

SMAハニカムを用いた形状回復サンドイッチパネルの 加熱技術に関する研究

46212 村上 賢

(指導教員 武田 展雄 教授)

Key Words : Sandwich panel, Shape memory alloy; Composite material, Shape recovery; Heat transfer

1. はじめに

サンドイッチパネルとは複合構造の一種で、比較的厚い軽量心材（コア）を高剛性・高強度の薄い表面材で挟んで構造効率を高めたパネルである。そのため優れた曲げ剛性および面内圧縮強度を持ち、軽量化が要求される航空宇宙構造物に広く応用されている。しかし、面外方向から衝撃が加わると、コアが座屈し、表皮が曲がり、曲げ剛性や圧縮強度等の低下が生じる。

そこで本研究では、表面材として炭素繊維強化プラスチック（CFRP）積層板、心材として形状記憶合金（SMA）ハニカムコアを採用した、形状回復機能を有するサンドイッチパネルを提案し、面外方向からの衝撃損傷の回復を試みる。そして、回復に必要な熱エネルギーを供給する手段の一つとして、CFRP積層板中に埋め込んだニクロム線を熱源とする方法を提案し、有限要素法によりサンドイッチパネルの熱伝導解析を行って、ニクロム線に電気エネルギーを与えた場合のSMAハニカムコアの回復範囲を求めることを目的とする。

2. SMA

実用化されている SMA には、Ti-Ni 合金、Cu-Zn-Al 合金の 2 種類がある。これらの材料特性を比較すると、Ti-Ni はコストを除くあらゆる面で Cu-Zn-Al 合金より優れている。しかしその Ti-Ni 合金ですら、比剛性は Al 合金の約 15%程度と著しく劣っている。しかし、SMA は負荷時と除荷時では異なる応力-ひずみ曲線を描き、それらの曲線に囲まれた部分に相当するエネルギーを吸収するという性質がある。よって、SMA をサンドイッチパネルのコアとして用いると、下記のメリットが期待できる。

- ・面外衝撃による変形に対し、形状回復が可能
- ・衝撃エネルギーを吸収することが可能

3. 衝撃損傷回復実験

3-1 実験概要

作製したSMAハニカムサンドイッチパネルに、落錘衝撃試験機で3Jの面外衝撃荷重を加え、損傷を発生させた後、恒温槽で80℃に加熱して形状回復を試みた。その試験前、試験後、形状回復後のそれぞれの段階で、衝撃負荷点を含む試験片表面の形状をレーザー変位計を用いて測定した。

3-2 実験結果

結果を図1に示す。衝撃点直下に約1.6mmの窪みが発生しているが、加熱後にはほぼ元の形状に回復している。これにより、作製したSMAハニカムサンドイッチパネルは少なくとも16%の変位を回復させる能力があることが確認された。

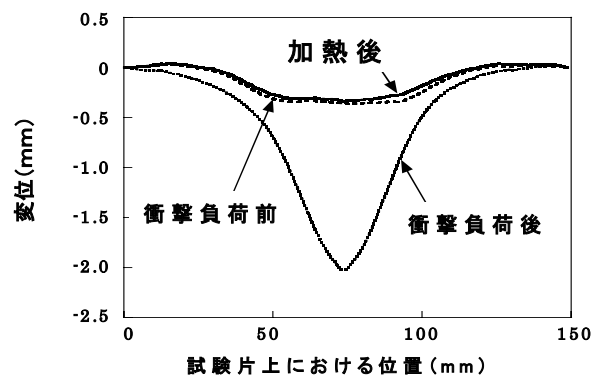


図 1 衝撃損傷の回復実験結果

3-3 形状回復によって期待される剛性回復

コアの縦弾性係数は表面材の縦弾性係数よりはるかに小さいと仮定すると、単位幅あたりのサンドイッチパネルの曲げ剛性 D は、次式で表される。

$$D = \frac{1}{2} E_f t_c^2 t_f$$

E_f : 表面材の縦弾性係数

t_c : コアの厚さ t_f : 表面材の厚さ

この式より、コアの厚さが 16%減少すると、曲げ剛性 $D' = 0.84^2 D = 0.71D$ となり、曲げ剛性は 29%低下

する。したがって、コアの厚さを回復できれば、パネルの曲げ剛性も大きく回復すると考えられる。

4. CFRP積層板中のニクロム線の埋め込み位置による加熱効率の評価

SMAハニカムコアサンドイッチパネルの実用上の問題として、加熱方法が挙げられる。大型の構造物に用いる場合を想定すると、内部に予め加熱機構を備えておく必要がある。そこで、CFRP積層板の内部にニクロム線を埋め込み、ジュール発熱によりSMAの形状回復に必要な熱を供給する方法を提案する。

CFRPにニクロム線を埋め込む場合、積層構成に対して様々な埋め込み方が考えられる。そこで、どのような埋め込み方が最も適しているのか、実験によって検討した。

4-1 実験方法

積層構成が[0/90/90/0]のCFRP直交積層板において、1層目と2層目の間、2層目と3層目の間に、それぞれ0度方向と90度方向に、計4通りの仕様でニクロム線を埋め、同じ電気エネルギーを与えた場合に、CFRP積層板のニクロム線埋め込み部付近の表面温度がどの程度上がるかを調べた。

4-2 実験結果

4通りの仕様で実験した結果、2層目と3層目の間に炭素繊維に平行にニクロム線を埋めた場合が、最も表面温度が高くなった。この原因としては、炭素繊維方向に沿ってニクロム線を埋めると、樹脂による絶縁が保たれるのに対し、ニクロム線が炭素繊維に直交すると、ニクロム線から炭素繊維に漏電して、エネルギーが積層板全体に拡散してしまい、ニクロム線周辺における加熱効率は下がってしまうためであると推察される。

したがって、効率や温度制御の観点から、炭素繊維に沿うようにニクロム線を埋め、絶縁を保つことが重要である。

5. 有限要素法によるSMAハニカムサンドイッチパネルの熱伝導解析

5-1 解析モデル

埋め込みニクロム線への通電によるSMAコアの加熱効率を検討するため、SMAハニカムサンドイッチパネルの熱伝導を、有限要素法によって解析した。解析モデルにおいて、CFRP表面材の積層構成は[0/90/90/0]で、2層目と3層目の間に直径0.100mmのニクロム線を配置した。そして、ニクロム線に、0.024W/mmの電気エネルギーを与えた。CFRP表面材と空気との間の熱伝達率を5W/m²Kとし、輻射の影響は無視した。また、SMAの潜熱を考慮するため、逆変態開始温度 $A_s = 48^\circ\text{C}$ から、逆変態終了温度 $A_f = 60^\circ\text{C}$

$^\circ\text{C}$ までの区間において、潜熱1548J/molを吸収するように比熱を増加させた。そして時間増分 $\Delta t = 0.5\text{sec}$ とし、通電開始後300秒間のSMAの温度分布を求めた。

5-1 解析結果

解析結果を図2に示す。300秒後において、ニクロム線を中心とした約8mmの範囲が A_f 点に達しており、約15mmの範囲が A_s 点に達している。

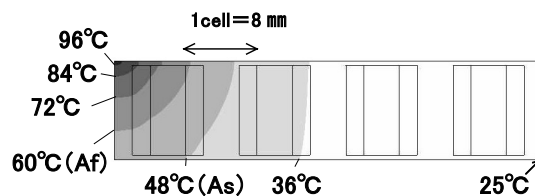


図2 300秒後の温度分布の解析結果

5-2 実験と解析の比較

解析と同じ条件で実験を行い、300秒の通電後の試験片形状を、解析結果と比較した。図3にその結果を示す。上図が実験の結果で、下図が解析の結果である。解析結果から求めた逆変態開始温度 A_s 以上の温度のエリアと、実験においてコアの座屈が回復しているエリアがほぼ一致している。

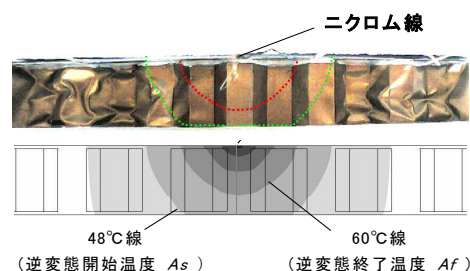


図3 熱伝導解析結果と実験結果の比較

6. まとめ

本研究によって、下記の結果が得られた。

- ・SMAハニカムサンドイッチパネルは、面外衝撃荷重による変形を元通りに回復させる機能を持つ。
- ・積層板中にニクロム線を埋込み通電する場合に、与えた電気エネルギーが効率良く埋め込み部周辺の熱エネルギーとなるための、最適な埋め込み方が分かった。
- ・ニクロム線に通電した場合のSMAハニカムの回復範囲を調べるため、有限要素解析モデルを作成し、その計算結果を実験結果と比較することで、本解析手法の妥当性を確認した。