変動応力の繰返速度が動クリープ変形におよぼす影響*

平 修 二** 小寺沢良一** 斎 藤 誠**

Effect of the Frequency of Superposed Alternating Stress on Dynamic Creep

by

Shuji TAIRA, Ryoichi KOTERAZAWA and Makoto SAITO

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

In recent years, the problems of the dynamic creep have become of increased interest with the use of alloys at high temperature. With a view to predicting the dynamic creep from the static creep data, the analysis based upon the strain hardening theory, was reported in the previous papers by the authors. In the papers, it was found that the analysis could be applied to the materials of relatively stable structure, that is, carbon steels, some ferritic and austenitic steels and commercially pure titanium. In the case of super alloys of precipitation hardening type, however, considerable discrepancy was observed between the theory and the experiments, and this discrepancy seemed to result from the acceleration of precipitation hardening or the strain retardation due to alternating stress.

In the present paper, the dynamic creep tests to elucidate the effects of alternating stress frequency on the strain retardation have been carried out within the frequency range from 20 to 4 000 cpm.

In the experiments, for the higher frequency range from 800 to 4 000 cpm the alternating stress has been applied to a specimen by the centrifugal force of rotating eccentric mass as reported previously, and for the lower range of 20 and 80 cpm the alternating stress has been applied by an eccentric disc and lever mechanism. In both cases, the application of sinusoidally alternating stress has been accurately attained.

The tests have been carried out with a low carbon steel at the temperature of 450°C.

It is found from the test results that, taking the stress amplitude and the mean stress as the same, the creep curves for the various alternating frequencies coincided approximately with the creep curve under the corresponding equivalent static stress analytically obtained.

(Received Dec. 3, 1963)

1 緒 言

高温における金属材料の使用がますます増大し、クリープ強度が設計上重要な問題となって来た。しかるに、機械部品では静荷重の上に変動荷重が作用する場合が多く、このような観点から最近動クリープ変形および破断に関する研究が進められ、諸外国でも種々の実験研究¹⁾がなされて来た。筆者らも数年来、動クリープに関する実験並びに解析を行ない²⁾、低炭素鋼、工業用チタニウム等の材質的に安定な材料については、ひずみ硬化説に基づいて静クリープ試験結果から動クリープひずみを推定する方法を得ている。しかし、析出硬化型の耐熱合金については、静クリープ試験結果から求めた動クリープ変形の解析結果が、これらの材料の動クリープ試験結果に比べ著しく低い強度を与え

^{3) 4)}る。このように解析値と実験値との間に差が生じる原因について考えられることは、繰返応力による析出硬化等材質変化の促進が起こるためとする考えと、応力の変化速度が大きいため負荷された応力に相当するクリープひずみ速度が追従できず、現われるひずみ量が小さくなるとする考え方がある。本実験では、特に後者の応力変動速度が動クリープひずみにおよぼす影響を検討するため、従来用いて来た動クリープ試験機とこれを改造した低速動クリープ試験機を用い、繰返速度を20~4 000cpmの範囲で変えて応力繰返速度の異なった動クリープ試験を行ない、生ずるひずみについて比較検討を行なった。

2 試験材料および試験条件

供試材料は0.14%炭素鋼で、Table I, II にその化学成分、熱処理条件および常温における機械的性質を示す。試験片は Fig. 1 に示す形状の中実試験片である。

* 原稿受理 昭和38年12月3日

** 正員 京都大学工学部機械 京都市左京区吉田本町

Table I. Chemical composition and condition of heat treatment

Composition	C	Mn	Si	P	S	Cl ₁	Ni	Cl ₂	Al	Fe
(%)	0.14	0.46	0.25	0.013	0.017	0.13	0.02	0.06	0.015	Bal.

Heated after machining at 900°C for one hour in vacuum with subsequent cooling in furnace

Table II. Mechanical properties of test material at room temperature

Yield point (kg/mm ²)	24.6
Tensile strength (kg/mm ²)	39.8
Elongation (%)	35.3
Reduction of area (%)	71.6

Fig. 1. Test specimen

実験を行なった2種の応力条件は、平均応力 σ_m を両者とも 10kg/mm^2 とし、重畳する応力振幅 σ_a をそれぞれ 7.5kg/mm^2 および 5kg/mm^2 とした。繰返速度は上記応力条件にたいして、おのおの、20, 80, 800, 2000, 4000cpm の5段階について実験した。

3 実験装置

実験装置として、800~4000cpm の繰返速度の速い範囲にたいしては従来用いて来た回転偏心質量の慣性力を利用した高温引張圧縮動クリープ試験機（原理図 Fig. 2）を使用した。20, 80cpm の低繰返速度に

Fig. 2. Schematic diagram of dynamic creep testing machine

- Ⓐ Worm and worm gear
- Ⓑ Test specimen
- Ⓒ Coil spring to apply static load
- Ⓓ Coil spring to support lever weight
- Ⓔ Lever
- Ⓕ Coil spring
- Ⓖ Turn buckle
- Ⓗ Eccentric disc
- Ⓘ } Microswitch
- Ⓛ } Load cell

Fig. 3. Schematic diagram of low speed dynamic creep testing machine

対しては上記の試験機では所要の変動荷重が得られないため、Fig. 3 に示すような偏心円板とレバーを組み合わせた機構を用いた。

Fig. 3 において、平均応力は静荷重用バネ Ⓒ により、また、正弦波状変動応力は偏心円板 Ⓗ からバネ Ⓔ およびレバー Ⓔ (1:10) を介して試験片 Ⓑ に負荷される。荷重監視は水冷された荷重計 Ⓖ によって行なっているが、試験片を取り付けた状態で常温および 450°C に加熱した時の荷重計の検定結果は Fig. 4 に示すとおりで、両者とも良好な直線性を示している。また、応力波形について、高速試験機ではブラウン管オシロ

Fig. 4. Calibration diagram for static tensile load

で、低速試験機ではペン書きオシロでそれぞれ観測したが両者とも満足すべき正弦波形を示した。

試験機の機構上、試験片がクリープすると静荷重の減少が起こるが、これに対してはレバーの変位をマイクロスイッチ④で検出し、ウォーム歯車機構④を介して上部チャックを引き上げている。これによって生ずる荷重変動は2.5kg以下であり、本実験の応力条件では1%以内の誤差となり充分無視できる。

4 解 析

引張クリープ試験におけるひずみ ϵ と応力 σ 、時間 t の間には通常遷移クリープ領域において一般に次の式が成り立つ

$$\epsilon = a \sigma^\alpha t^n \quad (1)$$

ただし、 a , α , n は温度と材料による定数である。

この式に対応する固体状態力学方程式は次式で示される。

$$d\epsilon/dt = na^{1/n} \sigma^{\alpha/n} \epsilon^{-(1-n)/n} \quad (2)$$

一方、変動応力 $\sigma(t)$ は平均応力 σ_m 、応力振幅 σ_a 、変動の角速度を ω とすれば、

$$\sigma(t) = \sigma_m (1 + A \sin \omega t) \quad (3)$$

ただし、 $A = \sigma_a / \sigma_m$: 応力比で表わされる。そこで、(2)式をこの変動応力に対して積分してクリープひずみを求めると、

$$\epsilon = a \sigma_e^\alpha t^n \quad (4)$$

ただし

$$\sigma_e = \sigma_m \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 + A \sin \omega t)^{\alpha/n} d(\omega t) \right]^{n/\alpha}$$

となる。

(4)式が表わす意味は、(3)式で示される変動応力下のクリープひずみは、(4)式中の等価静応力 σ_e のもとにおける静クリープひずみと全く同一となることを示しており、かつその大きさは応力変動速度 ω には関係せず、応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m によって決まることを示している。

5 試 験 結 果

Fig. 5 は、450°Cにおける0.14%炭素鋼の静クリー

Fig. 5. Static creep curves

プ試験結果を示す。図中の一点鎖線は(1)式による近似曲線である。近似曲線と実験値とは時間の経過とともに特に高応力側においてその差が大きくなるが、これは(1)式が遷移クリープ領域のみを表わし、定常クリープの項を含んでいないためである。しかし筆者らはすでに、遷移クリープ領域における等価静応力と定常クリープ領域における等価静応力は一致することを報告している。従って Fig. 5 に示すように(1)式が遷移クリープ領域を正確に表わすならば、(1)式で求められた遷移クリープ領域における等価静応力は定常クリープ領域まで拡張できると考えられる。

Fig. 6 は、平均応力 σ_m および応力振幅 σ_a を一

Fig. 6. Dynamic creep curves

定にして、変動応力の繰返速度を 20~4 000cpm の範囲で変えて行なった 2 種類の動クリープ試験結果を、ひずみ—時間線図で表わしたものである。ここで平均応力はともに $\sigma_m = 10 \text{ kg/mm}^2$ で応力振幅 σ_a は 7.5 kg/mm² および 5.0 kg/mm² である。これらの応力条件に対して(4)式から求められる等価静応力はそれぞれ $\sigma_e = 15.5 \text{ kg/mm}^2$ および 13.3 kg/mm² である。図中の一点鎖線は、遷移クリープ領域で決定した上記の等価静応力のもとにおけるクリープ曲線であるが、これは Fig. 5 の静クリープ試験結果から内挿して求めたもので定常クリープ領域をも含んでいる。Fig. 6 に示されるように、応力比 $A = 0.75$ および 0.5 の 2 種類の応力条件に対して生ずる動クリープひずみは、応力繰返速度が 20~4 000cpm の範囲で変化してもほとんど解析ひずみと一致しており、応力繰返速度の動クリープ変形におよぼす影響は認められない。ただ、わずかながら動クリープひずみは等価静応力下の静クリープひずみに比べて、短時間範囲では大きく長時間側では逆に小さくなる傾向がある。また、この傾向は繰返速度が速いものほど幾分促進されている。繰返速度の速いほど初期のひずみが大きく現われるのは、内部摩擦熱によって試験片の温度上昇が起こるためと考えられるが、試験片に密着させたアルメル—クロメル熱電対

では検出できなかった。

Fig. 7, 8 は、それぞれ応力比 $A=0.75$ および 0.5

Fig. 7. Relation between strain and cycles

Fig. 8. Relation between strain and cycles

の動クリープ試験結果をひずみ—繰返数で表わした図であるが、同一ひずみを生ずるまでの繰返数には明らかに速度依存性があり、繰返速度が低い程同一ひずみ量に達するまでの繰返数が少ない。これと類似の現象は高温引張圧縮疲労試験においても報告されている。たとえば、Forrest & Tapsell が行なった 0.17 炭素鋼の 450°C の引張圧縮疲労試験の結果では、繰返速度 125, 2000cpm の 2 種類の実験結果を、応力—破断繰返数 ($S-N$ 線図) で整理した場合、125cpm の低繰返速度の方が 2000cpm の場合に比して、同一応力振幅下では破断までの繰返数が少ない。これに対して、同じ実験値を応力振幅—破断時間 ($S-T$ 線図) で整理すると、同一応力振幅下では両者ともほぼ同一時間で破断している。従って、 $S-N$ 線図で整理した場合には実験結果は繰返速度に応じて 2 本の直線にわかれるが、 $S-T$ 線図表示では一本の直線上に乗る。

以上のように、高温における動クリープ変形並びに

疲労破断は、繰返数で整理すれば繰返速度の影響を受け、試験時間を基準にとれば繰返速度に依存せずほぼ同一直線上に乗る。従って、これらの変形あるいは損傷機構が速度依存性であることがわかる。

6 結 言

動クリープ変形におよぼす応力繰返速度の影響をみるため、0.14%炭素鋼について変動応力の繰返速度を 20~4000cpm の範囲で変えた場合の動クリープ試験を行ない、生ずる動クリープひずみについて検討した。

生じた動クリープひずみはひずみ—時間線図で表わすと、20~4000cpm の範囲では応力繰返速度には影響されず、静クリープ試験結果からひずみ硬化説に基づいて解析された値と良く一致した。従って、階段状応力変動のようにきわめて応力変動速度がおそく、このためひずみ回復や応力再負荷時の遷移状態が問題となるような場合を除けば、相当広い範囲の繰返速度に対して従来の解析方法が有効であると言える。

(昭和38年10月8日、当学会第6回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば、Hempel u. Tillmans, Mitt. KWI Eisenforschung. Bd., **18**, S. 163 (1936).
B.J. Lazan., Proc. ASTM., **49**, 757 (1949).
- 2) 平修二, 田中吉之助, 小寺沢良一, 藤田, 機械学会論文集, **25**, 151, 163 (1959).
- 3) B.J. Lazan., and Westberg, Proc. ASTM., **52**, 837 (1952).
- 4) 平修二, 小寺沢良一, 材料試験, **10**, 9 (1960).
- 5) Manjoine, M.J., Proc. ASTM., **49**, 757, (1949).
Vitovec, F.H., Proc. ASTM., **157**, 977 (1960).
- 6) Lazan, B.J., Proc. ASTM., **49**, 757 (1949).
Vitovec, F.H., Trans. ASME., **82**, Ser. D. No. 2, 441 (1960).
- 7) 小寺沢良一, 材料試験, **8**, 219 (1959).
- 8) 平修二, 小寺沢良一, 小沢三敏, 鈴木俊夫, 機械学会論文集, **26**, 935 (1960).
- 9) Forrest P.G., and H.J. Tapsell, Proc. I.M.E., **168**, 667 (1957).
- 10) 大路清嗣, 材料試験, **8**, 209 (1959).