クリープにおける応力休止の影響について*

平 修 二** 鈴木 房 幸** 玉 田 公***

Creep Behaviors of 2¹/₄Cr-1Mo Steel under Cyclic Unloading and Reloading

by

Shuji TAIRA, Fusayuki SUZUKI and Isao TAMADA

(Faculty of Engineering Kyoto University) (Yawata Steel Tube Co.,)

Structural members which are subject to load at high temperature are, in general, not in a steady condition of applied stress and temperature. In this paper, as one of fundamental problems, the creep behavior under cyclic stress removal is discussed. If a specimen of metals is creeping under constant load, at high temperature and on the way, the load is removed, elastic strain and creep strain recovery which seems like elastic-after-effect occur. After the period of stress removal, when reloaded, creep recovery which is based on the recovery of work-hardening in each crystal, strain aging and precipitation in commercial materials, take place. When the cyclic stress removal is given creep curves, show the differences from steady load creep curve.

As the a result of this experiment, creep curves of stress removal are shown upper or lower than steady load creep curves, but the difference between lower creep curve of stress removal and steady load curve is very small. So in this experiment, by considering creep recovery only, creep curve of stress removal can be estimated well. But as for cases when stress cycle or period of stress removal is changed, this result has some questions. As test temperature is risen, creep recovery is much remarkable. If stress amplitude is synchronized with temperature cycle, the influence of creep recovery is much striking. Experimental results may be summarized up as follows:

- (1) Under a high stress and high temperature, creep recovery is much remarkable.
- (2) In the early stage of transient creep, creep recovery is much larger and thereafter gradually decreases. In the stage of steady creep, creep recovery reaches almost constant value.
- (3) Strain increment in cyclic stress removal test is affected not only by creep recovery but also by precipitation, aging and phase change. *etc.*
- (4) In this experiment, this strain increment is well expressed by the following equation:

$$\Delta\varepsilon = a \log (1 + Ct_r)$$

$\Delta\varepsilon$: strain increment, t_r : rest time

a, c : constant in constant strain, temperature and stress.

(Received Jan. 5, 1963)

1. 緒 言

高温高応力下で用いられる機械部品は必ずしも一定温度、一定荷重ではなく、変動温度変動応力下の材料の挙動を解明することが重要な課題となり、多くの人の関心を集めている。ここでは変動応力下の材料の挙動を解明する基礎的なデータとして、応力休止を与えた場合のクリープ特性について報告する。

一般に金属材料を一定温度、一定荷重でクリープさ

せ、途中荷重を除いて休止を与えた場合、応力を除いたときには弾性ひずみとともに弾性余効のような挙動を示す creep strain recovery の現象が現われる。休止後再負荷すると、休止期間中の加工硬化の回復による creep recovery の現象および休止期間中に起こった組織変化たとえば時効、析出等により、応力休止を与えた後のクリープ曲線は一定荷重クリープ曲線の上や下に現われる。このクリープにおける応力休止の影響に関しては今まで文献が少なく、それらにも確証的な見解にとぼしいと思われるので、今までの文献を参考にし、その上にたってなんらかの解決の糸口を見いだそ

* 原稿受付 昭和38年1月5日、当協会第5回高温強度シンポジウムにて講演(昭37.10)

** 正員 京都大学工学部

*** 正員 八幡鋼管研究部

うとした。ここでは $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼について 500°C および 550°C でクリープ試験を行ない、その途中応力休止を与えた場合の結果について報告する。

2. 試験材料および試験方法

用いた材料は $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼で化学成分は Table 1 のようである。熱処理は 900°C 1時間加熱後、 100°C/h の割合で 650°C まで徐冷し、その後炉冷した完全焼なましのものである。試験片は直径 5 mm、標点距離 80 mm で普通のレバー型クリープ試験機に 1/1000 mm ダイアルゲージを付けて伸び測定を行なった。この材料には Charge A と Charge B とがあり、Charge B のほうがいくぶんクリープ強度が高い。

この実験では割合応力の低い通常のクリープ変形の領域で、温度は 500°C 一定にして試験を行なった。そのため応力休止を与えたクリープ曲線が一定荷重静クリープ曲線に対し、充分測定しうるような増加ひずみを得るために、わりあい長時間の応力休止を与えた。もっと高応力で破断に至るような領域で行なえば、休止時間をもっと短くしても、大きな休止による増加ひずみが測定される。

3. 試験結果

Fig. 1 に概略を示すように、材料を一定温度、一定荷重である時間クリープさせた後、荷重を除くと弾性ひずみ分が収縮し同時に弾性余効的に現われる creep strain recovery 分が収縮する。この横軸を正味クリープ時間で表わし、縦軸は全ひずみから弾性ひずみと瞬間塑性ひずみを除いて、クリープひずみで表わしたものが Fig. 2 である。これは Charge A の材料につ

Table 1 Chemical composition of $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Charge A	0.10	0.17	0.52	0.012	0.011	2.29	0.97
Charge B	0.10	0.24	0.48	0.012	0.013	2.28	0.99

Fig. 1 Strain behavior with stress removal

いて温度 500°C 、応力 18, 22, 27 kg/mm²、負荷時間 48 時間、休止時間 48 時間程度で Cyclic な荷重-休止を与えたものである。この場合一定荷重静クリープ曲線に対し、休止を与えた場合のクリープ曲線は 18, 22 kg/mm² の場合はわずかに下にきており、27 kg/mm² の場合は上にきている。

この応力休止を与えたクリープ曲線に対応する同温度、同応力での一定荷重静クリープ曲線の推定は次のようにして行なった。2本の試験片を同温度、同応力でクリープ試験を行ない、そのクリープひずみとクリープ時間とを両対数で表わすと Fig. 3 に示すように途中折れてはいらぬが直線となり、かつ両者はほとんど平行的である。また、温度や荷重の掛けかたを注意深くやれば両者は非常に接近してくる。そこで応力休止を与えたクリープ曲線の休止を与える前の部分を同様にして両対数でプロットし、別に行なった同温度、同応力の一定荷重静クリープ曲線のひずみ-時間の両対数線図に平行になるよう延長して推定曲線とした。

従来、応力休止を与えたクリープ曲線は、一定荷重静クリープ曲線の上側にもみ現われるとされていたが、下側に現われる場合の例として Fig. 4 にボーイングの L.F. Lundberg 編集のデータ集にある Guarnieri¹⁾の結果を示す。これは低合金 Cr-Mo 鋼の

Fig. 2 Influence of cyclic stress removal on creep curves

Fig. 3 Relation between creep strain and time

AISI 4130 鋼に 1000°F で負荷時間 1 時間, 休止時間 1 時間の Cyclic な応力休止を与えたものである。応力の低いところでは一定荷重静クリープ曲線と Cyclic な応力休止を与えたクリープ曲線との相違はほとんどないが, 応力の高いところでは休止を与えたクリープ曲線が一定荷重静クリープ曲線のはるか下側に現われている。Fig. 5 は Charge B の材料について温度 500°C, 応力 20, 24, 28 kg/mm², 負荷時間 72 時間, 休止時間 143 時間の割合, 長時間のサイクルで試験した結果である。Fig. 5 のうち, 応力 34 kg/mm² のもの

Fig. 4 Influence of cyclic stress removal on creep curves

Fig. 5 Influence of cyclic stress removal on creep curves

Fig. 6 Influence of cyclic stress removal on creep curve

は 188 時間後 72 時間の休止を与えたものである。Fig. 6 は温度 500°C で, 負荷時間は任意で休止時間は 70 時間程度のサイクルを与えたものである。この場合, 休止を与えたクリープ曲線が一定荷重静クリープ曲線の上側へ現われる。クリープ時間が同じところで休止を与えると, 一定荷重静クリープ曲線と比べての増加ひずみ $\Delta \epsilon$ は応力が高いほど大となる。このように応力休止を与えたクリープ曲線が一定荷重静クリープ曲線の上側へくる原因は休止期間中にポリゴンゼーション等の機構によって加工硬化の回復が起こるためであるといわれている。一方, 下側へくることはその原因が今まで説明されていないが, 著者らは実用材料では温度応力の各条件によりクリープの休止期間中に起こる組織変化, たとえば鉄鋼材料では炭化物窒化物等の析出物の分布状態や形状の変化, 新たな析出物の析出, 時効等による影響であると考えている。これらは休止期間中に材料の軟化および硬化の両作用を及ぼすものである。クリープ過程中, 鉄鋼材料を電子顕微鏡で観察すると, これらの変化が認められるので, 休止期間中にもこれらの組織変化が多少様子をこにして起こっているものと考えられる。この考え方を基にして Fig. 7 に示した 24S アルミ合金に対する Guarnieri²⁾の結果に説明を試みる。①の曲線は 24S-T3 材を試験温度 149°C, 応力 47 000 psi で負荷時間 8 時間, 休止時間 8 時間の Cyclic な応力休止を与えたクリープ曲線と, 同じ荷重での一定荷重静クリープ曲線を示したものである, この材料は溶体化処理後, 軽度の加工硬化を与えたもので, クリープの途中, 応力休止を与えると休止期間中に微細な CuAl₂ やその中間相等の析出のため材料が硬化し, Steady load のクリープ曲線のはるか下側に Cyclic load のクリープ曲線が現われる。②の曲線は 24S-O 材を温度 232°C, 応力 9 000 psi で Cyclic な応力休止を与えたクリープ曲線と一定荷重静クリープ曲線である。この材料は 24S 材を完全焼

Fig. 7 Influence of cyclic stress removal on creep curves

なまし処理したもので CuAl_2 やその中間相等がほとんど完全析出の状態にあるため、休止期間中材料の硬化が起こらず、Creep recovery のみが起こるため上側にくるものと思われる。

Fig. 8 は Charge B について試験温度を上げて 500°C とし、応力 20 kg/mm^2 、負荷時間 71 時間、休止時間 143 時間の場合のクリープ曲線を示すが、温度が 500°C のときに比べて、一回のサイクルでの増加ひずみがはるかに大きくなっている。さらにこの場合、³⁾ 休止期間と変動温度の高温側と一致すると、平、大南の文献に示されているように一段と増加ひずみが大となる。Fig. 9 は温度 500°C 、応力 24 kg/mm^2 で 71 時

間クリープさせた後、おのおの 71, 143 時間休止させて再負荷した場合である。これから、休止期間の長いほうが増加ひずみ $\Delta\epsilon$ は大きいことがわかる。休止による増加ひずみ $\Delta\epsilon$ は Fig. 10 に示すように一回のサイクルにおいて再負荷後、休止を与えたクリープ曲線と一定荷重静クリープ曲線がほぼ平行になったところでの増加分である。ゆえに数回のサイクルを与えた場合にはこの $\Delta\epsilon$ の総和が一定荷重静クリープ曲線とのひずみの差異になる。Fig. 11 はこの $\Delta\epsilon$ の総和を各サイクル段階でクリープひずみに対して表わしたものである。Fig. 11 でははっきりしないが、あとに Fig. 14 に示すように、クリープの過程が進むにつれ、増加ひずみ量 $\Delta\epsilon$ の値は減少してくる。

Fig. 12 は温度 500°C で 48 時間クリープさせて荷重を除いたときに生ずる Creep strain recovery と時間の関係を各応力について表わしたものである。Creep strain recovery は応力が大きいほど大きく、かつある時間後ほぼ飽和するようである。Fig. 13 は応力に

Fig. 8 Influence of cyclic stress removal on creep curve

Fig. 9 Influence of rest time on creep curve

Fig. 10 Strain increment $\Delta\epsilon$ with stress removal

Fig. 11 Relation between total strain increment with stress removal and creep strain

Fig. 12 Relation between creep-strain-recovery and time after 48 hr creep

対して, この Creep strain recovery がほぼ飽和したと思われる値をとったもので, ほぼ直線的に応力とともに増加している. この Creep strain recovery は弾性ひずみや応力がある程度以上のところでは先述の増加ひずみに比べて小さく, かつ再負荷の場合にはその大部分が再びもとにもどると考えられるので, 一応休止を与えた場合のクリープ曲線に対する影響は無視してよいと考えられる.

4. 解 析^{4)~6)}

今までに発表された文献によれば, クリープの途中応力休止を与えた場合, 内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ が減少するため再負荷によるひずみ, ひずみ速度の増加が見られると考えている. ここで内部降伏応力とは熱動揺の助けなしにすべり始める限界すべり抵抗である. クリープ過程のこの内部降伏応力の減少については転位論的立場から簡単な模型が考えられ, これから応力休止の場合にあてはまる式を求めると一回の休止による増加ひずみ $\Delta\epsilon$ は

$$\Delta\epsilon = a \log_{10}(1 + ct_r) \quad (1)$$

となる. ここで a , c は温度, 応力一定で, かつあるクリープひずみのところでは一定である. t_r は休止時間である. 今までは $a > 0$, $c > 0$ で Creep recovery の現象のみを取り扱っていたが, この内部降伏応力を転位による加工硬化, 硬化の回復, および析出等の組織変化も含めた限界すべり抵抗と拡張解釈すると, この考え方は休止による増加ひずみ $\Delta\epsilon$ が負の値をとる場合にも適用できると思われ, 便宜的に(1)式を用いる場合には $a < 0$, $c > 0$ の値をとってもよいと思われる. この実験の場合には休止による減少ひずみ量が非常に小さいので, $1/1000 \text{ mm}^2$ ダイアルゲージの精度とも関連して計算は行なわなかった.

(1)式において a , c はともに温度, 応力, クリープの各段階(ひずみ量)によって変化する値であるが, 内部降伏応力が定常クリープ領域では一定であることから, また, この実験は温度, 応力一定でほとんど定常クリープに近いところや定常クリープ領域内で休止を

Fig. 13 Relation between max creep-strain-recovery and stress

行なっていることから a はひずみにより変化するとし, c は一定として取り扱った. そこで数回の負荷-休止のサイクルを与えた場合の各段階での休止による増加ひずみ $\Delta\epsilon$ を求め, 休止時間が同じであるので最初の a の値に対しその後の休止の段階での a の値との比 a_n/a_1 を求めて各クリープひずみについて表わしたものが Fig. 14 である. また, Fig. 9 のデータを用いて温度 500°C , 応力 24 kg/mm^2 , クリープひずみ $\epsilon = 1.7 \times 10^{-1} \%$ における a , c を求めるとおのおの $a = 3.90 \times 10^{-2} \%$, $c = 0.01 \text{ 1/h}$ となる. 同温度, 同応力で215時間クリープさせた後, 初めて休止を与えた場合の増加ひずみ $\Delta\epsilon$ をこの値と Fig. 14を用いて推定したものが Table 2 で実験値とよく合っている. 内部降伏応力は定常クリープ領域内では一定であるから, 休止時間が同じであれば休止による増加ひずみは一定であると考えられる. ゆえに定常クリープにおける休止による増加ひずみから, Cyclic な負荷-休止を多数行なった場合と一定荷重クリープ曲線との差, すなわち $\Sigma\Delta\epsilon$ は一応推定できるが, 遷移クリープの段階では, はるかに大きな増加ひずみが見いだされるから目安程度のものである.

5. 考 察

この応力休止の問題に対しては, さきにあげたボーイングのデータ集, Johnson, Lubahn 等の文献があるが統一の見解がない, また, 炭素鋼について種々の実験と解析を行なった文献には, 西原, 平, 田中, 大馬がある. 一般に応力休止を与えた場合のクリープ曲線は多くの因子, たとえば温度, 応力, 休止時間, サイクル, ひずみ量等に依存して変化する. 定性的には温度, 応力の高い領域で休止-負荷を行なった場合, 一定荷重クリープ曲線との差異が大きいようである.

Fig. 14 Relation between a_n/a_1 and creep strain

Table 2 Strain increment $\Delta\epsilon$ with stress removal after 215 hr creep test under 24 kg/mm^2 at 500°C

Rest time (hr)	Experimental value of $\Delta\epsilon$ (%)	Calculated value of $\Delta\epsilon$ (%)
71hr Rest	4.2×10^{-3}	4.74×10^{-3}
143hr Rest	8.00×10^{-3}	7.50×10^{-3}

この差異の原因は大別して次の三つのことが考えられる。

(1) 休止期間中にポリゴニゼーションその他転位の消滅機構により起こる加工硬化の回復。

(2) 実用材料ではほとんどが温度、応力の加わった状態では準安定組織であるので、このため起こる組織、変化、たとえば時効、析出物の再分布や形状変化等。

(3) 休止-負荷の際、転位の交差や不動転位の形成等による。

(1)は今まで応力休止を与えたクリープ曲線について提唱されていたところであるが、著者らは(2)の項も考慮に入れる必要を提唱し、また、これは応力休止を与えたクリープ曲線が一定荷重静クリープ曲線の下側にくる大きな原因であると考えている。また、この(2)はある場合には析出あるいは再分布の状態によって逆に休止を与えたクリープ曲線が一定荷重クリープ曲線の上側にくる原因となることもある。(3)については現段階では不明な点が多いので一応無視し、(1)(2)のかね合いにより応力休止を与えた場合のクリープ挙動が変化すると考えられる。

6. 結 言

(1) 応力が高いほどかつ温度が高いほど一定荷重静クリープ曲線に対し、応力休止を与えた場合のクリ

ープ曲線のひずみ増加は大となる。また、遷移クリープ内では時間の早いところで休止を与えたものほど一回の休止による増加ひずみは大きい。

(2) 温度、応力一定のクリープ試験において、休止時ひずみ一定のとき、休止の影響により増加したひずみ $\Delta \varepsilon$ と休止時間 t_r の間には次式があてはまる。

$$\Delta \varepsilon = a \log_{10}(1 + t_r) \quad a, c: \text{定数}$$

(3) Creep strain recovery はその量が小さく、かつ再負荷後大部分もとへもどると考えられるのでクリープ曲線への影響は無視してよい。

(4) 確証的ではないが本実験の結果やこれまでの文献から考えると割合温度の低いところで、応力を高くして、サイクル数を多くしかも1サイクル中での休止時間が短い場合は休止を与えたクリープ曲線が一定荷重静クリープ曲線の下側へ来やすいと思われるが、さらに研究の必要がある。

参 考 文 献

- 1) Guarnieri, W.A.D.C, Tech. Rep., 53-24 (1956)
- 2) Guarnieri, W.A.D.C, Tech. Rep., 53-54 (1954)
- 3) 平, 大南, 材料試験, 9, 77, 89 (1960)
- 4) 西原, 平, 田中, 大略, 日本機械学会論文集, 21-111, 791 (1955)
- 5) " " " " " 21-111, 796 (1955)
- 6) " " " " " 22-123, 832 (1956)
- 7) A.E. Johnson, J. and Proc. Inst. Mech. Eng., 145-5 (1941)
- 8) J.D. Lubahn, Trans. Ameri. Soci. Metals, 787, 45 (1953)

(147頁より)

金属板の圧縮ベアリングおよびせん断クリープ強度の決定 (Determination of Compressive, Bearing and Shear Creep of Sheet Metals) by J.R. Kattus and H.L. Lessley, Proc. ASTM, Vol. 61, pp. 920~930 (1961)

金属材料のクリープデータとして、引張クリープデータは非常に多いが、圧縮ベアリングおよびせん断クリープデータは非常に少ない。この報告は、この種のデータを得るための試験装置を製作し、チタン合金の板材について二、三の実験を試みた結果に関するものである。まず、圧縮試験は板状試験片を、座屈を防止するために、ニッケルのブロックではさんだ状態で圧縮荷重を加えて行っており、摩擦を除くために研磨の上、二硫化モリブデンで潤滑している。加熱はニッケルブロック中に、8個のカートリッジヒーターを

温度分布が一様になるように、適当に配置することによって行っている。ベアリング試験は、板状試験片に孔をあけ、ピンを差し込んでこれに引張荷重を加えることにより行ない、加熱には2枚の板状ヒーターを用いている。せん断試験はピン状試験片に対するDouble shear試験と、板状試験片に、引張方向にある距離だけずらせて切り込みを入れたものを、引張ることにより、せん断クリープを起こさせるsingle shear試験の二種を実施している。この場合の加熱には、通常のクリープ用電気炉を用いている。実験の結果は、デザインデータダイアグラムとして与えており、ばらつきも少なく、良好な結果であるとしている。この試験そのものについては、検討の余地が残されているようであるが、著者らはこれが刺激となって、この種の試験が盛になることを望んでいる。

(小寺沢良一)

(166頁へ)