塑性疲労強度の温度依存性に関する研究*

井 上 達 雄** 吉 田 紀 元***

Temperature Dependence of Low Cycle Fatigue Strength

by

Tatsuo INOUE

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

and Toshiyuki YOSHIDA

(Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kobe)

Strain-controlled low cycle fatigue tests were conducted at four temperature levels; room temperature, 150°C, 300°C and 450°C. The temperature dependence of fatigue strength of low carbon steel was discussed with reference to the result of the tension tests at elevated temperatures.

The conclusions obtained are as follows:

- (1) The stress range increased continuously at 300°C until the specimen failed, while it held almost constant within other temperature levels.
- (2) The mean stress range had its peak value near 300°C just like tensile strength.
- (3) The number of cycles to failure of the material decreased with temperature when the test results were plotted both by the total and the plastic strain range.
- (4) The plastic work, no matter whether per unit cycle or total, was not effective for the arrangement of low cycle fatigue date, though such equivalent plastic work as defined in the study was found fairly effective.
- (5) The modified Larson-Miller method was applicable to estimation of failure life of low cycle fatigue at elevated temperature: Good correlation was found between the parameter $P' = T (\log N + C')$ and the total strain range $\Delta \epsilon$ except for the case of room temperature.

(Received Nov. 16, 1970)

1 緒 言

高温における塑性疲労の研究については、その材料の限界使用温度におけるものは多く発表されている。しかしながら、たとえばタービンなどにおいては、温度をあまり高くせず材料の強度が大きい温度で圧力を高めようとする動きがあり、また、化学反応装置などでも、通常は限界使用温度以下で使われることが多い。さらに、局所的に高温であっても他の部分はそれより低い温度領域にある部材も多く、また、温度が変化する熱疲労の基礎的資料を与える点においても、塑性疲労強度の温度依存性に関する研究は、最近とくに重要視されている。

塑性疲労強度の温度依存性の研究はすでにかなり多くなされている。しかしながら、実験結果の整理を行なうにあたっては、Manson-Coffin の式の定数に温度

を含ませるもの¹⁾、塑性仕事によるもの²⁾³⁾、クリープにおける Larson-Miller 法の考えを適用したもの⁴⁾⁵⁾などがあるが、いまだ統一的に実験結果を整理し、したがって、ある温度範囲における実験からの他の温度の強度を推定する方法は確立されていない。

ところで、炭素鋼の場合、強度の温度依存性を考えるにあたっては、炭素、窒素およびそれらの化合物の拡散および析出、また青熱ぜい性などの影響などがあり、疲労の機構はかなり複雑である。

本研究では、0.16% C 炭素鋼の室温(R.T.), 150°C, 300°C, 450°Cの各温度における定ひずみ塑性疲労の実験を行ない、引張試験の結果と対応しながら種々の角度から結果を整理し、特に、塑性仕事による方法と修正 Larson-Miller 法に注目して検討した。

2 実験材料、試験片および実験装置

実験に用いた材料は0.16% C 炭素鋼であり、その化学成分および各温度における機械的性質を Table I(a) および(b)に示す。試験片は Fig. 1 に示すような寸法・

* 原稿受理 昭和45年11月16日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 正 会 員 川崎重工業株式会社 神戸市垂水区磯谷町松本

Table I. Chemical compositions and mechanical properties of material tested.

(a) Chemical compositions (%)							
C	Si	Mn	P	S	Cu	N	G
0.16	0.19	0.43	0.013	0.029	0.08	0.02	0.04

(b) Mechanical properties					
Temperature (°C)	Lower yield point (kg/mm ²)	0.2% proof stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Area contraction (%)
R. T	26.0	—	41.0	39	44
150	20.4	—	36.0	33	44
300	13.3	—	37.8	30	42
450	—	12.3	26.1	42	57

Fig. 1. Test specimen.

形状であり、標点距離 20 mm の間に直径 6 mm、長さ 12 mm の平行部分を有する。試験片は旋削加工後 #03 紙やすりで仕上げ、900°C×1 hr の真空焼なましを施した。

本試験片ではカラー部分にひずみのとり出し棒をとりつけ変位を測定するが、この間の断面積が一定でないため、肩の部分のひずみは付録に述べる方法で推定し、カラー間の実測変位からこれを差し引いて真のひずみを計算によって求めた。このようにして求めたひずみ範囲は、室温の場合について試験片の直径変化から求められるひずみと良く一致するから（付録参照）、他の温度についてもこの方法で真のひずみを推定した。

実験装置は、回転する偏心円板とレバーで両振りの引張圧縮のひずみを試験片に加える形式のもので、繰返し速度は 2 cpm である。ひずみは上述の試験片のカラー部分にとりつけたひずみとり出し棒に差動変圧器をセットし、応力は試験片と直列においたロードセルによって検出した。

3 実験結果および考察

3.1 応力範囲の繰返し数にともなう変化

各温度における応力範囲の繰返し数にともなう変化の様子を示したものが Fig. 2 である。図よりわかるように破損繰返し数 N が 5×10^3 近傍における応力範囲の挙動は、R. T., 150°C, 450°C の場合は初期の急激な増加の後はほぼ一定の値を保つものに対して、300°C では破断直前まで増加の傾向をもつ。

また、Fig. 3 は $\Delta\epsilon = 1\%$ の場合の応力範囲の変化の様子を繰返し数をパラメータにとって各温度に対して示したものである。これからわかるように、 $\Delta\epsilon = 1\%$

Fig. 2. Variation of stress range during constant strain range

Fig. 3. Temperature dependence of stress range.

における応力範囲の温度に対する関係は、温度が高くなるにつれて応力範囲は小さくなっており、この傾向は降伏応力ないしは 0.2% 耐力の温度依存性と類似している。しかし、繰返し数の増加にともなう、とりわけ 300°C において応力範囲は著しく増大する。同様の傾向は、他のひずみ範囲についても言うことができる。また、破断直前における応力範囲の温度に対する関係は、静引張試験における破断強度の挙動に似ており、静引張りの場合と同様、塑性疲労においても 300°C 付近において青熱ぜい性効果が認められる。

3.2 応力範囲と破損繰返し数の関係

Fig. 2 よりわかるように、本実験においてはひずみ範囲を一定に保っても、繰返し数とともに応力範囲は変化する。したがってここでは、破断寿命の半分の繰返しにおける応力範囲 $\Delta\sigma_{N/2}$ を考えると、これは寿命の大部分を占め全体の平均とみなすことができるので、この $\Delta\sigma_{N/2}$ をもってこの条件における応力範囲とした。

Fig. 4 はこの応力範囲 $\Delta\sigma_{N/2}$ と破損繰返し数 N の関係を示すものである。図より、応力範囲と破損繰返し数 N の関係は両対数グラフ上で直線を示し、 N が大きいときの強度は 300°C, R. T., 150°C, 450°C の順になるが、 N が小さい範囲では 300°C の場合より R. T. の方が寿命が大きくなる。

Fig. 4 Relation between stress range and number of cycles to failure

Fig. 5. Temperature dependence of half value of stress range and tensile strength.

種々の破損繰返し数を示す応力範囲の半分すなわち $\frac{1}{2} \cdot \Delta\sigma_{N/2}$ に対する温度の関係を Fig. 4 から求めたのが Fig. 5 である。図には同時に静引張試験における引張強度 σ_B を破線で示してある。応力範囲は 150°C 付近で一度小さくなり 300°C 前後で極大を示した後減少しているが、この傾向は破線の引張強度の傾向と良く一致している。しかし、その増減の程度は破損繰返し数によって異なっており、寿命が長くなるにつれて 300°C における増加の程度は大きくなっている。すなわち、引張強度は R.T. において最大を示し、塑性疲労においても $N=3 \times 10^2$ では同様であるが、 $N=10^3$ 以上になると 300°C で最大の応力範囲をもつようになる。いいかえると、繰返し数が大きくなるほど、青熱ぜい性の効果が大きくなると言うことができる。

3.3 ひずみ範囲と破損繰返し数の関係

全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ と破損繰返し数 N の関係を Fig. 6 に示す。R.T. と 150°C の結果はほぼ一致しており、300°C においては同一のひずみ範囲に対して寿命は少し低下する。その低下の程度は全ひずみ範囲が小さい

Fig. 6. Relation between total strain range and number of cycles to failure.

Fig. 7. Temperature dependence of total strain range and fracture ductility.

ほど大きい。450°C では $\Delta\epsilon=3\sim4\%$ のときは 300°C とほぼ同じ寿命であるが、 $\Delta\epsilon$ が小さくなるにつれて寿命は大きくなり $\Delta\epsilon-N$ 線図の傾きは他の温度に比して大きい。

Fig. 6 より、種々の破損繰返し数を示す全ひずみ範囲と温度の関係を示したものが Fig. 7 である。図にはまた、次式で定義される静引張試験の破断延性 ϵ_f を破線で示してある。

$$\epsilon_f = l_n 1 / (1 - \psi), \quad (\psi: \text{絞り}) \quad (1)$$

$\Delta\epsilon \cdot N^\alpha = C$ の式が静引張試験も含めて成立し、 α の値が温度にあまり影響されないとすると、塑性疲労の結果を示す実線と静引張りの結果を示す破線の傾向は一致しなければならない。しかし、Fig. 7 からわかるように、両者の間にはかなり差異があり、したがっていずれの温度においても塑性疲労強度が静引張試験の結果から推定できるということはできない。同様のことは、次に示す Fig. 8 の塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ と破損繰

Fig. 8. Relation between plastic strain range and number of cycles to failure.

返し数 N の関係からも結論できる。

全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ と塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ の間には

$$\Delta\epsilon_p = \Delta\epsilon - \Delta\sigma/E \quad (2)$$

なる関係がある。この関係を用いて求めた塑性ひずみ範囲と破損繰返し数の関係を Fig. 8 に示す。ただし、 E の値としては 21 500 kg/mm² (R. T.), 20 800 kg/mm² (150°C), 19 700 kg/mm² (300°C), 18 500 kg/mm² (450°C) を用いた。Fig. 6 の全ひずみ範囲で整理した結果と大きな差異は見あたらな。

3・4 塑性仕事と破損繰返し数の関係

前述したように、応力範囲 $\Delta\sigma$ または全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ および塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ のみを考えても種々の温度における塑性疲労試験結果を統一的に整理することはできない。温度変化によって生ずる材質変化の効果は、一つには、同一の全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ にしたがって近似的に同一の塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ に対して表われてくる応力範囲の相違として表われる。したがって、それぞれを単独に考えていたのでは不充分であり、塑性ひずみ範囲と応力範囲を結びつけて考えることが必要であろう。たとえば、塑性仕事を用いれば材料の温度による変化の影響の一部も含めて考えることができると思われる。

実験によって求めたヒステリシスループの面積を測

Fig. 9. Relation between plastic work per one cycle and number of cycles to failure.

定して求めた破損繰返し数の $1/2$ における 1 サイクル当たりの塑性仕事 ΔW と破損繰返し数 N の関係を Fig. 9 に示す。この場合も、両対数グラフ上で直線関係があり、同一の ΔW に対して寿命は温度が高くなるにつれて低下している。

また、繰返し初期から破損にいたる全寿命の総塑性仕事 $\Sigma\Delta W$ と破損繰返し数 N の関係を Fig. 10 に示す。T. R., 150°C, 300°C の一部においては、白鳥らのように、 $\Sigma\Delta W$ と N の間に直接関係があるが、300°C のうちひずみ範囲の小さいところおよび 450°C では認められない。このように寿命すなわち時間の長いところおよび温度が高いときに直線関係が成立しなくなることは本実験のように空气中で長時間高温下におかれることによって著しくなる酸化の影響が重要になることを示しているように思われる。

Fig. 10. Relation between total plastic work and number of cycles to failure.

Fig. 9 の結果からわかるように ΔW と N の間には

$$\Delta W^{\beta(T)} N = D(T) \quad (3)$$

なる関係がある。ただし、 $\beta(T)$ および $D(T)$ は温度のみの関数である。したがって、温度 T を含めて考えた相当塑性仕事 ΔW^* なるものを考え、これを用いると (3) 式は温度に無関係に

$$\Delta W^* \beta_0 N = D_0 \quad (4)$$

なる形に表わされるものとする。(4) 式を満足する定数 β_0 , D_0 がわかるとたとえば室温における実験結果より他の温度の寿命が推定できることが考えられる。いま、Fig. 9 より考えて

$$\Delta W^* = \Delta W g(T) h(T) \quad (5)$$

とおく。(5) 式を (4) 式に代入して (3) 式を用いて N を消去することによって次式のようになる。

$$\begin{aligned} \{\beta(T) - \beta_0 g(T)\} \log \Delta W \\ = \log D(T) - \log D_0 - \log h(T) \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式は ΔW のいかににかかわらず成立しなければならないことから

$$\left. \begin{aligned} g(T) &= \beta(T)/\beta_0 \\ h(T) &= \{D_0/D(T)\}^{1/\beta_0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

が得られる。したがって、いま室温を基準温度とし

Fig. 11. Relation between equivalent plastic work per one cycle and number of cycles to failure.

Fig. 9 の室温の結果から β_0 , D_0 を求め, また, (7)式および Fig. 9 を用いて $g(T)$, $h(T)$ を求めると(5)式は

$$\Delta W^* = \{\Delta W(1 + 2.2 \times 10^{-3}T)\}^{(1-10^{-6}T^2)} \quad (8)$$

となる. ただし T は室温からの温度差である.

(8)式の ΔW^* によって実験結果を整理したものが Fig. 11 である. 実験結果のばらつきはいくらかあるが, すべての温度の実験結果が一本の直線であとめられる. すなわち, (8)式で与えられる相当塑性仕事を用いると各温度における寿命は室温における結果から推定できることがわかる.

3.5 修正 Larson-Miller 法による実験結果の整理

高温クリープの実験結果を整理するのにいわゆる Larson-Miller 法が用いられる. すなわち, 応力 σ , 温度 T , 時間を t とするとき縦軸に σ , 横軸に $P = T(\log t + C)$ をとると, 種々の温度におけるクリープデータが一本の曲線にまとめられる.

この考え方を高温塑性疲労に適用することを考える. すなわちクリープの応力 σ に対応するものは高温塑性疲労ではひずみ範囲 $\Delta \epsilon$, 時間 t に対応するものは破断繰返し数 N であるとする. 縦軸に $\Delta \epsilon$, 横軸に $P' = T(\log N + C')$ をとればよい. ここで, 定数 C' を求めるには, Fig. 12 に示すように, 温度 ($^{\circ}\text{K}$) の逆数を普通目盛りで横軸にとり破断繰返し数 N を対数で縦軸にとって, おおのこの $\Delta \epsilon$ が一定の点を結ぶ直線が $1/T$

Fig. 12. Procedure to determine the constant C' .

$=0$ と交わる点の $\log 1/N$ の値を C' とする. ただし, Fig. 12 から明らかのように, 室温における実験点はこの直線から著しくはなれているのでこれを除外して考えることにした. このようにして求めた C' の値は -2 であり, Krempf による値とはほぼ一致する.

すべての実験結果をこの修正 Larson-Miller 法によって整理したものが Fig. 13 である. 図からわかるように, 室温における結果を除くとほぼ $P' = T(\log N - 2)$ ですべての実験結果がよく整理できることがわかる. いいかえると, この方法を用いると, 青熱ぜい性温度の効果も含めて, 高温における塑性疲労強度は一段階の温度における実験を行なうことによってほぼ推定できるということが出来る.

Fig. 13. Experimental results represented by modified Larson-Miller parameter.

4 結 言

0.16% C 炭素鋼を用いて, 室温, 150°C, 300°C, 450°C の各温度における定ひずみ引張圧縮塑性疲労の実験を行ない次のような結論を得た.

(1) 定ひずみ塑性疲労において, 応力範囲は室温, 150°C, 450°C では繰返しの初期の急激な増加の後ほぼ一定の値を示すが, 青熱ぜい性温度近傍の 300°C では初期から破断直前まで増加しつづける.

(2) 全寿命の平均的な応力範囲で比較した場合, 長寿命の領域では 300°C が最も強く, この傾向は静引張試験の場合と類似している.

(3) 全ひずみ範囲および塑性ひずみ範囲で実験結果を整理すると, いずれの場合も温度とともに寿命は低下する. これは, 破断延性の傾向と特に高温において著しく異なる.

(4) 1 サイクル当たりの塑性仕事で比較すると, 温度とともに寿命は低下し, すべての温度の実験結果と統一的に整理することはできない. 同様のことは, 破損までの全塑性仕事についてもいうことができる.

$\{\Delta W(1 + 2.2 \times 10^{-3}T)\}^{(1-10^{-6}T^2)}$ なる相当塑性仕事を

考えると実験結果は一本の直線でまとめられる。

(5) クリープにおける Larson-Miller 法を適用して結果を整理した。すなわち、 $P' = T(\log N + C')$ で定義されるパラメータにおいて C' の値は -2 となり、これを用いると室温以外の高温における実験結果は良い一致を示し、一段階の温度における実験から他の温度の塑性疲労強度を推定することができる。この考え方は、すでにクリープで広く用いられていることもあり、また、実用上簡便であるので、かなり有益であると考えられる。

終わりに、本研究を行なうにあたり終始ご指導をいただいた京都大学工学部平 修二教授に心から感謝の意を表する。

(昭和45年8月25日 第10回高温強度シンポジウムにて講演)

付録：試験片平行部のひずみの求め方

本研究で用いた試験片では、標点距離の間の平行部の割合が少ないので、ひずみとしては標点間での変位から肩部の変位を引き、これを、これを平行部長さで除した値を用いた。

いま、標点間全体の変位を平行部長さで除した値をみかけの全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon'$ とする。室温における塑性疲労試験のみかけの全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon'$ と、寿命の半分の繰返し数における応力範囲 $\Delta \sigma_{N/2}$ の関係を Fig. A の白丸印で示し、これを図のように三本の直線で近似する。これらの折点の値などを $\Delta \sigma_y : \Delta \epsilon_y$, $\Delta \sigma_1 : \Delta \epsilon_1$ および $\Delta \sigma_2 : \Delta \epsilon_2$ とする。

Fig. A. Relation between stress range and total strain range at room temperature.

Fig. B. Dimension of test specimen.

試験片肩部の形状は Fig. B に示すとおりであり、平行部端から x なる距離の断面積は

$$A_x = \pi(r + R - \sqrt{R^2 - x^2})^2 \quad (a)$$

である。平行部の応力が $\Delta \sigma_0$ のとき x 点での応力範囲は次のようになる。

$$\Delta \sigma_x = \frac{\pi r^2}{A_x} \Delta \sigma_0 = \frac{r^2 \Delta \sigma_0}{(r + R - \sqrt{R^2 - x^2})^2} \quad (b)$$

$\Delta \sigma_x$ が $\Delta \sigma_y$ および $\Delta \sigma_1$ になる位置 x_y および x_1 はそれぞれ

$$x_y^2 = R^2 - (r + R - r\sqrt{\Delta \sigma_0 / \Delta \sigma_y})^2 \quad (c)$$

$$x_1^2 = R^2 - (r + R - r\sqrt{\Delta \sigma_0 / \Delta \sigma_1})^2 \quad (d)$$

で与えられる。

まず、肩部の変位をおおのの応力範囲の場合について求める。

(1) $\Delta \sigma_y \leq \Delta \sigma_0 \leq \Delta \sigma_1$ の場合

i) $x_y \leq x \leq R$ の変位

この部分の全ひずみ範囲は

$$\Delta \epsilon_x = \frac{\Delta \sigma_x}{E} = \frac{r^2 \Delta \sigma_0}{E} \frac{1}{(r + R - \sqrt{R^2 - x^2})^2} \quad (e)$$

であるから、変位は次のようになる。

$$\Delta u'_y = \int_{x_y}^R \Delta \epsilon_x dx \quad (f)$$

ii) $0 \leq x \leq x_y$ の変位

全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_x$ および変位 $\Delta u'_2$ はそれぞれ次式のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_x &= \frac{1}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_y} \{ (\Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_y) \Delta \sigma_x + (\Delta \epsilon_y \cdot \Delta \sigma_1 - \Delta \epsilon_1 \cdot \Delta \sigma_y) \} \\ &= r^2 \Delta \sigma_0 \frac{\Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_y}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_y} \frac{1}{(r + R - \sqrt{R^2 - x^2})^2} \\ &\quad + \frac{\Delta \epsilon_y \Delta \sigma_1 - \Delta \epsilon_1 \Delta \sigma_y}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_y} \end{aligned} \quad (g)$$

$$\Delta u'_1 = \int_0^{x_y} \Delta \epsilon_x dx \quad (h)$$

したがって、両方の肩部全体の変位は

$$\Delta u' = 2(\Delta u'_y + \Delta u'_1) \quad (i)$$

となる。

(2) $\Delta \sigma_1 \leq \Delta \sigma_0$ の場合

i) $x_y \leq x \leq R$ の変位

(1)の場合と同(f)式で与えられる。

ii) $x_1 \leq x \leq x_y$ の変位

全ひずみ範囲は(g)式と同じであり、変位は次のようになる。

$$\Delta u'_1 = \int_{x_1}^{x_y} \Delta \epsilon_x dx \quad (j)$$

iii) $0 \leq x \leq x_1$ の変位

この部分の全ひずみ範囲は

$$\Delta \epsilon_x = r^2 \Delta \sigma_0 \frac{\Delta \epsilon_2 - \Delta \epsilon_1}{\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_1} + \frac{\Delta \epsilon_1 \Delta \sigma_2 - \Delta \epsilon_2 \Delta \sigma_1}{\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_1} \quad (k)$$

であるから変位 $\Delta u'_2$ は次式で与えられる。

$$\Delta u_2' = \int_0^{x_1} \Delta \varepsilon_x dx \quad (1)$$

したがって、両方の肩部全体の変位は

$$\Delta u' = 2(\Delta u_2' + \Delta u_1' + \Delta u_2') \quad (m)$$

となる。

以上の(1)および(2)の場合における肩部の変位がそれぞれ(i)式および(ii)式で与えられると、ダイヤルゲージで測定される変位 Δu によって、平行部 (長さ l) の全ひずみ範囲は次のようになる。

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta u - \Delta u'}{l} \quad (n)$$

Fig. A の黒丸点は、このようにして求めた行平部の真のひずみ範囲と応力範囲の関係である。

参考文献

- 1) Udoguchi, T., and T. Wada, Proc. 1967 Semi-International Symposium, **1**, 109 (1968).
- 2) 山内英和, 山本 成, 材料, **13**, 152 (1964).
- 3) 安藤善司, 中野典彦, 加藤容三, 広瀬素尚, 材料, **15**, 499, (1966).
- 4) Coffin, L.F., Jr., Trans. AIME, **203**, 1960 (1964).
- 5) Krempl, E., Preprint Int. Conf. Thermal Stresses and Thermal Fatigue, No. 2 (1969).
- 6) Taira, S., T. Inoue, and T. Yosida, Proc. 12th Jap. Cong. Mat. Res., 50 (1969).
- 7) 白鳥英亮, 小幡谷洋一, 機械学会論文集, **32**, 886 (1966).