クリープ変形後温度変化がある場合の SUS 304 の塑性変形挙動*

新 津 靖**, 池 上 皓 三**

Plastic Behaviors of SUS 304 Subsequent to Creep Pre-Strain under Temperature Change

by Yasushi NIITSU and Kozo IKEGAMI

Plasticity-creep interaction effect was experimentally investigated under changing temperature. The combined stress tests were performed on thin-wall tubular specimens of austenite stainless steel SUS 304 from room temperature to 600°C. Plastic behaviors at 600°C subsequent to creep pre-strain produced at room temperature and those at room temperature subsequent to creep pre-strain produced at 600°C were experimentally determined under various loading conditions. The stress strain relations obtained by these experiments were compared with the results calculated by the equiplastic strain surfaces. The influence of creep pre-strain at room temperature on subsequent plastic behaviors of high temperature was nearly equal to that of plastic pre-strain, but the influence of creep pre-strain at high temperature on plastic behaviors of room temperature were weaker than that of plastic pre-strain.

Key Words: Plasticity, Creep, Stainless Steel, High Temperature, Combined Stress, Subsequent Behavior, Plasticity-Creep Interaction

1. 緒 言

従来、塑性変形やクリープ変形は、それぞれ単独には多くの研究が成されているが、それらの相互関係について研究した例は少ない。たとえば、アルミニウム合金に対して Brown が行った高温クリープ変形と室温での塑性変形の関係についての実験的研究⁽¹⁾、SUS ステンレス鋼に対し室温での粘塑性変形挙動について調べた Kujawski らの研究⁽²⁾、同じ材料に対し高温でのクリープ変形と塑性変形の関係について実験を行った Greenstreet⁽³⁾や Cho ら⁽⁴⁾の研究、また、炭素鋼に対し高温で実験を行った石崎らの研究⁽⁵⁾、SUS 316 に対し大橋ら⁽⁶⁾が行った高温クリープ予ひずみ後の組合せ応力下での塑性変形に関する研究などがあるにすぎない。

一方著者らは、クリープ変形と塑性変形の相互関係および塑性変形の温度依存性を明らかにするため、すでに SUS 304 に対し、室温および高温におけるクリープ変形と塑性変形の関係について組合せ応力下で調べるとともに⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾、温度が変化する場合の塑性変形挙

動についても研究してきた⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾。そこで本報では、これら一連の研究の一つとして、ある温度であたえたクリープ変形が他の温度における塑性変形挙動におよぼす影響について調べた。すなわち、SUS 304 製薄肉円筒試験片にクリープ予ひずみをあたえた後の他の温度での塑性変形挙動をさまざまな負荷条件で実験的に定め、次にこれらの結果をクリープ予ひずみの等塑性ひずみ曲面に対する影響として、その定性的および定量的な評価を行った。

2. 実 験 方 法

実験は高温組合せ応力試験機を用い、SUS 304 製薄肉円筒試験片に室温から 600°C の間で軸方向負荷とねじり負荷を組合わせて加えることにより行った。試験片に生じるひずみは、高温実験用に製作されたひずみ測定装置⁽⁷⁾を用いて測定した。温度は高周波加熱器により制御されており、試験片の加熱は 2°C/s の速度で行い、負荷は試験片が所定の温度に達したのち約 5 min 保持してから行った。ここで室温は 27°C に制御した。また負荷速度は、応力経路上の速度が 0.653 MPa/s になるようにした。そして、この速度で負荷している間に生じた非弾性ひずみを塑性ひずみ、応力一定の条件で生じた非弾性ひずみをクリープひずみとして扱っ

* 昭和 59 年 11 月 29 日 第 929 回講演会において講演、原稿受付 昭和 59 年 5 月 31 日。

** 正員、東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町 4259)。

た。また試験片の応力は真応力状態で制御した。

3. 実験結果および考察

3.1 一定温度下における塑性変形挙動の定式化

室温から 600°C の間で引張試験を行った。600°C ではセレーションにより応力ひずみ曲線に階段状の形状が観察された。ここでは室温から 600°C の間の一定温度および一定応力速度下で得られた引張試験結果をもとに応力ひずみ関係をなめらかな関数⁽¹⁰⁾

$$\sigma_F = \sigma_y + H\rho^\alpha$$

$$\rho = \int \sqrt{(d\epsilon^p)^2 + (d\gamma^p)^2} / 3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

で近似した。式(1)中の σ_F と ρ はそれぞれ流動応力と相当塑性ひずみ量である。また、表 1 に実験結果より得られた材料定数 σ_y , H および α の値を示す。

本論文では、組合せ応力状態での塑性変形挙動を表すのに、等塑性ひずみ曲面の概念を用いる⁽¹¹⁾。ここでは、一定温度下で引張方向に塑性予ひずみをあたえた後の等塑性ひずみ曲面を図 1 に示すように σ_* の左右で形状の異なるだ円をつなぎ合わせた関数形⁽⁸⁾

$$\left. \begin{aligned} \frac{(\sigma - \sigma_*)^2}{\xi + \eta \operatorname{sgn}(\sigma - \sigma_*)} + \frac{3\tau^2}{\sigma_F - \sigma_C} - 1 &= 0 \\ \xi &= [(\sigma_F - \sigma_*)^2 + (\sigma_* + \sigma_F - \sigma_B)^2] / 2 \\ \eta &= [(\sigma_F - \sigma_*)^2 - (\sigma_* + \sigma_F - \sigma_B)^2] / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

を用いる。そして、室温と 600°C における σ_B と σ_C および σ_* については、すでに定式化されている関数形

表 1 応力ひずみ曲線を決定するパラメータ

Temp.	σ_y MPa	H MPa	α
27°C	189.8	48.7	0.69
200°C	112.8	34.9	0.80
400°C	93.3	36.5	0.78
600°C	72.1	37.1	0.76

図 1 等塑性ひずみ曲面を決定するパラメータ

を用いる⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_B(R.T.) &= \sigma_{B0} + \Delta\sigma_B \\ \sigma_{B0} &= 0.11\sigma_1[1 - \exp(-0.39\rho_1)] \\ \Delta\sigma_B &= 1.8(\sigma_1 - \sigma_{B0})\exp(-g\sqrt{\rho_2^p}) \\ g &= 3.09 + 2.32\exp(-0.61\rho_1) \\ \sigma_B(600^\circ\text{C}) &= \sigma_1[1.61\exp(-6.18\sqrt{\rho_2^p}) + 0.0711] \\ \sigma_C &= 0.499\sigma_B\exp(-2.1\sqrt{\rho_2^p}) \\ \sigma_* &= 0.499\sigma_B\exp(-0.802\sqrt{\rho_2^p}) \\ \sigma_1 &= \sigma_F(\rho = \rho_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ρ_1 および ρ_2^p はそれぞれ塑性予ひずみ量と後続塑性ひずみ量である。

3.2 温度変化がある場合の塑性変形挙動

材料の流動応力におよぼす塑性ひずみと温度履歴の影響を調べるため、室温から 600°C の間で、塑性ひずみをあたえた後、温度を変化させて再負荷する実験を繰返し行った。実験に用いた温度および負荷の条件と、得られた実験結果を図 2 に示す。実験中、温度は弾性域内で変化させた。ここで縦軸は引張真応力、横軸は塑性ひずみである。また、温度変化時に生じる熱ひずみは、差し引いて示してある。図 2 中の各印が実験結果であり、一点鎖線は実験時の温度ではじめから負荷したときの応力ひずみ曲線、すなわち、式(1)で近似された応力ひずみ曲線である。各温度での実験結果と一点鎖線はほぼ一致しており、すでに著者ら⁽⁷⁾によって示されているように、一方向に負荷する場合には、SUS 304 では流動応力は予ひずみをあたえた温度にはほとんど影響されず、負荷中の温度と過去に受けた累積塑性ひずみ量に大きく依存することがわかる。また、実

図 2 温度変化がある場合の応力ひずみ曲線

験結果の特徴としては、200°C および 400°C で軟鋼に見られるような降伏現象が、塑性ひずみが 5% 付近での 600°C の応力ひずみ曲線にはセレーションがはっきりと観察される。

温度が変化する場合のパウシング効果については、室温予ひずみ後の高温におけるパウシング曲線は、予ひずみをあたえた温度にはあまり影響されず、高温の一定温度下で予ひずみをあたえた後のパウシング曲線とほぼ一致するが、高温予ひずみ後の室温におけるパウシング効果は、室温の一定温度下におけるパウシング効果よりも弱く現れるという結果が得られている⁽¹⁰⁾。

3・3 室温クリープ変形が高温塑性変形挙動におよぼす影響 SUS 304 において、室温で顕著に現れる粘性ひずみ（クリープひずみ）は同温度では塑性ひずみとほぼ同等の変形履歴効果を示していた⁽⁸⁾。そこで、この室温でのクリープひずみが高温での塑性変形挙動に対しどのような影響をおよぼしているか調べる。まず始めに図 3 (a), (b) に示すような引張圧縮実験を行った。すなわち、室温で引張方向に塑性ひずみとクリープひずみをあたえた試験片と塑性ひずみのみあたえた試験片について、部分除荷後 600°C で引張方向および圧縮方向に再負荷する実験を行った。室温でのクリープ試験応力は 200 MPa とした。この応力まで負荷したときの塑性ひずみは約 0.2% であった。応力は 12 h から 18 h 保持され 1.0% のクリープひずみが試験片にあたえられた。図 4 (a), (b) にそれぞれ、室温予ひずみ後 600°C での引張負荷時および圧縮負荷時の実験結果を示す。ここで縦軸は相当応力、横軸は再負荷後に生じた塑性ひずみ（後続塑性ひずみ量）である。図 4 中の○印および●印はそれぞれ、室温でクリープひずみをあたえた場合とあたえない場合の実験結果であり、この二つの結果の差が室温クリープ変形による影響と考えられる。また図 4 (a) の点線および実線は、それぞれ 600°C において塑性ひずみが 1.2% および

0.2% 生じた後の単純引張りの応力ひずみ曲線であり、図 4 (b) の点線および実線は、600°C で 1.2% および 0.2% の引張塑性予ひずみ後、圧縮方向に再負荷したときの実験結果である。図 4 (a), (b) の実験結果より、室温でクリープひずみをあたえることにより、600°C においても材料は硬化していることがわかる。また、○印と点線、●印と実線がそれぞれほぼ一致していることから、室温での塑性予ひずみとクリープ予ひずみが 600°C での後続塑性変形挙動におよぼす影響は、600°C であたえた同量の塑性予ひずみによるそれとほぼ等しいことがわかる。

次に、室温クリープ変形が組合せ応力下での高温塑性変形挙動におよぼす影響を調べるため、図 5 (a) に示すような応力経路の実験を行った。すなわち、図 3 に示した実験と同様に引張クリープ予ひずみを室温であたえた後、75 MPa まで部分除荷した試験片を 600°C まで加熱し、応力増分方向を θ_0 だけ折り曲げて再負荷した。得られた実験結果を図 6 (a), (b) に示す。実験は 0° と 180° の単軸実験を含めて 5 種類の折り曲げ角について行った。図 6 (a) の印は、再負荷後に生じた塑性ひずみが所定の値に達したときの応力状態の実

図 3 室温クリープ予ひずみ後 600°C での引張圧縮試験の負荷条件

(a) 引張負荷試験

(b) 圧縮負荷試験

図 4 室温クリープ予ひずみ後 600°C での試験結果

験結果を示しており、実験点上の矢印は、そこでのひずみ増分ベクトルを表している。また、図 6 (a) 中の各線は、図 5 (b) に示すような 600°C で 1.2% の塑性予ひずみ後の計算された等塑性ひずみ曲面であり、図 4 に示した点線に相当するものである。実験結果と対応する計算された等塑性ひずみ曲面はほぼ一致しており、図 4 に示した単軸応力実験の結果と同様の性質が組合せ応力下でも見られる。また、図 4 (a) の実験で、せん断応力成分が大きくなる $\theta_\sigma = 90^\circ$ および 135° の実験結果は、 $\theta_\sigma = 0^\circ$ の結果よりも高い流動応力を示していた。

図 6 (b) はこの実験における再負荷後に生じた塑性ひずみ経路である。ここで縦軸はせん断塑性ひずみの $1/\sqrt{3}$ 、横軸は軸方向塑性ひずみと予ひずみの差である。図 6 (b) 中の各線は、図 5 (b) に示すように、600°C で 1.2% の塑性予ひずみ後応力経路を折り曲げて再負荷した場合の計算された塑性ひずみ経路である。実験

(a) 実験に用いた応力経路 (b) 計算に用いた応力経路
図 5

(a)

(b)

図 6 600°C における等塑性ひずみ曲面と後続塑性ひずみ経路

結果と計算結果はほぼ一致している。

3.4 高温クリープ変形が室温塑性変形挙動におよぼす影響 3.3 節とは反対に、高温下であたえられたクリープ変形が室温での塑性変形挙動にどのような影響をおよぼすか調べた。始めに、図 7 (a), (b) に示すような引張圧縮実験を行った。すなわち、600°C で引張方向に負荷し、塑性ひずみとクリープひずみをあたえた試験片と、塑性ひずみのみをあたえた試験片について、室温で引張方向および圧縮方向に再負荷する実験を行った。600°C でのクリープ試験応力は 125 MPa とした。材料には、この応力に負荷されるまでに約 1.6% の塑性ひずみが生じた。応力は真応力状態で 75 h から 80 h 保持され、約 1.4% のクリープひずみが試験片にあたえられた。

図 8 (a), (b) に高温予ひずみ後、室温での引張負荷時および圧縮負荷時の実験結果を示す。ここで座標軸は図 4 のそれと同じである。図 8 中の $\circ$ 、 $\bullet$ 印および Δ 印はそれぞれ、高温で 1.6% の塑性予ひずみと 1.4% のクリープ予ひずみをあたえた場合、1.6% の塑性予ひずみのみあたえた場合、および 3.0% の塑性ひずみをあたえた場合について、室温で行った再負荷実験の結果である。また、図 8 (a) の実線と点線はそれぞれ、室温で塑性予ひずみ 1.6% および 3.0% あたえた後の同温度での応力ひずみ曲線であり、図 8 (b) の実線と点線は、同様に室温における、引張予ひずみ後圧縮方向に再負荷したときの計算結果である。600°C で 1.4% のクリープ予ひずみをあたえることにより、室温での流動応力が高くなっているのが観察される。しかしながら、クリープ予ひずみ後の流動応力 ($\circ$ 印) は、 ρ_p と ρ_f を加えた量の高温塑性予ひずみをあたえた場合の流動応力 (Δ 印) にくらべ低く、600°C であたえたクリープ予ひずみによる材料の硬化量は、同量の塑性予ひずみによるそれよりも少ないことがわかる。また、3.2 節で示したように、図 8 (a) の点線と Δ 印、実線と $\bullet$ 印はよく一致しているが、図 8 (b) では、実

(a) (b)
図 7 高温クリープ予ひずみ後室温での引張圧縮試験の負荷条件

験結果は計算結果よりも弱いバウシング効果を示している。

次に、高温クリープ変形が、組合せ応力下での室温塑性変形挙動におよぼす影響を調べるため、図 9 (a) に示すような応力経路の実験を行った。すなわち、600°C で予ひずみをあたえた後、室温で応力経路を折り曲げて再負荷する実験を行った。得られた結果を図 10(a), (b) に示す。図 10(a) は応力空間上の等塑性ひずみ点を、図 10(b) はひずみ空間上の後続塑性ひずみ経路を表している。図 10(a) では、白印は高温で塑性予ひずみのみをあたえた場合、黒印は高温で塑性予ひずみとクリープ予ひずみをあたえた場合の実験結果である。高温でクリープ予ひずみをあたえることにより、材料はわずかに硬化しており、等塑性ひずみ曲面は膨張する傾向にある。また、クリープ予ひずみ後の実験結果は、塑性予ひずみが 3.0% の場合の実験結果よりも低い応力状態にある。図 10(a) 中の実線と点線はそれぞれ、室温で 1.6% および 3.0% の塑性予ひずみ後の計算された等塑性ひずみ曲面である。実線と白印を比較すると、 θ_σ が 135° 以上の場合に差が顕著に見られる。また、 θ_σ が 135° の実験結果では、 θ_σ が

0° や 90° の実験結果より高い流動応力を示していた。

図 10(b) では、高温でクリープ予ひずみをあたえたことによる差は θ_σ が 90° の場合に顕著に現れている。また図 10(b) 中の実線および点線は、図 9 (b) に示すような負荷条件に対する計算結果、すなわち、室温塑性予ひずみ後の塑性ひずみ経路であるが、実験結果とは一致していない。

著者らは、以前にも、これとほぼ等しい条件で実験を行い、高温クリープ変形は室温での塑性変形に顕著な影響をおよぼしていないという結果を得ている⁽⁷⁾。しかし、そのときのクリープ予ひずみ高応力で短時間にあたえられたものであった。本報に示すように、比較的低応力下でのクリープ予ひずみでは、硬化を示すことがわかる。

(a) 実験に用いた応力経路 (b) 計算に用いた応力経路

図 9

(a) 引張負荷試験

(b) 圧縮負荷試験

図 8 高温クリープ予ひずみ後室温での試験結果

(a)

(b)

図 10 室温における等塑性ひずみ曲面と後続塑性ひずみ経路

4. 結 言

金属材料の塑性変形とクリープ変形の相互干渉効果を検討するため、SUS 304 製薄肉円筒試験片に塑性予ひずみとクリープ予ひずみをあたえ、その後の塑性変形挙動を実験的に調べた。その結果以下の結論が得られた。

(1) 室温であたえられた塑性予ひずみとクリープ予ひずみが 600°C での後続塑性変形挙動におよぼす影響は、600°C であたえられた同量の塑性予ひずみによるそれとほぼ等しい。

(2) 600°C でクリープ予ひずみをあたえることにより材料はわずかに硬化しており、室温における等塑性予ひずみ曲面は膨張する。しかしその程度は、同量の

塑性予ひずみによる膨張よりも少ない。

文 献

- (1) Brown, G. M., *J. Mech. Phys. Solids*, 18-6, (1970), 383.
- (2) Kujawski, D., ほか 2 名, *J. Mech. Phys. Solids*, 28-2, (1980), 129.
- (3) Greenstreet, W. L., *Nucl. Eng. Des.*, 41 (1977), 375.
- (4) Cho, U. V. and Findley, W. N., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 49-1, (1982), 297.
- (5) 石崎・ほか 3 名, 機論, 39-326, A (昭 48), 3010.
- (6) Ohashi, Y., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, 105 (1983), 257.
- (7) 新津・ほか 2 名, 機論, 49-448, A (昭 58), 1590.
- (8) 新津・池上, 機論, 50-451, A (昭 59), 424.
- (9) 新津・池上, 機論, 50-453, A (昭 59), 996.
- (10) 新津・池上, 機講論, No. 840-2 (昭 59-3), 188.
- (11) 白鳥・ほか 4 名, 機論, 47-416, A (昭 56), 441.