539. 376 : 620. 172. 251. 2 : 669. 14

低炭素鋼の第 2 期クリープに及ぼす応力減少の影響*

西原利夫**, 平 修二***, 田中吉之助***, 大路清嗣****

Effect of Stress Reduction on Secondary Creep of Mild Steel

by Toshio NISHIHARA, Shuji TAIRA, Kichinosuke TANAKA
and Kiyotsugu OHJI

The transient behaviour of creep strain, which appeared on partial removal of applied stress at the stage of secondary creep, was studied. The strain rate immediately after partial reduction in stress was found smaller than the steady creep rate, at which the material was expected to creep under the reduced stress, and then gradually increased and reached the expected value. It was also found that this behaviour was well interpreted on the basis of the theory of creep deformation, which had been proposed by the present authors.

1. 緒 言

第 1 期クリープを対象とした階段的応力変動の影響については、すでに報告したように⁽¹⁾, 変動後の応力値と等しい一定応力試験 (以下これを基準試験と名付ける) のひずみ速度に比べて, 応力を増加した場合には, 同じひずみ量に対して, 大きいひずみ速度が, また応力を減少した場合には小さいひずみ速度が対応する。しかしながらその後のひずみの増加(時間の増加)とともにその差は漸次縮まり, 基準試験のひずみ速度に近づいて行くことを明らかにした。またこれらの現象については, 内部降伏応力という概念を用いて, この値の増加および減少という立場から定性的に説明できることを示した。ところで第 1 期クリープとともに, 第 2 期クリープが非常に重要な意味をもつことから, 第 2 期クリープに対する階段的応力変動の影響を実験的に明らかにすることは重要なことである。一方, 第 1 期クリープにおける現象に対して用いた著者らの説明は, その本質において第 1 期ならびに第 2 期クリープを区別する必要はなく, したがってこの考察をさらにおしすすめてゆけば, 前報告⁽¹⁾⁽²⁾の結果から第 2 期クリープに対する階段的応力変動に対する影響も予想しうるものである。したがってこれと実験結果とを対比すれば, この種のクリープ変形に対する考え方の定性的な正否を調べることができる。本研究はこれらを明らかにするために行われたものである。

2. 試験機および試験片

試験機は一定応力型のもので, 附属装置を含め既報⁽¹⁾のものをそのまま用いた。

試験片についても従来のものと同一形状のもので⁽¹⁾ 第 1 図に示すような直径 6 mm, 標点距離 50 mm の丸棒試験片である。試験片は機械加工後, 真空炉中で 900°C に 1 時間保たれ, 後炉中冷却されている。第 1 表および第 2 表はそれぞれこの試験片の材料(軟鋼)の化学組成および常温機械性質を示したものである。

3. 一定応力クリープ試験結果

本報告において述べる結果はいずれも温度 450°C の下で得られたもので, また ひずみ はすべて対数ひずみによって表わされている。

一定応力クリープ試験結果をひずみ速度 de/dt と負

第 1 図 試験片

第 1 表 試験片材料化学組成 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.14	0.29	0.41	0.010	0.029

第 2 表 試験片材料常温機械性質

降 伏 点 σ_s kg/mm ²	引 張 強 さ σ_B kg/mm ²	破 断 伸 び ϕ %
23.7	38.0	39.0

* 昭和 31 年 11 月 15 日 岡山臨時大会講演会において講演, 原稿受付 昭和 32 年 12 月 27 日。

** 正員, 名誉員, 講演当時京都大学工学部。

*** 正員, 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)。

**** 正員, 大阪大学工学部, 講演当時京都大学大学院。

第 2 図

荷時間 t との関係で示したのが第2図である。またクリープ曲線は第3図に黒丸で示されている。第2図から明らかなように、実験結果は両対数グラフ上で、時間の短いところではほぼ直線的に、そして時間の経過とともにこの直線関係からはずれて漸次横軸に平行に移行している。したがってひずみ速度およびひずみは負荷時間に対してそれぞれ次のような式で表わすことができると考えられる。

$$d\epsilon/dt = n\beta t^{n-1} + \kappa \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 + \beta t^n + \kappa t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに ϵ_0 は瞬間初期ひずみ、 β および n はそれぞれ遷移クリープの係数およびその時間指数、また κ は定常クリープ速度で、いずれも温度、応力一定になるとき定数である。

第2図および第3図に示した一定応力クリープ試験結果からこれらの定数を決定すると、これらの値は各応力について第4図に示すようになる。ここで n の値については、一般には応力および温度によって変化するものと考えられるが、温度 450°C の下では、第2図から明らかなように、負荷時間の短い範囲(第1期

第3図 クリープ曲線

第 4 図

クリープの範囲)での直線部分のこう配は、応力 20.0 kg/mm^2 から 14.0 kg/mm^2 の範囲でほぼ等しいとみることができ、したがって n の値はこの応力範囲では一定とし、 0.267 の値をとっている。第4図において、 ϵ_0 、 β および κ は応力に対して両対数グラフ上でほぼ直線関係にあることから、結局次のようなべき関数で表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_0 &= 2.07 \times 10^{-4} \times \sigma^{3.00} \\ \beta &= 2.29 \times 10^{-7} \times \sigma^{5.00} \\ \kappa &= 2.37 \times 10^{-15} \times \sigma^{8.37} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただしこれらの値はひずみ ϵ を%，時間 t をmn，また応力 σ を kg/mm^2 でとった場合のものである。第2図および第3図の破線は(3)式の値を用い、(1)および(2)式によって計算した結果で、図に示した負荷時間の範囲内でよく実験結果と一致している。

4. 応力減少後のクリープ

第2図より明らかなように、低炭素鋼のクリープでは、第1期クリープから第2期クリープへの移行は漸進的であり、ひずみ速度がほぼ一定となり完全に第2期クリープに移行してしまうにはきわめて長時間を要するものと考えられる。したがって完全に第2期に移行した状態での応力減少の影響を調べることは時間的にもきわめて困難なことである。したがって本研究では第1期クリープから第2期クリープへの移行の途中、すなわち(1)式において右辺第2項の影響が第1項のそれに対してかなり顕著になった状態で応力変動を与えるものとする。

第3図に

(a) 応力 18.0 kg/mm^2 で8%のひずみを与えた後応力を 16.0 kg/mm^2 に、

(b) 応力 16.0 kg/mm^2 で 5% の ひずみ を与えた後応力を 14.0 kg/mm^2 に、それぞれ減少した場合のクリープ曲線が白丸で示されている。さらにこれをひずみ速度と時間の関係で示したのが第 5 図で、それぞれ白丸と黒丸で表わしてある。図中破線は (1) および (3) 式を用いて計算した結果である。また横軸に平行な一点鎖線は応力 16.0 および 14.0 kg/mm^2 に対して (3) 式を用いて計算した κ の値で定常クリープ速度を示すものであり、それぞれ 16.0 および 14.0 kg/mm^2 に対する破線の漸近線となるものである。

応力減少後のひずみ速度は、(a) の 18.0 kg/mm^2 から 16.0 kg/mm^2 に応力を減少した場合には、減少後のある期間、減少後の応力に対する定常クリープ速度 $\kappa_{\sigma=16.0 \text{ kg/mm}^2}$ より大きい値を示しているが、その後減少して κ より小さい値となる。しかしある時間後は増加に転じ、漸次 κ より大きいある値に近づいて行くように見える。

(b) の 16.0 kg/mm^2 から 14.0 kg/mm^2 に応力を減少した場合には、ひずみ速度は減少直後、ほぼ (3) 式の与える κ の値に等しく、その後一度減少するが、(a) の場合と同様、ある時間以後は増加に転じ、 κ に近い値に漸近している。

この二つの結果からみれば、(1), (2) 式を使って実験結果から決定された定数 κ を比較の基準にする限り、上に述べたように二つの実験結果は異なった傾向を示すことになるが、一方応力変動後のひずみ速度の時間的变化のありさまに注意するとき、第 5 図から明らかなように両者は全く相似的に変化している。

第 5 図

ここで (3) 式のように得られた κ の値について考えてみよう。(1) および (2) 式を用いて実験値から諸定数を求める手順を考えてみるに、 ϵ_0 は $t=0$ に対して、また κ は $t \rightarrow \infty$ に対して決定さるべき値である。しかし実験技術上 $t=0$ に対する値を求めることは、負荷応力が小さいとき以外は実際上きわめて困難であり、また $t \rightarrow \infty$ に対する資料をうることも、経済的、時間的に不可能である。したがって、 ϵ_0 , κ の値は実際の資料から (1), (2) 式を用いての外そう値にたよるほかはない。このうち ϵ_0 については、(2) 式の表現が正しいと仮定すれば、かなり正確に決定することができ、またその値から (2) 式の仮定の適否を判定できるが、 κ については、第 2 図からわかるように第 2 期クリープの現われるのがきわめて緩慢であるため、正確に κ の値を定めることは困難であり、(1) 式のような表現の適否も結局試験を行った負荷時間内での判断に限られ、 κ のもつ物理的意味も実際上は (1) 式を介して得られる定常クリープ速度の外そう値に止まり、厳密な意味の定常クリープ速度と断ずることはできない。実際に第 2 図の 18.0 kg/mm^2 に対する実験値をみても、この実験結果が 10 000 mn 以後第 2 期クリープの様相を呈している点については他の応力における結果と比較して若干疑問の点はあるが、真の定常クリープ速度が (3) 式の κ で与えられるものと異なる可能性が大きい。むしろ応力減少後長時間経過の後にひずみ速度が収束して行くところの値がこの真の定常クリープ速度とも考えられる。したがって第 2 期クリープにおける応力減少は、真の定常クリープ速度の一決定法となる可能性があることも考えられる。これについては次節の考察において詳しく述べる。

なお実験結果と固体状態力学方程式 (Mechanical equation of state)⁽⁹⁾によって与えられる値との比較、換言すれば同じひずみに対する実験ならびに基準試験におけるひずみ速度の比較については、実際に $\sigma = 16.0 \text{ kg/mm}^2$, $\epsilon = 8\%$ および $\sigma = 14.0 \text{ kg/mm}^2$, $\epsilon = 5\%$ に対するひずみ速度を (1), (2), (3) 式を用いて計算すれば、 4.4×10^{-5} および $1.44 \times 10^{-5} \text{ \%/mn}$ となり、変動直後のひずみ速度がそれぞれ 3.6×10^{-5} および $9.0 \times 10^{-6} \text{ \%/mn}$ であるのに比べて計算値の方が大きい値となっている。これらは傾向として、いずれも第 1 期クリープの場合と同じである⁽¹⁾。しかしこの場合にも、上に述べた ϵ_0 および κ , 特に κ の値についての問題は残り、固体状態力学方程式の検討も (1), (2) 式の外そうの可能なことを仮定した上でのものである。

5. 考 察

この節ではすでに著者らが報告したクリープ変形に対する基礎的な考え方⁽¹⁾⁽²⁾を基にして, 第2期クリープおよび第2期クリープにおける階段的応力変動の影響について考察し, この結果と実験結果との比較を試みる。

著者らのクリープ変形に対する考え方⁽¹⁾⁽²⁾は

(1) ある瞬間の材料のすべり性質は, その瞬間の材料のもつ内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ なる量によって代表され, そのときのひずみ速度は応力 σ , 温度 T およびこの $\bar{\sigma}$ によって

$$d\epsilon/dt = f(\bar{\sigma}, \sigma, T) \geq 0 \quad (4)$$

のように表わされる。ここに $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ は $\bar{\sigma}$ の減少関数, σ , T の増加関数である。

(2) $\bar{\sigma}$ なる値は, ひずみの増加にともなう加工硬化ならびに時間の経過による回復のため刻々変化し, 一般に温度, 応力の履歴が異なれば異なった値をとる。という仮定に基いている。今簡単のため, 加工硬化係数 $(\partial\bar{\sigma}/\partial\epsilon)'$ および回復速度 $(\partial\bar{\sigma}/\partial t)'/f(\bar{\sigma}, \sigma)$ を $\bar{\sigma}$, σ および T のみの関数と考えれば, 次の基礎式が求まる。なお本研究においては試験温度は常に一定(450°C)に保たれているので, 温度に関する記述は省かれている。

$$\delta\epsilon = F(\bar{\sigma}, \sigma)\delta\bar{\sigma} \quad (5)$$

ただし

$$F(\bar{\sigma}, \sigma) = \frac{1}{(\partial\bar{\sigma}/\partial\epsilon)' + (\partial\bar{\sigma}/\partial t)'/f(\bar{\sigma}, \sigma)}$$

ここに $F(\bar{\sigma}, \sigma)$ の逆数は有効硬化係数⁽²⁾と名付けられるもので, 本理論の中心となるものである。

ある内部降伏応力に達するまでのひずみは

$$\epsilon = \int_{\bar{\sigma}_0}^{\bar{\sigma}} F(\bar{\sigma}, \sigma) d\bar{\sigma} \quad (6)$$

によって与えられる。ここに $\bar{\sigma}_0$ は材料のもつ内部降伏応力の初期値である。

さてこのような考えによると, すでに報告したように⁽²⁾, 第2期クリープとはひずみが増加するにもかかわらず $\bar{\sigma}$ が一定, すなわち $\delta\bar{\sigma}=0$ の状態であると考えられるから, このときには関数 $F(\bar{\sigma}, \sigma)$ は無窮大となり,

$$1/F(\bar{\sigma}, \sigma) = 0 \quad (7)$$

を満足する $\bar{\sigma}$ の値 $\bar{\sigma}_0$ の近くで双曲線的な変化をするものと考えられる。

次に上の考え方を基礎にして, 第2期クリープにおける応力変動の影響を考えてみる⁽²⁾。既報の一定応力クリープ試験におけるひずみ ϵ と $\bar{\sigma}$, σ の関係の考察⁽¹⁾, すなわち同じひずみ量に対しては σ が大きい

第 6 図

ほど大きい $\bar{\sigma}$ が対応することを考慮すると, $F(\bar{\sigma}, \sigma)$ と $\bar{\sigma}$ の関係は σ を助変数として第6図の太実線のようにになると考えられる。

今負荷応力を σ_0 から σ_1 に減少する場合を考える。負荷応力がそれぞれ σ_0 , σ_1 であるときの第2期クリープにおける内部降伏応力の値〔(7)式を満足する $\bar{\sigma}$ の値〕をそれぞれ $\bar{\sigma}_{s0}$, $\bar{\sigma}_{s1}$ とする。 σ_0 なる応力で第2期クリープ近く, すなわち $\bar{\sigma}$ が $\bar{\sigma}_{s0}$ 近くの値 $\bar{\sigma}_1$ に達するまで変形させたとすれば, このとき $F(\bar{\sigma}, \sigma_0)$ は第6図の矢印の方向に変化し, そのときのひずみは(6)式からわかるように, $\bar{\sigma}$ 軸の上方の陰影部の面積で表わされる。 $\bar{\sigma}_1$ は, $\sigma_0 > \sigma_1$ であれば, $\bar{\sigma}_{s1}$ より大きい値となることができる。したがって, ここで応力を σ_0 から σ_1 に減少させれば, そのときの $\bar{\sigma}$ に対応する $F(\bar{\sigma}, \sigma_1)$ の値は, 第6図からわかるように, 負の値となる。しかしひずみ速度は引張応力下(0を含む)では常に正または0と考えれば, $\delta\epsilon \geq 0$ であるから, (5)式から $\delta\bar{\sigma} \leq 0$ でなければならない。この場合にはひずみが増加するとともに内部降伏応力が減少するという, いわゆる加工軟化の現象が起ることになる。すなわち図で $F(\bar{\sigma}, \sigma)$ と $\bar{\sigma}$ 軸で囲まれる $\bar{\sigma}$ 軸下方の陰影部の面積が正になるため $\bar{\sigma}$ は減少し $F(\bar{\sigma}, \sigma_1)$ は矢印の方向に変化することになる。このようにして $\bar{\sigma}$ は漸次減少して $\bar{\sigma}_{s1}$ に近づいて行くことになる。これをひずみ速度の変化でいえば, 応力減少直後, σ_1 に対する定常クリープ速度($\bar{\sigma}_{s1}$ に対するひずみ速度)より小さいひずみ速度が現われるが, 時間の経過とともに(ひずみの増加とともに)漸次増加して, σ_1 の定常クリープ速度に近づいて行く。

以上の考察の結果と実験結果とを比べてみると, 応力減少直後のひずみ速度は基準試験の真の定常クリープ速度と考えられる値より小さいこと, および応力減少後ある時間を経た後のひずみ速度が漸次増加して真の定常クリープ速度と考えられる値に近づくとい

う実験結果と一致する。なお単結晶による応力減少の実験結果では、減少直後のひずみ速度はいったん 0 に近い値となるが、それから漸次増加して基準試験の定常クリープ速度に近づくという結果が発表されているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、これは著者らの考えと定性的に全く一致するものである。

6. 結 論

以上の実験および考察から次のことが結論できる。

(1) 低炭素鋼の 450°C におけるクリープ試験において、第 2 期クリープの状態段階的に応力を減少した場合には、減少後のひずみ速度は減少後の応力に対する真の定常クリープ速度よりも小さい値を示すが、時間とともに漸次その定常クリープ速度に近づいて行く。

て行く。

(2) 著者らの加工硬化ならびに回復を考慮したクリープ変形に対する基礎概念により、第 1 期クリープのみならず第 2 期クリープにおける応力変動時の現象を十分説明することができる。

文 献

- (1) 西原, 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **22**, 123 (昭 31), 832.
- (2) 西原, 平, 田中, 大路, 本論文集 452 ページ.
- (3) J. H. Hollomon & J. D. Lubahn, *General Electric Rev.*, **50**(1947).
- (4) M. Tanenbaum & W. Kauzmann, *Appl. Phys.*, **J.**, **25**(1954), 415.
- (5) A. H. Cottrell, *Dislocations & Plastic Flow in Crystals*, Oxford(1953), 209.

620. 178. 38 : 669. 14

低 炭 素 鋼 の 高 温 疲 れ*

西原利夫**, 平 修二***, 田中吉之助***, 小寺沢良一***, 東 良学****

Fatigue of Low Carbon Steel at Elevated Temperature

by Toshio NISHIHARA, Shuji TAIRA, Kichinosuke TANAKA,
Ryoichi KOTERAZAWA and Yoshisato AZUMA

Fatigue tests were made under the condition of constant deflection with a rotating type machine at temperatures of 450°C, 300°C and at room temperature by applying stress cycles in the range from 170 to 3000 cpm. The results were arranged on the basis of strain amplitude and discussed by referring to the results presented by Forrest and Tapsell. The conclusions obtained may be summarized as follows:

1. At a temperature of 450°C, frequency of repeated cycles has the following influence on fatigue life,

(a) under a definite stress amplitude, the number of cycles to fracture is less at lower frequency and time to fracture has a definite value irrespective of frequency.

(b) under a definite inelastic strain amplitude, (in other words, when the inelastic deformation in one cycle has a definite magnitude) the number of cycles to fracture does not vary with frequency.

2. At a temperature of 300°C, higher frequency results in decreasing the number of cycles to fracture in the range of amplitude near the fatigue limit. This perhaps results from anchoring of dislocations by solute atoms of carbon or nitrogen.

3. It seems that the general characteristics of fatigue at elevated temperature do not appear until the temperature is raised over the range of blue brittleness. Maximum of fatigue strength appears at temperature 300°C.

* 昭和 32 年 3 月 20 日 関西支部第 32 期定時総会議演会において講演, 原稿受付 昭和 32 年 12 月 7 日.

** 正員, 名誉員, 同志社大学工学部(講演当時 京都大学工学部).

*** 正員, 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町).

**** 准員, 京都大学大学院(講演当時).

金属材料の高温疲れは、高温において使用される機械装置の設計に際して問題となることから中で最も重要なものの一つである。海外においては、古くからこの方面の研究が行われているが⁽¹⁾、わが国においてはまだ二三の実験⁽²⁾⁽³⁾が試みられた程度で十分の研究