低温下における SUS 304 鋼の塑性変形挙動*

辻 大作^{*1}, 新 津 靖^{*2}, 池 上 皓 三^{*2}Plastic Deformation of SUS 304 under Combined Stress
States at Low Temperatures

Daisaku TSUJI, Yasushi NIITSU, and Kozo Ikegami

Equipments and procedures for combined stress testing in a cryogenic state are presented. The combined axial load and torsion are applied to a thin wall tubular specimen in a cryostat. The specimen is cooled by liquid nitrogen and helium. A strain measuring system of a mechanical type is developed and the sensitivity of the system is calibrated. The cryogenic plastic behavior of SUS 304 is experimentally investigated under combined tensile stress and torsional stress. At 77 K, the plastic deformation follows the Mises law under combined stress states of tension and torsion, but the compressive flow stress is greater than tensile or torsional. An unstable serrated flow by the proportional loading under stress control conditions is observed at 4.2 K.

Key Words: Plasticity, Cryogenics, Low Temperature, Testing Method, Stainless Steel, Combined Stress, Stress-Strain Relation

1. 緒 言

近年超伝導コイル, LNG タンクおよび宇宙機器などに見られるように低温下で使用される構造物が増え、低温構造の重要性が高まってきている。これに伴って極低温下で材料試験が可能な試験機が多くのメーカーや研究機関で試作され、構造材料の低温変形挙動が精力的に研究され始めてきている。しかしながら、極低温下での構造材料の変形挙動に対する従来の研究は、実験の困難さ、特にひずみ測定の困難さのため、一方向の引張荷重下における変形挙動について調べたものが多く、実際の構造物に加わると予想される複雑な組合せ応力下での変形挙動を調べた研究はほとんど見あたらない。わずかに 118 K において引張内圧の組合せ試験を行った Koval'chuk ら⁽¹⁾⁽²⁾の研究などがあるのみである。

本研究では、液体ヘリウムおよび液体窒素の冷媒中で薄肉円筒試験片に軸方向荷重とねじり荷重を任意に組合せて負荷することができる極低温複合荷重試験機

とクライオスタット(低温恒温槽)内に密閉されている試験片のひずみを正確に測定できる計測系を試作した。さらに、これら試作した試験装置を用いて、低温構造材料として多用されている SUS 304 ステンレス鋼について基本的な複合負荷試験を行い、実験結果の定性的な検討を行った。

2. 実験装置および試験片

試作した極低温複合荷重試験装置の写真と構成図を図 1 および図 2 に示す。本試験装置は、試験機本体、クライオスタットおよび制御装置から構成されている。試験機本体は、立て形で、上部に取付けた油圧モータでねじり負荷を、下部に取付けた油圧シリンダで軸方向負荷を二重円管を通してクライオスタット内の試験片に負荷することができる。またクライオスタットは、外径 300 mm, 内径 200 mm, 高さ 800 mm の円筒形状の三重断熱構造となっている。本試験機は、負荷形式として電気油圧サーボ方式を用いており、応力またはひずみをフィードバック信号として用いることにより応力制御とひずみ制御の実験が可能である。このアナログフィードバック系の制御は D/A 変換器を介してコンピュータによって行われており、プログラムにより任意の負荷を試験片に加えることができる。また、

* 昭和 62 年 4 月 1 日 第 64 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 10 月 6 日。

^{*1} 正員, (株)小西六写真工業, (〒192 八王子市石川町 2970)。

^{*2} 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)。

応力、ひずみ、温度などのデータは A/D 変換器を通してコンピュータに入力されデータとして保存および処理される。

試験片は図 3 に示すような薄肉円筒形であり、両端にテーパを付けた形となっている。材料は SUS 304 ステンレス鋼で、加工後約 1050 °C で約 40 分間固溶体化処理を施した。

図 4、5 にそれぞれクライオスタット内の断面図および試験片取付部の断面図を示す。試験片への負荷は、図 4 に示すように二重のステンレス製パイプを介して行う⁽³⁾⁽⁴⁾。また、図 4 のクライオスタットの外側の支柱は、試験機の 4 本の支柱に取付けられているリニアガイドの上を上下動するようになっており、試験機のねじりに対する剛性を高めている。

低温下でのひずみ測定は、多くの場合ひずみゲージを用いて試験片のひずみを直接測定するが、ひずみゲ

ージでは大ひずみの測定は不可能であり、変位測定装置を試作する必要がある。本試験機ではチャック間の変位測定によってひずみを計測する方法を採用した。これを可能にするため、図 5 に示す試験片およびその取付部にテーパ構造を取り入れ、チャック部が軸方向荷重・ねじり荷重に對しがたのない構造にした。試験片の取付けは、図 5 および図 6 に示すように、まず試験片のテーパに二つ割のテーパ付きリング②を合せ(図 6 (a))、ねじり軸⑤とテーパ付きの治具④に取付

図 3 SUS 304 製薄肉円筒試験片

図 1 極低温複合負荷試験機

図 4 試験装置の断面図

図 2 試験装置の構成図

図 5 試験片取付部の断面図

ける〔図6(b)〕。これを、引張軸である外側の円筒⑥に入れて、円筒の底面から、ねじ穴の付いたリング⑦をかぶせ、ねじで押さえ固定している〔図6(c)〕。治具の材質は、二つ割のテーパ付きリングには線膨張係数の小さいSNM鋼を、他のものにはSUS 304鋼を採用し、温度の低下によってテーパ部が緩まないようにした。

軸心の一致の精度を出すために、外側の円筒の内面には切削加工後さらにホーニング加工を施している。

3. ひずみ測定および実験方法

実験は、SUS 304 製薄肉円筒試験片に冷媒中で軸方向荷重とねじり荷重を組合せて加えることにより行った。試験片への荷重の測定は、ねじり軸に接続された複合加重測定用ロードセルを用いて行った。温度は冷媒(液体ヘリウム、液体窒素)に浸すことにより一定温度(4.2, 77 K)に保持した。また、冷媒の液面のチェックは、図5に示した外側円筒の3箇所にはった炭素線抵抗を用いて行った。

試験片に生じるひずみは、試験片に直接はったひずみゲージ(1~2%以下)と図7に示す差動変圧器(軸方向用)とポテンションメータ(ねじり用)を用いたチャック間変位計(1~2%以上)を併用して測定した。

(a)

(b)

(c)

図6 試験片の取付手順

変位計の校正は測定した値とひずみゲージによる値を比較することにより行った。図8は変形の少ない外径12 mmの中実試験片を取付け、変位計を用いて試験装置の変形(剛性)を測定した結果である。装置の変形は負荷に対して線形であり、変位計の出力から試験片のひずみを算出することが可能である。図9は室温において変位計の校正のために行った、引張りとねじり試験の結果である。ここで横軸は試験片にはった塑性ひずみゲージの出力、縦軸は変位計の出力から図8の装置の変形に相当する出力を差引いた値である。これらの予備実験および実際の試験において治具のがたや滑りは観察されなかった。また、図9の結果よりひずみの測定誤差は、最大で $\pm 0.05\%$ strainであった。

(a) 軸方向ひずみ用

(b) せん断ひずみ用

図7 引張圧縮用とねじり用の変位計

(a) 引張圧縮負荷

(b) ねじり負荷

図8 変位計で測定した試験装置の変形

実験は応力制御で行い、負荷速度はミーゼス形相当応力の速度 $\sqrt{\dot{\sigma}^2 + 3\dot{\tau}^2}$ が 1 MPa/s となるようにした。また塑性ひずみ (ε_p, γ_p) と真応力 (σ, τ) は、測定された応力とひずみのデータから式(1)を用いて計算された。

$$\begin{aligned}\varepsilon_p &= \varepsilon' - \sigma'/E \\ \gamma_p &= \gamma' - \tau'/G \\ \sigma &= \sigma' \cdot (1 + \varepsilon') \\ \tau &= \tau' \cdot (1 + 3/2 \cdot \varepsilon') \cdots \cdots (1)\end{aligned}$$

ここで、 $\varepsilon', \gamma', \sigma'$ および τ' は、それぞれ工学軸方向ひずみ、工学せん断ひずみ、公称軸方向応力および公称せん断応力であり、 E および G は縦弾性係数とせん断弾性係数である。 τ の計算には、軸方向ひずみによる試験片の内外径の変化が考慮されている。また、式(1)で得られる塑性ひずみと真応力から、累積塑性ひずみ ρ とミーゼス形相当応力 $|\sigma|$ は式(2)を用いて計算された。

$$\rho = f \sqrt{(d\varepsilon_p)^2 + (d\gamma_p)^2} / 3$$

$$|\sigma| = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \cdots \cdots (2)$$

4. 実験結果

4.1 低温下での SUS 304 鋼の引張応力ひずみ曲線

図 10 に 4.2 K と 77 K および室温での引張負荷における応力-ひずみ曲線を示す。縦軸は真応力、横軸は塑性ひずみである。これを見ると、温度が下がるにつれて応力-ひずみ曲線の流動応力が高くなっており、かつ初期の加工硬化率も大きくなっている。4.2 K では塑性ひずみが約 1% を超えたところから、応力-ひずみ曲線はセレーションによる不安定な変形を示している。ここで観察されたセレーションは Novikov らの実験⁽⁵⁾に見られるようなきれいなこの歯状ではなく、不安定で大きなものとなっている。これは、実験を応力制御で行ったためセレーション時のひずみ速度が増大したことが原因と考えられる。また、77 K における応力-ひずみ曲線を見ると、1% 付近でいったん小さくなった加工硬化率が、5% 付近より再び大きくなっている。

4.2 SUS 304 鋼の組合せ荷重下における変形挙動

(a) 軸方向ひずみ

(b) せん断ひずみ

図 9 室温で行った変位計の校正曲線

図 10 引張りの応力-ひずみ曲線の温度依存性

図 11 相当応力-相当ひずみ曲線の負荷方向依存性

図 11 に、77 K において比例負荷実験を行った時の応力ひずみ曲線を示す。縦軸は相当応力、横軸は相当塑性ひずみを表し、負荷方向は図 11 に示すようにミーゼス形応力平面上で引張方向からの角度 θ で表す。これをみると、 θ が 0° から 90° における実験結果はほぼ一致している。しかし、 θ が 135° , 180° においては流動応力が $\theta=0^\circ$ の場合の流動応力より高く、圧縮方向に硬い傾向があることがわかる。次に、この傾向が引張り後の圧縮変形に対しどのような影響をあたえているか調べた。図 12 は縦軸を相当応力、横軸を相当塑性ひずみの累積量としたときの、応力-ひずみ曲線の比較を示している。三角印は引張負荷で塑性ひずみを約 3.6 % 与えた後、負荷方向を折り曲げて圧縮負荷を加えたときの応力-ひずみ曲線である。また、実線および破線はそれぞれ引張負荷および圧縮負荷による応力-ひずみ曲線で、この結果より、引張後圧縮負荷時の応力-ひずみ曲線の負荷方向折り返し後の流動応力は、引張の応力-ひずみ曲線の流動応力よりも高くなって

いる。このことより、バウシinger 曲線においても引縮方向に硬化することがわかる。

図 13 は、4.2 K においてセレーションによって大きな変形が生じる前(約 1 % まで)の、引張負荷と引張ねじりの組合せ負荷による応力ひずみ曲線である。4.2 K においても、77 K の場合と同様に、 $\theta=0^\circ$ と $\theta=45^\circ$ の応力ひずみ曲線は、ほぼ一致している。

図 14 は、4.2 K における負荷実験により破断したものである。上の試験片は引張荷重により破断したもので、下の試験片はねじり負荷により破断したものである。破断した時の応力は双方とも相当応力で約 1800 MPa、試験片のひずみは双方とも相当塑性ひずみで約 20 % であった。また破面を見ると、双方とも最大せん断応力方向で破断していることがわかる。また Gunter らの実験結果⁹⁾では 30 % 以上伸びているのに対し本実験では約 20 % で破断している。応力制御実験のため、セレーション時にひずみ速度が増大し、試験片に衝撃的な変形が生じることにより早い破断になったと考えられる。

5. 結 言

本研究では極低温複合荷重試験機を試作し、SUS 304 製薄肉円筒試験片を用いて極低温下で複合荷重試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 試作した極低温複合荷重試験機と変位計を用いて、極低温下における複合負荷実験法を確立した。
- (2) SUS 304 鋼の応力-ひずみ曲線の温度依存性を調べた。この結果、温度が低くなるにつれて流動応力が高くなり、初期の加工硬化率が大きくなった。
- (3) 77 K において軸荷重とねじりによる比例負荷実験を行い、SUS 304 鋼の低温塑性変形の負荷方向依存性を求めた。この結果、引張りとねじりの組合せ負荷での相当応力と相当ひずみの関係は、ミーゼス形の相当量で表せた。しかし、圧縮負荷実験による応力-ひずみ曲線は引張りやねじりの応力-ひずみ曲線より

図 12 引張ひずみ後圧縮方向に再負荷したときの応力-ひずみ曲線

図 13 セレーションの生じる前の塑性変形

図 14 4.2 K で破壊した試験片
(上: 引張負荷, 下: ねじり負荷)

流動応力が高く、SUS 304 鋼は引張負荷よりも圧縮負荷に対して硬い傾向があった。

(4) 4.2 K における応力-ひずみ曲線では、応力制御でのセレーションは、ひずみ制御でのセレーションよりも不安定で大きく出た。また 4.2 K の実験により破断した試験片の破面は、引張負荷試験の場合、ねじり負荷試験の場合ともに最大せん断応力面で破断した。

終わりに、本研究の一部は、昭和 60 年度文部省特定研究費の援助によるものであることを記し謝意を表します。

文 献

- (1) Koval'chuk, B. I., ほか 2 名, *Strength Mater. Sci.*, 10-10 (1978), 1140.
- (2) Kul'chitskii, N. M., ほか 2 名, *Strength Mater. Sci.*, 10-2 (1978), 201.
- (3) 福島, 機誌, 77-668 (昭 49), 799.
- (4) 堀内・ほか 3 名, 神戸製鋼技報, 34-3 (昭 60), 47.
- (5) Novikov, N. V. and Gorodyskii, N. I., *Strength Mater. Sci.*, 11-7 (1979), 719.
- (6) Gunter, C. S., (Ed. Wigley, D. A.), *Mechanical Properties of Material at Low Temperatures*, (1971), 60, PLENUM PRESS.