液体窒素温度と室温で予ひずみを与えた後の液体窒素温度と室温での繰返し変形挙動†

横塚 智人* 池上 皓三**

Cyclic Plastic Deformation at Low Temperature in Liquid Nitrogen and Room Temperature Subsequent to Pre-Strain at Low Temperature in Liquid Nitrogen and Room Temperature

by

Tomohito YOKOTSUKA * and Kozo IKEGAMI **

Cyclic loading tests are performed by using thin-walled tubular specimens of SUS304 stainless steel at low temperature in liquid nitrogen (77K) and room temperature. Cyclic plastic deformation subsequent to pre-strain at 77K and room temperature is experimentally investigated under torsional, tensile and compressive loading conditions. At small cyclic numbers, the pre-strain perpendicular to cyclic loading direction results in large hardening, and cyclic plastic behavior subsequent to the pre-strain at 77K is more hardened than the pre-strain at room temperature. With increasing cyclic number, the effect of temperature on the hardening behavior becomes small. When the cyclic loadings are conducted in the same direction as the pre-straining direction, the effect of the pre-strain on hardening behavior is not remarkable at room temperature and 77K. The pre-strain at 77K influences the cyclic hardening at room temperature even for large cyclic number.

Key words : Material testing, Plasticity, Low cycle deformation, Pre-strain, Cyclic loading

1 緒 言

低温構造体の重要性が高まるにつれて、低温構造材料の変形特性の把握が必要となってきた。著者らは、これまでに低温での変形挙動について、複雑な負荷¹⁾、繰返し負荷^{2), 3)}、クリープ変形⁴⁾について実験結果を報告してきた。低温構造体は、実用的には低温と室温の温度変化と繰返し変形を受ける場合が多いことが予想される。本報告では、低温構造体として広く使われている SUS304 鋼について、予ひずみを与えないときと、液体窒素温度および室温で予ひずみを与えた後に、繰返し変形をそれぞれ室温と液体窒素温度で行い、予ひずみを与えた温度と繰返し変形時の温度を変化させて、予ひずみの繰返し変形に及ぼす影響を調べた。

2 試験装置および試験片

本研究で使用した低温複合荷重材料試験機は、極低温用に試作されたもの⁵⁾で、室温から液体ヘリウム温度 (4.2K) まで試験することが可能である。負荷形式は、電気油圧サーボ式を採用している。試験機上部の油圧トルクモータからねじり方向負荷を、試験機下部の油圧シリンダより軸方向負荷を与えることができる。これらの負荷は、内側がねじり軸と外側が引張軸の二重円筒管を介して、試験片に同時に加えることができる。試験片に加わる軸方向荷重とねじり方向荷重は、二重円筒管の内筒の上部に取り付けたロードセルより測定し、ひずみは画

像処理法⁶⁾を用いて計測した。

試験機のアナログフィードバック系の制御は D/A 変換器を介してパーソナルコンピュータによって行い、プログラムにより任意の負荷を試験片に与えることができる。ロードセルより測定した応力は、A/D 変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込み、記録する。実験は、ロードセルによって測定した応力をフィードバック信号とし、応力速度を制御して行った。

試験片材料には、耐食性に優れ、低温においても高い延性をもち、熱伝導率が小さく、入手することも容易なため、低温構造体として広く用いられているオーステナイト系ステンレス SUS304 鋼を用いた。試験片形状は、長さ 50mm、外径 9.6mm、内径 8.0mm の薄肉円筒形状である。この試験片は、加工時の残留応力を除去して、一様なオーステナイト組織をつくるため、アルゴンガス中で 1050℃ に加熱して、30 分間保持し、その後空气中で放冷する固溶体化熱処理を施した。

3 実験方法

本研究では、実験を液体窒素温度 (77K) と室温で行った。負荷方法は、次のような手順である。

・ねじり、引張または圧縮の予ひずみを 77K または室温で与え、完全除荷する。

・その後、ひずみのくりかえし幅が 2% になるように繰返し負荷を 77K または室温で 40 サイクル行う。

† 原稿受理 平成 10 年 2 月 25 日 Received Feb. 25, 1998

* 東京工業大学大学院 〒226-8503 横浜市緑区長津田町, Graduate School of Tokyo Inst. of Tech., Midori-ku, Yokohama, 226-8503

** 正会員 東京工業大学精密工学研究所 〒226-8503 横浜市緑区長津田町, Tokyo Inst. of Tech., Precision & Intelligence Laboratory, Midori-ku, Yokohama, 226-8503

負荷速度は、真応力が 10MPa/sec から 1MPa/sec まで順次変化する方法を用いた。弾性域とみなせる範囲は、負荷速度が 10MPa/sec で負荷し、塑性域ではひずみの値によって順次、負荷速度が減少する負荷条件で行った。この過程を負荷速度とひずみの値の関係で示したのが Fig. 1 である。点 B や点 C_1 などの記号は、Fig. 2 と対応している。また、Fig. 1 のひずみの値は、予ひずみを与えた後、完全除荷したときのひずみの値を 0 として負荷中のひずみの値を示したものである。

本研究では、繰返し中の応力-ひずみ曲線の特徴を調べるため、応力幅 $\Delta\sigma$ と累積塑性ひずみ S^p を用いる。これらの値を Fig. 2 に示す。図の実線は繰返し中の応力-ひずみ曲線で、これらを相当応力-相当ひずみの関係で示したのが破線である。まず、点 0 から点 A と予ひずみを与え、その後、完全に除荷し点 B に達する。この点 B から $C_1 \rightarrow D_1 \rightarrow C_2 \rightarrow D_2 \rightarrow \dots$ と繰返し試験を行う。このとき、それまで繰返し負荷で生じた塑性ひずみを横軸方向に累加した相当ひずみ量が累積塑性ひずみ S^p である。すなわち、この曲線を点 D_1 を中心に 180° 回転移動をすれば、 $C_1 \rightarrow D_1 \rightarrow C_2' \rightarrow D_2' \rightarrow \dots$ のように横軸が累積塑性ひずみになる。また、繰返し負荷を与えているとき、あるサイクルでの最大応力値（点 C_1 の応力値）と最小応力値（点 C_2 の応力値）の差が応力幅 $\Delta\sigma$ とする。なお、塑性のひずみ幅 ΔS^p は、ねじり負荷の場合には塑性ひずみの値を $\sqrt{3}$ で割った値を用いる。以下 S^p についても同様である。

4 実験結果と考察

4・1 ねじり方向繰返しにおける予ひずみの温度の影響

予ひずみを与えて、ねじり方向繰返し負荷を与えたときの応力-ひずみ線図の例を Fig. 3³⁾ に示す。これは、77K において 2% のねじり予ひずみを与え、77K でひずみ幅が 2% になるようにねじり方向繰返し負荷を与えたときの応力-ひずみ曲線である。繰返し数の小さいところでは、ヒステリシスループのひずみ方向の幅が広いが、繰返し数が大きくなると、ひずみ方向の幅が狭くなり、応力方向に細長くなる。これは、繰返し負荷により、材料が硬化したためである。この硬化の進行を見るために、Fig. 2 で示した応力幅と累積塑性ひずみを用いた。なお予ひずみをあたえたときには、その値も累積塑性ひずみの値に含めた。

室温および 77K において (a) ねじり方向、(b) 引張方向、(c) 圧縮方向の予ひずみを 2% 与えた後、77K でねじり方向繰返し負荷を与えたときの応力幅-累積塑性ひずみ曲線を Fig. 4 (a), (b), (c) に示す。これらの図には、予ひずみを与えずにねじり方向の繰返し変形を行った試験の結果も示してある。なお、累積塑性ひずみの値には予ひずみ量も含んでいる。Fig. 4 (a) のねじり方向予ひずみを与えた場合、予ひずみを与えずに繰返しした場合と、77K で予ひずみを与えた場合の硬化量はほぼ同じであり、室温で予ひずみを与えた場合が約 5% 程硬化量が少ない。Fig. 4 (b), (c) の引張、圧縮方向予ひずみを与えた場合、すなわち、繰返し方向と 90° 方向の予ひずみを与え

Fig. 1. Cyclic loading conditions.

Fig. 2. Parameters of cyclic stress-strain curves.

Fig. 3. Stress-strain curve of cyclic torsional test subsequent to torsional pre-strain at 77K.³⁾

た場合は、77K で予ひずみを与えた場合が、室温で予ひずみを与えた場合や予ひずみを与えない場合と比べ、繰返し回数の少ないところで硬化量大きい。

そして、室温でも引張や圧縮方向予ひずみを与えた場合は、繰返し回数の少ないところで、予ひずみを与えない場合と比べ硬化量がやや大きくなる。これは、77K での単純負荷において負荷方向を 90° 折り曲げた場合に大きな硬化が見られる¹⁾ のと類似の現象である。しかし、繰返し回数が多くなり累積塑性ひずみが大きくなると、77K での繰返し変形では、予ひずみの方向と与える温度の影響が小さくなり、ほぼ 1 つの曲線に収束していく。

室温で予ひずみを与えても、その後の繰返し変形挙動に影響が出ていることから、室温で、ねじり、引張、圧縮の予ひずみを与えて、77K でねじり繰返し負荷を与え

Fig. 4. Effect of pre-straining temperature on cycle torsional test at 77K.

Fig. 5. Relation between stress range and accumulated plastic strain of cyclic torsional test at 77K subsequent to pre-strain at room temperature.

Fig. 6. Relation between stress range and accumulated plastic strain of cyclic torsional test subsequent to torsional, tensile and compressive pre-strain at 77K.³⁾

たときの応力幅—累積塑性ひずみの関係を Fig. 5 に示す。比較のため、77K でねじり、引張、圧縮の予ひずみを与え、77K でねじり方向繰返し負荷を与えたときの応力幅—累積塑性ひずみの関係を Fig. 6³⁾ に示す。室温で予ひずみを与えた場合は、77K で予ひずみを与えたほどの硬化は示さないが、繰返しと 90° 方向、すなわち引張や圧縮方向に予ひずみを与えた場合は、初期の段階で繰返し方向と同方向の予ひずみを与えた場合に比べ硬化量が大きく、累積塑性ひずみが 10% のところでは、ねじり予ひずみを与えたものと比べ、応力幅が約 1.15 倍になっている。

室温および 77K において (a) ねじり方向、(b) 引張方向、(c) 圧縮方向の予ひずみを与えた後、室温でねじり方向繰返し負荷を与えたときの応力幅—累積塑性ひずみ曲線を Fig. 7 (a), (b), (c) に示す。Fig. 7 (a) のねじり

Fig. 7. Effect of pre-straining temperature on cyclic torsional test at room temperature.

方向に予ひずみを与えた場合、繰返し方向と同方向の予ひずみを与えると、予ひずみを室温で与えても、77Kで与えてもほぼ同じ変形挙動を示し、その変形挙動は累積塑性ひずみの値が同じであれば予ひずみを与えないものと同じである。Fig. 7 (b), (c) の引張、圧縮方向に予ひずみを与えた場合、室温で予ひずみを与えた場合と与えない場合を同じ累積塑性ひずみの値で比較すると室温での予ひずみの影響は、低温での予ひずみの影響に比べて小さい。累積塑性ひずみの値が同じであれば予ひずみを与えない場合とはほぼ同じ変形挙動を示す。また 77K で予ひずみを与えた場合は、予ひずみを与えない場合と室温で与えた場合と比べ、硬化量が大きくなる傾向にある。

4・2 軸方向繰返しにおける予ひずみの温度の影響

予ひずみを与えて、軸方向に繰返ししたときの応力-ひずみ線図の例を Fig. 8³⁾ に示す。これは、77K において引張予ひずみを 2% 与えて、ひずみの幅が 2% になるように軸方向繰返し負荷を与えたときの応力-ひずみ曲線である。ねじり方向の繰返し負荷の場合と同様に、繰返し数が大きくなるとヒステリシスループのひずみ方向の幅が狭くなり、応力方向に細長くなり、材料が硬化している。

室温および 77K において (a) ねじり方向、(b) 引張方向、(c) 圧縮方向の予ひずみを与えた後、77K で軸方向繰返し負荷を与えたときの応力幅-累積塑性ひずみの関係を Fig. 9 (a), (b), (c) に示す。この図には、予ひずみを与えない場合のねじり方向の繰返し変形試験の結果も示してある。Fig. 9 (a) のねじり方向予ひずみを与えた場合、77K で予ひずみを与えた場合の硬化量が、室温で予ひずみを与えた場合や予ひずみを与えない場合と比べ、累積塑性ひずみが 30% 硬化量が大きい。室温で予ひずみを与えた場合も、77K で与えた場合ほどないが、硬化量が大きくなる。これらの傾向は前述した 77K での単純負荷において負荷方向を 90° 折り曲げた場合に大きな硬化が現れるのと同様である。しかし、繰返し回数が多くなり累積塑性ひずみが大きくなると、予ひずみの方向と与

Fig. 8. Stress-strain curves of cyclic tensile and compressive test subsequent to tensile pre-strain at 77K.³⁾

Fig. 9. Effect of pre-straining temperature on cyclic tensile and compressive test at 77K.

える温度の影響が小さくなる. Fig. 9 (b), (c) の引張, 圧縮方向予ひずみを与えた場合は, 室温で予ひずみを与えた場合と, 77Kで予ひずみを与えた場合の硬化量はほぼ同じであり, 予ひずみを与えた温度の影響は小さい.

室温で, 引張, 圧縮, ねじりの予ひずみを与えて 77K で軸方向繰返し負荷を与えたときの応力幅-累積塑性ひずみ曲線を Fig. 10 に示す. 比較のため, 77K でねじり, 引張, 圧縮の予ひずみを与え, 77K で軸方向繰返し負荷を与えたときの応力幅-累積塑性ひずみの関係を Fig. 11³⁾ に示す. 77K で予ひずみを与えた場合ほどではないが, 繰返しと 90° 方向, すなわち, ねじり方向に予ひずみを与えた場合は, 繰返し回数の少ないところで繰返し方向と同方向に予ひずみを与えた場合に比べ硬化量が大きく, 累積塑性ひずみが 10% のところでは, 引張や圧縮の予ひずみを与えた場合と比べ, 応力振幅が約 1.13 倍の

Fig. 10. Relation between stress range and accumulated plastic strain of cyclic tensile and compressive test at 77K subsequent to pre-strain at room temperature.

Fig. 11. Relation between stress range and accumulated plastic strain of cyclic tensile and compressive test subsequent to torsional, tensile and compressive pre-strain at 77K.³⁾

Fig. 12. Effect of pre-straining temperature on cyclic tensile and compressive tests at room temperature.

値になっている。累積塑性ひずみが大きくなると、予ひずみが圧縮方向や、ねじり方向に与えた場合や与えない場合の曲線がほぼ一致するが、引張方向に予ひずみを与えた場合は、77Kの予ひずみの場合と同様に硬化量が小さくなる。

室温および77Kにおいて(a)ねじり方向、(b)引張方向、(c)圧縮方向の予ひずみを与えた後、室温で軸方向繰返し負荷を与えたときの応力振幅—累積塑性ひずみ曲線をFig. 12 (a), (b), (c)に示す。Fig. 12 (a)のねじり方向に予ひずみを与えた場合、繰返し方向と90°方向の予ひずみを与えると、77Kで予ひずみを与えた場合の硬化量が大きくなり、室温で予ひずみを与えた場合と予ひずみを与えない場合の変形挙動は累積塑性ひずみ量が大きくなるに従い、予ひずみの影響は小さくなる。Fig. 12 (b), (c)の繰返し方向と同方向、すなわち引張、圧縮方向に予ひずみを与えた場合は、予ひずみを室温や77Kで与えても、与えなくてもその硬化量は、ほぼ同じになり予ひずみを与えた温度の影響は小さい。

5 結 言

77Kと室温におけるステンレス鋼 SUS304 の繰返し変形挙動に対して、予ひずみの及ぼす影響について実験的に調べた。実験は、液体窒素中、または室温の大気中で薄肉円筒試験片に予ひずみを与えた後、ねじり、または引張圧縮の繰返し変形を行い、予ひずみが繰返し変形中の応力—ひずみ曲線に与える影響を調べた。繰返し変形挙動を調べるために、繰返し応力—ひずみ曲線の応力振幅と、予ひずみおよび繰返し変形によって生ずるひずみを加えた累積塑性ひずみの関係を用いた。

(1) 繰返し方向と垂直な予ひずみは、室温で与えるより77Kで与える方が繰返し負荷による硬化量が大きくなる。しかし、繰返し回数が多くなると、予ひずみを与えときの温度の影響は小さくなる。

(2) 室温で繰返し負荷を行う場合、繰返し方向と垂直方向の予ひずみを77Kで与えると、繰返し回数が多くなっても予ひずみの影響は残る。

(3) 繰返し方向と同方向の予ひずみは、77Kで与えても、室温で与えても、その後の繰返し変形に大きな影響を与えず、予ひずみを与えない場合の繰返し変形とほぼ同じ挙動を示す。

参 考 文 献

- 1) 田中直敬, 白沢 洋, 池上皓三, 日本機械学会論文集, A-57, 2775 (1991).
- 2) 白沢 洋, 池上皓三, 新津 靖, 日本機械学会論文集, A-59, 2427 (1993).
- 3) 横塚智人, 池上皓三, 日本機械学会論文集, A-64, 209 (1998).
- 4) 河合出穂, 池上皓三, 新津 靖, 日本機械学会論文集, A-62, 2319 (1996).
- 5) 辻 大作, 新津 靖, 池上皓三, 日本機械学会論文集, A-53, 1426 (1987).
- 6) A. Horiguti, Y. Niitsu and K. Ikegami, Proc. of int. conf. on Advanced Mechatro, 489 (1989).