539.376 : 539.434 : 539.389.4

2 段変動周期応力をうけるクリープ*

(II) 非対称応力波形の下におけるクリープ変形

平 修二**, 田中吉之助**, 大路清嗣***, 紙谷利夫****

Creep of Mild Steel under Periodic Stresses of Rectangular Wave

(II) Creep Deformation under Unsymmetrical Periodic Stress Waves

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

Creep of mild steel was studied at a temperature of 450°C under unsymmetrical periodic stresses such that in a stress cycle the period under stresses higher than the mean stress was shorter than the period under stresses lower than the mean stress. It was found that in this case the "mechanical equation of state in solid" predicted a smaller deformation as compared with the one obtained by experiment, while it had been applicable without any appreciable error in the case of a symmetrical stress wave. It was also ascertained that the smaller the ratio of the loading time of the higher stress to that of the lower stress and the shorter the period of a stress cycle, the more the tendency was accentuated, although the lower stress affected little the total deformation under a given stress wave provided that the higher stress was constant.

1. 緒 言

前報⁽¹⁾で著者らは、階段状変動周期応力の基本応力波形が平均応力に対して点対称である場合のクリープ変形について軟鋼を用いて実験を行ない、これらの結果と固体状態力学方程式の考え⁽²⁾に基いて一定応力クリープ試験結果から計算した変形量とはきわめてよく一致するという結果を得た。しかしこれらの結果の考察において、このように実験結果と固体状態力学方程式に基く計算結果が、基本応力波形、負荷応力、温度等の試験条件のいかんにかかわらず常によく一致するのではなく、ある種の条件たとえば2段変動周期応力下の変形についていえば、1周期中に占める高応力負荷時間と低応力負荷時間の比が1より小となり、基本応力波形が平均応力に対して非対称となるに従って、実験結果と上記計算結果の相違も著しくなると考えられることを述べた⁽¹⁾。

さて機械部材にかかる応力波形は一般には非対称波形であると考えられるから、このような波形の下における変形量が、たとえば固体状態力学方程式に基いて計算された変形量とどのような関係にあるかを明らかに

にすることは工学上きわめて重要なことである。本報告は非対称波形の下における変形問題のうち、前報の考察の結果とも関連して、主として2段変動周期応力の高応力と低応力の負荷時間比が1より小さい場合を対象とし、1周期中に占める高応力負荷時間の割合、周期、負荷応力などの変形量に及ぼす影響を、前報と同様軟鋼について温度 450°C の下で実験的に調べたものである。

2. 実験装置および試験片

2.1 基本応力波形 第1図(I)⁽¹⁾ならびに(II)⁽³⁾に示した2種類の対称応力波形についてはすでに報告した。本報告においては主として(I)の変形波形である(III)について研究を進め、一部波形(II)を変形した(IV)の波形についても実験を行なった。図中の記号についてはそれぞれ

 $\sigma_{\max}$: 最高応力 $\sigma_{\min}$: 最低応力 $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$: 平均応力 $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$: 応力振幅 $\Delta\sigma$: 応力変動1回当たりの応力変動量 p : 周期 t : 試験時間 τ : 1周期中の最高応力負荷時間とする。なおここで $\bar{\epsilon}$ なる量を定義し

* 昭和 33 年 3 月 20 日 関西支部第 33 期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和 35 年 2 月 3 日。

** 正員、京都大学工学部。

*** 正員、大阪大学工学部 (大阪市都島区東野田町 9)。

**** 准員、住友化学工業会社。

$\bar{t}$: 最高応力総負荷時間 (各周期完了時に
おいては $\bar{t} = \sum \tau$)

とする. 本研究においては波形 (III) について τ/p の値を 50%*, 10% および 1.04% の 3 種類に選び, 変形量に及ぼす p および $\sigma_{\max}$ に対する $\sigma_{\min}$ の大きさの影響を調べ, さらに波形 (IV)** についても実験を行なっている. 以下記述の簡単のため $\sigma_{\max}$ および $\sigma_{\min}$ の各組合わせに対して第 1 表に示すような A, B, C, A', B', C' の記号をつけることにする.

なお本論文では基本となる単位として, 応力に kg/mm^2 , 時間に min を用い, またひずみ ϵ および τ/p は % で表わすことにする.

2.2 実験装置 波形 (III) については波形 (I) の下における実験に用いた既報の装置⁽¹⁾において, τ と p の関係を定める 2 枚のカム***の位相差を τ/p の値が所要の 50, 10 および 1.04 % になるよう変えた点以外は全く同様である. なお p の値が 1440 min (1 日) 以上の実験においては応力変動はすべて手働による. また波形 (IV) については, ここでは後述するように実験は一例のみについて行なわれ, かつ $\tau = 1440 \text{ min}$ (1 日) であったので, 特別な装置は用いず手働によるが, この波形は波形 (II) の負荷装置⁽³⁾によって, 時間間隔 τ ごとに負荷あるいは除荷する おもりの ΔW の大きさを各個について適当にかえ, かつその負荷および除荷順序を適当にすれば自動的に負荷することもできる.

2.3 試験片および試験材料 試験片は従来どおり⁽⁴⁾, 直径 6 mm, 標点距離 50 mm の丸棒試験片である.

試験材料は 0.14% および 0.15% の炭素含有量の軟鋼である. 前者は前報その他⁽¹⁾⁽⁵⁾で用いたものと同じである. それぞれの化学成分は第 2 表のとおりである. なお以下において両者を区別するため, 便宜上表中に示した SC-14-1 および SC-15 という記号を用いることにする. 試験片はいずれも直径約 25 mm の丸棒から機械仕上した後, 900°C で 1 時間真空炉中で焼なまされている. 第 3 表はこのような熱処理後の材料の常温機械的性質を示したものである.

3. 実験結果

試験はすべて温度 450°C の下で行なわれ, 変形量

* 第 1 図から明らかなように, この場合は波形 (I) と一致する.

** 波形 (IV) に対しては (II) と同様 $\tau/p = 12.5\%$ で一定である.

*** 文献 (1) 第 2 図(b) において C_1 および C_2 の記号で表わされている. τ/p の値をある値 x にしたいときには, 2 枚のカムの位相差 $\Delta\phi$ を $x \times 360^\circ$ にすればよい.

第 1 図

第 1 表 変動応力クリープ試験における応力範囲とその記号

記 号	応 力 範 囲	
	$\sigma_{\max} \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_{\min} \text{ kg/mm}^2$
A	18.0	16.0
B	18.0	12.0
C	18.0	0.0
A'	20.0	18.0
B'	20.0	14.0
C'	20.0	0.0

第 2 表 試験片材料化学成分

材料記号	化 学 成 分 %				
	C	Si	Mn	P	S
SC-14-1	0.14	0.29	0.41	0.010	0.029
SC-15	0.15	0.26	0.43	0.013	0.007

第 3 表 試験片材料常温機械的性質

材料記号	降 伏 点 $\sigma_s \text{ kg/mm}^2$	引 張 強 さ $\sigma_B \text{ kg/mm}^2$	破断伸び $\phi \%$	絞 り $\phi \%$
SC-14-1	24.9	39.1	37.4	72.8
SC-15	23.2	39.4	34.6	68.5

は対数ひずみで表わされている.

記述を簡単にするため, 波形, 応力範囲, p , τ などの組合せに対し, 各実験を第 4 表に示した記号で表わすことにする. 記号の意味については, たとえば (III-C-1440-10) について説明すれば, III は第 1 図の波形 (III) を, C は第 1 表に示した応力範囲 C すなわち $18.0 \sim 0 \text{ kg/mm}^2$ を表わし, 次の数字 1440 は p の値を min の単位で, また最後の数字 10 は τ/p の

値を%で表わしたものである*. なお $\tau/p=1.04\%$ の場合に対しては簡単のため1%と表わすこととし, また波形(IV)については, τ/p の値は常に12.5%であるのでこれを省略する.

3.1 一定応力クリープ試験結果 以下で変動応力下のクリープ変形量を固体状態力学方程式を用いて検討する関係上, ごく簡単に一定応力クリープ試験結果について述べておく.

SC-14-1についてはすでに報告し⁽¹⁾, クリープ曲線

第 2 図

第 4 表 変動応力クリープ試験の試験条件とその記号

記 号	波 形	応 力 範 囲 kg/mm ²	b min	τ min	τ/b %	試験時間 min	材 料
ⅢA-5760-50	Ⅲ	18.0~16.0	5760	2880	50	11520	SC-14-1
ⅢA-1440-50		18.0~16.0	1440	720	50	11520	
ⅢA-250-50		18.0~16.0	250	125	50	11625	
ⅢA-10-50		18.0~16.0	10	5	50	11520	
ⅢC-1440-10		18.0~0.0	1440	144	10	47520	
ⅢC-1440-1		18.0~0.0	1440	15	1.04	57600	
ⅢA'-1440-10		20.0~18.0	1440	144	10	38880	SC-15
ⅢB'-1440-10		20.0~14.0	1440	144	10	36000	
ⅢB'-1440-1		20.0~14.0	1440	15	1.04	34560	
ⅢB'-240-10		20.0~14.0	240	24	10	36240	
ⅢC'-1440-10		20.0~0.0	1440	144	10	28800	
ⅢC'-1440-1		20.0~0.0	1440	15	1.04	57600	
ⅢC'-13824-1		20.0~0.0	13824	144	1.04	69264	
ⅢC'-288-50		20.0~0.0	288	144	50	1872	
ⅣB'-11520	Ⅳ	20.0~14.0	11520	1440	12.5	25920	

* 波形(Ⅰ)に対して前報〔文献(1)〕で用いた記号とほぼ同じ.

は

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t^n + \kappa t \dots\dots\dots (1)$$

で表わされ, ε_0 , β , κ および n は応力の関数として次のように表わされる.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_0 &= 3.13 \times 10^{-6} \cdot \sigma^{4.41} \\ \beta &= 8.34 \times 10^{-4} \cdot \sigma^{1.91} \\ \kappa &= 3.25 \times 10^{-17} \cdot \sigma^{9.44} \\ n &= 2.31 \times 10^{-1} \cdot \sigma - 1.27 \times 10^{-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

SC-15については, 第2図に示すように, ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ と t の関係において, 応力の大きい場合には SC-14-1 の場合と異なり⁽¹⁾, 比較的早く第3期クリープが現われ, また実験初期においても実験結果は両対数グラフ上で直線関係からややはずれた傾向を示しているが, 本研究では第1期ならびに第2期クリープの範囲内で問題を取扱うものとし, これらの範囲でなるべく実験結果と合うよう ε_0 , β , κ および n を定めると次のようになる.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_0 &= 2.09 \times 10^{-1} \cdot \sigma - 3.14 \\ \beta &= 6.25 \times 10^{-1} \\ &\quad - \sqrt{1.06 \times 10^{-1} - 2.93 \times 10^{-3} (20 - \sigma)^2} \\ \kappa &= 1.88 \times 10^{-20} \cdot \sigma^{11.5} \\ n &= 2.57 \times 10^{-2} \cdot \sigma - 3.18 \times 10^{-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし(3)式は応力が22.0から14.0 kg/mm²の範囲で用いるものとする. 第2図の破線はこれらの式を用いて計算した $\dot{\varepsilon}$ と t の関係で, こ

これらの範囲では上の式によりよく実験結果を表わすことができる。

3.2 波形(III)に対する実験結果

$\sigma_{\max}$ を SC-14-1 に対しては 18.0 kg/mm^2 , SC-15 に対しては 22.0 kg/mm^2 と一定にし, 応力範囲 ($\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$), p および τ/p を種々変化させて実験を行なった。

3.2.1 応力範囲の影響 第3図は, 材料 SC-15 について $p=1440 \text{ min}$, $\tau/p=10$ および 1% の場合について, 応力範囲を第2表の A' ($20.0 \sim 18.0$), B' ($20.0 \sim 14.0$) および C' ($20.0 \sim 0$) の3種類に変えて行なった実験の結果を, ひずみ ϵ と最高応力の総負荷時間 $\bar{t}$ との関係で示したものである。図から τ/p が 10% および 1% の場合について, 応力範囲のいかにかわらず, それぞれの τ/p の値に対応して, ほぼ同一の ϵ と $\bar{t}$ の関係が対応していることがわかる。すなわち p , τ/p および $\sigma_{\max}$ の値が同一であれば $\sigma_{\min}$ の値は, 少なくとも $\sigma_{\max}=20.0 \text{ kg/mm}^2$ に対して ($\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$) が 2 kg/mm^2 程度以上であれば, ϵ と $\bar{t}$ の関係にはほとんど影響を与えないとみることができる。このことが成立するための $\sigma_{\max}$ の値に対する ($\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$) の値の限界がいかほどであるかは明らかでないが, $\sigma_{\max}$ の下で生ずる ひずみ に対して $\sigma_{\min}$ の下で生ずる ひずみ が十分小さいときにはこのような結果が現われるものと考えられる。なお図中の破線は(1)および(3)式を用い固体状態力学方程式に基いて計算した ϵ と $\bar{t}$ の関係で, これらの条件の下では実験結果は計算結果に比してきわめて大きな値となっている。これについては次項で考察することにする。

3.2.2 τ/p の影響 第4図は SC-14-1 について応力範囲および p を一定とし, τ/p の値を 10% および 1% に変えた場合の ϵ と $\bar{t}$ の関係を示したものである。図中破線は固体状態力学方程式に基く計算結果である*。図から明らかなように, 実験結果は固体状態力学方程式に基く計算結果とは一致せず, それよりも著しく大きい値を示し, かつ τ/p の値が小さくなるほどこの傾向が著しい。このことは SC-15 の場合につ

第 3 図

第 4 図

いても全く同様で, 第3図にみるように, 応力範囲と p が同一なら, τ/p の値が小さいほど, 与えられた $\bar{t}$ に対する ϵ の値は大きくなっている。

以上の二例は p を一定として τ を変化させて τ/p の値を変えたものであるが, 次に τ を一定として p を変化させて τ/p を変えた場合について調べてみよう。

第5図は SC-15 について τ の値を一定 (144 min) とし, p の値を 288 , 1440 および 13824 min に変化させることにより, τ/p を 50 , 10 および 1 (1.04%) に変えた場合の ϵ と $\bar{t}$ の関係を示したもので, この場合にも τ/p が小さいほど大きい ひずみ の生ずる傾向が認められる。なお図中破線は固体状態力学方程式に基く計算結果で, $\tau/p=50\%$ すなわち波形(I)の場合には, すでに前報で報告したのと同様に⁽¹⁾, 実験結果は破線とかなりよく一致している。第5図において, $\tau/p=1\%$ の場合の ϵ が $\tau/p=10\%$ の場合の ϵ よりも小さい値となっているようにみえるが, これは第1周期の終りすなわち $\bar{t}=144 \text{ min}$ における ひずみ ϵ_{144} の相違 (ばらつき) によるもので, $\bar{t}=144 \text{ min}$ 以後に生じた ひずみ $\epsilon'=(\epsilon-\epsilon_{144})$ と時間 $\bar{t}'=(\bar{t}-144) \text{ min}$ の関係で示せば, 第6図に示すように, 応力の繰返し回数が進むにつれて, τ/p の値の小さい場合の方が ひずみ が著しく大きくなることわかる。

3.2.3 p の影響 波形(I)および(II)に対

* 一般に固体状態力学方程式に基いて ϵ と $\bar{t}$ の関係を計算した場合, C および C' に対しては $\sigma_{\min}=0$ であるから, この場合の ϵ と $\bar{t}$ の関係は常に一定応力クリープ曲線と一致する。なお B および B' の場合にも計算結果は実質上一定応力の場合と一致することは, たとえば第3図にみるとおりである。これに対し A および A' の場合には一定応力の場合よりもやや大きい値となる。

する結果によれば⁽¹⁾⁽³⁾, 実験値のばらつきの範囲内で p の影響は認められなかった. しかしながら前項で示した結果から考えれば, これは変動応力下のクリープに対して p の影響が全然認められないということを表わすものではなく, 波形 (I) においては τ/p の値が 50% という比較的大きな値であるため, 応力変動のひずみに及ぼす影響が小さく, このためこれが実験値のばらつきの大きさと同程度となり, 周期の影響を識別することが困難となり, いちおう p の影響はないという結果になったものと考えられる. そこで本項ではまず τ/p が小さい場合について p の影響を調べ, これらの結果を考慮しながら再び $\tau/p=50\%$ の場合の結果⁽¹⁾ についても検討してみることにする.

第 7 図は SC-15 について τ/p が 1% の場合につい

て, 2 種類の p についての ε と $\bar{t}$ の関係を示したもので, また第 8 図は τ/p が 10% の場合についての結果を示したものである. いずれの場合も明らかに p の値が小さいほど大きいひずみが生ずることがわかる.

第 9 図は $\tau/p=50\%$ の場合の p の影響を調べるため前報の結果⁽¹⁾ の一部を ε と $\bar{t}$ の関係で表わしたものである. 図中破線は一定応力ならびに $p=10 \text{ min}$ の場合についての固体状態力学方程式による計算結果を示したものである. 実験値に多少のばらつきがあるため, 与えられた $\bar{t}$ に対する ε と p の間にはあまりめいりょうな関係はないが, 応力変動を与えたために生じたひずみの増加量に着目すれば, この場合にも周期が短いほどひずみが大きくなる傾向が認められる.

3.3 波形 (IV) に対する実験結果 SC-15 につ

いて (IVB'-11 520) の場合の ε と試験開始後の時間 t との関係を示したのが第 10 図である. 図中破線は固体状態力学方程式に基づく ε と t の関係の計算結果である. 図から明らかなように, 変形はほとんど最高応力負荷中に生じ, 他の応力下の変形量の全変形量に対する寄与はきわめて小さい. また実験値は計算値に対してやや大きい値を示している.

第 5 図

第 6 図

第 7 図

4. 実験結果の検討

4.1 固体状態力学方程式に基づく考察

固体状態力学方程式とは, よく知られているように, 「任意の瞬間のひずみ速度は, そのときのひずみ, 負荷応力および温度の 1 価関数で与えられる」とするものである⁽²⁾. すなわち

$$d\varepsilon/dt = h(\varepsilon, \sigma, T) \dots\dots\dots (4)$$

で表わされる. たとえば計算の基準となる資料として一定応力クリープ試験結果を用いるものとすれば, クリープ曲線を表わす

(1) 式とそれを t について微分して得られる次式

$$d\varepsilon/dt = n\beta t^{n-1} + \kappa \quad \dots\dots\dots (5)$$

から t を消去したものが (4) 式に相当する基礎式となる。

すでに述べたように、第 3 図から第 10 図までの各図において破線で示した曲線は、それぞれの実験条件に対してこの考え方に従って計算した ε と $\bar{t}$ の関係である。本実験の条件の下では実験結果は計算結果に比して常に大きな値を示し、この傾向は $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$

の値がある程度以上大きくなり、 τ/p が小さくなるほど、また p が短くなるほど著しい。これらの傾向は、すでに前報において固体状態力学方程式と著者の変形理論⁽⁶⁾との関係から定性的に推定した傾向⁽¹⁾とよく一致している。なおひずみに及ぼす上に示した三つの因子の影響のうち、特に τ/p の影響が著しく、 τ/p が 50% 以下となれば実験結果と計算結果の相違はしだいに顕著となり、特に τ/p が 10% 以下の場合にはこの影響が無視できない程度となる。

4.2 塑性変形理論⁽⁶⁾ に基づく考

察 前報では著者の提唱している塑性変形理論に基づいて固体状態力学方程式の成立限界を検討した⁽¹⁾。これらの結果はすでに上に述べたように少なくとも定性的には実験結果の傾向と一致している。しかしこれらの考察においては基礎となっている特性関数

$$F(\bar{\sigma}, \sigma, T) = 1/[(\partial \bar{\sigma}/\partial \varepsilon)' + (\partial \bar{\sigma}/\partial t)'/f(\bar{\sigma}, \sigma, T)] \quad \dots\dots\dots (6)$$

は $\bar{\sigma}$, σ および T の関数と考え取扱って来た。ただし (6) 式で $(\partial \bar{\sigma}/\partial \varepsilon)'$ は加工硬化率、 $(\partial \bar{\sigma}/\partial t)'$ は回復速度、また $f(\bar{\sigma}, \sigma, T)$ はひずみ速度を表わす関数である。ところがその後これら 3 種類の特性関数を軟鋼について求めた結果⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾、これら関数の性質がかなり明確となり、ことに回復速度 $(\partial \bar{\sigma}/\partial t)'$ については $\bar{\sigma}$, σ , T の他に階段的な応力変動を与えた場合には応力変動後の時間 t_i にも関係することが明らかとなったので、この点から前報の考察の結果に若干の補足を加える。ただし以下でも述べるように前報の考察の結果は定性的にはそのまま成立するものである。

さて $(\partial \bar{\sigma}/\partial t)'$ が t の関数となる場合には、(6) 式においてたとえ σ や T を一定とおいても、関数 F は $\bar{\sigma}$ のみの関数とはならず、したがって、前報の考察の基礎となった式

第 8 図

第 9 図

第 10 図

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon &= F(\bar{\sigma}, \sigma, T) d\bar{\sigma}, & d\varepsilon \geq 0 \\ dt &= \frac{F(\bar{\sigma}, \sigma, T)}{f(\bar{\sigma}, \sigma, T)} d\bar{\sigma}, & dt \geq 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

は変数分離形とはならず, したがって, たとえば ε と $\bar{\sigma}$ の関係についていえば, 問題を F と $\bar{\sigma}$ のみの関係から論ずることは厳密には正しくない. しかしながら (6) 式の $(\partial \bar{\sigma} / \partial t)'$ は $\bar{\sigma}, \sigma, T$ のみの関数で表わされる部分と, 変動後の時間 t_i にも関係する部分との和の形で与えられ, かつ t_i に関係する部分に対する時間の影響は $1/(1+c_1 t_i)$ (c_1 は定数) で表わされることがわかっている⁽⁷⁾ので, 応力変動後比較的短い時間の間はその影響の変化も大きい, ある程度以上時間が経過すると回復速度の時間による変化は少なくなり結局 t_i が適当に大きな値となれば $1/(1+c_1 t_i)$ の値はほぼ一定のある値とみなすことができるようになる. したがって回復速度の絶対値がある値だけ増加したものと考へて前報と同様に取扱ってもあまり大きな誤差はなく, 定性的には前報の考察の結果がそのまま成立するものと考えられる.

以上のほか回復速度については

(i) $\bar{\sigma}, \sigma, T$ のみの関数として表わされる部分は, 別の形で書き表わせば, ほぼ各瞬間のひずみ速度に比例する*.

(ii) t_i にも関係する項は, t_i の他に応力変動直前の $\bar{\sigma}$, ひずみ速度, ひずみ等の値が関係し, 応力変動後のこれらの値は関与しないという特徴がある⁽⁵⁾⁽⁷⁾. 一般に応力減少後のひずみ速度は, 減少直前の値に比べて著しく小さいのが普通であり, したがって各瞬間のひずみ速度に比例する上記 (i) の回復速度は, t_i の比較的小さい範囲では, (ii) の応力変動直前のひずみ速度などに関係する回復速度に比して無視できるようになることが考えられる. これが本実験において, $\sigma_{\max}$, τ/p および p が同一であれば, 低応力 $\sigma_{\min}$ がほとんど結果に影響を及ぼさなかった原因であると考えられる. τ/p の影響についても, τ/p の値が小さいほど回復のための時間が増すということから説明でき, また p を一定にして τ を変化させた場合の結果については, τ が小さいほど応力変動直前のひずみ速度が大きくなり, したがって t_i に関係する回復速度が大きくなるということが結果に大きく響くためと解釈することができる. なお p の影響については (ii) の回復速度の時間依存性が上述のように $1/(1+c_1 t_i)$ に比例するということから容易に理解できることである.

以上のことから $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ の値がある程度以上

大きくなり, τ/p および p が小さくなるほど, 換言すれば回復現象が顕著になるような条件の下では固体状態力学方程式の成立が困難となることが理解される.

5. 結 論

平均応力に対して上下非対称な応力波形をもつ2段変動周期応力下のクリープ変形について軟鋼を用い温度 450°C の下で実験を行ない, 応力波形の最高応力 $\sigma_{\max}$ および最低応力 $\sigma_{\min}$ の値, 1 周期中における最高応力負荷時間 τ と周期 p の比 τ/p , および周期 p の変形量に及ぼす影響について調べ, これらの結果を固体状態力学方程式および著者の変形理論に基づいて検討した結果次の結論を得た.

1. τ/p の値が 50% 以下の非対称 2 段変動応力下のクリープ変形量は, 固体状態力学方程式に基づいて計算した変形量に比べ一般に大きな値となり, 実験値は計算値に対して危険側の値となる.

2. 上の傾向は $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ および p (または τ) の値が同一の場合, τ/p の値が小さくなるほど著しい.

一般に最高応力の総負荷時間 $\bar{t}$ が同一の場合, 他の条件が同じなら τ/p が小さいほど生じたひずみは大きくなる.

3. 他の条件が同一のとき, p が小さいほど与えられた $\bar{t}$ に対するひずみは大きくなる. したがって p が小さいほど実験値と固体状態力学方程式に基づく推定値との差は大きくなる.

4. $\sigma_{\max}$, τ/p および p が同一の場合, $\sigma_{\min}$ の大きさは, $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ の値がある程度以上であれば, 生ずるひずみの大きさにほとんど影響を及ぼさない.

5. 2 段変動応力波形以外の波形の下でも, 高応力負荷時間と低応力負荷時間の比が小さくなれば, 固体状態力学方程式に基づく計算値と実験値のずれは大きくなり, 危険側のひずみを生ずる傾向にある.

終りに臨み本研究で用いた材料 SC-15 を提供された住友金属工業会社鋼管製造所に厚く感謝の意を表する.

文 献

- (1) 平, 田中, 大路, 春本, 機械学会論文集, **25**, 151 (昭 34-3), 155.
- (2) C. Zener & J.H. Hollomon, *J. Appl. Phys.*, **17** (1946), 69.
- (3) 西原, 平, 田中, 大路, 材料試験, **7**, 56 (昭 33), 254.
- (4) たとえば西原, 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **25**, 143 (昭 33-7), 441.
- (5) 平, 田中, 大路, 機械学論文集, **25**, 159 (昭 34-11), 1048.
- (6) 西原, 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **24**, 143 (昭 33-7), 452.
- (7) 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **25**, 159 (昭 34-11), 1056.
- (8) 平, 田中, 大路, 機械学会論文集, **26**, 164 (昭 35-4), 599.

* 本理論によればひずみ速度は $\bar{\sigma}, \sigma, T$ のみの関数として表わすことができる.