るが、X線の強さは少々変動してもさしつかえない。

(3) 変動応力が作用する場合においては半価幅の値は応力変動点のごく近傍においても異常が現われるが(焼なまし材)、一般的傾向はだいたい一定の繰返し応力が作用する場合の変化に等しい。また破壊前の半価幅の値は負荷応力値、応力履歴に関係なく一定の繰返し応力が作用する場合の半価幅の値に等しい。

(4) 負荷応力が変動する場合においても b/B と $\log \Sigma(n/N)$ の関係は、一定の繰返し応力が作用する場合と同様単調に増加(焼なまし材)または減少する(加工材)1本の直線により近似される。したがってこの場合においても本法による疲れ程度の非破壊的予知が可能と考えられる。

終りに本研究に御協力いただいた現三菱電機会社研

究所員 松木健二君、ならびに当研究室 有間淳一君に厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) 平・本田, 機械学会論文集, **26**-167 (昭35-7), 926; **27**-179 (昭36-7), 1066.
- (2) 平・本田, *Trans. Japan Inst. Metals*, **1** (1960), 43; 日本金属学会誌, **24** (昭 35), 331.
- (3) W.A. Rachinger, *J. Sci. Instrum.*, **25** (1948), 257.
- (4) L.G. Finch, *Nature*, **163** (1946), 402.
- (5) H. Neerfeld, *Mitt-K-wilth-Inst. Eisenforsch.*, **27** (1944), 81.
- (6) F.W. Jones, *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A*, **166** (1938), 16.
- (7) C.G. Shull, *Phys. Rev.*, **76** (1946), 679.
- (8) A.H. Cottrell, *Dislocation and Plastic Flow in Crystals*, (1953), Oxford.
- (9) 日本金属学会金属結晶分科会編, 転位論の金属学への応用 (昭 32), 丸善.

539. 389. 3:669. 15'26'24-194

2¹/₄Cr-1Mo 鋼のリラクゼーションについて*

平 修 二**, 鈴木房幸***, 山口 勝****

Relaxation of 2¹/₄ Cr-1 Mo Steel

by Shuji TAIRA, Fusayuki SUZUKI, and Masaru YAMAGUCHI

Relaxation, step down and creep tests were made at a temperature of 500°C to obtain relaxation characteristics of Cr-Mo steel and to study its relationship to creep properties under constant load. The conclusion may be summarized as follows:

Log-log plot of stress vs. plastic strain rate of relaxation consists of two straight lines. It was proved in both relaxation and also step down tests. At a higher stress range the strain rate depends on the initial total strain, but at a lower stress range its dependency is small, so that it is almost definite irrespective of the total strain. It may be said that the observed strain rate in a higher stress range corresponds to the transient creep and that of a lower stress range, to the steady creep.

The correspondencies do not always exist because of creep recovery, which inevitably follows the stress decrease due to relaxation.

All the methods, which have been so far presented to extrapolate the residual stress of relaxation are not exactly correct due to the lack of consideration of relaxation characteristics. Using the method by the present author, which is based on the relation between stress and plastic strain rate, the residual stress can be correctly estimated.

1. 緒 言

金属材料の高温強度に関する研究は、基礎試験として一定応力下のクリープ試験が広く行なわれている

が、静的な構造部材では全ひずみが一定に保たれて、応力が時間の経過とともに漸減していく応力し緩現象(リラクゼーション)をあらわすことが多い。この現象は、高温におけるフランジの締付けボルトの締付力、焼ばめ部の締付圧力、あるいは内部応力の焼なましによる除去などにおいて見られるもので、高温強度設計に際しての重要問題の一つである。

* 昭和 36 年 3 月 17 日 関西支部第 36 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 36 年 7 月 29 日.

** 正員, 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町).

*** 正員, 京都大学大学院.

**** 准員, 川崎製鉄会社.

海外では、かなり古くから研究^{(1)~(5)}が行なわれているが、個々の材料のリラクゼーション性質に関心が注がれ、その一般的特性は明らかにされていない。わが国における研究はほとんど見あたらず、設計上も十分に考慮されているとはいえない。

筆者らは、この問題を解明するためにすでに低炭素鋼を用いて試験を行ってきた⁽⁶⁾。本論文においては、高温における実用材料を対象として、リラクゼーション特性およびクリープとの相関性を求めるとともに、近似試験法としてのステップダウン試験の実用性をも確かめるために、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼について行なったリラクゼーション試験結果につき報告する。

2. 実験装置および実験材料

本研究に用いたリラクゼーション試験機は一定引張荷重試験機を改造したもので、第1図に示すようにレバーの一端につる巻ばねを取付け、おもりとばね力により試験片に荷重を加える。リラクゼーション試験では試験中に全ひずみが一定に保たれるので、負荷応力のために増加する微小な塑性伸びを検出して、連続的に除荷せねばならない。実験に用いた試験機では、ひずみは2個の1/1000 mmのダイヤルゲージにより測定され、ばね力はジャッキを連続的に回転することにより低下させられる。試験中はダイヤルゲージを常に監視して、全ひずみを一定に保って、厳密なリラクゼーション試験を行なった。

リラクゼーションの簡易試験法であるステップダウン試験⁽¹⁾⁽⁶⁾にはクリープ試験機を用いた。試験片に一定応力をかけ、全ひずみが規定値になったら応力を減らす。この減少した応力でクリープ試験を行ない、再び全ひずみが定められた値に達したら応力を減らす。この操作を繰返して全ひずみ一定の条件を近似的に満たすものである。

第1図 リラクゼーション試験装置原理図

リラクゼーション試験において、わずかの温度変動が生じて、試験片と伸び引出棒の膨張係数の差などに起因して、弾性ひずみと同程度の大きさの見掛けのひずみが生じ測定結果に誤差が生ずる。そのため、リラクゼーション試験では、クリープ試験の場合よりも厳密に試験温度を一定にせねばならない。本研究では、電子管式温度調整装置を用いた。この調整装置では周期的なほぼ一定の温度変動($\pm 1^\circ\text{C}$)が生じ、そのため全ひずみも周期的に変動するので、最大の全ひずみを一定に保って実験を行なった。

実験に用いた材料は $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼(STB 42 D)で、その化学成分は第1表に示すものである。熱処理は機械加工前に 920°C に1時間加熱して 760°C まで徐冷した後、 720°C で1時間加熱の後空冷したものである。常温における機械的性質は第2表に示す。試験片は第2図に示すように直径10mm、標点距離100mmのものである。

3. 実験結果

3.1 一定応力クリープ試験結果 高温強度の基 第1表 化学成分%

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.13	0.57	0.30	0.013	0.021	0.12	0.10	2.41	1.05

第2表 常温機械的性質

降伏点 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸 び %	絞 り %	か た さ Hv
35.6	53.0	33.8	73.8	159~166

第2図 試験片

第3図 一定応力試験におけるクリープ曲線

礎試験としてクリープ試験が普及しており、一般に資料が容易に入手できること、およびクリープとリラクゼーションの間に密接な関連のあることが考えられる点から、まずクリープ試験を行なった。試験は温度 500°C、負荷応力 8~18 kg/mm² の範囲で行なった。クリープひずみを第3図に示す。図において 6×10³ 分近辺まで遷移クリープが生じ、それ以上の期間で定常クリープがあらわれている。クリープひずみはすでに報告⁽⁷⁾ されているように次式であらわすことができる。

$$\epsilon = \alpha \sigma^{\kappa} + \beta \sigma^m t^n + \beta' \sigma^{m'} t \quad \dots\dots (1)$$

ここで、第1項は瞬間ひずみ、第2項は遷移クリープひずみ、第3項は定常クリープひずみに対応する。 $\alpha, \beta, \beta', \kappa, m, m', n$ は定数である。

試験の短時間範囲では、定常クリープ項の大きさは遷移クリープ項に比較して非常に小さくなるので、これを無視することにより遷移クリープ項が求められる。定常クリープ速度 $\beta' \sigma^{m'}$ を正確に知るには、ひずみ速度より計算する方法などが提案されているが、ひずみから直接に次のようにして求めることができる。すなわち、時間に依存するひずみを ϵ_t とおくと

$$\epsilon_t = \beta \sigma^m t^n + \beta' \sigma^{m'} t \quad \dots\dots (2)$$

これより、次の関係が導ける。

$$\epsilon_t \cdot t^{-n} = \beta \sigma^m + \beta' \sigma^{m'} t^{1-n} \quad \dots\dots (3)$$

(3) 式は第4図に示すように ϵt^{-n} と t^{1-n} の間に直線関係のあることを示している。第4図は第3図の実験結果から計算したものである。かような直線関係のあることから、その直線のこう配より定常クリープ速度 $\beta' \sigma^{m'}$ の値が求められる。

以上のようにして、実験結果から (1) 式の各定数はそれぞれ次のように与えられる。

第4図

$$\left. \begin{array}{ll} \alpha = 1.95 \times 10^{-6} & \kappa = 3.01 \\ \beta = 2.36 \times 10^{-6} & \beta' = 1.29 \times 10^{-11} \\ m = 2.35 & m' = 4.61 \\ n = 0.320 & \end{array} \right\} \dots\dots (4)$$

ただし、ここにひずみ ϵ を%, 応力 σ を kg/mm², 時間 t を min としている。

一方、一定応力下のクリープ試験に基いて変動応力下のクリープ問題を解析する場合に、クリープひずみを次式の形にあらわすことが多い。

$$\epsilon = A \sigma^p t^q \quad \dots\dots (5)$$

(5) 式の関係を調べるために、クリープひずみを縦軸にとり時間を横軸にとって両対数目盛上にあらわしたのが第5図である。第5図で 6×10³ 分近辺の範囲まで直線関係がみられる。すなわち、遷移クリープ期間では瞬間ひずみを含めてクリープひずみは (5) 式の形にあらわしうる。(5) 式中の定数は、第5図の実験結果からそれぞれ次の値をとる。

$$\left. \begin{array}{l} A = 6.75 \times 10^{-6} \\ p = 2.41 \\ q = 0.252 \end{array} \right\} \dots\dots (6)$$

ただし、ひずみ ϵ を%, 応力 σ を kg/mm², 時間 t を min の単位としている。

3.2 リラクゼーション試験 および ステップダウン試験結果

一般にリラクゼーションでは、応力低下の大部分は試験開始後の短時間の間に生ずるが、その後も長期にわたり応力が低下し続ける。したがって、実用的には長時間リラクゼーションが問題となる。また、リラクゼーションと定常クリープとの相関性をも調べる意図のもとに、試験はおよそ 1000 時間まで行なった。

リラクゼーション性質が問題となる締付けボルト等では、初応力の大きさが引張強さよりはるかに低く押えられるために、全ひずみはおよそ 0.2% 以内に保たれる。したがって、リラクゼーション試験では、全ひ

第5図 一定応力試験におけるクリープひずみ-時間曲線

ずみを0.1, 0.12%の条件で試験を行ない, ステップダウン試験では全ひずみを0.10, 0.12, 0.15, 0.20%で試験した。試験温度はともに500°Cである。

(1) リラクゼーション試験 リラクゼーション試験結果を第6図に示す。図は縦軸にリラクゼーションの残留応力を, 横軸に時間の対数をとって示したものである。この図において残留応力と時間の関係は明らかに直線ではなく, 長時間後にも応力は減少し続ける。また, 全ひずみ, したがって初応力を高めれば当然残留応力は大きくなるが, 第6図にみられるように長時間の後には応力の差は著しく減少してくる。

リラクゼーションにおいて, ひずみの弾性成分を ϵ_e , 塑性成分を ϵ_p , 全ひずみを ϵ_0 , 弾性係数を E であらわすと次式の関係がある。

$$\epsilon_e + \epsilon_p = \epsilon_0 \dots\dots\dots(7)$$

ここで, $\epsilon_e = \sigma/E$ である。これから

$$\dot{\epsilon}_p = -\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \dots\dots\dots(8)$$

本研究における材料では, $E=1.81 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ である。なお, 以下において ϵ_p を単に ϵ とあらわすことにする。

全ひずみが与えられれば, 第6図に示すように任意の時刻の残留応力が一意的に定まる。よって, 図から任意の応力における応力低下率 $d\sigma/dt$ が計算される。一方, 応力低下率と塑性ひずみ速度の間には(8)式が成り立つので, 残留応力と塑性ひずみ速度の関係が求められる。第7図はかようにして求めたもので, 縦軸に応力を, 横軸に塑性ひずみ速度をとって両対数目盛で示したものである。この図において, 塑性ひずみ速度-応力曲線は二つの直線部分とその中間領域の三つに分れている。

(2) ステップダウン試験 ステップダウン試験はリラクゼーションの近似試験法ではあるが, 試験の性質上応力減少の幅を非常に細かくすれば応力は連続的に低下し, 残留応力と時間の関係は厳密なリラクゼーションに一致するものである。通常行なわれているステップダウン試験では, 応力減少の幅はかなり大きく, 応力-時間曲線は階段状になる。それぞれの応力段階の下では, 一定応力下のクリープ試験と全く同一である。ステップダウン試験における全ひずみと時間の関係の一例を示したのが第8図である。ここでは, 応力低下量を 1 kg/mm^2 にとってある。これらの実験結果から応力を縦軸にとり, その応力のもとで所

定の全ひずみに達した時間の対数を横軸にとって示したのが第9図である。図中には, 全ひずみ0.12%での厳密なリラクゼーション試験結果をも示している。かような方法によりステップダウン試験から求めた残留応力はリラクゼーション試験結果より幾分高めではあるが, ほぼ等しい結果を与えている。

従来報告されたステップダウン試験では, それぞれの応力段階における平均ひずみ速度を求め, そのひずみ速度-応力曲線がリラクゼーション試験結果によく

第6図 リラクゼーション試験における残留応力-時間曲線

第7図 リラクゼーションにおける塑性ひずみ速度-応力曲線

第8図 ステップダウン試験における全ひずみ-時間曲線

一致することが示されている⁽⁶⁾。この関係を示したのが第10図である。図はステップダウン試験の各段階での平均ひずみ速度を横軸にとり、対応する応力を縦軸にとり両対数目盛上に示している。リラクゼーション試験よりえられた第7図とよく一致し、二つの直線部分よりなっている。

以上の実験結果から、2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の 500°C におけるリラクゼーションの特徴は、塑性ひずみ速度-応力曲線が両対数目盛上で2本の直線になることである。すなわち、応力の高い試験初期にあらわれる直線部分と長時間後の低応力範囲でみられる直線部分である。以下において、前者を第1期リラクゼーション、後者を第2期リラクゼーションと呼ぶ。第1期リラクゼーションにおける塑性ひずみ速度は応力と全ひずみ量によって決まる。実験結果から次の関数であらわされる。

$$\dot{\epsilon} = 3.21 \times 10^{-52} \epsilon_0^{-10.6} \sigma^{29.6} \dots\dots\dots (9)$$

第2期リラクゼーションのひずみ速度は、全ひずみが大きくなると幾分低下するが、その影響は非常に小さい。

第9図 ステップダウン試験における残留応力-時間曲線

第10図 ステップダウン試験におけるひずみ速度-応力曲線

い。一方、ひずみ速度の応力依存性は全ひずみ量によって変らない。したがって、実験結果からひずみ速度はほぼ次式で示される。

$$\dot{\epsilon} = 2.2 \times 10^{-12} \sigma^{5.09} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、ここにひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を %/min, 全ひずみ ϵ_0 を %, 応力 σ を kg/mm² の単位にとっている。

リラクゼーションの塑性ひずみ速度の応力依存性が2期に分かれることは、本研究に用いた材料以外においても一般に成り立つ。ASTM の報告⁽⁵⁾にある実験例では、二、三の実験結果を除きひずみ速度が応力に対し両対数目盛上で一つの直線であらわされている。これは、長時間リラクゼーションを対象としたために、第2期リラクゼーションのみがあらわれたものと思われる。短時間リラクゼーションをも含めれば、第1期リラクゼーションもめいりょうにあらわれるはずである。事実、上記の報告中にある Cr-Mo-V 鋼に対する MIT の実験結果は短時間試験結果をも含めて整理したもので、ひずみ速度は明らかに第1期と第2期の過程に分かれている。

4. 考 察

4.1 リラクゼーションに及ぼす全ひずみの影響

リラクゼーションにおいて全ひずみの相違することから起るこの残留応力の差は、時間の経過するにつれてしだいに減少する。この関係を示したので第11図である。図は実験結果から求めたもので、全ひずみに弾性係数をかけて計算された初応力 σ_0 を横軸にとり、一定時間後の残留応力を縦軸にとって示したものである。ただし、3000時間後の残留応力の値は次節に述べる筆者らの式による外そう値である。この図から、短時間範囲では初応力の大きさは残留応力に大きい影響を与えるが、長時間リラクゼーションに対しては初応力の影響は小さいとみなしうる。その理由は次のように解釈できる。

第11図 リラクゼーションにおける残留応力 (温度 500°C)

すなわち、リラクゼーションも時間に依存する塑性ひずみが生ずる意味においてクリープと類似の現象である。したがって、その塑性ひずみの応力依存性は、一定応力下のクリープひずみの応力依存性と同様な傾向を示すものである。そのために、リラクゼーションで全ひずみを大きくすると初応力が高まり、大きな塑性ひずみが生じて応力低下が大となる。全ひずみが小さければ、生ずる塑性ひずみも減少し応力低下量は小さくなる。長時間後には加工硬化により塑性ひずみ速度が著しく低下するために、全ひずみの異なるために起る残留応力の差は減少してくる。この関係は初応力の範囲にも依存するものである。第11図における初応力は第12図に示すように弾性限よりもはるかに高くとられている。図は、実際に負荷される初応力を縦軸にとり、初ひずみを横軸にとって表わしたものである。リラクゼーションにおいて、全ひずみが小さくなると初応力は弾性応力に近づき、試験中に生ずる塑性ひずみは非常に小さくなり、第11図の初応力-残留応力曲線は $t=0$ の45度の傾斜の直線に接近する。すなわち、初応力の小さい範囲では、その残留応力に及ぼす影響は長時間にわたり持続されるものである。しかし、実用的にはおよそ0.1~0.2%の範囲の全ひずみが問題になるので、3000時間程度の長時間後には初応力の残留応力に対する影響は非常に小さいとみなせる。その外、クリープひずみは温度に敏感であるために上述の関係も温度の影響を著しくうけることは ASTM の報告⁽⁶⁾にも見られる。

4.2 長時間リラクゼーションの推定 厳密な長時間リラクゼーション試験を行なうためには精密な試験機を必要とし、経費と手数から大きな負担とな

る。したがって、短時間リラクゼーション試験結果、または他種の標準試験結果から長時間リラクゼーションを推定することが重要な課題となる。リラクゼーションの残留応力-時間曲線は第6図に示すように片対数目盛、あるいは両対数目盛で直線で表わされない。したがって、第6図を用いて短時間試験結果から直接、長時間後の値を推定するのは困難である。一方、塑性ひずみ速度と応力低下率の間には(8)式に示す関係が成り立つので、ひずみ速度が応力の関数として表わされれば残留応力-時間の関係が導ける。これに対し、Roberts⁽⁹⁾、Davis⁽³⁾らによるクリープ試験結果を用いる方法や、Robinson⁽¹¹⁾によるステップダウン試験結果を用いる方法などが提案されている。

まず、Robertsらの方法に従って以下にクリープ試験結果を直接適用してみる。すなわちリラクゼーションを応力の変動するクリープ問題の一つとみなし、応力履歴の影響をいちおう度外視すれば、厳密にはひずみ硬化理論(strain hardening theory)、あるいは近似法として時間硬化理論(time hardening theory)を適用しうる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。遷移クリープひずみは一般に(5)式の形にあらわされるので、ひずみ硬化理論によるひずみ速度は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon} = qA \frac{1}{q} \sigma^{\frac{p}{q}} \epsilon^{1-\frac{1}{q}} \dots\dots\dots (11)$$

同様に、時間硬化理論によれば

$$\dot{\epsilon} = qA\sigma^n t^{q-1} \dots\dots\dots (12)$$

となる。したがって、前者の理論によれば(8)式を $t=0$ で $\sigma_0 = E\epsilon_0$ の初期条件のもとで積分することにより次式がえられる。

$$t = -\frac{1}{q(EA)^{\frac{1}{q}}} \int_{\sigma_0}^{\sigma} \left[\frac{(\sigma_0 - \sigma)^{1-q}}{\sigma^p} \right]^{\frac{1}{q}} d\sigma \dots\dots\dots (13)$$

第12図

第13図 リラクゼーションの残留応力-時間曲線

一方、後者の理論によると、次の関係が求められる。

$$t^q = \frac{1}{EA(p-1)} \left[\frac{1}{\sigma^{p-1}} - \frac{1}{\sigma_0^{p-1}} \right] \dots \dots \dots (14)$$

全ひずみ $\epsilon_0 = 0.12\%$ の場合についての計算結果を第 13 図に示す。ここに定数 A , p , q は (6) 式に示す値を用いた。計算値は実験値より少し低い値を与えているが、ひずみ硬化理論によるもののほうが実験値に近い値を与え、長時間の後には応力が大きくなっている。これは、長時間の後には定常クリープに相当するひずみがでてきて、ひずみ硬化理論で予想するよりも大きい塑性ひずみが生ずるためである。

長時間に至れば、塑性ひずみの大部分は定常クリープが占めると考えられるので、この成分のみを考慮して計算すると次のようになる。すなわち、ひずみ速度は定常クリープ速度になり、次式で示される。

$$\dot{\epsilon} = \beta' \sigma^{m'} \dots \dots \dots (15)$$

これと (8) 式より次のようになる。

$$t = \frac{1}{E\beta'(m'-1)} \left[\frac{1}{\sigma^{m'-1}} - \frac{1}{\sigma_0^{m'-1}} \right] \dots \dots \dots (16)$$

$\epsilon_0 = 0.12\%$ に対する計算結果も第 13 図に示されている。ここに定数 β' , m' は (4) 式に示す値を用いた。長時間の後には実験値とよく一致した傾向を示すが、実験値より低めの値を与える。

上述のように、クリープ試験結果から直接、リラクゼーションの応力を計算しても Roberts, Davis らの論文に示されているほど、実験値と十分に一致しない。これは、次節に述べるように、応力の減少があるとクリープの回復を伴うためと考えられる。クリープ回復が生ずれば塑性ひずみは減少する。したがって、残留応力はクリープ回復を生じないときよりも高くなり、上述の計算結果と実験結果の相違を定性的に説明しうるものである。クリープ回復現象に関して精密な資料のえられていない現状では、リラクゼーションの残留応力を推定するのに、クリープ試験結果によるもの以外の方法が考慮されねばならない。

これに対して、Robinson⁽¹⁾⁽⁴⁾はステップダウン試験結果を用いている。すなわち、(16) 式の m' の代りにステップダウン試験におけるひずみ速度-応力線図の傾斜から求めた値を用い、 β' はクリープ試験結果を用いている。その計算結果は、厳密なリラクゼーション試験での非常に長時間後の残留応力の減少とよく一致した傾向を示しているが、実験値より低い値を与えている。実験結果と異なるのは、第一に実験結果の節で述べたようにリラクゼーションにおけるひずみ速度の応力依存性が第 1 期と第 2 期で異なるにもかかわらず、リラクゼーション中では変らないとしたためであ

る。これは、残留応力がかなり低下した後のひずみ速度を対象としたために第 1 期が無視されたものと思われる。

第二に、 β' の値を $10^{-6}/h$ の定常クリープ速度に対応するクリープ強さから計算しているためである。ひずみ速度-応力曲線上で、かような点は必ずしもリラクゼーション、あるいはステップダウン試験結果と一致しない。このことは Robinson の論文、および本論文の第 14 図にみられるとおりである。

以上のように、長時間リラクゼーション応力の推定について提案された各種の方法は、いろいろの難点があるので、以下において筆者らはひずみ速度-応力曲線に基いた新しい方法につき述べる。リラクゼーションの第 1 期と第 2 期におけるひずみ速度は、一般に (9) および (10) 式に示すように応力のべき関数で表わされる。したがって、それぞれの過程での残留応力は次のように計算される。

第 1 期に対し

$$t \leq t_1 \quad \dot{\epsilon} = K_1 \sigma^{\alpha_1}$$

$$t = \frac{1}{K_1 E(\alpha_1 - 1)} \left[\frac{1}{\sigma^{\alpha_1 - 1}} - \frac{1}{\sigma_0^{\alpha_1 - 1}} \right] \dots \dots \dots (17)$$

第 2 期に対し

$$t \geq t_1 \quad \dot{\epsilon} = K_2 \sigma^{\alpha_2}$$

$$t - t_1 = \frac{1}{K_2 E(\alpha_2 - 1)} \left[\frac{1}{\sigma^{\alpha_2 - 1}} - \frac{1}{\sigma_1^{\alpha_2 - 1}} \right] \dots \dots \dots (18)$$

ここで、 K_1 は初応力 σ_0 の関数である。 K_2 は定数、 α_1 および α_2 はひずみ速度の応力依存性を示す定数であり、第 10 図の直線の傾斜の逆数である。 σ_1 , t_1 は第 2 期の始まる点であり、第 10 図で第 1 期、第 2 期の直線の交点として与えられる。 $\epsilon_0 = 0.12\%$ の場合について (9) および (10) 式に示す係数を用いて計算した結果を第 13 図に示す。これは実験結果と最もよく一致している。時間 t が t_1 よりもはるかに大になれば、応力 σ は σ_1 に比較してかなり小さくなり (18) 式の右辺の第 2 項は無視される。したがって、かような条件のもとでは時間 t と残留応力 σ は両対数目盛上で直線となり、Robinson の論文にある結果とも一致する。

上述のように、長時間リラクゼーション応力の外そうに関して各種の方法があるが、筆者らの計算式によるものはリラクゼーション特性に基いていて、計算結果は実験値に最もよく合致し、かつ計算も容易である点から、最も有効な外そう方法と思われる。

なお、長時間応力の外そうに影響を及ぼす因子として材料の組織変化がある。折出等が起ればクリープ強度が変り、したがってリラクゼーション量も異なるので、十分な注意が必要である。

4.3 リラクゼーションとクリープの相関性 塑性ひずみ速度の応力依存性が2期に分かれることがリラクゼーションの特徴である。したがって、これと一定応力下のクリープとの相関性を調べることは、その本質を知る上で重要である。

3.2 に述べたように、リラクゼーションの第1期における塑性ひずみ速度は応力と全ひずみ量により決まる。(7) 式を考慮すれば、これは応力と塑性ひずみに依存するともいえる。第2期での塑性ひずみ速度はほとんど応力にのみ依存し、全ひずみによる影響は非常に小さい。一方、一般の応力変動のあるクリープ問題では、遷移クリープに対し(11) 式に示すひずみ硬化理論がほぼ妥当なことが認められている。したがって、リラクゼーションの第1期は遷移クリープに相当する段階であり、第2期は定常クリープに相当する段階であると言える。第1期から第2期に移行する点につき考察してみると、たとえば $\epsilon_0 = 0.12\%$ の場合には第10図よりみて応力 σ が 16 kg/mm^2 近くである。このとき生じているクリープひずみは(7) 式から $3.2 \times 10^{-2}\%$ となる。この値は第5図に見られるように、遷移クリープ段階から定常クリープ段階があらわれ始める点にはほぼ相当している。

上述のクリープとリラクゼーションの対応は完全には成立しない。たとえば遷移クリープ速度からリラクゼーション応力を推定しても、第13図に示すように完全には一致しない。また、定常クリープ速度の応力依存性をあらわす指数は $m' = 4.61$ であるが、リラクゼーションの第2期でのその値は5.09となり、クリープ試験結果のほうが低い値を与えている。この関係は先にあげた ASTM の報告⁽⁵⁾においても一、二の例外を除き認められる。

第14図はクリープ試験とリラクゼーション試験におけるひずみ速度を比較したものである。ここで、第1期のひずみ速度の応力依存性がクリープのそれと著しく異なるのは、塑性ひずみ量、したがって初応力の影響を大きくうけるからである。

リラクゼーションがクリープと完全に対応しないのは、応力低下に伴いクリープ回復現象があらわれるためと思われる。クリープ回復については Johnson⁽¹²⁾, Lubahn⁽¹³⁾らの二、三の研究があるが、本研究に用いた $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼でも第15図に示すようなクリープ回復がみられる。図は、長時間のクリープおよびステップダウン試験後に応力を完全に除去したときにあらわれた収縮ひずみを縦軸にとり、応力除去後の経過時間の対数を横軸にとっている。応力の除去前は定常クリープおよび第2期リラクゼーションの状態にあるが、

等しい応力除去量に対して等しいひずみの回復が生じている。この応力を完全に除去した際のクリープ回復について、十分な解釈はいまだ与えられていない。応力をわずかに低減した際にもかかる現象の存在することは考えられ、転位論的にも、また試験片内の局所的な応力集中を考慮することからも理解しうる。第8図のステップダウン試験における全ひずみと時間の関係において、応力を減少した直後にひずみの低下、あるいは休止期間の存在することがみられる。第8図では、いまだ第1期リラクゼーションの過程である。

したがって、第15図の結果とあわせ考えれば、クリープ回復はリラクゼーションの第1期、第2期を通じてあらわれるものである。これはリラクゼーションに影響を及ぼす因子の中で、今後研究すべき重要課題の一つである。

5. 結 論

(1) $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼のリラクゼーションにおける塑性ひずみ速度を応力について両対数目盛で示せば、第1期、第2期の二つの直線部分であらわされる。第1期では、全ひずみにより異なるほぼ平行な直線とな

第14図 リラクゼーションにおける塑性ひずみ速度とクリープ速度の比較

第15図 クリープおよびステップダウン試験後のクリープ回復

るが、第 2 期での塑性ひずみ速度はほとんど応力にのみ依存する。前者は遷移クリープに対応し、後者は定常クリープに対応するものである。

(2) リラクゼーションは応力減少過程であるためにクリープ回復現象があらわれ、クリープとリラクゼーションは単純には対応しない。したがって、一般に妥当性の認められているひずみ硬化理論によりクリープ試験結果からリラクゼーションの残留応力を推定しても、完全に実験値と一致しない。リラクゼーション応力の予測に対しては、リラクゼーション特性に基づく筆者らの式が最も有効である。

(3) ステップダウン試験は、リラクゼーションの簡易試験法として、その価値が十分認められる。すなわち、各応力段階での平均ひずみ速度を求めれば、その内に応力低下に伴うクリープ回復の影響が含まれるので、第 1 期、第 2 期を通じてリラクゼーション試験結果と等しくなる。

終りに、本研究の材料につき御援助をいただいた神戸製鋼所、および同所の山本俊二技師に謝意を表わします。

文 献

- (1) E.L. Robinson, *Trans. ASME*, **59** (1937), 451.
- (2) N.L. Mochel, *Trans. ASME*, **59** (1937), 453.
- (3) E.A. Davis, *J. Appl. Mech.*, **10-2** (1943), A-101.
- (4) E.L. Robinson, *Trans. ASME*, **61** (1939), 543.
- (5) E.L. Robinson, *Proc. ASTM*, **48** (1948), 214.
- (6) 平・鈴木, *Proc. 4th Japan Congr. Test. Mater.* (1961), 56.
- (7) 西原・平・田中・大南, 機械学会論文集, **23-127**(昭32), 158.
- (8) *ASTM STP*, No. 187 (1956).
- (9) I. Robert, *Proc. ASTM*, **51** (1951), 811.
- (10) I. Finnie & W. R. Heller, *Creep of Engineering Materials*, (1959), 114, McGraw-Hill.
- (11) 大路, 材料試験, **8-66** (昭34), 209.
- (12) A.E. Johnson, *J. & Proc. Inst. Mech. Engrs.*, **145-5** (1941), 210.
- (13) J.D. Lubahn, *Trans. Amer. Soc. Metals*, **45**(1953), 787.

欧米に電子計算機専門視察団

電子計算機の専門視察団がこの 6 月にアメリカおよびヨーロッパに派遣されることになった。これは日本電子工業振興協会と日本生産性本部がタイアップして派遣するもので、6 月 10 日出発、45 日間にわたってアメリカはじめ西ドイツ、フランス、イタリアなど西欧各国を視察各国のメーカの実情、ユーザ側の事務機械化の状況など、電子計算機の各分野にわたって調査することになっている。

電子計算機の国内需要は、このところ急速にのびており、これに対処して電子計算機メーカ各社はその完全国産化を急いでいるが、外国の電子計算機にくらべて計算機の応用面、プログラミングの面がとくに完備されておらず、この面の早急な開発が緊急課題となっており、こんどの「電子計算機利用専門視察団」の調査結果が期待されている。

メンバーつぎのとおり。

▽原科 茂 (日本電子工業振興協会 電子計算機部長), ▽生垣 斎 (第一銀行事務部長), ▽伊藤 潔 (日産自動車事務管理課長), ▽城所正明 (日本車輛倉庫課長), ▽河野忠義 (日本国有鉄道技師長室調査役), ▽水野幸雄 (日本電気 電子機器 事業部 計算機部 開発課), ▽守田敬太郎 (東芝電子機器技術部長代理), ▽中川 隆 (通産省重工業局電子工業課長代理), ▽大杉欣一郎 (松下通信工業研究部第一研究室主任), ▽

島田正三 (日立製作中央研究所主任研究員), ▽鈴木健三 (沖電気工業電子計算機事業部計算課長), ▽渡辺文明 (三菱電機電子機器技術部第三技術課長), ▽吉田佳一 (富士通信機企画部企画課長)。

訪問先

デパートおよび商社会社、銀行および証券会社、電力会社、鉄鋼・運輸交通・官庁関係・航空鉄道会社など業種別の事務機械化状況やメーカの生産管理状況などで具体的にはつぎのとおり

IBM (インターナショナル・ビジネス・マシン=米), RR (レミントン・ランド=米), RCA (ラジオ・コーポレーション・オブ・アメリカ=米), GE (ゼネラル・エレクトリック=米), オリベッティ (伊), ブル (仏), ジーメンス (西独), フェランティ (英), インターナショナル・コンピューター・タピュレーター (英), パロース (米), NCR (ナショナル・キャッシュ・レジスター=米) など電子計算機メーカのほか、ロック・ヒード (米), シルバニア (米), ユナイテッド・エアラインなどのユーザや, CEIR (コーポレーション・フォアエコノミック・アンド・インダストリアル・リサーチ=米), IBM トレードセンター, RR トレードセンター, ローマセンターなどコンサルタントやセンターおよびシンガン大学 (米) など。

(服部 敏夫)