620.178.38 : 539.431 : 539.376

13 クロム鋼の引張繰返し曲げ高温疲れならびに動クリープ*

平 修 二**, 田中吉之助**, 小寺沢良一**, 井上 睦 夫***

Fatigue and Dynamic Creep Properties of 13 Cr Steel at Elevated Temperature under Combined Stresses of Static Tension and Alternating Bending

by Shūji TAIRA, Kichinosuke TANAKA, Ryōichi KOTERAZAWA,
and Mutsuo INOUE

The fatigue and dynamic creep tests were made under simulated service condition of turbine blades, i.e. combined stresses of static tension and alternating bending at elevated temperature of 450°C. The frequency of alternating bending stress was 780 cpm and the test period was 0.2 to 200 hrs.

The results are summarized as follows :

1. Alternating bending stress superimposed on static tensile stress reduces the fatigue life.
2. Alternating bending stress which is combined with static tensile stress does not always increases creep strain. In the range of small stress ratio (alternating bending stress divided by static stress) alternating bending stress clogs the increases in creep strain.
3. The hindrance of increase in creep strain by the alternating bending stress is interpreted by the hardening effect of material by stress alternation.
4. An analysis was made which led to the estimation of dynamic creep strain under combined alternating bending stress and static tensile stress by using static tensile creep data.

1. 緒 言

タービン翼は運転状態において遠心力による静引張応力と振動による繰返し曲げ応力を受ける。このような応力状態の下における疲れ試験を目標として、さきに筆者らの一部は、高温引張繰返し曲げ疲れ試験機を試作し⁽¹⁾、これを使用しタービン翼に用いられている13クロム鋼について、高温において静引張応力が曲げ疲れ強さに及ぼす影響に関する基礎実験を行い、その結果を報告した⁽²⁾。この疲れ強さとともに、上のような応力状態の下におかれる機械部分の設計に際して考慮しなければならない重要な問題として、引張繰返し曲げ応力の下におけるクリープの問題がある。これに関連して、引張圧縮変動応力の下におけるクリープの研究が従来行われて来ているが^{(3)~(8)}、タービン翼の受ける応力状態をより忠実に再現した上記応力下のクリープについては、まだ研究例を見ない。そこで、本報告ではこの問題をとり上げ、静引張応力の上に繰返し

曲げ応力が重畳して加わった場合にクリープ伸びが受ける影響について実験ならびに考察を行った結果について報告する。

2. 記 号

- σ : 応力(変形前の試験片断面に関する公称応力)
 ε : クリープひずみ(静応力,あるいは引張圧縮変動応力の下におけるひずみ。ただし、瞬間塑性ひずみをも含めた全ひずみとする)
 ε_0 : クリープひずみ(引張繰返し曲げ応力の下におけるひずみ。上と同様全ひずみとする)
 σ_t : 静引張応力(変形前の試験片断面に関する公称応力)
 σ_{ba} : 繰返し曲げ応力振幅(弾性計算による公称応力)
 $A_b = \sigma_{ba}/\sigma_t$: 応力比(引張繰返し曲げの場合)
 σ_m : 平均応力
 σ_a : 応力振幅
 $A = \sigma_a/\sigma_m$: 応力比 } 引張圧縮変動応力の場合
 ω : 繰返し応力の角周波数
 t : 時間

* 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33年6月16日。

** 正員, 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)。

*** 准員, 住友金属工業会社鋼管製造所。

$(\sigma_t)_0$: 引張繰返し曲げ応力の下における同一ひずみを同一時間に生ぜしめるとき静引張応力
 σ_0 : 引張圧縮変動応力の下における同一ひずみを同一時間に生ぜしめるとき静引張応力

$$\psi_b = \sigma_t / (\sigma_t)_0, \quad \psi_t = \sigma_m / \sigma_0$$

α : 遷移クリープの応力指数

β : 遷移クリープの時間指数

a : 遷移クリープの係数

h : 板の厚さ

E : 弾性係数

3. 実験装置

(a) 試験機 本実験に使用した試験機の詳細はすでに報告したとおり⁽⁴⁾で、その原理図のみを第1図に示す。この図は試験機の側面図であるが、試験片⑥付近の部分(⑤, ⑨および⑩)のみは、その構造を示すため平面図を書入れてある。本試験機は試験片⑥に、おもり⑧により、レバー⑦を介して静引張荷重を与え、回転する不つりあい輪②による強制振動を利用して一定振幅の繰返し曲げを与えるもので、繰返し速度は780 cpmである。

(b) 加熱装置, 温度測定装置および温度調整装置

試験片の加熱はニクロム線を発熱体とする電気炉を使用し、温度測定はアルメルクロメル熱電対と電位差計式温度計によった。また、白金抵抗体の電気抵抗の温度による変化を利用してサイラトロンの位相制御を行う方式による自動温度調整を行い、その時間的変動を450°Cにおいて $\pm 2^\circ\text{C}$ におさえている⁽¹⁾⁽⁹⁾。

(c) 伸び測定装置 伸び測定には顕微鏡を使用した。すなわち、第2図に示したごとく、試験片の上下両面よりそれぞれ2本の18-8ステンレス鋼製測定用棒を取り出し、その先に正確な直線のedgeを持った薄板を取りつけてスリットを作り、それに光をあてて、その間隔を接眼ミクロメータ付顕微鏡で読みとることにより行った。繰返し曲げによる振動状態の下においても、この方法により2/100 mm程度まで読取りが可能である。

4. 実験

(a) 試験材料 試験材料は住友金属製鋼所の提供になる蒸気タービン翼材13クロム鋼で、その化学成分、熱処理条件、常温における機械的性質を第1表、第2表に示す。

(b) 試験片 試験片の形状寸法は第3図に示したごとくで、(a)は高温疲れ試験用、(b)は動クリープ試験用(有効標点距離は附録IIに示すごとく、

① 振動レバー ⑤ 曲げ荷重用腕 ⑨ 引張荷重用押棒
 ② 不つりあい輪 ⑥ 試験片 ⑩ 加熱炉
 ③ 電動機 ⑦ 引張荷重用レバー ⑪ 板ばね
 ④ 連接棒 ⑧ おもり

第1図 試験機原理図

① 試験片取付用チャック ⑤ 薄板
 ② " ⑥ 顕微鏡視野
 ③ 伸び測定用取出棒 ⑦ 試験片
 ④ " ⑧

第2図 伸び測定装置

第1表 化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.15	0.46	0.36	0.027	0.012	0.36	11.97	残余

第2表

下降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸 び %	熱 処 理
63.3	74.6	29.4	950°C 30分加熱 750°C 60分焼もどし 油焼入 炉中冷却

12.6~13.8 mm)である。

(c) 実験およびその結果 以上のごとき装置および材料を使用して、次の条件の下において高温疲れ試験および動クリープ試験を行った。

試験温度 450°C, 繰返し速度 780 cpm

応力比 $A_b=0, 0.24(0.25), 0.60, 8.0$

試験時間 200 h まで

なお、第3図(a)の試験片のうち厚さ4 mmのものは $A_b=0, 0.24, 0.6, 6 \text{ mm}$ のものは $A_b=8.0$ の試験に使用した。第4図、第5図に実験の結果を示す。第4図は高温疲れ試験における破断までの繰返し

(a) 高温疲労用試験片

(b) 動クリープ用試験片

第3図 試験片

(a) 静引張応力と破断繰返し数の関係

(b) 最大応力と破断繰返し数の関係

第4図 高温疲労試験結果

数と静引張応力〔(a)図〕および最大応力 $\sigma_t + \sigma_{ba}$ 〔(b)図〕の関係を示す線図であり、第5図は動クリープ試験における時間と動クリープひずみ(瞬間塑性ひずみを含む全ひずみ)の関係、すなわちクリープ曲線を示したものである。ただし、第4図における応力比0の曲線は試験片(a)〔第3図〕についての静クリープ試験結果であって、この場合の横軸の繰返し数は、破断時間を繰返し速度 780 cpm に相当する繰返し数に換算したものである。

(a)

(b)

(c)

第5図 引張繰返し曲げ動クリープにおける負荷時間とクリープひずみの関係

5. 考 察

(a) 高温疲れ試験結果 第4図(a)において静引張応力に繰返し曲げ応力が加わり、応力比が大きくなるにつれて、同一の静引張応力に対しては寿命が短くなり、また同一寿命に対して与え得る静引張応力は小さくなってゆくことが認められる。また、第4図(b)の最大応力を縦軸にとって表わした線図では、同一の最大応力に対しては、応力比0.6の場合が最も寿命が長く、これより応力比が大きい場合も小さい場合もともに寿命が短い。これは、Lazan らがアルミニウム合金 24S-T4 について得ている結果⁽⁸⁾とも傾向を一にしている。

(b) 引張繰返し曲げ動クリープ試験結果 第5図(a)は応力比が0の場合、すなわち、静引張応力のみの場合であり、(b)(c)はそれぞれ、静引張応力にその0.25, 0.60倍の繰返し曲げ応力が重畳した場合のクリープ曲線である。

これらの結果を比較するため、負荷後10時間および50時間における負荷応力とひずみの関係を示したものが第6図である。この図において、応力比0と0.25の二つの場合を比較すると、応力(あるいはひずみ)の大きい範囲では、同じ静引張応力に対して同一時間に生ずるひずみは、応力比0.25の場合の方が大きい。応力の小さい範囲では逆の傾向を持つ。言い換えれば、静引張応力に繰返し曲げ応力が加わることにより、応力(あるいはひずみ)の大きい範囲ではクリープが促進されるが、小さい範囲ではかえって妨げられる。これらの移りかわりの点における応力は50時間の場合も、10時間の場合もほぼ同一(43 kg/mm²)で、ある静引張応力以下では繰返し曲げ応力の存在により、クリープがかえって妨げられるといえる。応力比0.60の場合には、実験を行った応力範囲全体にわたって、繰返し曲げ応力がクリープを促進する傾向を示しているが、この場合も、応力(あるいはひずみ)の小さい範囲では、大きい範囲に比して促進の程度が少くなる傾向がみられる。

このような繰返し曲げ応力がクリープに及ぼす影響を今少し検討するため、ある繰返し曲げ応力 σ_b 、静引張応力 σ_t の組合わせ応力の下におけるひずみと同じひずみを同じ時間に生ぜしめるような静引張応力 $(\sigma_t)_0$ をとり、

$$\phi_b = \sigma_t / (\sigma_t)_0$$

なる比を考える。 $\phi_b < 1$ であれば、繰返し曲げ応力はクリープを促進しており、 $\phi_b > 1$ であれば妨げていることとなる。第7図は、負荷時間50時間に対する ϕ_b

第 6 図

第7図 実験による ϕ_b の値

とひずみとの関係を応力比0.25, 0.60の両方の場合について第6図をもとにして描いたもので、いずれの場合にもひずみが小さいほど ϕ_b の値が大きくなり、クリープの促進から妨害の方向へ移ってゆく傾向がめいりょうに認められる。

(c) 時間強度線図 上述の高温疲れならびに動クリープ試験結果を、横軸に静引張応力、縦軸に繰返し曲げ応力をもって表わした時間強度線図としてまとめたものが第8図である。(a)図は50時間、(b)図は10時間の寿命に対するもので、それぞれの図中に破断に対する線図、2%, 1%のひずみに対する線図を併示してある。本図より、破断寿命を50時間あるいは10時間以上とした場合の許容応力範囲、および許容ひずみ1%あるいは2%に対する寿命を50時間あるいは10時間以上とした場合の許容応力範囲を知ることができる。実際には、破断、ひずみの両方から許容応力が制限されるから、両方の許容応力範囲に属する応力範囲が使用可能な応力範囲となる。また、前項において述べた繰返し曲げ応力がクリープに及ぼす影響は、(a)図にめいりょうに表われており、 $\epsilon=1\%$ の曲線が、応力比の小さい範囲で応力比0の場合の点より右へ張り出していることは、繰返し応力がクリープに対する強度を増加せしめていることを示している。 $\epsilon=2\%$ の曲線および(b)図の、許容ひずみを規定し

た場合の二つの曲線にこの傾向の示されていないのは、これらに対する応力が大きく、前項で述べた繰返し曲げ応力がクリープを促進する範囲にはいっているためである。破断に関する曲線について強化の傾向が示されていないのも、同じ理由、すなわち、破断を生ぜしめるために大きい応力を必要とするため、繰返し曲げ応力がクリープを促進する応力範囲にはいっているという理由によるものとみなしてよいであろう。

(d) 繰返し曲げ応力による強化について 以上引張繰返し曲げ動クリープ試験結果を検討した結果、応力がある値以下であれば、応力比の小さい範囲では、静引張応力に繰返し曲げ応力が加わることにより、クリープひずみはかえって少くなることが認められた。そしてまた、クリープの促進が起る応力の範囲においても、附録Iに示すごとく、固体状態の力学方程式が成立するものとして、計算した結果よりもやや促進の程度が少い。この現象の原因としては、繰返し応力により材料が硬化を受け、そのためにクリープ促進の効果が減殺されて、ある場合にはかえってクリープが妨げられる結果となることが考えられる。以下、これについて検討を加える。

本実験における繰返し応力は曲げ応力であって、試験片中央部では0で表面で最大となっているので、もし繰返し応力による硬化が生じているならば、表面におけるかたさが内部におけるかたさよりも大きいはずである。このことを検討するために、試験片断面におけるかたさ分布を微小かたさ計 (Micro Vickers Hardness Tester) にて測定した。その結果を第9図に示す。上の図は繰返し曲げ応力がなく、静引張応力のみの場合であり、下の図は静引張応力の0.25倍の繰返し曲げ応力が加わった場合である。図に明らかなごとく、繰返し曲げ応力のない場合は、表面において内部よりややかたさが低いものに対して、繰返し曲げ応力が加わった場合は、表面におけるかたさが高く、明らかに繰返し応力による硬化を示している。

次に、この硬化の原因が問題となるが、本実験結果に示されているごとき繰返し応力によるクリープ強度の増加は、ある種の耐熱合金に関する引張圧縮動クリープ試験においてしばしば得られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この理由については、まだ明確な結論は得られていないようであるが、繰返し応力による析出硬化、時効等の冶金学的変化の促進がその原因であろうと言われている⁽⁶⁾。本実験結果においても、このような現象にその原因があることを考えて、試験片の顕微鏡組織を調べた。その一例として、応力比 $A_b=0.6$ における試験を実施した後の試験片について、繰返し応力が加わっていない

第 8 図

第 9 図

い中央部と繰返し応力の最も大きい表面附近における組織を第10図に示す。これらの写真に現われた限りにおいては、両者の間に特記すべき差異は認められない。この結果のみを見ると上述のごとき繰返し応力による組織変化の促進は生じていないかのごとくであるが、たとえば、析出硬化過程において、硬化の最も著しい時期は、析出物がまだ顕微鏡で見ることのできない微粒子状態で分散している時期とされているから、これらの顕微鏡組織に変化がないことのみからそのように結論することはできない。ただ、この組織が750°Cにおいて焼もどし処理をして得られたもので、しかも

試験温度は 450°C であることを考えあわせて、上述のような冶金学的変化よりも、むしろ、繰返し応力による機械的な加工硬化が上記実験結果の原因であることも考えられる。

6. 結 言

タービン翼が運転状態において受けると考えられる引張繰返し曲げ応力の下における高温疲れ試験、および動クリープ試験をタービン翼材 13 クロム鋼について行い、次の結果を得た。

1. 静引張応力に繰返し曲げ応力が加わることにより、破断寿命は減少する。
2. クリープひずみに関しては、静引張応力に繰返し曲げ応力が加わった時、必ずしも増加するとは限らず、応力が小さい場合、応力比の小さい範囲ではかえって減少する。
3. 上記、繰返し曲げ応力によるクリープひずみの減少は、繰返し応力による材料の硬化に基くものごとくである。

(a) 中央部

(b) 表面附近

倍 率 ×600 腐食液 王 水
 $A_b = 0.6$ $\sigma_t = 34.7 \text{ kg/mm}^2$
 $\sigma_{ba} = 20.8 \text{ kg/mm}^2$ $t = 50 \text{ h}$

第 10 図 顕微鏡組織

4. 固体状態の力学方程式が成立すると考え、断面内の弾性的曲げ応力分布を仮定して、静クリープ試験結果から引張繰返し曲げ動クリープ特性を推定するための解析を行い、実験結果の傾向を比較的良く表わす結果を得た(附録)。

終りに、本研究に関して、終始御鞭達を賜った京都大学西原利夫名誉教授に深甚の謝意を表し、また、試験材料を提供された住友金属工業会社製鋼所に対して感謝の意を表する。

附録 I. 引張繰返し曲げ応力の下における動クリープの解析

筆者らは、さきに固体状態の力学方程式の考えに基づいて、静クリープ試験結果から引張圧縮動クリープ特性を推定することを目的とした解析を行い、低炭素鋼についての実験結果と比較的良く一致することを示した⁽¹⁰⁾。ここでは、この考え方を更に引張繰返し曲げ動クリープの場合に拡張して解析を試みる。

上記、引張圧縮動クリープの場合の解析結果によると、一定応力の下における静クリープひずみを今回の実験に採用したごとく遷移クリープのみをとり上げ、

$$\epsilon = a\sigma^\alpha t^\beta \dots\dots\dots (1)$$

とし、応力を、本研究の実験条件に従って

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t \dots\dots\dots (2)$$

とすると、この場合のひずみは

$$\epsilon = a\sigma_m^\alpha t^\beta I^\beta$$

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 + A \sin \omega t)^{\alpha/\beta} d(\omega t) \dots\dots (3)$$

で表わされる。

今、これと同一の時間に同一のひずみを生ずる静応力を σ_0 とすれば、(1)、(3) より

$$\psi_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = I^{-\beta/\alpha} \dots\dots\dots (4)$$

これは前節で定義した ψ_t の引張りの場合に相当するもので、(3) において $I > 1$ 、したがって (4) において $\psi_t < 1$ であるから、この結果は、繰返し応力の存在によってクリープが促進されることを示している。

さて、引張繰返し曲げ応力の場合は、断面における応力分布が引張圧縮の場合のごとく一様でない、これを考慮する必要がある。引張繰返し曲げ応力を受ける板を表面に平行な多くの薄い層にわけて考えると、各層の受ける平均応力は同一であるが、繰返し応力は、中央では作用せず、表面に近づくほど大きくなる。したがって、応力比 A の値も

各層によって異なる。したがって、もし、これらの各層が互に拘束されず、自由に伸び得るものとするれば、(3)式によれば表面に近い層ほど伸びが大きくなるであろう。しかし、実際は、各層の間には拘束があり、自由に伸び得ないから表面には圧縮、内部には引張りの応力が発生し、応力の分布が時間とともに変化してくるであろう。このことを考慮に入れた解析は後日に譲ることとし、ここでは、曲げによる応力分布の存在が動クリープに及ぼす影響を近似的に求めるため、応力分布は時間的に変化せず、弾性応力分布をなしているものとして計算を行ってみる。

試験片断面の中心を原点とし、厚さの方向に y 軸をとる。そして、ある一定の時間動クリープ試験を行った後、各層が自由に伸び得るものとした場合に $\varepsilon = \varepsilon(y)$ なるひずみの分布が生ずるとする。断面が平面に保たれるとするとひずみは y に沿って一様な値 ε_0 を持たなければならない。このために生ずる残留応力を σ_r とし、

$$\sigma_r = E(\varepsilon - \varepsilon_0) \dots \dots \dots (5)$$

とすると、全断面にわたって σ_r を積分した値は 0 でなければならないところから、一様なひずみ ε_0 は

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon(y) dy \dots \dots \dots (6)$$

(6) 式の ε を代入して

$$\varepsilon_0 = \alpha \sigma_m^\alpha t^\beta I_0^\beta$$

$$\text{ただし } I_0^\beta = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} I(y)^\beta dy \dots \dots \dots (7)$$

すなわち、 ε_0 を (3) 式と同じ形の式で表わしたとき、 I_0^β は I^β の断面全体にわたっての平均値に等しい。

(7) 式を計算するにあたって第 6 図の曲線から α を求めると $\alpha = 4.2$ と $\alpha = 20$ が得られるが、以下 $\alpha = 4.2$ の応力範囲で計算を進めることとする。このとき $\beta = 0.38$ であって、(1) 式に相当する実験式は

$$\varepsilon = 3.8 \times 10^{-8} \sigma^{4.2} t^{0.38} \dots \dots \dots (8)$$

$$\text{ただし } \varepsilon : \%, \sigma : \text{kg/mm}^2, t : \text{h}$$

(3) 式、(7) 式および (8) 式の定数を用いて I_0 を求めることができる。このようにして求めた I_0 を用いて、引張圧縮の場合と同様に ψ_b の理論値を求めると

$$\psi_b = I_0^{-\beta/\alpha} \dots \dots \dots (11)$$

第 11 図に ψ_b , ψ_t の (4), (11) 式による計算値を実線で示している。この結果は、繰返し曲げ応力は引張圧縮繰返し応力に比してクリープひずみを増加せしめる作用がかなり小であることを示している。

実験結果と比較すると、引張圧縮動クリープの場合の実験点は、低炭素鋼について筆者らが実験したところでは、ほぼ理論曲線と一致する⁽¹²⁾なのである、図の

第 11 図

ψ_b 曲線は、引張繰返し曲げの場合の実験結果が引張圧縮の場合よりも著しくクリープ促進の程度の少ない方向へずれている傾向をある程度良く表わしていると言える。定量的な一致を示していないのは、一つには、本文中において考察したとき繰返し応力による硬化に原因することが考えられ、また一つには、理論的解析の過程において、弾性応力分布を仮定したため、クリープひずみを過大評価していることが考えられる。後者については後日更に厳密な解析について報告する予定である。なお、同じく上の計算において、 $\alpha = 4.2$ としたことは、繰返し曲げ応力が加わった場合、応力変化範囲が $\alpha = 20$ の範囲に及んでいることと矛盾するが、これはクリープひずみを過少評価したこととなっているので上の差異の原因とはなり得ない。

附録 II. 有効標点距離

本実験に使用した試験片は、第 2 図に示したごとく、平行部分の両端に円弧の部分を持っているので、有効標点距離を求めておく必要がある。これを計算するにあたって次の仮定を置く。

1. 試験片断面の応力は一様であって、荷重を断面積で割ったものに等しい。
2. 各断面位置におけるひずみは、その断面における応力のみにより定まり、それに隣接する部分の影響は受けない。

今、円弧部分の任意断面における応力、ひずみおよび断面積をそれぞれ σ , ε_1 , S 、平行部分のそれを σ_0 , ε_0 , S_0 とすれば、荷重 P は各断面について同一の値を持つから、

$$P = \sigma S = \sigma_0 S_0 \quad \therefore \sigma / \sigma_0 = S_0 / S$$

第 5 図に示した結果より、

$$\varepsilon = \sigma^\alpha$$

と表わし得るから

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma^\alpha/\sigma_0^\alpha = S_0^\alpha/S^\alpha$$

円弧部分の長さを l , 伸びを Δl とすると

$$\Delta l = \int_0^l \varepsilon dl = \int_0^l \left(\frac{S_0}{S} \right)^\alpha \varepsilon_0 dl = \varepsilon_0 l_e$$

$$\therefore l_e = \int_0^l \frac{dl}{(S/S_0)^\alpha}$$

この l_e が長さ l の円弧部分と同一の伸びを生ずる平行部分の長さである。したがって平行部分の長さを L_0 とし, この両端に円弧部分があることを考慮して,

$$L_e = L_0 + 2l_e$$

とおけば, L_e は求める有効標点距離を与える。ここで注意すべきは, α の値によって有効標点距離が異なってくることである。本実験結果においては, 第 6 図に示したように応力の範囲によって α の値が異なっているから, 一本の試験片について, この両範囲に応力範囲がまたがる時は, 二つの部分に分けて積分しなければならない。このようにして計算した有効標点距離を第 3 表に示す。

文 献

(1) 西原, 平, 田中, 村田, 材料試験, 5, 34(昭 31), 410.

第 3 表

応 力 比	平均応力 kg/mm ²	有効標点距離 mm
0	40.1	13.8
0	42.0	13.8
0	44.1	13.8
0	46.0	13.8
0	48.0	13.0
0.25	40.0	13.8
0.25	42.5	13.8
0.25	45.0	13.0
0.25	46.0	12.6
0.25	47.0	12.6
0.60	34.7	13.8
0.60	38.1	13.8
0.60	40.0	13.8
0.60	41.8	13.0

- (2) 西原, 平, 田中, 村田, 材料試験, 5, 35(昭 31), 489.
 (3) Hempel u. Tillmanns, Mitt. K. W. I. Eisenforschung, 18(1936), 163.
 (4) Bernhardt u. Hanemann, Z. für Metallkunde, 30, 12(1938), 401.
 (5) Hempel u. Krug, Mitt. K. W. I. Eisenforschung, 24(1942), 71.
 (6) B. J. Lazan, ASTM, Proc., 49(1946), 757.
 (7) B. J. Lazan & E. Westberg, ASTM, Proc., 52(1952), 837.
 (8) F. W. DeMoney & B. J. Lazan, ASTM, Proc., 54(1954), 769.
 (9) 西原, 平, 田中, 弘中, 材料試験, 2, 3(昭 28), 47.
 (10) 平, 田中, 小寺沢, 田中, 藤田, 関西支会第 33 期定時総会議演会において講演(昭 33).

539.376 : 620.172.251.2

2 段変動周期応力をうけるクリープ*

平 修二**, 田中吉之助**, 大 路 清 嗣***, 春 本 功***

Creep of Mild Steel under Periodic Stresses of Rectangular Wave

by Shūji TAIRA, Kichinosuke TANAKA, Kiyotsugu OHJI,
and Isao HARUMOTO

Creep tests were made with 0.14 percent carbon steel at 450°C under the periodic stresses changing stepwise between two stress levels, the mean stress of which was 17.0 kg/mm² and the stress amplitudes of which were 1.0 and 2.0 kg/mm².

It was found that, under the test conditions in this study, creep strain under varying stresses could be predicted from the results of constant stress creep tests employing the assumption of the "mechanical equation of state in solid", within an error not exceeding ten percent. The limitations of the "mechanical equation of state in solid" as an approximate method of estimation of the strain under varying stresses were also discussed on the basis of the authors' theory of plastic deformation of metals at high temperatures, in which the effect of stress and temperature history is taken into account.

1. 緒 言

著者はこれまでに応力休止を含め, 一ないし数回の

階段状応力変動を与えた場合のクリープ変形挙動を軟鋼について調べて来たが, その結果は, 第 1 期, 第 2 期クリープの別なく, いずれも応力変動後に顕著な変化が認められた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾. すなわち変動後のある期間, 材料は固体状態力学方程式⁽⁴⁾が成立する場合に予測さ

* 昭和 32 年 4 月 2 日 第 34 期通常総会議演会において講演,

原稿受付 昭和 33 年 6 月 21 日.

** 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. **** 准員, 富士電機会社.