539.376 : 539.389 : 669.14

低炭素鋼の再負荷時のクリープ現象⁽¹⁾西原利夫⁽²⁾ 平 修二⁽³⁾ 田中吉之助⁽⁴⁾ 大路清嗣⁽⁵⁾

Creep of Low Carbon Steel under Reloading

by Toshio NISHIHARA, Shūji TAIRA, Kichinosuke TANAKA and Kiyotsugu ŌJI

The creep phenomena of low carbon steel subjected to unloading and reloading were examined at 450°C. The stress was interrupted when the strain reached ϵ_r and imposed again after a period of time t_r . The creep strain was found to increase compared to the value attained under uninterrupted load. For equal amount of ϵ_r , the strain increment $\Delta\epsilon$ can be expressed by

$$\Delta\epsilon = a \log (1 + ct_r),$$

where a and c are constants, and $\Delta\epsilon$ is found to decrease with the strain ϵ_r .

1. 緒 言

筆者らは先に一定応力のクリープ試験の途中に応力 0 の段階すなわち休止を与えた場合について、主として定性的に調べた結果を報告した⁽⁶⁾。本論文では、前報告の結果を基にして更に詳細に実験を行い、主として休止の影響により増加する ひずみ を対象とし、これと休止時間の関係を表わす実験式を提案し、これに対して考察を加えている。その他、再負荷後の性質について二、三検討し、これらをすでに発表されている二、三の結果と比較検討している。

2. 実験結果

実験装置、方法はほとんど前報⁽⁶⁾のとおりである。試験片は直径 6 mm, 標点距離 50 mm の丸棒試験片で、その化学成分および常温機械的性質は、第 1 表および第 2 表のとおりである。試験温度は 450°C ± 1°C であり、応力は 24.0, 25.5, 26.0 kg/mm² の一定応力で行い、本論文の基幹となる休止を与えた場合のクリープについては、応力は 25.5 kg/mm² で行っている。ひずみ は自然ひずみを用い、すべて最初の標点距離からの全ひずみで表わし、この値が 15% 以下の所で実験している。

まず一定応力のクリープ試験結果については第 1 図に示すような形になり、これをひずみ速度と時間の関係に直し対数をとると第 2 図に示すように、前報⁽⁶⁾同様ほぼ直線関係が認められる。図中 ● ○ ● の各点は応力がそれぞれ 26.0, 25.5, 24.0 kg/mm² のときの値を示す。したがって、この場合もクリープ曲線は次式で表わされる。

$$\epsilon = \epsilon_0 + \beta t^n \dots\dots\dots (1)$$

次に休止を与えた場合の結果については、休止時間

第 1 表 試験片化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.12	0.21	0.41	0.013	0.019

第 2 表 常温機械的性質

降 伏 点 σ_s kg/mm ²	引 張 強 さ σ_B kg/mm ²	破 断 伸 び φ %
22.3	38.0	39.8

の影響を調べるための実験として、試験片に負荷後ひずみが 8% に達したとき、それぞれ 5, 15, 60, (90), 300, 1500 分の休止時間を与えた後、再び元の応力に戻した場合が第 3 図および第 4 図に示されている。 t

第 1 図

は負荷後の時間から休止時間を差引いた全負荷時間を表わし、 t_r は休止時間を表わす。また休止を与えるまでの ひずみ ϵ_r (または時間 τ) による影響を調べるため負荷後の ひずみ が 6, 8, 10, 12% に達したときそれぞれ 60 分, 300 分 (一例のみ 332 分) の休止時間を与えた場合が第 5 図に示されている。これらの図をみると、まず再負荷により ひずみ が増し、またその量は休止時間が増すほど増す傾向にあり、再負荷後のクリープ曲線の形は休止を与えたときの ひずみ

第 2 図

第 3 図

第 4 図

第 5 図

の量により変り、ひずみが小さいときに休止させた方が休止の影響が早く消えている。これらの結果をひずみ速度と時間の関係に直し、両対数目盛で示すと、たとえば第 6 図のようになり、この場合にも前報⁽⁶⁾で述べたとおり再負荷後著しく増加したひずみ速度は時間の経過とともに図の直線、すなわち休止を与えない場合の同じ負荷時間の値に近づいて行くことがわかる。

3. 休止の影響による増加ひずみ

実験結果によると、休止時間を与えることにより休

第 6 図

止を与えないときの ひずみ にくらべ、同一負荷時間 t に対して再負荷後の全ひずみに増加が認められる。この ひずみ の増分すなわち増加ひずみについて考える。第 3 図および第 4 図からもわかるように、実験結果において休止を与えるまでの全試験片についてのクリープ曲線は必ずしも一致せず、したがって増加ひずみを定義するとき、たとえば実際に求めた 1 本の一定応力クリープ試験結果を標準として各休止を与えた場合の ひずみ との差を求めるとすれば、増加ひずみの値は各試験片について、非常に散らばりを示す。したがって正しい解析が非常に困難になる。ところが再負荷後のひずみ速度については、前節にも述べたように著しく増加した後時間の経過とともに休止を与えない場合の同じ負荷時間に対する値に近づくことがわかっている。換言すれば再負荷後のクリープ曲線と休止を与えないときのクリープ曲線が同じ負荷時間に対し平行することを表わしている。そこで、このひずみ速度と時間の関係から各試験片について第 7 図の破線で示すような、休止を与えない場合のクリープ曲線を推定

第 7 図

し、これと実験値との差をひずみ速度が休止を与えない状態に戻ったとき、すなわち

第 7 図で並行したときに求め、これを休止の影響による増加ひずみ $\Delta\epsilon$ とする。第 3 図および第 4 図の場合につき増加ひずみを求め、これと休止時間 t_r の対数の関係を示すと第 8 図の点のようになる。括弧を付したものは試験温度にわずかながら不備が存在するため他の値に対して参考として記入した値である。ここでは増加ひずみは各結果を参照して再負荷後 30 分の値をとっている。図より増加ひずみは休止時間が増すほど増加し、また休止時間の短い所では横軸に平行に近づいている。したがって、これらの各点は a, c を定

第 8 図

数として次式で表わすことができると考えられる。

$$\Delta \varepsilon = a \log_{10}(1 + ct_r) \quad (2)$$

休止時間 60 分の場合を標準として、これらの点から a , c を求めると休止時ひずみ 8% に対する値として $a = 0.26(\%)$, $c = 0.5(\text{mn}^{-1})$ をうる。この値を (2) 式に入れ計算した値が第 8 図に実線で示されている。この式によりかなりよく傾向を表わすことができる。

次に休止時のひずみの大きさによる影響について調べる。前報⁽⁶⁾で休止を与えた後のひずみ速度は負荷時間に依存して決定され、ひずみ量には依存しないことを示した。このことより考えれば休止時のひずみ ε_r よりむしろ休止時の時間 τ をとるべきである。しかし今の場合、試験片について休止はただ一度与えるのみであるから便宜上休止を与える直前のひずみを用いても同じである。

前と同様にして増加ひずみを求め休止時のひずみを横軸にとって示すと第 9 図のようになる。図中、半

第 9 図

黒丸は休止時間が 332 分のときの値である。 $\Delta \varepsilon$ を求めるときの再負荷後の時間については、第 3 表の値をとっている。図より増加ひずみは休止時のひずみの増加とともに減少の傾向を示している。しかし、この値から (2) 式の定数 a , c を求めると第 4 表のように

第 3 表

休止時ひずみ ε_r %	6	8	10	12
再負荷時の時間 $(t - \tau)$ mn	7	30	67	180

第 4 表

休止時ひずみ ε_r %	6	8	10	12
a %	0.37	0.26	0.12	0.13
c mn^{-1}	0.18	0.5	20	5

なり一定の傾向を示していない。したがって、これらの結果についてはなお検討の必要がある。

4. 再負荷直後のひずみ速度

再負荷後のひずみ速度が時間の経過とともに漸次休止を与えないときの値に近づいて来ることはすでに前報⁽⁶⁾および本論文の始めに述べた。ここでは再負荷直後から休止を与えない場合の値に近づくまでの間について考える。

ひずみが 8% に達したときに 15, 60, 300, 1500 分の休止を与えた例につき、ひずみ速度と再負荷後の時間 $(t - \tau)$ の関係を求めると第 10 図のように対数目盛ではほぼ直線関係の成立することが認められる。この直

第 10 図

線のこう配は休止時間が増加するほど増加している。次に休止ひずみの影響を調べるためひずみが 6, 8, 10, 12% に達したときに休止時間 60 分を与えたときのひずみ速度と再負荷後の時間の関係を求めると、第 11 図のようになる。図中破線は休止を与えない場合である。この場合も再負荷後ある時間対数目盛で直線関係が認められ、こう配は休止時ひずみが小さいほど大きい。また直線関係から時間とともにはずれて行く傾向を示し、その時間は休止時ひずみの増加とともに増加する。このことは休止時のひずみが大きいほど

第 11 図

休止の影響の持続する時間が長いことを表わし、第 5 図のように再負荷後のクリープ曲線の形が異なることと一致する。また、この時間は第 3 表に示した、ひずみ速度が休止を与えないときの値に近づくに要する時間とほぼ同じ程度であり、各結果を参照すればこの値は休止時間によって余り影響されないように見える。

5. 考 察

遷移クリープの過程については従来から多くの説明がなされ、たとえば ひずみ の増加ともなう加工硬化、換言すれば内部降伏応力の増加などにより説明されている。今たとえば、このような過程を経て、ある ひずみ に達した後、応力を 0 に戻し休止を与えた場合を考える。この場合、内部降伏応力に変化がなければ休止の影響は現われないはずである。実際には降伏応力に減少があ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ものと考えられる。この内部降伏応力の減少については転位論的な立場から簡単な模型により次の式が導かれている⁽⁷⁾。

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 - (kT/\beta) \log(1 + t_r/t_0) \quad \cdots \cdots (3)$$

$\bar{\sigma}$ は休止後時間 t_r における内部降伏応力で、 $\bar{\sigma}_0$ はその初期値である。 t_0 は次式で定義される値である。

$$\bar{\sigma}_0 = W/\beta - (kT/\beta) \log(\beta A t_0/kT) \quad \cdots \cdots (4)$$

T は絶対温度、 A , β , k , W は定数である。したがって降伏応力の休止時間による減少は

$$\bar{\sigma}_0 - \bar{\sigma} = (kT/\beta) \log(1 + t_r/t_0) \quad \cdots \cdots (5)$$

で表わされる。本実験のように多結晶で、かつ ひずみ の相当大きい場合には簡単な模型より出発したこの式のみで降伏応力の減少が表わされるとは考えられないが、いちおうこの式で傾向を表わすことができるであろう。さて休止による降伏応力の減少が (5) 式により表わされるとすれば、温度一定なとき ($\bar{\sigma}_0 - \bar{\sigma}$) は $\log(1 + t_r/t_0)$ に比例する。今クリープひずみと内部降伏応力の間に $\epsilon = f(\bar{\sigma})$ なる関係が存在するとすれば第一次近似として次式が成立する。

$$\Delta \epsilon = f'(\bar{\sigma}) \Delta \bar{\sigma}$$

($\bar{\sigma}_0 - \bar{\sigma}$) は小さな値と考えられるから $\Delta \bar{\sigma}$ の代りに (5) 式を用いると、 $\bar{\sigma}$ のわずかな変化に対しては $f'(\bar{\sigma}) =$ 一定と考えることができるから、

$$\Delta \epsilon \cong K \log(1 + t_r/t_0) \quad \cdots \cdots (6)$$

となる。ここに K は定数である。これは先に実験式として提案した (2) 式と全く同じ形の式であり、増加ひずみを (2) 式のように表わすことができることを示している。このことから本論文の結果は更に応力の異なるときにも定性的に正しいことが推定される。

休止時間後のひずみ速度と再負荷後の時間が、対数目盛で直線関係にあることは、M. Tanenbaum および W. Kauzmann により亜鉛の単結晶につき報告され、簡単な仮定により数式的にも説明されている⁽⁸⁾。本実験より、第 10 図および第 11 図に見られるように、多結晶についてもほぼ同じことが言えることがわかる。本論文では、これらの直線のこう配について定性的に考えてみる。

さて activation energy が u なるときのひずみ速度は一般に次式で与えられる。

$$d\epsilon/dt (\equiv \dot{\epsilon}) = B \exp(-u/kT), \quad B: \text{定数} \quad \cdots \cdots (7)$$

ここで u は、外部から加えられている応力が一定とす

れば、内部降伏応力 σ の増加関数であり、内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ が ひずみ の増加とともに増加するありさま、すなわち加工硬化の曲線は、上に凸な増加関数と考えられる。また、実験結果より再負荷後ある時間の後にはひずみ速度は實際上休止の影響が消えて、休止を与えない場合の同じ負荷時間に対する ひずみ速度 に近づき、それに要する時間は休止時のひずみ ϵ_r が同じときには、休止時間 t_r の大きさに余り影響されずほぼ一定である。

これらのことを念頭において、休止時間 t_r がこう配に及ぼす影響について考えてみる。内部降伏応力の休止時間による減少は (5) 式により休止時間 t_r の増すほど大きくなる。したがって上に述べた所から、当然 u は休止時間 t_r が増すほど減少する。したがって (7) 式より考えると、再負荷直後のひずみ速度は休止直前の値より増加し、その増分 $\Delta \dot{\epsilon}$ は (7) 式を使えば次のようになる。

$$\Delta \dot{\epsilon} = -B \cdot \exp(-u/kT) \cdot \Delta u/kT \quad \cdots \cdots (8)$$

これよりひずみ速度の増分は休止時間が大きいほど大きいことになる。一方、ひずみ速度が大きければ当然同一時間内の ひずみ の増加が大きく、上に述べたことから、内部降伏応力の増加も速い。したがって休止時間の差による内部降伏応力の差は時間とともに減少し、これにともなうひずみ速度の差も減少する。そしてある時間の後には、實際上ほぼ同じ値になり、休止を与えない場合の同じ負荷時間に対する値に近づく。このように休止時間が長いほど再負荷直後のひずみ速度の増分が大きく、かつほぼ同じ時間の後にひずみ速度がほぼ同一になることを考えると、休止時間が長いほどこのこう配が急になる。

次に休止時ひずみの大きさの影響について考える。(7) 式より u が大きいほど、すなわち内部降伏応力 $\bar{\sigma}$ あるいは ひずみ が大きいほど、ひずみ速度は小さく同一の ひずみ の増加に要する時間が永くなる。また上に仮定した加工硬化曲線の性質から ひずみ が大きい所ほど同じ ひずみ の増分に対し内部降伏応力の増分が小さい。したがって休止による内部降伏応力の減少量がほぼ同じとき、休止の影響が實際上なくなり、ひずみ速度が休止を与えない場合の値に近づくまでに要する時間は、休止時ひずみの増加とともに増加すると考えられる。このことは実際結果とも一致する。一方、内部降伏応力の減少にともなう再負荷直後のひずみ速度の対数目盛上での増加は、(8) 式を用いると

$$\begin{aligned} \log(\dot{\epsilon} + \Delta \dot{\epsilon}) - \log \dot{\epsilon} &= \log(1 + \Delta \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}) \\ &\cong \Delta \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon} \\ &= -\Delta u/kT \end{aligned}$$

となり、 Δu に比例することになる。今休止時間が同じときには、 Δu はおおよそ同じと仮定すれば、対数目盛上でのひずみ速度の増加は休止時間が等しければほぼ等しいことになる。したがって休止時ひずみ ϵ_r の増加とともに、休止の影響がなくなるまでに要する

時間が増加することを合せ考えると, 休止時ひずみの増加とともにこう配が減少することになる。

A. J. Kennedy は, 鉛について常温で休止の影響を調べたような考え方を発表している⁽⁹⁾。それによると再負荷後のひずみ (およびひずみ速度) の増加に関与するのは (1) 式において t^n で表わされる部分のみと考え, ある時間 τ の間クリープして後休止を与えたとき, 材料の $m(0 \leq m \leq 1)$ の部分は休止により完全に応力を加える前の状態に戻り, 残りの $(1-m)$ の部分は休止の影響を全く受けず, 休止を与える直前の状態にそのまま止まると考えた。 m はこの場合休止までの時間 τ および休止時間 t_r のみに関係する定数とした。この考え方を本論文の場合に適用すると, 再負荷後のクリープ曲線は次式で表わされることになる。

$$\epsilon = \epsilon_0 + \beta \tau^n + m \beta (t - \tau)^n + (1 - m) \beta (t^n - \tau^n) \quad \dots\dots\dots (9)$$

右辺の最初の 2 項は ϵ_r の大きさを表わし, 第 3 項は m なる部分により再負荷後新たに始まるクリープひずみ, 第 4 項は残りの $(1-m)$ の部分が休止の影響なく再負荷後も元のクリープ曲線に沿っておこすクリープひずみを表わしている。この式により再負荷後のクリープをある程度表わすことができ, また第 5 図のような傾向も表わすことができるが, 実際に実験結果より m の値を求めると, 第 12 図に示すように一定とはならず再負荷後の時間により変化する。したがって低炭

素鋼の場合このような考え方を直ちに適用することはできない。

6. 結 言

0.12% 炭素鋼につき 450°C でクリープ試験を行い, 途中に応力 0 の状態を与えたとき再負荷後のひずみ, ひずみ速度につき次のことを明らかにした。

(1) 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 $\Delta\epsilon$ と休止時間との関係は次式で表わされる。

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

(2) 休止時間一定のとき増加ひずみは休止を与えるときのひずみの増加とともに減少の傾向にある。

(3) 再負荷後のひずみ速度と再負荷後の時間は対数目盛上で直線関係にある。その傾きは休止時間が永いほど, 休止時ひずみが小さいほど大きい。その直線関係を持続する時間は休止時のひずみが大きいほど大きい。

(4) 応力休止を与えることにより材料の一部分は完全に初期の状態に戻り, 残部は全くそのまま荷重をとめたときと同一の状態に止まるものと考えた Kennedy の考え方は, 直ちに低炭素鋼に用いることは出来ない。

注: —

- (1) 昭和 30 年 4 月 6 日 第 32 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 30 年 4 月 26 日。
- (2)(3) 正員, 京都大学工学部。
- (4) 正員, 京都大学工学研究所。
- (5) 准員, 京都大学大学院。
- (6) 本誌 791 ページ
- (7) たとえば A. H. Cottrell, Progress in Metal Physics, Vol. 4, p. 252 (1952)。
- (8) M. Tanenbaum and W. Kauzmann, J. Appl. Phys., Vol. 25, p. 451 (1954)。
- (9) A. J. Kennedy, Proc. Roy. Soc. A., Vol., 213, p. 492 (1952)。

第 12 図