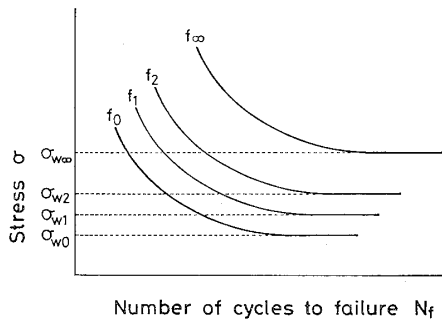


Fig. 10. Hypothetical S-N diagrams corresponding to various degrees of ageing progress.

結され、疲労過程で材質の変化は起らない。図中の σ_{w0} , σ_{w1} , ..., $\sigma_{w\infty}$ は各 S-N 曲線の疲労限度を表し、曲線 f_0 は時効の進行度 $y=0$, すなわち低温焼入れ直後の材質を有する無時効性材の S-N 線図であり、曲線 f_∞ は $y=1$, すなわち時効を終了した材料の S-N 線図を表す。常温時効処理した B 材の S-N 曲線は、Fig. 10 中の曲線 f_∞ に対応し、これら S-N 曲線群の疲労限度 $\sigma_w(y)$ と横軸方向の移動量 $n(y)$ は時効硬化率 γ (式(10)) にしたがって変化するものと仮定すると、B 材の S-N 曲線 f_∞ は式(6)により表されるので、S-N 曲線 f_0 , f_1 , ... は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} N_f &= [\{\sigma - \sigma_w(y)\}/b]^{-1/d} - n(y) \\ \sigma_w(y) &= \sigma_{w0} + (\sigma_{w\infty} - \sigma_{w0})(1 - e^{-kN}) \\ n(y) &= ne^{-kN} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

これらの仮想的に考えた材料は、時効性をもたないことから、被害の累積過程は B 材の場合と同様、式(8)のべき乗則にしたがうと考えられる。その被害曲線群を Fig. 10 の S-N 曲線群 f_0 , f_1 , ..., f_∞ に対応してそれぞれ g_0 , g_1 , ..., g_∞ とし (Fig. 11), これらから時効性をもつ A 材の被害曲線を求める。

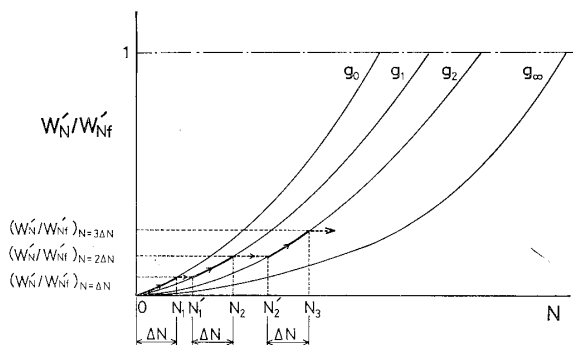


Fig. 11. Accumulation process of fatigue damage.

Fig. 11 において、 g_0 は時効の進行度 $y_0=0$ に対応する材質をもつ無時効性材の被害曲線で、破断繰返し数を N_{f0} 、べき数 a_0' とする。微小繰返し数 ΔN 間では近似的に時効の進行度は変化せず、 $y=0$ のままであるとすると、低温焼入れ直後に $N_1=4\Delta N$ だけ繰返し応力を負荷したときの被害は曲線 g_0 に沿って進み、

$$(W'_N/W'_{Nf})_{N=4\Delta N} = (N_1/N_{f0})^{a_0'} \quad (13)$$

で与えられる。つぎの ΔN 間の繰返しでは、時効の進行度は $y_1=1-\exp(-k\Delta N)$ となっているから、被害は y_1 に対応する曲線 g_1 (破断繰返し数 N_{f1} 、べき数 a_1') に沿って進む。曲線 g_1 上で被害が式(13)と等しい繰返し数 N_1' は $N_1'=N_{f1}(N_1/N_{f0})^{a_0'/a_1'}$ より求まるから、 N_1' から近似的に y_1 —一定で ΔN だけ繰返したときの被害は

$$\begin{aligned} (W'_N/W'_{Nf})_{N=2\Delta N} &= (N_2/N_{f1})^{a_1'} \\ &= \{(N_1'+\Delta N)/N_{f1}\}^{a_1'} \end{aligned} \quad (14)$$

によって与えられる。 $2\Delta N$ 繰返し後の時効の進行度は $y_2=1-\exp(-2k\Delta N)$ となるから、同様にして曲線 g_2 上で N_2' より ΔN 繰返したときの被害 $(W'_N/W'_{Nf})_{N=3\Delta N}$ を求めることができる。以降は被害 $(W'_N/W'_{Nf})=1$ となるまでこの操作を繰返し、Fig. 11 における曲線 g_0 上の $N=0\sim N_1$ の部分、曲線 g_1 上の $N=N_1'\sim N_2$ の部分、 g_2 上の $N_2'\sim N_3$ の部分、..., をつなぎ合せると、A 材の被害の累積過程を表す近似曲線が得られる。

以上の計算を行うにあたり、時効の進行度 $y_0=0$ に対する S-N 曲線 f_0 および被害曲線 g_0 を実験的に求めることはできない。B 材 ($y_\infty=1$) の場合、S-N 曲線 f_∞ は既知であり、すなわち式(12)中の $\sigma_{w\infty}$, b および d が既知であるから、 n と $y_0=0$ に対する疲労限度 σ_{w0} を仮定すれば、S-N 曲線群 f_0 , f_1 , ... が求まる。また、B 材の 343, 284 MPa の場合、式(7)中の a' と N_f が既知であるから、 c を仮定すると A , B が決まり、したがって被害曲線 g_0 , g_1 , ... のべき数 a_0' , a_1' , ... が定まる。時効の進行過程を表す定数 k は 3・4・1 項で示した値を用い、定応力レベルにおける寿命の計算値が実験値と合うよう、きざみ値 $\Delta N=100$ として計算した結果、 $A=5.6 \times 10^4$, $B=12$, $C=3$, $\sigma_{w0}=235$, $n=2.8 \times 10^5$ が得られた。このときの疲労寿命の計算値を Fig. 3 (a)中の×印で示した。また、この場合の A 材の被害の進行過程を表す曲線は Fig. 8 (a)中に示した曲線となり、B 材の場合 (Fig. 8 (b)) に比べると低応力の場合に被害の進行が抑えられており、A 材のき裂面積比 A_N/A_{Nf} の繰返し過程における変化を表す実験点の傾向に類似している。

3・4・3 2次応力繰返し数比の算出 3・4・2 項において近似的に求めた A 材の定応力での被害曲線から、任意の 1 次応力繰返し数比における被害と時効の進行度を与えると、2 段 2 重試験における破断までの 2 次応力繰返し数比を求めることができる。

Fig. 12 に低応力 σ_L から高応力 σ_H へ応力を変更した場合の例を示す。Fig. 12 (a)は繰返し過程における時効の進行を表したものであり、曲線 f_H は σ_H の、曲線 f_L は σ_L の場合で、いずれも式(10)で表される。

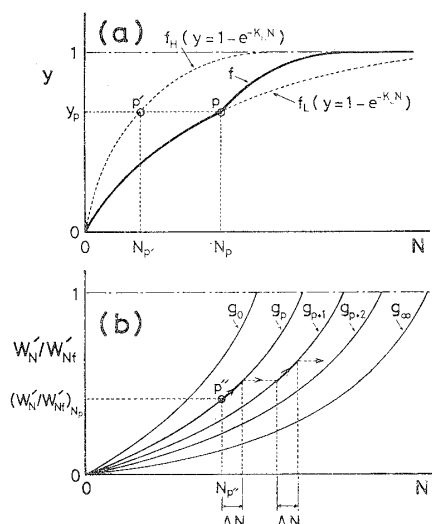


Fig. 12. (a) progress of ageing and (b) accumulation process of fatigue damage for $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ sequence.

$\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ へと応力変更時の繰返し数を N_p , 時効の進行度を y_p とすると, 2次応力 σ_H の繰返しによる N_p 以降の時効の進行は, 曲線 f_H を右方に

$$\bar{p}'\bar{p} = \ln(1 - y_p)(1/k_H - 1/k_L) \quad (15)$$

だけ移動した曲線 f で表されると考えられる。ここで k_L, k_H はそれぞれ σ_L, σ_H における式(10)中の定数 k の値である。Fig. 12 (b)は Fig. 11 と同様, 仮想的に考えた各時効の進行度に対応する材質を有する無時効性材の $\sigma = \sigma_H$ の繰返しに対する被害曲線を表すものである。 $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ へと応力変更時の被害を $(W_{N'}'/W_{N_H}')_{N_p}$ とすると, 時効の進行度 y_p に対応する曲線 g_p 上で, この値と被害の等しくなる点 p'' を見出せば, 応力変更以後の2次応力 σ_H による被害の累積過程は, 3・4・2 項の定応力繰返しの場合と同じ手順で求めることができる。 $\sigma_H \rightarrow \sigma_L$ へと応力を変更する場合も同様にして求めると, Fig. 5 (a)中に示した曲線が得られ, 実験値の傾向を比較的よく表している。すなわち, $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ の場合, 疲労限に近い応力 σ_L において, 時効硬化による材料強化により疲労初期のき裂の進展が抑えられ, Miner 則からの大きい偏りが現れたものと考えられる。一方, $\sigma_H \rightarrow \sigma_L$ の場合, 高応力 σ_H の繰返しにより時効硬化とともに加工硬化も生じるが, とともに被害の進行を抑制するに至らず, Miner 則からの偏りはB材と同程度になったと考えられる。

4 結 論

低炭素鋼に低温焼入れをして時効性を与えた試料(A材)とこれを常温放置して時効をほぼ終了させた試料(B材)を用意して, 2段2重重複応力疲労試験を行い, 疲労過程における内部摩擦エネルギーの累積過

程およびき裂の進展過程を調べ, つぎの結果を得た。

(1) B材では低応力 $\sigma_L \rightarrow$ 高応力 σ_H , $\sigma_H \rightarrow \sigma_L$ の双方とも, Miner 則からの偏りは小さいが, 時効性をもつA材では $\sigma_H \rightarrow \sigma_L$ の場合 Miner 則からの偏りはB材と同程度であるが, $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ の場合偏りはかなり大となった。

(2) 時効性が関与していないB材の場合, 内部摩擦エネルギーの測定結果をもとに, 疲労被害にはき裂面積比が対応するものとし, き裂面積の増大に内部摩擦エネルギーの一部が使われるものと考えて, 被害の累積過程を繰返し数比のべき乗則で表すと, $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ と $\sigma_H \rightarrow \sigma_L$ で Miner 則からの偏りは対称形となり, (1)のB材に対する実験結果の傾向と一致した。

(3) 時効性をもつA材の場合, 疲労限に近い低応力レベルにおいては, 時効の進行にともなって上述のべき数の値が増加し, 被害の進行が抑えられるものと考ええると, $\sigma_L \rightarrow \sigma_H$ の場合のみ Miner 則からの偏りは大となり, (1)の実験結果とほぼ同一の傾向を示した。

なお, 本研究は過大応力レベルにおける2段2重負荷の場合について実験, 考察したものであり, 疲労限上下にまたがる場合の挙動については今後の課題であると考えている。

(昭和59年11月14日 第17回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) S. M. Marco and W. L. Starkey, ASME, Trans., 76 (1954).
- 2) N. M. Newmark, "Fatigue and Fracture of Metals", 197 (1952) Wiley & Sons.
- 3) 例えば, 委員会研究報告, 材料試験, 8, 684 (1959).
- 4) 西谷弘信, 日本機械学会論文集, 42, 2661 (1976).
- 5) 大川 功, 榎本信助, 日本機械学会講演論文集, No. 823 -1, 13 (1982).
- 6) 西原利夫, 榎木義一, 田賀喜一, 日本機械学会論文集, 42, 369 (1939).
- 7) Z. Hashin and C. Laird, Fatigue of Engineering Materials and Structures, Pergamon Pr., 2, 345(1980).
- 8) C. E. Stromeyer, Proc. Roy. Soc., A-90, 411 (1914).
- 9) 広瀬素尚, 長谷川典彦, 加藤容三, 材料, 27, 841(1978).
- 10) 西谷弘信, 後藤真宏, 日本機械学会論文集, 49, 779 (1983).
- 11) 広瀬素尚, 長谷川典彦, 加藤容三, 服部辰治, 日本機械学会論文集, 45, 1496 (1979).
- 12) 武田武信, 那須康雄, 白鳥英亮, 日本機械学会論文集, 49, 557 (1983).
- 13) 桜井忠一, 日本機械学会論文集, 24, 532 (1958).