

208 TiNi 形状記憶合金の回復応力に関する実験的研究

Experimental Research on Recovery Stress of TiNi Shape Memory Alloy

○学 上田 典幸 (三重大・院) 正 徳田 正孝 (三重大・工)

正 稲葉 忠司 (三重大・工) 正 北村 一浩 (長野高専)

Noriyuki UEDA, Masataka TOKUDA, Tadashi INABA, Department of Mechanical Engineering, Mie University, 1577, Kurimamachiya, Tsu, 514-8507, Japan

Kazuhiro KITAMURA, Department of Mechanical Engineering, Nagano National College of Technology

The shape memory alloys have been expected from a view point of engineering applications because of its unique mechanical properties. When the shape memory alloy which was deformed at low temperature is heated in the condition with the restriction of strain, the recovery stress occurs by a reverse transformation. In this study, the recovery stress after the torsional loading condition was experimentally investigated in TiNi shape memory alloy tube manufactured by the sintering synthetic method. The obtained results are discussed in this paper.

Key Words: Shape memory alloy, Superelasticity, Recovery stress, Thin-walled tube specimen, Torsional load

1. 緒言

形状記憶合金は、優れた熱的・力学的変形特性を示すことから多岐にわたる分野で工業応用が期待されており、近年、積極的な研究開発の取り組みが行われているスマートマテリアルのひとつである⁽¹⁾。形状記憶合金では変形した後、そのひずみを拘束し加熱すると、逆変態により回復応力が発生する⁽²⁾⁽³⁾。この回復応力の応用例としては、パイプの継ぎ手や固体エンジンの駆動素子、アクチュエータなどが挙げられる。しかしながら、この回復応力に関する評価の多くは単軸引張条件に関わるものがほとんどであり、ねじり、圧縮などの負荷条件下では基本的な変形挙動に関する研究でさえほとんどなされておらず、その変形特性はあまり知られていない⁽⁴⁾。回復応力を利用した形状記憶合金の工業的応用を考慮した場合、一般負荷条件下での形状記憶合金の変形特性に関する研究は不可欠であり、その究明は極めて重要である。

本研究では、燃焼合成法によって製造された TiNi 形状記憶合金の薄肉円管試験片を用いて、熱膨張による影響の少ないねじり負荷条件下における TiNi 形状記憶合金の回復応力および形状回復挙動を実験的に評価した。

2. 試験片および実験方法

実験で用いた試験片は TiNi 形状記憶合金であり、その組成は Ti-50.2at%Ni である。試験片形状は、外径 7mm、内径 5mm、長さ 100mm の薄肉円管である。

この材料は燃焼合成法によって製造され、その後、押し出し成型されたものである。形状を記憶させる熱処理としてアルゴンガス中に、500°C で 40 分間保持し、後に水冷した。この熱処理によって得られた変態温度特性を示差走査熱量計(DSC-50、島津製作所製)により測定したところ変態温度は以下の通りであった。

$$M_s = -2^\circ\text{C}, M_f = -47^\circ\text{C}, M_s' = 33^\circ\text{C}, M_f' = 16^\circ\text{C}$$

$$A_s = 13^\circ\text{C}, A_f = 32^\circ\text{C}, A_s' = 28^\circ\text{C}, A_f' = 40^\circ\text{C}$$

ここで、 M_s 、 M_f は、マルテンサイト変態開始および終了温度であり、 M_s' 、 M_f' は R 相変態開始および終了温度

である。また、 A_s 、 A_f はマルテンサイト変態の逆変態開始および終了温度であり、 A_s' 、 A_f' は R 相変態の逆変態開始および終了温度である。

TiNi 形状記憶合金は難加工性材料であり、つかみ部加工が困難であるため、力学試験機への取り付けにはつかみ治具を用いた。つかみ部は試験片両端 35mm、標点間距離 30mm とした (Fig.1)。なお、実験の際に生じるひずみの計測にはひずみゲージ (最大計測ひずみ量 15%) を用いた。試験装置は複合負荷試験機オートグラフ (AG-10TCIR、島津製作所製) を用いた。また、試料の温度制御には温度コントロールシステム (OCE-TCR12300、オーム電機株式会社製) を用いた。

本研究では以下の方法によりねじり負荷条件下における回復応力を調べた。

- 手順 1) -20°C においてねじり負荷を与え、2% のせん断ひずみを生じさせる。
- 手順 2) 応力が 0 になるまで除荷をする。
- 手順 3) 試験片を加熱することにより回復応力を生じさせる。
- 手順 4) 回復応力を除荷する。

なお、実験は手順 3 において加熱する温度が回復応力および形状回復挙動にどのように影響するのかを調べる目的で、ひずみを一定として種々の温度まで加熱した場合と、形状記憶合金のアクチュエータ等への応用を考え、ひずみを減少させながら 80°C まで温度を上昇させた場合とを行った。手順 3 における昇温速度はいずれの場合も $3^\circ\text{C}/\text{min}$ である。

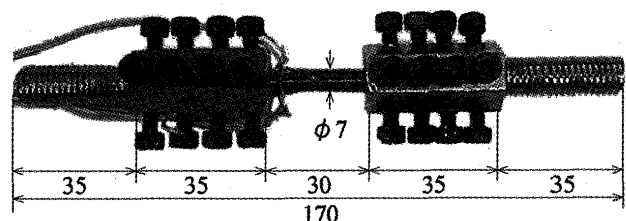


Fig.1 Geometry of specimen and grip device [mm]

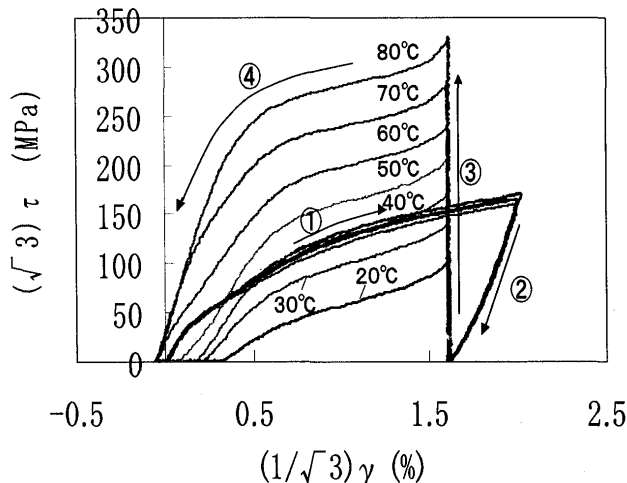


Fig.2 Stress-strain relation of the recovery behavior in various temperature

3. 実験結果および考察

Fig.2 に実験手順3においてひずみを一定として種々の温度(20~80°C)まで加熱した際の応力-ひずみ関係を示す。ここで τ はせん断応力、 γ はせん断ひずみである。Fig.2の①の過程は-20°Cでのねじり負荷により、R相が応力誘起マルテンサイト相に変態するときの応力-ひずみ曲線であり、②は除荷過程におけるR相とマルテンサイト相の弾性挙動である。また、③は、ひずみを一定とし、所定の温度まで加熱したときの回復応力を示し、④は、その回復応力からの除荷過程を示す。また、Fig.2の③から④の過程における応力-温度曲線をFig.3に示す。

Fig.2 からわかるように回復応力は温度が10°C上昇するごとに約32MPaずつ大きくなっている。また、Fig.3より、回復応力は温度の変化に対して線形に変化していることがわかる。

Fig.4に実験手順3において80°Cまで温度を上昇させる際に種々のクロスヘッド速度(0, -0.09, -0.18, -0.27 deg/min)でひずみを減少させた場合の形状回復挙動と80°Cにおける超弾性挙動の応力-ひずみ関係を示す。いずれのひずみ速度でひずみを減少させても回復経路は超弾性の除荷時の応力-ひずみ曲線に一致することがわかった。

形状記憶合金は母相からマルテンサイト相へ変態させる場合とマルテンサイト相から母相へ逆変態する場合とで異なる応力-ひずみ関係を示す、そのためFig.4の超弾性挙動のように A_f 点以上の温度域ではヒステリシスループを描く。ここで実験手順3の温度を上げるという操作はマルテンサイト相を母相へ逆変態させる方向に作用するため、回復応力は超弾性の除荷時における応力に一致すると考えられる。この結果より、任意の温度における超弾性挙動を把握することにより、その温度まで温度を上昇させる際にひずみの減少を伴う形状回復挙動の予測が可能であることが示唆された。形状記憶合金のアクチュエータやパイプの継ぎ手などへの応用を考えた場合、実際の材料の変形挙動には回復応力の発生に伴いひずみの減少が起こるはずである。本実験により得られた結果はこれらの設計を行うための一助となるものであり、極めて有用なデータであると考えられる。

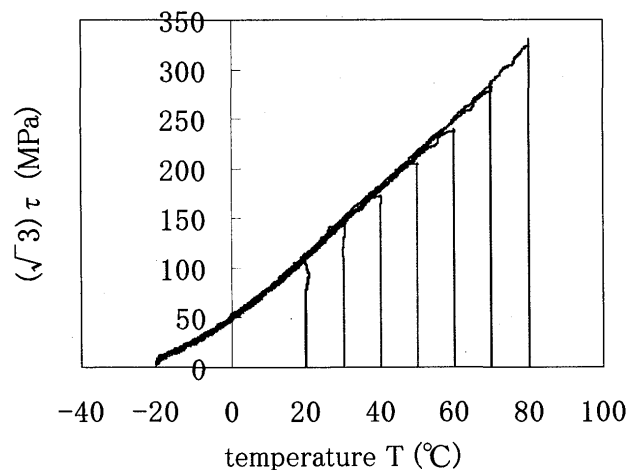


Fig.3 Temperature-recovery stress relation of case of a temperature rise

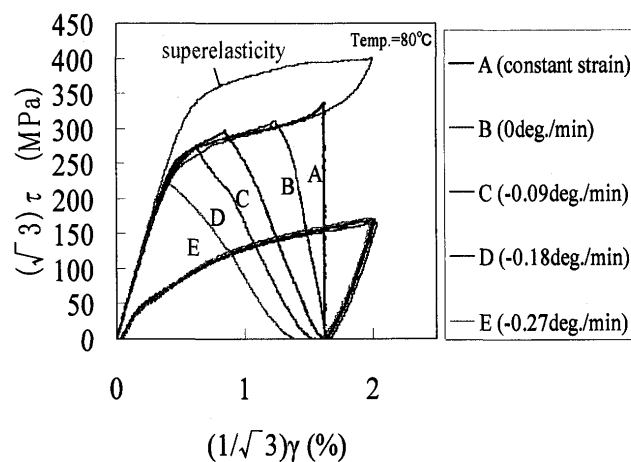


Fig.4 Stress-strain relation of recovery behavior with decrease of a strain

4. 結言

本研究ではねじり負荷におけるTiNi形状記憶合金の回復応力を調査した。実験結果より形状回復挙動は超弾性挙動の除荷過程に一致することがわかった。しかし、TiNi形状記憶合金の薄肉円管を用いた研究はまだ始まったばかりである。今後、さらに複雑な負荷条件や温度条件での変形特性を明らかにしていくことで、TiNi形状記憶合金の工業的応用の可能性をより一層高めることができると思われる。

参考文献

- (1) 田中喜久昭, 戸伏壽昭, 宮崎修一, 形状記憶合金の機械的性質, 養賢堂, pp.1-5, 1993.
- (2) 宮崎修一, 佐久間俊雄, 渋谷壽一, 形状記憶合金の特性と応用展開, CMC, pp.29-35, 2001.
- (3) 林萍華, 戸伏壽昭, 田中喜久昭, 伊貝亮, TiNi形状記憶合金の変形特性, 日本機械学会論文集(A編), 60巻575号, 1994.
- (4) P.Sittner, 徳田正孝, 複合負荷条件下の熱弾性マルテンサイト変態特性に関する実験的, 材料, Vol.44, No.500, pp.597-601, 1995.