110 形状記憶合金を用いた可逆的形狀変化スマート構造の解析

Analysis of Reversible Shape Changing Smart Structure using Shape Memory Alloys

○正 永井 英幹 (産総研) 大石 竜太郎 (産総研)
 許 亜 (物材機構) 正 吉田 均 (産総研)
 阿見 則男 (千代田メンテナンス)

Hideki NAGAI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1,
 Umezono, Tsukuba, Ibaraki

Ryutaro OISHI, AIST

XU Ya, National Institute of Materials Science

Hitoshi YOSHIDA, AIST

Norio AMI, Chiyoda Maintenance Co., Ltd

This paper describes a study of smart structure composed of Ti-Ni shape memory alloys (SMA) and elastic materials. SMA is one of the effective materials which possess actuator function for smart structure. However, in the conventional application of SMA, its shape change is non-reversible. Under certain conditions, SMA can show two-way shape memory effect (SME). But conventional two-way SMA is not used for smart structure because stability of the effect and strength of generated force is not sufficient. Composing SMA with elastic materials, the structures can response reversibly depending on temperature. In this paper, ring-shape type, which contains CFRP as the elastic materials, is investigated. Analytical models of reversible shape change and generated forces are led based on beam theory. The validity of the models is shown by comparison with experimental results.

Key Words : Smart Structure, Shape Memory Alloys, CFRP, Reversible Shape Change

1. 緒 言

知的材料・構造においてアクチュエータ機能を発現する材料として、形状記憶合金(SMA)は有力な地位を占める材料である。逆変態時に生じる回復力を利用して、振動や損傷の制御に利用されている¹⁾。しかし、通常は形状記憶効果が利用可能なのは一方向のみであるため、応用対象に限りがある。筆者らは、SMAを金属、高分子材料などの弾性体と複合化し、形状記憶効果に二方向性(可逆性)を有する複合材料を開発してきた。主として、その複合体の変形ストロークが大きくとれるコイル型やリング型について取り組んできているが、本稿ではリング型の場合を対象とし、本材料の重要な性能となる形状変化と発生荷重について、解析値を平易なモデルで導き、実験により検証した結果を報告する。なお、本稿は既発表の研究²⁾⁻⁵⁾をまとめ直したものである。

2. 可逆的形狀変化複合体

2.1 原理

SMAのみでも、特定の条件のもと、特定の処理を加えれば、二方向性を得ることは可能ではある。しかし、処理が簡単ではないことに加え、得られる効果の持続性・一定性、双方向で発生する形状変化や荷重が容易に設計できるかの点で、実用化には難点がある。また、バイアスバネを用いて構造として二方向性を実現する手段が多用されるが、スマート構造においてアクチュエータとして利用する場合、そのような外部部材が利用可能とは限らず、なるべく少ないアクチュエータ自身で複数の機能を発現する方が望ましい。ここで示す複合体は、それ自身で二方向性を有するものである。

相変態前後で剛性が大きく変化する SMA ワイヤ(TiNi 合金を用いた)と、大きな変形に耐える高靱性な弾性体を複合化するが、このとき SMA の記憶形状と弾性体の形状を異なる形状(リング型の場合、異なる曲率半径)で作製し、複合化する。これにより、可逆的形狀変化を実現している。

2.2 形状変化と発生荷重のモデル化

Fig.1 は本スマート構造の動作および複合化の前後における形状を表した模式図である。ここでは、高温時に複合体が閉じて、低温時に開く動作をする場合を取り上げている。弧 OA, OA' が SMA ワイヤのみの場合で、SMA の変態温度以下の低温時、逆変態温度以上の高温時における形状を示し、 R_{al} , R_{ah} がそれぞれ低温時、高温時の場合における曲率半径を表す。弧 OB は母材(弾性体)のみの場合、弧 OC, OC' は母材と SMA を複合化した場合のそれぞれ低温時、高温時を表し、曲率半径はそれぞれ R_m , R_{cl} , R_{ch} である。まず低温時において、図に示すように、母材と SMA に曲げモーメント(それぞれ M_{mb} , M_{al})を想定し、複合化後の位置へ変形させるとすると、

$$M_{ml} = E_{ml} I_m (1/R_{cl} - 1/R_m) \quad (1)$$

$$M_{al} = E_{al} I_a (1/R_{cl} - 1/R_{al}) \quad (2)$$

となる。ここで、 E_{ml} , I_m , E_{al} , I_a は各々母材及び SMA の低温時における曲げ剛性である。この両者が釣り合うことから、複合化後の低温時の曲率半径

$$\frac{1}{R_{cl}} = \frac{R_{al} E_{ml} I_m + R_m E_{al} I_a}{R_m R_{al} (E_{ml} I_m + E_{al} I_a)} \quad (3)$$

が得られる。同様に逆変態温度以上の高温時における曲率半径も

$$\frac{1}{R_{ch}} = \frac{R_{ah} E_{mh} I_m + R_m E_{ah} I_a}{R_m R_{ah} (E_{mh} I_m + E_{ah} I_a)} \quad (4)$$

で求められ、可逆的な形状変化が定められる。ここで、 E_{mh} , I_m , E_{ah} , I_a は各々母材及び SMA の高温時における曲げ剛性である。

次に、高温時において、複合体を Fig.1 の弧 OC' から低温時形状の弧 OC まで形状変化させる動作を考える。先述

Fig. 1 Schematic model of the shape memory composites

と同様に曲げモーメント M_{ch} を想定すると、

$$M_{ch} = (EI) * (1/R_{ch} - 1/R_{cl}) \quad (5)$$

の関係がある。ここで (EI) は複合体リングの高温時曲げ剛性で、母材と SMA の曲げ剛性の和で与えられる。この M_{ch} がなす仕事と y 方向に引っ張った場合の荷重 F'_{ch} がなす仕事等しいことから、 F'_{ch} を求めることができる。これは低温状態において図3の点Cを拘束して、低温時の形状を保持したまま、逆変態点温度以上に昇温させた時に同点に発生する力を F_{ch} と大きさが等しく逆方向の力である。よって、下式のように発生荷重が定まる。

$$F_{ch} = -F'_{ch} = -\frac{M_{ch}(\theta_{ch} - \theta_{cl})}{Y_{cl} - Y_{ch}} \quad (6)$$

3. 実験方法

SMA と複合化させる弾性体には CFRTP を用いた。一方 向 CF/PEEK プリプレグを4枚積層した。SMA には直径 1.5mm の TiNi ワイヤを用いた。SMA ワイヤは直径 77.8mm の円弧形状を記憶させ、CFRP は直径 114mm の円弧形状に成形した。SMA ワイヤを1~4本使用し、接着により CFRP と複合化し、4種類の試験体を作製した。示差走査熱量計 (DSC) により測定した SMA の相変態温度は $A_s=45^\circ\text{C}$, $A_f=62^\circ\text{C}$, $M_s=50^\circ\text{C}$, $M_f=39^\circ\text{C}$ で、実験を行う環境温度は低温側を 20°C 、高温側を 80°C とした。

温度変化に伴う可逆的な形状変化については、複合体の高温時および低温時における曲率半径と半弦長をそれぞれ測定した。発生荷重に関しては、複合体の低温時形状のまま拘束して温度上昇させ、Fig.2 点Cに発生する荷重 F_{ch} を測定した。測定時の支持点は、低温時の状態で直径の位置 ($\theta_{cl}=90^\circ$) とした。

4. 実験結果

可逆的な形状変化に関しては、曲率半径の変化を測定した結果を Fig.2 に示す。使用した SMA ワイヤの本数にかかわらず、高温時、低温時とも、モデルに基づいた計算結果とよく一致した結果が得られている。SMA ワイヤ4本で高温時での差が4%となったのが最大誤差であった。

次に、発生荷重に関する実験結果とモデルから算出され

た結果の比較を Fig.3 に示す。低温時形状に拘束して昇温した際に得られる加重 F_{ch} についても、良好な一致をみている。

Fig. 2 Result of shape change (radius of curvature)

Fig. 3 Result of generated force

5. 結 言

本稿では、SMA ワイヤと弾性体とを複合化して、温度変化によって可逆的に形状変化する材料について、リング形状タイプの場合において、その形状変化ならびに発生荷重について梁に基づきモデル化を行った。高温閉じ型の場合において実験値との比較を行い、モデルの妥当性を検証した。

参考文献

- 1) J.S.N.Paine and C.A.Rogers, Smart Struct. and Mater. 1994: Smart Struct. and Intelligent Systems, SPIE Vol. 2190, 427 (1994).
- 2) H.Yoshida, Adv. Composite Mater., Vol.6, No.4, pp.341-352.
- 3) 吉田ら, FRP シンポジウム講演論文集, 日本材料学会, pp.169-172 (2001).
- 4) 永井ら, 強化プラスチック, pp.513-522, (2002).
- 5) 吉田ら, JSME 材料力学部門講演会講演論文集, pp.325-326, (2002).