きの鋭くないときの中心部での引張破断と, 鋭いときの周辺部でのせん断破断との両方の危険度の遷移点に相当し, とともに極端でないことのためである。

6. む す び

第1報で, 金属破断の一般的な現象論的法則を提示し, 各種の基本的な多軸応力状態での実験結果を良く説明できた。実際上の破断問題に適用するには, 応力・ひずみ分布の解明が必要であるという見地から, 本文では Neuber 切欠きの破断実験を行い, 近似的ではあるが一解法を試み, 破断法則を適用したところ, 切欠きぜい性破断の諸現象が良く説明されたようである。ただ破断問題には各種の因子の作用すること, ことに本問題では応力こう配・異方性等の因子を省略したことには不満足である。その他限界破断応力面の定量的資料が不足しているが, 今後試験設備の整備と相まち温度特性についての考察も含め, 今後の課題とする。

末筆ながら本研究に当り, 吉村慶丸先生より懇切・有益なる御指導を賜わったこと, および実験に当り竹中幸彦・阿部慎蔵・田近陽子の諸氏にお手伝い願ったことに厚く謝意を表します。

文 献

- (1) 筆者, 本誌 142 ページ.
- (2) 吉村・植村, 東大理工研報告, 6 (1952), 149.
- (3) 吉村・植村, 機械学会第 31 期総会講演会発表 (1954/4/16).
- (4) Brown etc., *J. Amer. Weld. Soc.*, 12 (1947) 554.
- (5) Dana etc., *N.A.C.A. Final Rep.* (1947/5).
- (6) E. Siebel, *Werkstoffaus*, 71 (1925).
- (7) P.W. Bridgman, *Trans. A.S.M.*, 32 (1943) 553.
- (8) N.N. Davidenkov & N.I. Spiridonova, *A.S.T.M. Proc.*, 46 (1946), 1147.
- (9) J. Aronofsky, *J.A.M.* (1951/3), 75.
- (10) E. Orowan, J.F. Nye, W.J. Cairns, *Theo. Res. Rep.*, No. 16/45, *Arm. Res. Dep.*, M.O.S., London (1945).
- (11) 金沢武, 造船協会講演会 (1954/11).

539. 376:669. 141. 24

軟 鋼 の 第 1 期 ク リ ー プ*

西原利夫** 平 修二*** 田中吉之助**** 大南正瑛*****

Primary Creep of Mild Steel

by Toshio NISHIHARA, Shūji TAIRA, Kichinosuke TANAKA and Masateru ŌNAMI

In this paper, an empirical formula is introduced concerning with the relation between transient creep rate, stress, and temperature at the primary creep of mild steel.

Experiments are made on 0.14% carbon steel to verify the formula, and it is found that the formula can be applied to fairly wide range of stress and temperature.

Concerning the graphical representation of the formula, the availability of "Master creep curve", proposed by F.R. Larson and J. Miller, for the primary creep of mild steel is discussed.

1. 緒 言

近時, 高温の下で使用される金属材料の急速な進歩に伴って, 高温の下における金属の塑性変形ならびに破損の問題を明らかにすることが重要となり, 応力, 温度, ひずみ および ひずみ 速度間の関係についての研究が種々進められて来た⁽¹⁾. このような関係は定常クリープならびにクリープ破断を対象としてそれぞれ考察が進められ, たとえば F.R. Larson および J. Miller⁽²⁾によって応力および温度と定常クリープ速度

あるいはクリープ破断時間との関係に対してその一図式表示が示されている。

本研究は軟鋼材料について, 第1期クリープ状態を対象とした短時間クリープ試験を行い, 上に述べたような関係, すなわち第1期クリープのクリープ速度がある範囲の応力ならびに温度といかなる関係にあるかを明らかにし, 比較的広い範囲の応力ならびに温度に対して適用しうるクリープ式を導いている。さらにまた従来示されて来たこれら関係の図示法, たとえば定常クリープ状態に対して提案された Larson-Miller 法を第1期クリープ試験結果に適用するに際して起る諸点を検討して, その適当な一表示法を提案している。なお, 本研究で実験的に導かれた第1期クリープに対するクリープ式は, 今後その定常クリープ式と

* 昭和31年3月20日 関西支部第31期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和31年12月3日。

** 正員, 京都大学工学部。

, * 正員, 京都大学工学研究所。

***** 准員, 京都大学工学研究所。

の関係を明らかにすることによって短時間試験結果と長時間試験結果との結び付きを考える一基礎にし、また既報⁽³⁾の第 1 期クリープにおける温度依存性の問題を定常クリープにおける同問題に発展させる一基礎にせんとするものである。

2. 実験材料および実験方法

(1) 実験材料 実験に用いた材料は 0.14% C の低炭素鋼で、その化学成分ならびに常温における機械的性質をそれぞれ第 1 表および第 2 表に示す。

第 1 表 化 学 成 分 (%)

C	Mn	Si	M	S
0.14	0.41	0.29	0.010	0.029

第 2 表 常 温 機 械 的 性 質

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

(2) 試験片 試験片は第 1 図に示すように標点距離が 50 mm、直径が 6 mm のもので、直径 1" の同一母材から切出したものを用いた。また加工後、900°C で 1 時間の真空焼なましを施している。

第 1 図

(3) 試験機および付属装置 用いた試験機は負荷装置がレバー式のもので、レバー比が 1:340 の 2

第 2 図

段レバー式の一定引張荷重クリープ試験機である。すなわち、第 2 図は試験機の概略図を示すもので、ナイフエッジ A, C でささえられる レバー AB および CD を経ておもり W により試験片 S に負荷されるようになっている。なお、本試験機の最大容量は 5 t である。

伸び測定は既報⁽⁴⁾の方法により 1/100 mm 目盛のダイヤルゲージを 2 個用いて、その読みの平均値をとっている。また加熱炉ならびに温度制御装置は同じく既報⁽⁴⁾の方法によっている。

(4) 実験条件 以上の試験片、試験機および付属装置を用いて次のような負荷応力および温度の下でクリープ試験を行った。すなわち、第 3 表は実験を行った負荷応力および温度の組合せを示すもので、初

第 3 表 実 験 条 件

初引張応力 σ kg/mm ²	試 験 温 度 T °C		
8.0	450	475	500
10.0	485 500		
12.0	450	475	500
15.0	450 460	475 485	500
17.0	440 450 460 475		
20.0	425 440 450		
27.0	400		

引張応力は 8.0~27.0 kg/mm² の比較的広範囲の応力段階を選んでいる。また温度は前報告⁽³⁾で述べたように、そのクリープひずみあるいはひずみ速度に及ぼす影響が大きいゆえ、温度範囲は自ら制限を余義なくされ、本実験では 400~500°C を選んだ。ここで試験時間は最長およそ 100 時間程度で実験はすべて第 1 期クリープを対象としている。なお、温度は温度制御装置により時間的変動を $\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲内に調整を行っている。

3. 第 1 期クリープの実験式

第 1 期クリープに関するクリープ式を実験的に導くため温度を一定として応力を変数とするときのクリープ式、および応力を一定として温度を変数とするときのクリープ式をそれぞれ検討し、それらの結果を用いて応力および温度をともに変数とするときのクリープ式について述べる。

(1) 温度を一定として応力を変数とするときのクリープ式 第 3 表に示し

た一連の条件の下における実験結果から、温度を一定とし応力をパラメータとして、ひずみ速度と負荷時間との関係を表わしたものを第3, 4および5図に示す。すなわち、これらの図はそれぞれ温度が 450°, 475°

第 3 図

第 4 図

第 5 図

および 500°C におけるひずみ速度と負荷時間との関係をそれぞれ両対数目盛上に示したものであり、両者の間にはほぼ直線関係が成立することがわかる。またこれらの直線は図にみられるように実験を行った程度の応力ならびに温度範囲においては互いにほぼ平行であるとみることができる。したがって第6図に示す

第 6 図

ようにたとえば、負荷時間 100 mn におけるひずみ速度と応力との関係を温度をパラメータとして両対数目盛上に示すと、両者の間には同じく直線関係が成立する。これらのことは前報告⁽³⁾で述べたように、クリープひずみ ϵ あるいは ひずみ速度 $d\epsilon/dt$ と負荷応力 σ ならびに負荷時間 t との間には温度一定するとき次式で表わされる関係のあることを示している。

$$\epsilon = \beta \sigma^m t^n \dots\dots\dots (1)$$

$$d\epsilon/dt = \beta n \sigma^m t^{n-1} \dots\dots\dots (2)$$

ここで β, m および n はそれぞれ定数である。軟鋼材料についての以上の実験結果によれば、(1), (2) 式の応力および負荷時間のべき数の中で、 m は第6図にみられるように、図中の直線のこう配を示すものであるが、これがパラメータとした温度によって幾分変ることから温度に関係するものであると考えられる。一方、 n は第3, 4および5図に見られるように近似的に温度ならびに応力には関係しない定数と考えることができ、このことは既に述べたとおりである⁽³⁾。なお n の値は一連の実験結果から 0.35 を得た。

(2) 応力を一定とし温度を変数とするときのクリープ式 応力を一定とした場合の温度とひずみ速度との間の関係を第7図に示す。すなわち、図は負荷時間 100 mn におけるひずみ速度と温度(ただし絶対温度)の逆数とを負荷応力をパラメータとしてそれぞれ片対数目盛上に示したもので、両者の間にはほぼ直線関係が成立する。このことは同じく前報告⁽³⁾で述べたように、応力一定なときの負荷時間 t におけるひずみ速度 $d\epsilon/dt$ と温度 T (絶対温度) との間には次式で表わされる関係のあることを示している。

$$d\epsilon/dt = A \cdot \exp(-K/T) \dots\dots\dots (3)$$

第 7 図

ここで A および K は応力ならびに負荷時間一定なるときそれぞれ定数である。したがって係数 A および K はそれぞれ負荷時間ならびに応力に関する定数と考えられ、これを次に述べる方法で実験的にその関数形を明らかにした。

係数 A : A は (3) 式からわかるごとく $1/T=0$ となるときひずみ速度 $dε/dt$ に等しいゆえに、実験結果から $1/T=0$ におけるひずみ速度を外そうして任意の応力ならびに負荷時間に対して A を求めることができる。したがって、このような外そうによるひずみ速度を仮定することによって、その結果いかなる便宜が得られるかということここでは問題にして以下考察を進める。この外そうにより求めたひずみ速度すなわち、 A は次式に示すごとく $T=\infty$ における (1) 式の関係を満足するものと仮定する。

$$dε/dt|_{T=\infty} = A = \text{const} \cdot \sigma^\alpha t^\gamma \quad (4)$$

ここで α および γ はそれぞれ定数とする。したがって $\log A$ は $\log \sigma$ ならびに $\log t$ に対してそれぞれ直線関係にある。すなわち、第 8 図 (a) および (b) はそれぞれ縦軸に $\log A$ を、横軸に t ならびに σ の対数をとって A の値を図示したものであり、 A が (4) 式で表わしうることを示している。ここで図よりわかるごとく定数 γ は第 8 図 (a) の直線のこう配より与えられるもので、その値は応力 σ に無関係に -0.65 で負の値をとり、(4) 式における γ は数値的に (2) 式の $n-1$ に対応するものであると考えることができる。

また定数 α は同じく第 8 図 (b) の直線のこう配より与えられるもので、その値は t に無関係に -7.25 で同じく負の値をとる。したがって第 8 図 (c) に示すように $\log A$ の縦軸に対して $(7.25 \log \sigma + 0.65 \log t)$ を横軸にとるとき、両者の関係は -45° のこう配を有する一直線的関係に表わしうる。このことは (4) 式の定数 γ を (2) 式の $n-1$ に対応させて $\log A$ と $(-\alpha \log \sigma - n-1 \log t)$ の図上で、両者の -45° のこう配を有する一直線的関係より定数 α を決定しうることを示している。ここで第 8 図 (c) における横軸の値が零なるときの縦軸の外そう値を C とすると (4)

第 8 図 (a)

第 8 図 (b)

第 8 図 (c)

式は次式のように表わすことができる。

$$A = 10^C \sigma^\alpha t^{n-1} \quad (5)$$

ここで C および α はそれぞれ材料により定まる定数と考えることができる。なおこの場合 C は 20.53 である。

係数 K : K は第 7 図に示すように (3) 式の片対数図表表示における直線のこう配から与えられるもので、軟鋼の第 1 期クリープについて本実験を行った程度の温度範囲では近似的に負荷時間には無関係に応力のみに関係する定数であることを前報告⁽³⁾で述べた。したがって K と応力との関係を調べると第 9 図のようになる。すなわち、図は縦軸に K を横軸に応力の対数をとったもので、 K は実験的に次式のように応力の減少関数であることがわかる。

$$K = a - b \log \sigma \quad (6)$$

ここで a および b はそれぞれ材料により定まる定数で

第 9 図

ある。なお、実験に用いた材料については $a=4.5 \times 10^4$, $b=1.9 \times 10^4$ である。

(3) 温度および応力をともに変数とするときのクリープ式 項目(1)で述べた温度一定なときのクリープ式に項目(2)で示す温度の因子を加えて温度、応力をともに変数とするときのクリープ式を導くと次のようになる。すなわち、(5)および(6)式をそれぞれ(3)式に代入し、これを(2)式の形に変形すると次式のごとくなる。

$$d\epsilon/dt = 10^c - \frac{a}{2.3} \frac{1}{T} \frac{b}{\sigma^{2.3}} \frac{1}{T} + \alpha t^{n-1} \quad (7)$$

ここで C, a, b, α および n はそれぞれ材料により定まる定数であり、実験に用いた材料についての各値は前述のとおりである。第10図は(7)式で表わされるひずみ速度-負荷時間関係がどの程度に実験結果を表わしうかを調べたものである。すなわち、図で破線で示したものは(7)式より各定数の値を代入して求めたものであり、実験結果をかなりよく表わしている。この

ことは(7)式で与えられるクリープ式が第1期クリープに対して、比較的広範囲の応力ならびに温度に対して適用しうることを示している。

また(7)式と(2)式とを比較して、(2)式における係数 β およびべき数 m をそれぞれ温度の関数として表わすと次式のごとくなる。

$$\beta = \frac{1}{n} 10^c - \frac{a}{2.3} \frac{1}{T} \quad (8)$$

$$m = \frac{b}{2.3} \frac{1}{T} + \alpha \quad (9)$$

ここで m はクリープひずみあるいはひずみ速度に与える応力依存性を表わす係数と解釈できるが、この係数は(9)式より温度が高くなるに従って小さくなることがわかる。このことは第6図に示すように、温度が高くなるに従って両対数目盛上図示の応力とひずみ速度間の直線のこう配はゆるやかになり、応力の増分に伴うひずみ速度の増分の割合が小さくなることを示している。

4. Master creep curve の第1期 クリープへの適用

緒言において述べたように、最近、Larson および Miller によって Master creep curve によるクリープ試験結果の一整理法が提案され、その後 S. S. Manson ら⁽⁵⁾によって同じクリープ破断時間を対象としたその修正法が試みられている。すなわち Master creep curve は応力 σ の対数をとった縦軸に対して $T(c - \log \dot{\epsilon})$ (ただし T は絶対温度、 $\dot{\epsilon}$ は定常クリープ速度、 c は定数で通常約 20 の値をとる) なるパラメータを横軸にとるとき、一直線関係で応力、温度および定常クリープ速度間にある関係を示しう。この Master creep curve の横軸のパラメータは定常クリープを対象としたものであるが、第1期クリープにおいても定常クリープの $\dot{\epsilon}$ 代りに平均ひずみ速度 ϵ/t (ただし ϵ, t はそれぞれ第1期クリープにおけるクリープひずみおよび負荷時間) でもって近似的に用いると報告されている。しかしこの近似法はきわめて大きな近似であるから第1期クリープについては、これに代るべきパラメータを考える必要があると思われる。またこれらの方法において材料に固有であるべき定数 c が応力によって変る傾向にあり、したがって定数 c の決め方についても検討されねばならないと思われる。本論文ではこの Master creep curve の第1期クリープへの適用に際して、その横軸のパラメータならびに定数 c の検討を行ったものである。

第 10 図

(1) 第1期クリープにおけるパラメータ 第1期クリープにおいては ひずみ速度 が負荷時間の経過あるいはクリープひずみの増大に伴って減少することから、Master creep curve の横軸のパラメータには負荷時間もしくはクリープひずみを考慮に入れなければならない。このため、いま (7) 式を用いてこの点につき考察する。すなわち、(7) 式を応力 σ について変形すると次式のようになる。

$$\log \sigma = \frac{a}{b+2.3\alpha T} - \frac{2.3}{b+2.3\alpha T} \times T(C+n-1 \log t - \log d\epsilon/dt|_t) \quad \cdots (10)$$

ここで $b+2.3\alpha T$ を $T \cong 700 \sim 900^\circ\text{K}$ の温度範囲に対して近似的に一定であると考えたと $\log \sigma$ は $T(C+n-1 \log t - \log d\epsilon/dt|_t)$ の一次関数で表わされる。このことは第1期クリープ試験結果を横軸のパラメータとして $T(C+n-1 \log t - \log d\epsilon/dt|_t)$ を用いて整理しうることを示しており、第11図は応力の対数

第 11 図

を縦軸に、 $T(20.53 - 0.65 \log t - \log d\epsilon/dt|_t)$ を横軸にとって実験結果を整理したものである。すなわち、図の各点は縦軸の各応力に対して、実験結果における任意の温度と負荷時間およびその負荷時間におけるひずみ速度から計算したパラメータの値を横軸にとったものであり、よく一直線上に表わしうる。また実線は $b+2.3\alpha T = 1.9 \times 10^4 + 2.3 \times (-7.25) \times 733 \cong 6.8 \times 10^3$ として (10) 式より求めたものでよく実験結果を表わ

すことができる。なお (10) 式における $b+2.3\alpha T$ を定数とおくことによって生ずる誤差はたとえば、温度の 100°K の変化に対して横軸のパラメータの値に与える変化は約 5% 以内である。したがって、この表示法から任意の応力および温度の下で任意負荷時間における ひずみ速度 を近似的に推定することができ、またその推定は十分信用しうるものである。

(2) パラメータの定数 C Larson-Miller 法では Master creep curve を表わす横軸のパラメータ中の定数 c の決定は第7図に示すような定常クリープ速度-温度関係図より $1/T=0$ における定常クリープ速度の外そうにより、求めることができるとされている。しかし必ずしもこの外そう値は一点に集まらず、したがって c が応力に無関係に決定しえないことが報告されている⁽⁵⁾。この点につき本論文で提案するパラメータでは第8図(c)に示すような方法で、定数 c を応力、負荷時間を含む一直線の外そう値として求められることから、定数 c はいちおう材料に固有な数値として取り扱うことができる。

5. 結 言

以上の実験的考察により、次のことが明らかとなった。

(1) 第1期クリープに関するクリープ実験式を (7) 式で表わされるように温度、応力の関数として導き、これが軟鋼材料について比較的広範囲の応力ならびに温度の下における実験結果をかなりよく表わすことを明らかにした。

(2) Master creep curve の第1期クリープへの適用には縦軸の応力の対数に対して、横軸のパラメータに $T(C+n-1 \log t - \log d\epsilon/dt|_t)$ を用いることによって実験結果をよく整理することができる。またこの表示法から任意の応力ならびに温度における任意負荷時間での ひずみ速度 を近似的に推定することができ、その推定結果は十分信用しうるものである。ただし、ここで C および n はそれぞれ材料によって定まる定数である。

文 献

- (1) たとえば
J.H. Hollomon & J.D. Lubahn, *G.E. Review*, (1947).
J.C. Fisher & C.W. Mac Gregor, *J. of App. Mech.*, Vol. 67 (1945), Vol. 68 (1946).
- (2) F.R. Larson & J. Miller, *Trans. ASME.*, Vol. 74, (1952).
- (3) 西原・平・田中・大南, 材料試験, 5 卷 36 号, (昭 31).
- (4) 西原・平・田中・弘中, 材料試験, 2 卷 3 号, (昭 28).
- (5) S.S. Manson & W.F. Brown, Jr, *Proc. ASTM.*, Vol. 53, (1953).