SMA と SMP による形状記憶複合材料の作製と 2 方向変形特性

Fabrication and Two-Way Deformation Property of Shape Memory Composite with SMA and SMP

正 戸伏 壽昭 (愛知工大)

林 俊 一 (㈱ SMP テクノロジーズ)

学 杉本 義樹 (愛知工大)

○学 伊達 功祐 (愛知工大)

Hisaaki TOBUSHI, Aichi Institute of Technology, 1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota-shi, Aichi

Shunichi HAYASHI, SMP Technologies Inc., Sendagaya 3-50-11, Shibuya-ku, Tokyo

Yoshiki SUGIMOTO, Aichi Institute of Technology, 1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota-shi, Aichi

Kousuke DATE, Aichi Institute of Technology, 1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota-shi, Aichi

Key words: Shape memory alloy, Shape memory polymer, Shape memory effect, Superelasticity, Composite, Two-way, Bending, Recovery force

1. 緒 言

光, 電気, 熱などの外部からの刺激に応答して種々の能動的機能を発現する材料はインテリジェント材料あるいはスマート材料と呼ばれ, その開発と応用が注目されている. 主なインテリジェント材料の一つは, 形状記憶特性を発現する形状記憶合金 (shape memory alloy, 以下 SMA) や, 形状記憶ポリマー (shape memory polymer, 以下 SMP) である. さらに, これらの材料の優れた長所を組み合わせ, 新しい機能を持たせるために, SMA と SMP を組み合わせた形状記憶複合材料 (shape memory composite, 以下 SMC) の開発が期待されている.

本研究では温度変化によって 2 つの方向に動作可能な 2 方向性を持つ SMC の作製と力学特性を検討する. このような複合材料の開発を進めるための第一段階として, 2 種類の SMA と SMP を組合せた SMC ベルトを試作し, 2 方向性を持つ SMC の作製方法の確立および基本的な力学特性を調べる. SMC ベルトの作動特性に関しては, 実用上多く使用されている曲げ変形に関して, 3 点曲げの状態に加熱・冷却により, 2 方向特性に伴う回復力の挙動について検討する.

2. 2 方向動作の SMC ベルトの構造と動作原理

2.1 供 試 材

SMA には室温で形状記憶効果 (以下 SME) を示す薄帯板と超弾性 (以下 SE) を示す薄帯板の 2 種類の SMA 薄帯板を用いた. SME を示す薄帯板は (株) 古河テクノマテリアル製の TiNi SMA 薄帯板 (NT-M) を用いた. 幅は 5mm, 厚さは 0.25mm であった. 逆変態終了温度 $A_{f,SME}$ は 347K であった. SE を示す薄帯板は (株) 吉見製作所製の TiNi SMA 薄帯板であり, 幅は 2.5mm, 厚さは 0.3mm であった. 逆変態終了温度 $A_{f,SE}$ は 317K であった. 各 SMA 薄帯板は内径 16mm の円環固定治具の内側にそって巻きつけ, 外径が 16mm の円形になる形状記憶熱処理を施した. SMP には三菱重工業 (株) 製のポリウレタン系 SMP シート (MM6520) を使用した. 厚さは 0.25mm であり, ガラス転移温度 T_g は 338K であった.

2.2 SMC ベルトの構造と 2 方向曲げ挙動

2 種類の SMA と SMP を使用し, 長さ 60mm, 幅 10mm,

厚さ 0.75mm の SMC ベルトを作製した. 作製した SMC では, マトリックスには SMP フィルムを使用し, ファイバーには SMA 薄帯板を使用した. SMA 薄帯板には SME を示す長さ 50mm, 幅 5mm, 厚さ 0.25mm の帯板 (SME 薄帯板, SME-SMA tape) と SE を示す長さ 50mm, 幅 2.5mm, 厚さ 0.3mm の帯板 (SE 薄帯板, SE-SMA tape) の 2 種類を使用した. SMC ベルトでは母材の中心部分に 2 種類の SMA 薄帯板を埋め込んでいる. 作製した SMC では SMA の断面積分率が 27% である.

図 1 に示すように, 丸形を形状記憶した SME 薄帯板と SE 薄帯板は, 記憶した形状が逆向きにそる様に貼り合わせる. 作製した SMC の加熱冷却での 2 方向挙動の原理を図 2 に示す. 図 2 に示すように, SMC は, 低温時には SE 薄帯板の回復力によって下に凸になるように (SE 薄帯板の丸記憶の方向に) 曲がり, 高温時には SME 薄帯板の回復力で上に凸になるように (SME 薄帯板の丸記憶の方向に) 曲がる.

Fig. 1 Structure of SMC composed of SME-SMA tape, SE-SMA tape and SMP sheet

Fig. 2 Principle of two-way bending behavior in SMC during heating and cooling

3. SMC ベルトの2方向曲げ変形

作製した SMC ベルトを加熱・冷却することにより図 3 に示すように 56° の2方向曲げ変形が発生した。加熱と冷却は 363K と 293K の間で行った。温度で変化する2方向曲げ変形挙動は SMC を構成する SE 薄帯板, SME 薄帯板および SMP シートに生じる内部曲げモーメントに基づいて現れる。内部曲げモーメントは各構成要素の曲げ剛性 EI に比例し, その温度依存性は次の通りである。TiNi SMA 帯板の弾性係数 E は $T > A_s$ の温度域では 70GPa であり, $T < A_s$ の温度域では 20GPa である。これより, SE 薄帯板の曲げ剛性 EI は 293K 以上の温度において $1576\text{N}\cdot\text{mm}^2$ である。また, SME 薄帯板の EI は 293K では $520\text{N}\cdot\text{mm}^2$ であり, 363K では $1842\text{N}\cdot\text{mm}^2$ である。SMP シートの弾性係数 E は $T < T_g$ の温度域では 1GPa であり, $T > T_g$ の温度域では 10MPa である。したがって, SMP シートの EI は 293K では $301\text{N}\cdot\text{mm}^2$, 363K では $3\text{N}\cdot\text{mm}^2$ である。したがって 293K では内部曲げモーメントの一番大きな SE 薄帯板の曲げ記憶の方向に曲がり, 363K では内部曲げモーメントの一番大きな SME 薄帯板の曲げ記憶の方向に曲がる。

Fig. 3 Photograph of the two-way bending deformation of the SMC belt during heating and cooling

4. 曲げにおける SMC ベルトの回復力

4.1 実験方法

回復力測定の3点曲げ試験の手順を模式的に図 4 に示す。加熱冷却の速度は, 恒温槽内を 293K から 363K の間を約 1K/min で行う。加熱過程では SMC ベルトが平面形状になろうとする時の回復力を測定し, 冷却過程では SMC が元の形状に戻ろうとする時の回復力を測定する。

Fig. 4 Experimental procedure of the three-point bending test

4.2 実験結果および考察

SMC ベルトの3点曲げ試験で得られた回復力-温度関係を図 5 に示す。図中の $A_{f,SE}$ と $A_{f,SME}$ はそれぞれ SE-SMA 薄帯板と SME-SMA 薄帯板の逆変態終了温度を示し, T_g は SMP のガラス転位温度を表す。加熱過程全体での結果として, 350K 付近の温度で SME-SMA 薄帯板の回復力が SE-SMA 薄帯板の回復力より大きくなり, SMC の回復力が急激に大きくなる。また, 冷却過程全体の結果として, SME-SMA 薄帯板の回復力が徐々に小さくなり, SMC の回復力は減少する。

Fig. 5 Relationship between recovery force and temperature during heating and cooling in the three-point bending test for the SMC belt

5. 結 言

2種類のSMAとSMPを組合せたSMCベルトを試作し, 曲げにおける2方向変形および回復力の挙動を検討した。得られた主要な結果は次の通りである。

- (1) SMC ベルトのファイバーとして丸形の形状を記憶処理した SME と SE を示す 2 種類の SMA 薄帯板を用いた。2つの SMA 薄帯板の丸形記憶形状が背中合わせになるように配置し, 上下と中間に配した SMP シートにより挟み, SMC ベルトを作製した。SMP シートの枚数, 加圧力, 加熱温度, 保持温度の因子を適正に選ぶことにより, 気泡やすき間のない, SMC ベルトが作製できた。
- (2) 作製した SMC ベルトは, 加熱においては SME を示す SMA 薄帯板の曲げ記憶の方向にたわみ, 冷却においては SE を示す SMA 薄帯板の曲げ記憶の方向にたわむ。加熱と冷却により角度 56° の2方向曲げ変形を示した。
- (3) SMC ベルトの回復力に関して, 3点曲げにおいて初期形状を保って加熱・冷却を行った。SMC の2方向特性に基づき, 回復力は加熱により増加し, 冷却により減少した。
- (4) SMC の特性は構成する SMA と SMP の変態温度, 体積分率, 配置, 加熱と冷却の速度に依存する。高機能な SMC の開発と応用が期待される。