低温における SUS 304 鋼の繰返し塑性変形挙動*

白 沢 洋^{*1}, 池 上 皓 三^{*2}, 新 津 靖^{*3}Experimental Investigation of Cyclic Plastic Deformation
of Stainless Steel 304 at Low Temperature

Yo SHIRASAWA, Kozo IKEGAMI and Yasushi NIITSU

Cyclic plastic deformation of stainless steel 304 was experimentally investigated at low temperature of liquid nitrogen (77 K) under combined loading conditions. Tubular specimens were subjected to cyclic loading under stress-controlled conditions. At low temperature, the material showed magnitudes of different hardening for the same strain in tensile and compressive loading directions. The characteristic hardening behavior caused a kind of mechanical ratchetting under cyclic loading. The hysteresis loops of stress-strain curves in cyclic loading were saturated with increasing cycle numbers. The saturated stress values depended on the loading condition. The values were represented by an equation accounting for cumulative plastic strain.

Key Words: Plasticity, Combined Stress, Cyclic Behavior, Low Temperature, Stainless Steel, Stress-Strain Relationships, Mechanical Ratchetting

1. 緒 言

低温構造物の重要性が高まるにつれて、低温における構造用材料の機械的特性を詳細に知ることが必要になってきている。低温における金属材料の機械特性に関する研究では、繰返し負荷に対する特性の研究は極めて少なく、引張特性などの単純な負荷状態のものが多く、また、低温での高サイクル疲労は比較的多く研究が行われているが、低サイクル疲労についての研究は、わずかに鈴木ら⁽¹⁾の SUS 304 L 鋼による研究があるのみである。

本研究では液体窒素温度(77 K)において低温構造用材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鋼 SUS 304 の繰返し塑性変形挙動を実験的に調べた。試験片は薄肉円筒形状で、軸方向負荷とねじり方向負荷の多軸負荷試験が可能である。SUS 304 鋼は 77 K において、その硬化則が Mises 則に従わず、圧縮方向において、引張方向、ねじり方向よりも硬化が著しい。これには、低温でオーステナイト系ステン

レス鋼にみられる加工誘起マルテンサイト変態の影響が関係していると考えられる。このような引張りと圧縮で異なる硬化特性のため、低温での単純負荷後の繰返し負荷では、変形挙動の負荷方向依存性が顕著であることが報告されている⁽²⁾⁽³⁾。このため繰返し負荷においても、低温特有の変形挙動を示すことが考えられる。報告の実験では、軸方向、ねじり方向負荷のほか、組合せ負荷、さらに軸方向繰返し予負荷の後、負荷の軸を変え後続方向へ繰返し負荷を行い、低温における繰返し変形の特徴を調べた。

2. 実験方法および試験片

実験は低温複合負荷試験機を用いて行った。ひずみ

図 1 試験片形状

* 原稿受付 平成 5 年 4 月 1 日。

^{*1} 学生員, 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)。

計測には、本研究室において製作された、光学式非接触ひずみ計測システムを用いた⁽³⁾。実験に用いた被試験材料は SUS 304 ステンレス鋼である。試験片は図 1 に示すような形状で、薄肉円筒形状に加工した後、1050°C、30 分の固溶体化処理を行った。77 K における繰返し負荷実験は次のような負荷条件のものを行った。すなわち、

(1) 負荷方向が変化しない繰返し実験として、(a) 軸方向繰返し、(b) ねじり方向繰返し、(c) 比例方向繰返しの実験、(2) 負荷方向を変化させる繰返し実験として、(d) 軸方向繰返し後のねじり方向繰返し、(e) ねじり方向繰返し後の軸方向繰返し実験を行った。

ここで(c)の比例方向とは、図 2 に示される Mises 形応力平面上で、軸方向とねじり方向の負荷応力が 1

図 2 負荷方向の概略図

図 3 繰返し応力-ひずみ曲線の模式図

対 1 になる負荷の方向とする。繰返し数は(1)の実験では 40 サイクルとした。また(2)(d)の実験では予負荷方向に 20 サイクル、後続負荷方向に 20 サイクルの 1 種、(2)(e)では予負荷方向に 20 サイクルと 10 サイクルの場合の 2 種で後続負荷はともに 20 サイクルとした。繰返しのひずみ幅は(a)の実験では 2, 3, 4%, (b)の実験では 2, 3, 4%, (c)の実験では 2% である。(d)と(e)の実験では 2% である。実験結果を表示するのに用いた記号は次のとおりである。また、これらの記号のうちで、応力-ひずみ曲線のヒステリシスループに関するものを図 3 に示す。

N : 繰返し数

p^p : 相当塑性ひずみ

r^p : せん断塑性ひずみ

$\Delta \epsilon$: ひずみ範囲

$\Delta \bar{\sigma}$: 応力範囲 ($|\bar{\sigma}_{\max}^+| + |\bar{\sigma}_{\max}^-|$)

$|\bar{\sigma}_{\max}^+|, |\bar{\sigma}_{\max}^-|$: サイクルにおける最大応力

$\bar{\sigma}_s$: 飽和応力振幅

$\bar{\sigma}_0$: 第 0 サイクルの応力振幅

S^p : 累積塑性ひずみ

3. 単純負荷での変形特性

液体窒素温度(77 K)での単純負荷に対する応力-塑性ひずみ曲線を図 4 に示す。図には室温でのねじり負荷に対する応力-塑性ひずみ曲線も示してある。ねじり負荷での変形特性を 77 K と室温と比較すると 77 K では室温よりも硬化が著しい。77 K における負荷方向の違いによる変形特性を比較すると、引張方向とねじり方向では同一の変形特性を示すが、圧縮方向には加工硬化が大きく、図 4 に示されるように、同じ塑性ひ

図 4 単純負荷の相当応力-相当塑性ひずみ曲線

ずみに対する応力値は 15~18%ほど高い。このような圧縮方向での硬化特性は室温や高温ではみられない、特有の変形特性である⁽²⁾⁽³⁾。したがって、初期状態から負荷したとき、等塑性ひずみ量に対する応力値を、Mises 形応力平面上で連ねた初期等塑性ひずみ曲線は、図 5 に示すように、圧縮側をだ円、引張側を円とし

図 5 77 K における初期等塑性ひずみ曲線

図 6 ねじり方向繰返し負荷の相当応力-相当ひずみ関係 (77 K)

図 7 ねじり方向繰返し負荷の相当応力-ひずみ関係(室温)

て表現するとほぼ実験結果を表現することができる。

4. 負荷方向が変化しない 繰返し負荷変形特性

ねじり方向の繰返し負荷の場合、77 K と室温における応力-ひずみ曲線を図 6、図 7 に示す。ひずみ振幅は 77 K の場合が 3%、室温の場合が 2%である。77 K では繰返しとともに硬化の進行が著しいのに対し、室温では繰返しによる硬化は極めて小さい。このようなねじり方向繰返し負荷に対する応力-ひずみ曲線の最大応力の絶対値を示したのが図 8 である。図において、ひずみ振幅はともに 2%である。室温では、最大応力値はほぼ第 5 サイクルまでに飽和しているが、77 K では第 20 サイクルまで一定の割合で増加し、その後も緩やかに増加する。また、77 K においてひずみ振幅の異なる場合のサイクル数と最大応力値の関係を図 9 に示す。ねじり方向繰返し負荷試験では、3 種のひずみ振幅の場合には、40 サイクルの負荷においても途中

図 8 ねじり方向繰返し負荷におけるサイクル数と最大応力の関係(77 K と室温)

図 9 ねじり方向繰返し負荷におけるサイクル数と最大応力の関係

での試験片の破断はみられなかった。図 9 より、ひずみ振幅の大きいものほど少ないサイクル数で、最大応力値が飽和する傾向があることがわかる。なお、図 8 と図 9 の曲線の一部に不連続箇所があるが、これは試験片つかみ部でのジグのわずかのすべりによるものと思われる。

77 K でのねじり方向繰返し負荷時に、サイクル数の増加に伴い、引張方向に塑性ひずみが累積していく一種のラチェット変形現象がみられる。これは低温での異方硬化性に起因するものと考えられ室温、高温においてはみられない現象である。図 10 にねじり方向繰返し負荷を行った場合の塑性ひずみ経路を示す。ひずみ経路が脈動しながら、軸方向にひずみが累積していく。また、図 11 にねじり方向繰返し負荷を室温と 77 K で与えた場合の、サイクル数とラチェットひずみ ϵ_r の関係を示す。この場合、ラチェットひずみは 1 サイクルでの増分が最大で 0.2% ほどに達する。室温では、ひずみがほとんど累積していないのに対し、77 K

ではサイクルごとにひずみが累積している。また図 11 に示すように、77 K でのラチェットひずみは第 20 サイクルまではほぼ一定の割合で増加し、その後も緩やかに増加する。

ひずみ振幅 3% での軸方向繰返し負荷の場合の、応力-ひずみ曲線を図 12 に示す。軸方向繰返し負荷において、各サイクルの最大応力値は引張方向より圧縮方向で高い値となる。また硬化量も引張方向よりも圧縮方向でのほうが大きいことがわかる。このような繰返し負荷でのサイクル数と引張側と圧縮側における最大応力値の関係を示したのが図 13 である。図にはねじり方向繰返し負荷の場合の最大応力値を比較のため示してある。圧縮側の最大応力値の飽和値は引張側よりも大きく、ねじり側の値と近い値となる。また、ねじり方向負荷に比べ、軸方向負荷の場合は早く飽和する。

比例方向負荷をひずみ振幅 2% で繰返した場合の応力-ひずみ曲線を、77 K での結果を図 14 に、室温での

図 10 ねじり方向繰返し負荷における塑性ひずみ経路

図 12 軸方向繰返し負荷の相当応力-相当ひずみ関係

図 11 ねじり方向繰返し負荷におけるサイクル数とラチェットひずみの関係

図 13 繰返し負荷におけるサイクル数と最大応力値の関係

結果を図 15 に示す。比例負荷の繰返しにおいても、77 K のほうが室温に比べて硬化の進行が著しい。なお、図 14 と図 15 の応力とひずみの値はいずれも相当量で示されているが、図 2 での比例負荷経路で負荷の応力値が負の場合には、それに対応する応力値とひずみ値をそれぞれ負の相当量で示してある。

以上の結果から、負荷方向の変化しない繰返し負荷では、応力-ひずみ曲線のヒステリシスループの応力の最大値が繰返し負荷によって増加し徐々に飽和していく。この飽和する値 $\bar{\sigma}_s$ と繰返しひずみ幅の関係をねじり負荷、軸方向負荷、比例負荷についてまとめたのが図 16 である。応力の飽和値はねじり負荷の場合が、他の負荷の場合に比べ大きい。応力の飽和値もひずみ振幅に対し増加し、ひずみ振幅が大きくなるにつれ飽和していく。なお、図 11 や図 13 などの結果で曲線に一部不連続箇所があるが、これも図 8 と図 9 の結

果で述べたように、試験片つかみ部でのジグのすべりによるものと思われる。

5. 負荷方向が変化する繰返し特性

軸方向繰返し予負荷(20 サイクル)を与えた後、ねじり方向後続繰返し負荷(20 サイクル)の場合の、サイクル数と繰返し応力-ひずみ曲線の引張側と圧縮側の最大応力値 ($|\bar{\sigma}_{\max}|$ と $|\bar{\sigma}_{\min}|$) の関係を■印で図 17 に示す。図には比較のため負荷方向が変化しない軸方向の繰返し負荷の場合も○印で示してある。■印で示される結果について、軸方向負荷の予繰返し変形(20 サイクルまで)では、圧縮側で硬化が大きいため、最大応力の絶対値が圧縮側で引張側より大きくなっているが、軸方向繰返し負荷後のねじり負荷の後続繰返し変形(20 サイクル以降)では、正方向のねじりと負方向のね

図 14 比例方向繰返し負荷の相当応力-相当ひずみ関係 (77 K)

図 16 種々のひずみ振幅での飽和応力振幅

図 15 比例方向繰返し負荷の相当応力-相当ひずみ関係 (室温)

図 17 繰返し負荷を軸方向からねじり方向へ変化した場合のサイクル数と最大応力の関係

じりにおける最大応力の絶対値がほぼ一致している。後続繰返し負荷時の最大応力値を、負荷方向が変化しない軸方向の繰返し負荷の最大応力値と比較すると、後続繰返し負荷のほうが大きくなっているが、いずれの場合もサイクル数が多くなるにつれて最大応力値が飽和していく傾向を示している。

ねじり方向で繰返し予負荷(20 サイクル)を与えた後、軸方向後続繰返し負荷(20 サイクル)の場合のサイクル数と繰返し応力-ひずみ曲線の最大応力値の関係を図 18 に示す。図には比較のため、負荷方向が変化しないねじり方向繰返し負荷の場合の最大応力値も示してある。ねじり方向繰返し負荷の最大応力値は、サイクル数とともに増加する。しかし、軸方向の後続繰返し負荷では、サイクル数とともに圧縮側の最大応力は

増加するが、引張側の最大応力は減少する。また最大応力値の引張側と圧縮側の値の和で与えられる応力振幅と、サイクル数との関係を示したのが図 19 である。図には予ねじり繰返し負荷を 10 サイクルと 20 サイクル行った後の軸方向繰返し負荷、そして予負荷のない軸方向負荷の場合が示してある。予繰返し負荷を行った場合の軸方向後続負荷では、予サイクル数の応力振幅に及ぼす影響は極めて小さい。また予ねじり繰返し負荷を与えると軸方向繰返し負荷の応力振幅が大きくなっている。いずれの場合にも、サイクル数の増加とともに応力振幅の値は飽和していく。

6. 考 察

6・1 繰返し硬化過程の定式化 繰返し硬化過程

図 18 繰返し負荷をねじり方向から軸方向へ変化した場合のサイクル数と最大応力の関係

図 20 ねじり方向繰返し負荷における累積塑性ひずみと応力振幅の関係

図 19 繰返し負荷をねじり方向から軸方向へ変化した場合のサイクル数と応力振幅の関係

図 21 軸方向繰返し負荷における累積塑性ひずみと応力振幅の関係

の解析手法として、室温、高温の場合に次の式で最大応力 $\sigma_{(N)}$ を近似するものがある⁽⁴⁾。

$$\sigma_{(N)} - \sigma_{(0)} = (\sigma_s - \sigma_{(0)}) \{1 - \exp(-a S^p)\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで σ_s は飽和応力値、 a は材料定数、 S^p は累積塑性ひずみである。77 K の場合には硬化の進行は長いサイクルにわたり続くため、式(1)の S^p を $(S^p)^2$ で置き換えた以下の式を実験結果に適用した。

$$\sigma_{(N)} - \sigma_{(0)} = (\sigma_s - \sigma_{(0)}) \{1 - \exp[-a (S^p)^2]\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ねじり方向繰返し負荷は、3種のひずみ振幅の試験で40サイクルまで行われているため、この3種の試験より材料定数 a を求めた。得られた a の値は 9.2×10^{-4} となった。図20に累積塑性ひずみと応力振幅の関係の実験値と近似曲線を示す。図において式(2)による近似曲線は曲線2で示している。また図20には式(1)で近似したものを曲線1としてあわせて示している。曲線1での a の値は 5.3×10^{-2} である。またこの a を軸方向の結果に式(2)を用いて適用した場合の、累積塑性ひずみと応力振幅の関係の実験値と近似曲線を図21に示す。実験結果と近似曲線はよく一致しており、ねじり方向から得られた材料定数 a が軸方向の結果にも適用できることがわかる。

6・2 ラチェット変形 77 K でねじり方向単純負荷での塑性ひずみ経路を図22に示す。この図において引張方向の塑性ひずみはねじり方向に比べ微小なため、横軸は縦軸の5倍のスケールで表している。また図中には塑性ひずみベクトルの方向を示してある。ベクトルの大きさは一定で、塑性ひずみ量を表すものではない。この図よりわかるように単純負荷においてもねじり方向負荷において、引張方向に塑性ひずみが現

図22 ねじり方向単純負荷における塑性ひずみ経路

れることがわかる。そして、この塑性ひずみが繰返しにより累積し、ラチェットひずみとして観察される。この現象は低温において圧縮方向に大きく硬化する異方硬化性に起因していると考えられる。これは図23のように室温、高温と低温での等塑性ひずみ曲線の形状の違いにより説明できる。図23(a)は室温、高温の場合の予負荷後の等塑性ひずみ曲線で、これは図のような閉曲線で表せ、その形状はねじり応力軸に対して対称である。したがって、ねじり負荷の繰返しを行ったときも、この対称性が保たれるとすると、等塑性ひずみ曲線と負荷方向が交差する点(図のA)では、等塑性ひずみ曲線の法線方向が、ねじり応力軸方向に一致し、またその点で生じる塑性ひずみベクトルの方向は、ねじり応力軸方向に一致する。したがってこのときは、軸方向成分の塑性ひずみ成分は生じない。

77 K での初期等塑性ひずみ曲線は、引張側と圧縮側での硬化特性が異なるため図23(b)に示すように、ねじり応力軸に対して非対称となる。したがって、ねじり負荷の繰返し経路と等塑性ひずみ曲線の交点(図のB)では、等塑性ひずみ曲線の法線方向がねじり応力軸に一致しない。したがって、この点で生じる塑性ひずみベクトルは、図に示すように軸方向に傾いた方向となる。この塑性ひずみベクトルの方向とねじり応

(a) 室温、高温の場合

(b) 77 K の場合

図23 ねじり負荷による等塑性ひずみ曲線と塑性ひずみベクトルの方向

力軸の方向のずれにより軸方向ひずみが生じる。このことにより軸方向にひずみが累積する一種のラチェット現象が観察される。

6・3 負荷方向を変化させた場合のヒステリシスループの遷移現象 負荷方向を途中で変化させた場合、予負荷方向がねじり方向であるか、軸方向であるかにかかわらず、図 19 に示されるように、後続負荷方向に応力振幅は増加し、その後、飽和する。しかし、図 17, 18 にみられるように、最大応力値についてみると、ねじり方向予負荷の後、軸方向後続繰返し負荷の場合の引張側において、減少していく。また、このとき圧縮側では最大応力値は増加している。したがって、応力振幅の値としてはほぼ飽和しているといえる。この現象は、応力-ひずみ平面上ではヒステリシスループの応力振幅が、一定のまま応力の圧縮側へ徐々に遷移していく現象である。

7. 結 言

SUS 304 鋼試験片を用いて、液体窒素温度において繰返し負荷試験を行い、その変形挙動を調べた。その結果以下の知見が得られた。

(1) 負荷方向の変化しない繰返し負荷では、応力-

ひずみ曲線のヒステリシスループの応力の最大値が増加する。この増加の傾向は室温の場合より顕著である。

(2) 77 K において繰返し負荷による硬化は長いサイクルにわたり徐々に進行するため、累積塑性ひずみの二乗を硬化パラメータとすれば、硬化過程をよく近似できる。

(3) 繰返しの途中で負荷方向を変化させると、変化させない場合に比べて、サイクル数が同じであっても繰返し応力-ひずみ曲線のヒステリシスループの硬化量が異なる。

(4) 77 K でのねじり方向繰返し負荷において、引張方向へひずみが累積していくラチェット現象がある。

(5) 77 K において、ねじり方向繰返し予負荷の後、軸方向に後続繰返し負荷を行った場合に、ヒステリシスループの遷移する現象がある。

文 献

- (1) 鈴木・深倉・森, 材料, 34 (1985), 1206.
- (2) 廖・新津・池上, 機論, 54-503, A (1987), 1426.
- (3) 田中・白沢・新津・池上, 機論, 57-543, A (1991), 2775.
- (4) 新津・池上, 機論, 52-478, A (1986), 1621.