ステンレス鋼の室温と高温での塑性クリープ予変形後の
繰返し変形挙動*斉 藤 正^{*1}, 池 上 皓 三^{*2}, 新 津 靖^{*3}Cyclic Plastic Deformation of Stainless Steel SUS304
Subsequent to Plastic and Creep Prestraining

Tadashi SAITO, Kozo IKEGAMI and Yasushi NIITSU

Effects of plastic and creep prestrain on cyclic plastic deformation are experimentally investigated. Thin-walled tubular specimens of stainless steel SUS304 are subjected to combined axial and torsional loads. Prestraining is conducted at room temperature and 600°C, and subsequent cyclic loading under constant strain amplitude is performed at room temperature and 600°C. The cyclic stress-strain curves become saturated with increasing number of cycles. The properties of cyclic loading are examined based on the maximum stress values of the saturated cyclic stress-strain curves. The saturated cyclic stress subsequent to creep straining is influenced by testing temperature as well as strain amplitude. Small strain amplitudes result in large saturated stress values comparing with cyclic loading without creep prestraining. The effects of cyclic loading under combined stress state are also examined using the equi-plastic strain curves. Tensile creep straining expands the equiplastic strain curves in the directions of tensile and torsional stresses. Cyclic loading subsequent to tensile creep straining result in the expansion of the equi-plastic strain curves in the directions of tensile and compressive stresses.

Key Words: Creep, Combined Stress, Plasticity, Cyclic Loading, High Temperature

1. 緒 言

原子力発電設備等の高温構造物の信頼性および安全性確保は、極めて重要である。信頼性の高い高温構造設計技術の開発には高温構造材料の変形挙動を解明することが必要である。

高温構造物における構造材料は、繰返し負荷や温度変化を含む過酷な条件にさらされる。さらにクリープ変形が起こることも考えられる。クリープ予ひずみがその後の塑性変形に及ぼす影響、予ひずみを与えない場合の繰返し変形挙動については過去に新津ら⁽¹⁾⁽²⁾によって研究されている。しかしながら、クリープ変形と繰返し変形とを合わせて考察した研究はほとんどない。

本研究では、ステンレス鋼 SUS 304 を用いてクリープ予ひずみがその後の繰返し変形挙動に及ぼす影響について、温度条件の変化を考慮しながら実験的に調べた。すなわち室温や 600°C で塑性ひずみやクリープひずみを与えた後、室温や 600°C での単軸繰返し変形

挙動を調べた。また、等塑性ひずみ曲線に及ぼす単軸繰返し変形の影響について調べた。

2. 実 験 方 法

試験片は図 1 に示すようなステンレス鋼 SUS 304 の円筒試験片を用いた。試験片材料の成分を表 1 に示す。初期状態での材料の均質化を図るために、試験片をアルゴンガス中 1050°C で 30 分間保持した後、空气中で放冷した。試験片への負荷には、室温から 1500°C の温度範囲で軸方向負荷とねじり負荷を任意に組み合わせて負荷することができる高温複合負荷試験機⁽¹⁾⁽²⁾を用いた。実験装置の構成図を図 2 に示す。試験機は電気-油圧サーボ方式で駆動されている。試験片の加熱には高周波加熱装置を用いた。またひずみは高温でのひずみ測定が可能なひずみ測定装置によって計測した⁽²⁾。図 3 に軸方向ひずみ測定用の装置を示す。測定原理は以下のようなものである。試験片の伸縮に合わせてそれに押し当てたガラスロッドが動く。2 本のロッドのうち上の方は水平および垂直な 2 枚の板ばねに接続されており、ひずみゲージを貼った水平な板ばねがたわむ。そのゲージの出力の変化を測定することにより間接的に試験片のひずみを計測する。ねじり方向の変形による影響は、垂直な板ばねによって吸収される。なお、ね

* 原稿受付 1995 年 4 月 12 日。

^{*1} 東京工業大学大学院 (〒227 横浜市緑区長津田町 4259)。^{*2} 正員、東京工業大学精密工学研究所。^{*3} 正員、東京電機大学工学部 (〒101 東京都千代田区神田錦町 2-2)。

じり方向のひずみ測定用装置は2枚の板ばねの水平、垂直がそれぞれ逆方向になっている。

試験機の制御対象には応力またはひずみをとることができ、クリープを与える場合は応力制御、繰返し変形を与える場合はひずみ制御で行った。ただし、応力制御とひずみ制御を組み合わせで行う場合には、その間に一度除荷することが必要である。制御に用いた応力値は真応力値で、ひずみ値は公称ひずみ値である。 (ϵ', τ') を垂直ひずみとせん断ひずみの公称ひずみ値、 (σ', τ') を垂直応力とせん断応力の公称応力とすると、垂直応力とせん断応力の真応力 (σ, τ) は次式で計算した。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma' \times (1 - \epsilon') \\ \tau &= \tau' \times (1 + 3/2 \times \epsilon') \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

予ひずみは試験片に1 MPa/sの応力速度で引張負荷を加え、室温では300 MPaで約15時間保持して1.0%のクリープ予ひずみを、600°Cでは160 MPaで約12時間保持して0.4%のクリープ予ひずみを与えた。また、室温および600°Cともに、指定の応力まで負

荷する間に生じた塑性予ひずみは約1.0%であった。室温と高温ではそのクリープ変形挙動は異なるが⁽⁴⁾、本論文では、負荷途中で生じたひずみを塑性ひずみ、応力保持状態で生じたひずみをクリープひずみとした。

繰返し変形を与える場合はひずみ速度毎秒0.2%でひずみ幅 $\Delta\epsilon$ 一定で行った。なお繰返し変形におけるサイクルの数え方は、最初の引張負荷過程を0サイクル、次の圧縮負荷過程を1/2サイクル、さらに次の引張負荷過程を1サイクルというように数えた。そして図4に示すように N サイクルでの応力ひずみ曲線での応力の絶対値の最大値を、応力が引張側では $\sigma_{(N)}$ (A点)、圧縮側では $\sigma_{(N)}$ (B点)とする。

3. 実験結果

3・1 軸方向繰返し変形挙動 600°Cにおけるサイクルの進行に伴う $\sigma_{(N)}$ の変化を、予ひずみの条件を変えて調べた。室温でクリープ予ひずみを与えた後

Table 1 Chemical composition of specimens

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.06	0.61	1.78	0.32	0.03	8.24	18.2	70.8

Fig. 1 Shape and dimension of specimen

Fig. 2 Combined loading system at high temperature

Fig. 3 Displacement measuring equipment

Fig. 4 Schematic figure of cyclic stress strain curve

Fig. 5 Stress strain curves of cyclic deformation at 600°C including creep straining at room temperature

600°Cで繰返し変形を行ったときの、相当応力-相当ひずみ線図を図5に示す。相当応力と相当ひずみはミーゼス形の値を用いた。これらをそれぞれ $\bar{\sigma}$ と $\bar{\epsilon}$ で示す。繰返しひずみ幅は1.0%である。破線で示されるのがクリープひずみを与えたときの軌跡で、逆三角で印を付けた間の部分がクリープひずみに相当する。実線で示すのがその後の繰返し変形の応力ひずみ曲線である。サイクルが進むにつれ一定のループを描くようになるのがわかる。二点鎖線は600°Cでの単軸引張応力ひずみ曲線である。繰返しの0サイクルでの曲線がこれとほぼ一致しており、室温での塑性およびクリープ予ひずみによる600°Cでの硬化は、600°Cでの同量の塑性予ひずみによる加工硬化に相当する。

図6は600°Cで1.4%の塑性予ひずみを与えた後に室温でひずみ幅 $\Delta\epsilon$ を変化させて繰返し負荷を与えた場合の $\sigma_{(N)}^+$ の変化を示す。ひずみ幅は、予ひずみを与えていないものは $\Delta\epsilon=1.0\%$ 、塑性予ひずみを与えたものは19サイクルまでは $\Delta\epsilon=1.0\%$ 、その後は $\Delta\epsilon=2.0\%$ と変化した。予ひずみを与えたことにより0サイクルでの応力値は予ひずみを与えない場合よりも高くなっているが、19サイクルめには両者はほぼ等しい

Fig. 6 Maximum tensile stress of cyclic stress strain curves at room temperature after plastic straining

Fig. 7 Maximum tensile stress of cyclic stress strain curves at 600°C after plastic straining

応力値を示した。また、ひずみ幅を変化させると $\sigma_{(N)}^+$ の値は急激に大きくなる。

同様の実験を、600°Cで繰返し負荷を与えて行った場合の $\sigma_{(N)}^+$ の変化を図7に示す。0サイクルでの応力値は塑性予ひずみを与えた場合は、予ひずみなしの場合の1.54倍もの応力値を示すが、19サイクルでは塑性予ひずみを与えた場合のほうが予ひずみを与えていない場合よりもやや低い値を示した。20サイクル以降、塑性予ひずみを与えた場合は、一度高くなった応力値がその後低くなっていくが、これは試験片がネッキングにより不均一に変形したためである。なお、図6および図7の点線は、3・4節で後述する式により実験結果を近似したものである。

図8に示すのは室温と600°Cでクリープ予ひずみを与えた後ひずみ幅 $\Delta\epsilon=0.7\%$ 、試験温度は600°Cで繰返し負荷実験を行ったときの $\sigma_{(N)}^+$ の変化である。クリープ予ひずみを与えた場合には、0サイクルでは予ひずみなしの場合の1.80倍以上の高い応力値を示した。その後サイクルの進行に伴って予ひずみを与えない場合とクリープ予ひずみを与えた場合の差は小さくなるが、室温でクリープを与えた場合には、予ひずみなしの場合の1.08倍程度の応力値に飽和していった。600°Cでクリープを与えたものは、室温でクリープを与えたものよりもやや低い応力値に飽和したが、ほぼ60サイクルから徐々に飽和応力値は下がっていった。

ひずみ幅 $\Delta\epsilon$ を変化させて室温で同様の実験を行った結果を図9に示す。予ひずみを与えない場合は $\Delta\epsilon=1.0\%$ 、クリープ予ひずみを与えた場合は19サイクルまで $\Delta\epsilon=1.0\%$ で、その後 $\Delta\epsilon=2.0\%$ と変化した。この場合にも、クリープ予ひずみを与えた場合は0サイ

Fig. 8 Maximum tensile stress of cyclic stress strain curves at 600°C after creep straining

クルでの応力値が、予ひずみを与えない場合の1.25倍以上と高くなった。サイクルが進むにつれて、どの場合も応力値が高くなるが、クリープ予ひずみを与えた場合は10サイクル以上になると緩やかに応力値の低下が見られた。室温でクリープ予ひずみを与えた場合は、19サイクル程度で予ひずみを与えない場合とほぼ等しい応力値となった。600°Cでクリープ予ひずみを与えた場合は、19サイクルで予ひずみを与えない場合の1.12倍と高い応力値を示していた。室温でクリープ予ひずみを与えた場合と、図6で示した600°Cで塑性予ひずみを与えた場合とが同様の傾向を示した。20サイクルからひずみ幅を変化させてもクリープ予ひずみを与えた二つの場合の応力値の大小関係はほぼ変わらなかった。

同様の実験を600°Cで行った結果を図10に示す。この場合も0サイクルでの応力値は、クリープ予ひずみ

を与えた場合は予ひずみなしの場合の1.73倍程度と高くなった。しかしサイクルが進むと、室温の場合と異なり、10サイクル程度でクリープ予ひずみを与えた場合も、予ひずみを与えない場合もほぼ等しい応力値に飽和した。なお、室温でクリープ予ひずみを与えた場合は10サイクルで終了した。この傾向は図7の塑性予ひずみを与えた場合と似ているが、塑性予ひずみを与えた場合のほうがやや低い応力値に収束していた。600°Cでクリープ予ひずみを与えたものは繰返しひずみ幅を $\Delta\epsilon=2.0\%$ とした後、7サイクルで試験片が座屈してしまった。

3・2 ねじり方向繰返し変形挙動 引張クリープ予ひずみがねじり方向繰返し変形挙動に及ぼす影響について調べた。実験は20サイクルごとにひずみ幅をミーズス形の相当ひずみにして $\Delta\gamma/\sqrt{3}=0.58, 1.2, 1.7, 1.2, 0.58\%$ と変化させて行った。ひずみ速度は毎秒0.12%とした。

室温で繰返し負荷を与えたときの $\tau(N)$ の変化を図11に示す。室温でクリープ予ひずみを与えたものは、ほぼ30サイクルまでは予ひずみを与えない場合よりも高い応力値を示したが、それ以降は予ひずみを与えない場合よりも低い応力値を示した。600°Cでクリープ予ひずみを与えた場合に関しては、ほぼ40サイクルまでは予ひずみを与えない場合よりも高い応力値を示したが、その後は予ひずみを与えない場合とほぼ一致した挙動を示した。

600°Cで繰返し負荷を与えたときの結果を図12に示す。室温でクリープ予ひずみを与えたものは、ほぼ12サイクルまでは予ひずみを与えない場合よりも高い応

Fig. 9 Maximum tensile stress of cyclic stress strain curves at room temperature after creep straining

Fig. 10 Maximum tensile stress of cyclic stress strain curves at 600°C after creep straining

Fig. 11 Maximum torsional stress of cyclic stress strain curves at room temperature after creep straining

力値を示し、それ以降は予ひずみを与えない場合よりも低い応力値を示した。600°Cでクリープ予ひずみを与えた場合は、ほぼ20サイクルまでは予ひずみを与えない場合よりも高い応力値を示したが、その後は予ひずみを与えない場合とほぼ一致した挙動を示した。600°Cで繰返し負荷を加えた場合は、室温で繰返し負荷を加えた結果とほぼ同じ傾向であるが、クリープ予ひずみを与えた場合の応力値が、予ひずみを与えない場合の応力値とほぼ等しくなるサイクル数が小さくなった。室温でクリープ予ひずみを与えた場合の応力値が予ひずみを与えない場合よりも小さくなるサイクル数、そして600°Cでクリープ予ひずみを与えた場合の応力値が予ひずみを与えない場合の応力値とほぼ等しくなるサイクル数が、室温での実験より、600°Cで実験を行ったときのほうが小さくなった。

3・3 最大応力値の近似 一定温度下における繰返し硬化過程の解析手法として、次の式(2)あるいは式(3)で最大応力値を近似する手法がある⁽⁷⁾。

$$\sigma_{(N)} - \sigma_{(0)} = R_s \times \{1 - \exp(-a \times \Delta \epsilon^p \times N)\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_{(N)} - \sigma_{(0)} = R_s \times \{1 - \exp(-a \times \Delta \epsilon^p \times N)\} + R_t \times \{1 - \exp(-b \times \Delta \epsilon^p \times N)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで R_s , R_t , a , b はそれぞれの硬化過程によって決定される定数である。 N はサイクル、 $\sigma_{(N)}$ は N サイクルでの最大応力値、 $\sigma_{(0)}$ は0サイクルでの最大応力値である。 $\Delta \epsilon^p$ は塑性ひずみ幅の平均値である。繰返し変形に伴い、最大応力値が増加していき、一定値に収束する場合は式(2)、最大応力値が一度飽和した後に徐々に減少する場合は式(3)を用いて近似した。また、

Fig. 12 Maximum torsional stress of cyclic stress strain curves at 600°C after creep straining

最大応力値が一度飽和した後に徐々に減少する場合でも、式(3)で近似がうまくいかない場合(図8の600°Cでクリープ予ひずみを与えた場合)は次の式(4)を用いて近似した。

$$\sigma_{(N)} - \sigma_{(0)} = R_s \times \{1 - \exp(-a \times \Delta \epsilon^p \times N)\} + c \times (\Delta \epsilon^p \times N)^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

これらの式を用いて近似した結果は図6から図12の図中に点線で示してある。

3・4 軸方向繰返し変形が複合負荷変形に及ぼす影響

クリープ予ひずみと繰返し変形による、等塑性ひずみ曲線の変化を調べた。予ひずみを与えない場合、その後室温でクリープ予ひずみを与えた場合、その後さらに600°Cで軸方向に繰返し負荷を10サイクル加えた場合について、それぞれ600°Cでの等塑性ひずみ曲線を求めた。どの場合も一度完全除荷をした後、比例負荷を行って曲線を求めた。予ひずみを与えない場合は、等塑性ひずみ曲線はミーゼス形相当応力、相当塑性ひずみを用いると円になるとした。クリープ予ひずみを与えた場合と繰返し負荷を10サイクル加えた場合については、0°(引張方向)、45°、90°(ねじり方向)、135°、180°(圧縮方向)の5方向について実験を行った。

図13にクリープ予ひずみを与えたものについて等塑性ひずみ曲線を示す。点は相当累積塑性ひずみ $\rho^p = 0.01, 0.1, 1.0\%$ の値に対する応力値を示し、実線はその結果を近似する曲線であり、第一象限、第二象限で異なるだ円をつなぎあわせたものである。 ρ^p が小さいものでは圧縮方向の応力値が低く、引張方向に出っ張った形となった。 ρ^p が大きくなるに従って引張りと圧縮の応力値の差がなくなっていった。また、90°方向の応力値は0.01%、0.1%と引張りの応力値よりも大きく、1.0%では圧縮の場合とほぼ同じ値になった。引張りのクリープ予ひずみによって、 ρ^p が小さい場合では、ねじり方向の硬化が軸方向の硬化よりも大きくなった。

Fig. 13 Equi plastic strain curves subsequent to creep straining

Fig. 14 Equi-plastic strain curves subsequent to cyclic prestraining and creep straining

予ひずみを与えない場合、クリープひずみを与えた場合、軸方向に繰返し負荷を10サイクル加えた場合についての等塑性ひずみ曲線の比較を図14に示す。また、再負荷方向での応力値の硬化率を表2に示す。Case 1は予ひずみを与えない場合からクリープひずみを与えた後までの硬化を示し、Case 2はクリープひずみを与えた後から繰返し変形を与えた後までの硬化を表す。Case 1では90°方向の硬化が最も大きく、180°方向が最も小さい。Case 2では90°方向の硬化が最も小さく、0°方向および180°方向の硬化は大差がなかった。したがって、軸方向繰返し変形によって90°方向の硬化は小さく、0°と180°方向にはほぼ同等の硬化を示した。

4. 結 言

ステンレス鋼 SUS 304 試験片に室温と600°Cで塑性ひずみやクリープひずみを与え、その後室温と600°Cで繰返し負荷を与えることにより、繰返し変形挙動に及ぼす予ひずみの影響を実験的に調べた。

(1) 室温での引張圧縮の繰返し応力ひずみ曲線の応力の飽和値を、高温で塑性予ひずみを与えた場合と与えない場合とで比較すると、繰返しの初期の段階では塑性予ひずみを与えた場合のほうがやや高くなるが、繰返しが進行するにつれて予ひずみの影響は小さくなった。

(2) 引張圧縮の繰返し応力ひずみ曲線における応力の飽和値は、室温で引張りのクリープ予ひずみを与えた場合は、ひずみ幅が小さいときは予ひずみを与えない場合より高くなり、ひずみ幅が大きくなるとほぼ

Table 2 Hardening rate of stress in loading directions

Loading direction	Hardening rate					
	$\rho^p = 0.01\%$		$\rho^p = 0.1\%$		$\rho^p = 1.0\%$	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
0°	77.0	70.6	69.5	67.5	42.7	48.2
90°	82.7	44.8	78.6	53.8	49.0	39.6
180°	45.0	69.6	55.5	71.8	49.3	45.6

一致した。600°Cでクリープ予ひずみを与えた場合には、室温で繰返し変形を行った場合、応力の飽和値は予ひずみを与えない場合よりも高くなるが、600°Cでの繰返し変形においては、応力の飽和値はひずみ幅が小さいときには高くなるが、ひずみ幅が大きくなるとほぼ一致した。

(3) ねじりの繰返し応力ひずみ曲線における応力の飽和値は、室温で引張クリープ予ひずみを与えた場合、ひずみ幅が小さいときは予ひずみを与えない場合より高くなるが、ひずみ幅が大きくなると逆に低くなった。600°Cでクリープ予ひずみを与えた場合の応力の飽和値は、ひずみ幅が小さいと高くなったが、ひずみ幅が大きくなるとクリープ予ひずみの影響が小さくなり、予ひずみを与えない場合と同様な挙動を示し、繰返し回数の増加に伴いその影響は薄れていった。そして上記の傾向はクリープひずみを与えた温度が室温か600°Cかに関係ないが、室温よりも600°Cでのほうが顕著に現れた。

(4) 等塑性ひずみ曲線において塑性ひずみが0.01%と小さいときは、引張りのクリープ予ひずみによって曲線はねじり方向に最も拡大し、圧縮方向の硬化が少なかった。その後軸方向に繰返し負荷を加えることによって、等塑性ひずみ曲線は引張りおよび圧縮方向に同等に拡大し、ねじり方向の硬化は少なかった。また塑性ひずみ1.0%程度の等塑性ひずみ曲線においてはこのような傾向は見られず、予ひずみを与えない場合の等塑性ひずみ曲線が等方的に拡大した。

文 献

- (1) 白鳥英亮・ほか3名, 機論, **47** 416, A(1981), 441-449.
- (2) 白鳥英亮・ほか2名, 機論, **49** 448, A(1983), 1590-1597.
- (3) 新津靖・池上皓三, 機論, **50** 451, A(1984), 424-431.
- (4) 新津靖・池上皓三, 機論, **50** 453, A(1984), 996-1002.
- (5) 新津靖・池上皓三, 機論, **51** 461, A(1985), 258-263.
- (6) 新津靖・池上皓三, 機論, **51** 464, A(1985), 1089-1097.
- (7) 新津靖・池上皓三, 機論, **52** 478, A(1986), 1621-1627.