高温における低炭素鋼の引張圧縮疲労変形*

河 本 実** 田 中 道 七** 三 木 美 昌***

Axial Fatigue Creep Test of Low Carbon Steel at Elevated Temperatures

by

Minoru KAWAMOTO, Tsuneshichi TANAKA and

(Kyoto University)

Yoshimasa MIKI

(Yawata Iron & Steel Co., Ltd)

Previously, some of the present authors conducted experiments on the fatigue creep of various kinds of steel and brass under bending, torsional and axial stress at room temperature, and clarified various features of the fatigue creep of these materials.

This report is on our study concerning the fatigue creep of 0.21% C carbon steel at a temperature of 300°C and 500°C, for which a newly devised axial fatigue testing machine for high temperature tests was used.

Results obtained were as follows: At 300°C, a fatigue creep strain occurred to the specimen increases considerably at the early stages of fatigue, when it is subjected to a combined mean and alternating stress, and, in subsequent repetitions of stress cycles, a slight increase of strain can be observed. But the general feature of fatigue creep strain is similar to that of this material at a room temperature. Namely, the fatigue creep strain is larger than the static creep strain at the same temperature, if the comparison is made under the same maximum stress both in fatigue and static creep tests, and the fatigue creep limit takes substantially the same value of yield point in the static test at this temperature.

At 500°C, the general feature of fatigue creep strain essentially differs from that at 300°C and a room temperature. The fatigue creep strain at this temperature increases gradually with repetitions of stress cycles, and we can observe a remarkable increase of strain in the final stage of fatigue, except when the mean stress is very low. Besides, the fatigue creep strain is smaller than the static creep strain at the same temperature and under the same maximum stress, contrary to the above tendency noticed at 300°C and a room temperature. These phenomena seemed to be resulted from so-called time effect which is recognized at high temperature tests.

(Received Jul. 31, 1959)

1. 緒 言

一般に材料は、平均応力をともなう繰返応力を受けた場合、耐久限度以下の応力においても、いちじるしい永久変形を生ずる。したがって、材料がこの種の応力を受ける場合には、耐久限度のみならず、このような永久変形を生じない応力の範囲を明確にすることが当然必要である。

この点に関して、著者らの一人は、さきに数種類の鋼について、曲げおよびねじり繰返応力のもとで生ずる疲労変形に関する研究を行ない^{1,2)}、また、前報においては、0.21% C炭素鋼および6:4黄銅について、引

張圧縮応力のもとにおける疲労変形に関する研究を行った³⁾。

これらの研究の結果、常温においては、平均応力をともなう繰返応力を受けた場合に、材料に生ずる疲労変形は、最大応力で比較した場合、つねに静応力のもとにおける変形よりも大きく、また、静試験において、明瞭な降伏点を有する材料では、疲労による降伏限は、静応力のもとにおける降伏点と一致するが、これに対して、明瞭な降伏点を示さない材料では、一定の永久変形を生じる応力は、繰返応力を伴う場合は、静応力の場合に比べてかなり低下することを明らかにした。

さらに、高温において、材料がこの種の応力を受けた場合、どのような変形挙動を示すかを明らかにする

* 原稿受付 昭和34年7月31日

** 正員 京都大学工学部

*** 八幡製鉄株式会社八幡製鉄所

ために、著者らはさきに、新しい高温引張圧縮疲労試験機の試作を行なったが、その構造および特性については、すでに報告したとおりである。

本研究においては、うえの試験機を用いて、0.21% C炭素鋼の300°Cおよび500°Cの温度における高温引張圧縮疲労試験を実施し、応力振幅および平均応力を種々に変えた場合に、材料に生ずる疲労変形ならびに疲労強度に関する実験を行なった。また、高温においては、静応力のもとにおけるクリープが当然問題になるのであるが、うえの温度におけるクリープ試験も同時に行ない、こうして得られた結果およびさきに行なった常温における実験結果をあわせて考察を加えた。

2. 実験材料ならびに実験方法

実験に使用した0.21% C炭素鋼の化学成分を Table 1 に、熱処理および常温における機械的性質を Table 2 に示した。

Fig. 1 は試験片の形状および寸法であって、熱処理後機械仕上げした。

使用した高温引張圧縮疲労試験機および変形測定装置、試験片加熱用電気炉、温度測定装置などの構造ならびに特性の詳細については、すでに報告したのでここでは省略する。

試験温度は300°Cおよび500°Cの2種類とし、300°Cにおいては、応力振幅 σ_a をほぼ16kg/mm²および11kg/mm²として、平均応力 σ_m を種々に変えた場合、500°Cにおいては、応力振幅をほぼ15kg/mm²および11kg/mm²として平均応力を種々に変えた場合について、疲労試験を行なった。なお、その場合の応力繰返速度は、すべて800cpmとした。以上のほかに、さらに300°Cおよび500°Cの温度において、疲労試験に相当した時間内でのクリープ試験を行ない、これらのすべての実験に際して、試験中、試験片に生ずる伸びの測定を行なった。

なお、伸びの測定は、Fig. 1 に示した試験片の段つきの部分(直径8mmの部分)に金具を取りつけ、これ

Fig. 1 Test specimen

より引出し棒によって、試験片の伸びを電気炉の外に取り出して行なっているために、測定した伸びの値には、平行部分両端の丸味部分、および金具を取りつけた段つきの部分の伸びが含まれている。しかし、ここでは段つきの部分の伸びは無視し、丸味部分については、応力集中を無視して、弾性学的に、この部分を平行部分と同一の直径に置き変えた場合の長さを計算して、これを平行部分に加えたものをもって、有効標点間距離とし、伸びの測定値をこの距離で除して、ひずみ ϵ を求めた。また、この値より永久ひずみ ϵ_p を求めるには、ひずみ測定時の応力を、各温度における弾性係数で除した値を、うえの ϵ よりさし引いて求めた。

3. 実験結果ならびにその考察

(a) 永久ひずみ-繰返数線図(ϵ_p - N 線図)

0.21% C炭素鋼について、うえに述べたような方法を用いて、疲労試験およびクリープ試験を行ない、試験片に生ずる永久ひずみを測定した結果を、Fig. 4~6、およびFig. 7~9に示す。このうちFig. 4、Fig. 5およびFig. 7、Fig. 8は、それぞれ300°Cおよび500°Cの温度において、疲労試験を行なった場合に、生ずる永久ひずみの測定結果であり、Fig. 6およびFig. 9は、それぞれの温度において、応力振幅 $\sigma_a=0$ 、すなわち、静荷重として平均応力 σ_m のみを加えたクリープ試験に対する結果である。いずれも縦軸には、前節で述べたような方法を用いて求めた永久ひずみ ϵ_p を%でとり、横軸には、応力繰返数 N を対数目りとして示したもので、応力振幅 σ_a をほぼ一定とし、平均応力 σ_m を種々に変えた場合について図示してある。ただし、Fig. 6およびFig. 9のクリープ試験においては、横軸は一般に時間をとって示すべきであるが、ここでは疲労試験の結果との比較を容易にするため、繰返速度800cpmとして換算した、相当繰返数 N を横軸にとっている。

Fig. 2 および Fig. 3 はうえの実験結果と比較するために、さきに報告した、常温における実験結果の中

Table 1 Chemical composition of material

Material	Symbol	Chemical composition (%)				
		C	Si	Mn	P	S
Mild steel	ヒ 2796	0.21	0.25	0.58	0.030	0.042

Table 2 Heat treatment and mechanical properties of material

Material	Symbol	Heat treatment	Upper yield point σ_{30} (kg/mm ²)	Lower yield point σ_{30} (kg/mm ²)	Ultimate strength σ_B (kg/mm ²)	Breaking strength on final area σ_T (kg/mm ²)	Elongation ϕ (%)	Reduction of area ψ (%)
Mild steel	ヒ 2796	875°C 1hr anneal	33.4	28.7	51.1	87.1	38.4	54.0

Fig. 2 ε_p - N diagram at room temperature Fig. 3 ε_p - N diagram at room temperature Fig. 4 ε_p - N diagram at 300°C ($\sigma_a \approx 16$ kg/mm²) Fig. 5 ε_p - N diagram at 300°C ($\sigma_a \approx 11$ kg/mm²) Fig. 6 ε_p - N diagram at 300°C ($\sigma_a = 0$) Fig. 7 ε_p - N diagram at 500°C ($\sigma_a \approx 15$ kg/mm²) Fig. 8 ε_p - N diagram at 500°C ($\sigma_a \approx 11$ kg/mm²) Fig. 9 ε_p - N diagram at 500°C ($\sigma_a = 0$)

Table 3 Mechanical properties of material used for test at room temperature

Upper yield point σ_{su} (kg/mm ²)	Lower yield point σ_{sl} (kg/mm ²)	Ultimate strength σ_B (kg/mm ²)	Breaking strength on final area σ_T (kg/mm ²)	Elongation ψ (%)	Reduction of area ψ (%)
28.7	26.8	52.1	87.9	28.9	55.0

から、応力振幅をそれぞれ、15 kg/mm² および 10 kg/mm² として、平均応力を種々に変えた場合の実験結果を示したもので、縦軸には、やはり永久ひずみ ϵ_p を%でとり、横軸に繰返数 N を対数目もりでとって示したものである。ただし、この常温における試験は Haigh 式引張圧縮疲労試験機を用いて行なったもので、その際の応力繰返速度は約 1800 cpm であった。また、常温において用いた材料の化学成分および熱処理は本実験におけると同一であるが、機械的性質は少しく異なるので、それを Table 3 に示してある。

以上の実験結果を比較してみると、まず常温においては、Fig. 2 および Fig. 3 にみるように、試験片に生ずる永久ひずみ ϵ_p は、繰返数のごく初期に起り、繰返数 N でほぼ 10^4 以後はほとんど変化せず、ただ応力の高い場合にのみ、ごくわずかの増加がみられる。

つぎに、300°C の温度においては、Fig. 4 および Fig. 5 をみると、応力振幅を、常温におけるとほぼ同じ、16 kg/mm² および 11 kg/mm² として平均応力を種々に変えた場合に、生ずる永久ひずみ ϵ_p は、やはり繰返数の初期にいちじるしく起るが、それ以後の繰返数においても、ゆるやかではあるが、しだいに増加しており、この点常温の場合と若干異なる傾向がみられる。また、同じ 300°C において、平均応力 σ_m のみを加えたクリープ試験の結果 Fig. 6 をみると、やはり初期にかなりの永久ひずみを生じているが、その後の増加は、同温度の疲労試験における、永久ひずみの増加に比べればわずかである。

500°C の温度においては、Fig. 7 および Fig. 8 からわかるように、永久ひずみ ϵ_p の繰返数 N に対する増加は、常温および 300°C における場合とまったく傾向を異にし、平均応力のごく小さい場合を除いて、ひずみは繰返数とともに、しだいに増加し、破断前において急激な増加を示している。また、Fig. 9 の同温度におけるクリープ試験においても、ひずみの増加は疲労試験における場合とほぼ同様の傾向を示していることがわかる。

(b) 応力-永久ひずみ線図 ($\sigma_{\max}-\epsilon_p$ 線図)

以上の実験結果から、それぞれの温度における静試験、クリープ試験および疲労試験において、試験片に生ずる永久ひずみと、その際の応力との関係を明らかにするために、縦軸に、これら 3 種の試験において、

試験片に加えた最大応力 $\sigma_{\max}$ をとり、横軸に永久ひずみ ϵ_p をとって図示すると、Fig. 10, Fig. 11 および Fig. 12 (a)(b)(c) のようになる。このうち、Fig. 10 および Fig. 11 はそれぞれ常温および 300°C の温度に対するもので、前項に述べたように、常温においては、繰返数 N がほぼ 10^4 以後は、ほとんどひずみの増加がみられないこと、および 300°C においては、このような繰返数に対しても、若干ひずみの増加がみられるのであるが、その程度はわずかであることを考慮して、いずれも繰返数 $N=10^6$ における永久ひずみ ϵ_p を横軸にとったものである。Fig. 12 (a)(b) および (c) は 500°C の場合で、この温度においては、上述のように、平均応力の小さい場合を除けば、永久ひずみは繰返数とともにいちじるしく増加するために、繰

Fig. 10 $\sigma_{\max}-\epsilon_p$ diagram at room temperature Fig. 11 $\sigma_{\max}-\epsilon_p$ diagram at 300°C

Fig. 12 $\sigma_{\max}-\varepsilon_p$ diagram at 500°C

返数 $N=3 \times 10^4$, 2×10^5 および 10^6 における永久ひずみ ε_p をそれぞれ横軸にとり, $\sigma_{\max}-\varepsilon_p$ 線図が繰返数とともに変化するようすを明らかにしたものである。

これらの図をみると, まず常温においては, 最大応力で比較した場合, 疲労試験の際に生ずる永久ひずみは, 静試験において生ずる永久ひずみよりも大きく, またこのように, 静試験において明瞭な降伏点を有する材料に対しては, 疲労による降伏限は, 静試験の場合に得られる降伏点と一致すること, および応力振幅が小さくなるに従って, 疲労試験の際の $\sigma_{\max}-\varepsilon_p$ 線図が, 静試験におけるそれに近づく傾向があることなどがわかる。

つぎに 300°C の温度においては, うえと同様, 最大応力で比較した場合, Fig. 11 より明らかなように, 疲労試験の際に生ずる永久ひずみは, 静応力のみを加えた, クリープ試験において生ずる永久ひずみよりも, つねに大きいことがわかる。また, 同図中に示した短時間の静引張試験結果は, 明瞭な降伏点を示しているが, いっぽう疲労試験において得られる降伏限も, この静試験の際における降伏点と一致することがわかる。なお, Fig. 11 では応力振幅 σ_a をほぼ 16 kg/mm² および 11 kg/mm² とした場合に生ずる永久ひずみは, 常温におけるように, 応力振幅の差によって明らかな相違を示していないために同一の曲線で表わしてある。

500°C の温度においては, さきにも述べたように, 試験片に生ずる永久ひずみは, 応力の繰返数とともにいちじるしく増加する。Fig. 12 (a) (b) および (c) はこの間の $\sigma_{\max}-\varepsilon_p$ 線図の変化のもようを示したもので, 応力の低い場合を除けば, 静応力のみを与えたクリープ試験においても, また, 繰返応力をともなう疲労試験においても, 永久ひずみは繰返数とともにいちじるしい増加を示している。また, この温度においては, 常温および 300°C の場合と異なり, 最大応力で比較した場合, 疲労試験の場合に生ずる永久ひずみは,

静応力のみを加えたクリープ試験において生ずる永久ひずみよりも, つねに小さいことがわかる。なお, これらの図においても, 300°C におけると同様, 応力振幅をほぼ 15 kg/mm² および 11 kg/mm² とした場合の永久ひずみには, いちじるしい差が認められないために一つの曲線で表わしてある。また, 図中には同温度における短時間の引張試験結果も参考のためにあわせ示した。

以上の結果より, 300°C において, 材料が平均応力ならびに繰返応力を受けた場合に生ずる永久ひずみの諸特性は, ほぼ常温の場合と同様の傾向を有していることがわかる。しかし定量的に比較するならば, 300°C における疲労降伏限は, 常温における疲労降伏限よりも多少低下するにもかかわらず, ひずみの大きい範囲では, 一定の永久ひずみを生ずる応力は, 300°C の温度におけるほうが, 常温におけるよりも逆に高くなっており, この間の関係は, それぞれの温度における静試験結果の示す傾向と一致している。

ところが, 500°C の温度においては, 変形の諸特性はうえにも述べたように, 常温および 300°C の温度においてみられる特性と, まったく傾向を異にしており, とくに, 繰返応力を伴う場合に生ずる永久ひずみが, 静応力のみを加えたクリープ試験の際に生ずる永久ひずみに比べて小さいことは, この温度において試験片に生ずるひずみが, 応力の作用する時間に関係し, したがって, 最大応力で比較すれば, 疲労試験におけるほうが, クリープ試験の場合に比べて, 高い応力の作用している時間が短いために, 当然, 生ずる永久ひずみも小さくなるものと考えられる。

(c) 一定の永久ひずみを生ずる応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の関係 ($\sigma_a-\sigma_m$ 線図)

Fig. 13~15 は Fig. 10~12 をもとにして, 縦軸に応力振幅 σ_a , 横軸に平均応力 σ_m をとり, それぞれの温度において, 一定の永久ひずみを生ずる σ_a および σ_m の値を図示したもので, Fig. 13 および Fig. 14 においては, それぞれ常温および 300°C の場合について, Fig. 10 および Fig. 11 におけると同様, 繰返数 $N=10^6$ において, 試験片に生ずる永久ひずみを取り, それぞれ $\varepsilon_p=0.5\%$, 2% および 3% を生ずる応力の値を示してある。また, Fig. 15 の 500°C の場合については, 一定の永久ひずみ $\varepsilon_p=2\%$ および 5% を生ずる応力振幅 σ_a および平均応力 σ_m を Fig. 12 における

Fig. 13 σ_a - σ_m diagram for $\varepsilon_p = \text{const.}$ at room temperature

Fig. 14 σ_a - σ_m diagram for $\varepsilon_p = \text{const.}$ at 300°C

Fig. 15 σ_a - σ_m diagram for $\varepsilon_p = \text{const.}$ and fracture at 500°C

と同様、3種類の応力繰返数について図示したものである。なお、Fig. 14 および Fig. 15 における横軸上の各点は、300°C および 500°C の温度において、応力振幅 $\sigma_a = 0$ 、すなわちクリープ試験の結果より、一定の永久ひずみを生ずる応力の値を図示したものであり、また、Fig. 13 の常温の場合においては、クリープ試験を行っていないために、静試験の結果をもとにして、所定の永久ひずみを生ずる応力の値を図示してある。また、同図中には、常温において得られた耐久限度線もあわせ示した。

これらの図より、常温および 300°C においては、一定の永久ひずみ ε_p に対する σ_a - σ_m 曲線は、永久ひずみの値が増すにつれて、しだいに、横軸上の点をとる 45° の直線よりも、原点の側にかたよってきており、

このことは前項にも述べたように、疲労試験の際に生ずる永久ひずみは、静応力のみの場合に生ずる永久ひずみよりも大きいことを示しており、また、このかたよりが、常温に比べて、300°C の場合には比較的小さいのは、Fig. 10 および Fig. 11 を比較した場合、Fig. 11 の 300°C の場合のほうが、常温に比べて、疲労試験の際の $\sigma_{\max}$ - ε_p 線図が、クリープ試験ないしは静試験の σ - ε_p 際の線図に近いことを示すものである。

つぎに Fig. 15 の 500°C の場合には、うえと異なっており、一定の永久ひずみを与える σ_a - σ_m 曲線はいずれの場合においても、相対する横軸上の点をとる 45° の直線よりも、明らかに右側をとっていることがわかる。このことは繰り返し述べたように、疲労試験の際に生ずる永久ひずみが、静応力のもとで生ずる永久ひずみよりも逆に少ないことを示すものである。なお、図中の黒丸および破線は、参考のために、応力繰返数 $N=10^6$ で破断する場合の応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m の値を図示したものである。

4. 結 言

0.21%炭素鋼を用いて、300°C および 500°C の温度で、引張圧縮疲労試験およびクリープ試験を行ない、試験片に生ずる永久ひずみを測定して、さきに求めた常温における実験結果も含めて考察した結果、つぎのことが明らかとなった。

300°C の温度においては、材料が繰返応力ならびに平均応力を受ける場合に、発生する永久ひずみは、応力繰返数の初期に急激に起るが、その後の繰返数においてもゆるやかな増加がみられる。しかしながら、このような応力のもとで生ずる永久ひずみの諸特性は、ほぼ常温における場合と同様の傾向を示している。すなわち、疲労試験の際に生ずる永久ひずみは、最大応力で比較した場合、クリープ試験ないしは静試験の際に生ずる永久ひずみよりもつねに大きく、また、疲労降伏限は、静試験の際に得られる降伏点に一致する。

500°C の温度においては、常温および 300°C の場合と異なり、永久ひずみは応力繰返数とともにしだいに増加し、破断前にはいちじるしい増加を示す。また、疲労試験の場合に生ずる永久ひずみは、最大応力で比較した場合、静応力のみを与えたクリープ試験において生ずる永久ひずみよりもつねに小さく、この点においても、常温および 300°C の場合に比べてまったく異なる傾向を示している。

参 考 文 献

- 1) 河本実, 西岡邦雄, 材料試験, 3, 14, 260/265 (昭29.5)
- 2) 河本実, 伊藤尚, 岩村幸裕, 材料試験, 5, 31, 217/222 (昭31.4)
- 3) 河本実, 田中道七, 福井均, 材料試験, 8, 68, 410/414 (昭34.5)
- 4) 河本実, 田中道七, 三木美昌, 材料試験, 8, 68, 415/418 (昭34.5)