

サンドイッチパネルの力学特性回復機能を有する SMAハニカムコアの開発

56212 白石 伸夫

(指導教員 武田 展雄 教授)

Key Words : Sandwich Panel, Impact Damage, Shape Recovery, Shape Memory Alloy, Honeycomb Core

1. はじめに

サンドイッチパネルは図1に示すように、厚く軽量なコアを高強度、高剛性の表皮で挟み、構造効率を上げたもので、航空宇宙分野で広く使用されている。しかし、サンドイッチパネルは面外方向に弱く、ツールドロップなどで衝撃損傷(図2)が生じ、曲げ剛性や面内圧縮強度が大幅に低下するという問題を持つ。そこで、本研究ではサンドイッチパネルの安全性、信頼性向上のために衝撃損傷を受けても形状修復により力学特性を回復し、さらなる損傷進展の抑制が可能なサンドイッチパネルの開発を目的とした。

衝撃損傷は、コアの座屈で表皮が下方に引っ張られ、表皮が弾性変形をすることで、たわみが残る損傷である。よって、コアの座屈を修復できれば形状を回復可能だと考えられる。そこで本研究では、加熱により座屈を修復可能な形状記憶合金(SMA)箔で作製したハニカムをコアにすることで、形状回復可能なサンドイッチパネルを作製した。そして、その形状修復でサンドイッチパネルの曲げ剛性および面内圧縮強度を回復できるかを評価した。

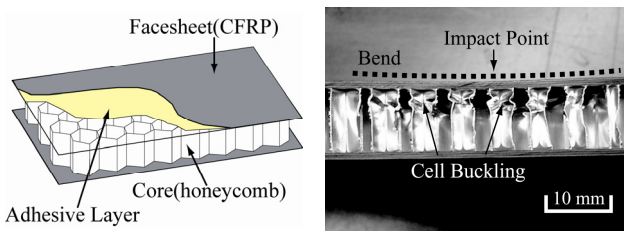


図1 サンドイッチパネル

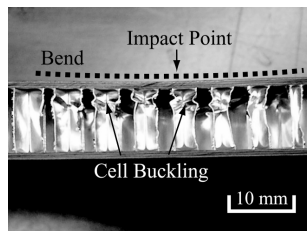


図2 衝撃損傷

2. 曲げ剛性の評価

試験片は厚さ50 μ mのSMA箔を用いて作製したセルサイズ1/4inchのSMAハニカムに、積層構成[0/90]_sの炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を接着して作製した。この試験片に対し、衝撃損傷を模した表皮のたわみを押し込み試験により与え、その後80 $^{\circ}$ Cまで加熱し、形状を回復させた。損傷前、損傷後、形状回復後の各段階で四点曲げ試験を行い、そのときの中央点の変位から試験片全体の曲げ剛性の変化を比較した。

実験の概要を図3に示す。また、図3A部の試験片下方表皮にひずみゲージを貼り付け、四点曲げ試験の際に生じるひずみ分布の計測も行った。さらに、損傷形状をモデル化してはり理論を用いた解析と有限要素解析を行い、実験値との比較を行った。

各段階において試験片を端面から観察した結果を図4に、図3A部の上方表皮のたわみを図5上部に示す。また、四点曲げ試験で4N与えたときの図3A部の下方表皮のひずみ分布を図5下部に、中央点の変位を表1に示す。なお、この中央点変位の大きさがサンドイッチパネル全体の曲げ剛性に対応すると考えられる。図5のひずみ分布と表1の変位の変化から、損傷後においてはたわみに起因する表皮間距離の低下と、それによるひずみの集中で曲げ剛性が低下していることがわかる。なお、はり理論に比べ、実験値および有限要素法解析でより高いひずみの集中が起きていることから、損傷後の曲げでは、はり理論では表現していないコアのせん断と表皮の曲げのカップリングが生じていることが予想される。次に、形状回復後においては図4と図5から加熱によってコアの座屈を修復することで、表皮のたわみが回復したことが確認できる。また、図5と表1からたわみが回復することで、表皮間距離が戻り、それによって局所的なひずみ集中も緩和され、サンドイッチパネルの全体的な曲げ剛性が回復することが実験および解析で確認できた。

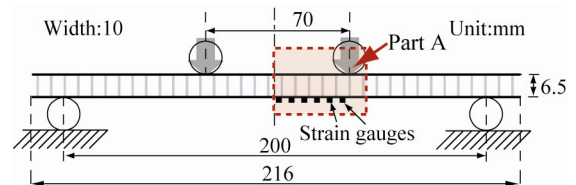


図3 四点曲げ試験および試験片の寸法

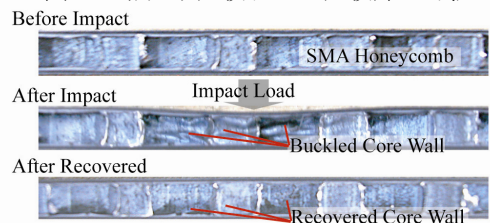


図4 試験片の断面写真

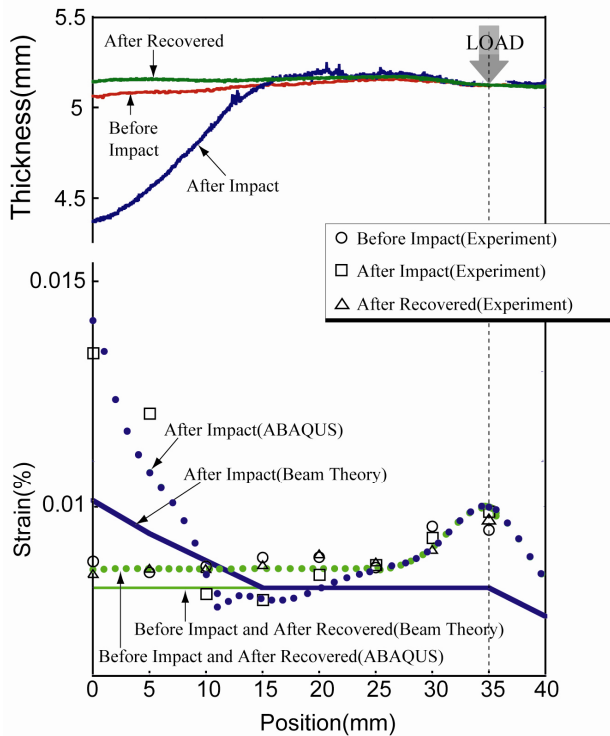


図5 A部のひずみ分布および上方表皮のたわみ

表1 四点曲げ試験における中央点の変位 Unit:mm

	Experiment	ABAQUS	Beam Theory
Before Impact	0.161	0.182	0.172
After Impact	0.179	0.206	0.181
After Recovered	0.159	0.182	0.172

3. 面内圧縮強度の評価

試験片にはSMAハニカムに $[0/90]_s$ の積層構成のCFRPを接着し、端部にアルミブロックを挟んだ $94 \times 75 \times 14\text{mm}^3$ のSMAハニカムサンドイッチパネルを用いた。損傷がない試験片、押し込み試験で面外方向に4.0mm押し込んで損傷を与えた試験片、損傷後に加熱により形状回復させた試験片の三種類を用いた。それぞれの試験片に対して面内圧縮荷重を破壊するまで与え、そのときの強度を比較した。なお負荷中は、上下をブロックで、左右をエッジで固定した。さらに、損傷後、形状回復後の試験片については負荷中にデントの面外方向の変位を計測することで破壊の様子を観察した。

形状回復を行った試験片の各段階の表皮のたわみの変化を図6に示す。また、面内圧縮試験において、損傷を与えた表皮側のひずみと荷重の曲線を図7に、観察された試験片の破壊形態を図8に示す。図6から押し込み試験により生じた表皮のたわみが、加熱により回復したが、0.1mm程度のたわみが残ったのが確認できる。これは、与えた損傷が大きすぎたためと考えられる。図7と図8から、損傷の有無で比較すると、損傷があることで破壊箇所が面内荷重を分担するはずの表皮からコアに変わり、大幅に強

度が減少したことがわかる。これはSMAハニカムコアの面外圧縮強度が弱く、加えて損傷による座屈でさらに強度が減少したために、表皮のたわみにより生じる面外方向の荷重に耐えられずにコアが破壊してしまったのが原因と考えられる。形状回復後の試験片では損傷後の試験片と同様にコアで破壊し、面内圧縮強度も戻らなかった。これは、図7に示すように表皮のたわみを完全に回復できなかったため、損傷後と同様に表皮のたわみによる面外方向の荷重が発生してしまったことと、コアの座屈を完全に修復できなかったために、コアの面外圧縮強度が低下したままだったことが原因だと考えられる。ただし、図10に示した、デントの成長を見てみると、形状回復することでコアの面外圧縮強度が戻り、デントの成長を抑制した様子が確認できる。そのため、完全に形状を元に戻せばデントの成長を抑制し、表皮で破壊をするようになると考えられる。以上より、形状回復により面内圧縮強度が戻ることの可能性を本実験で示すことができた。

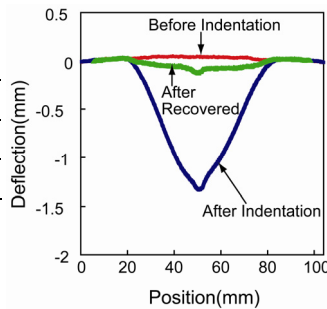


図6 表皮のたわみの様子

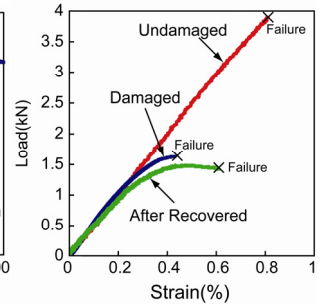


図7 荷重-ひずみ線図

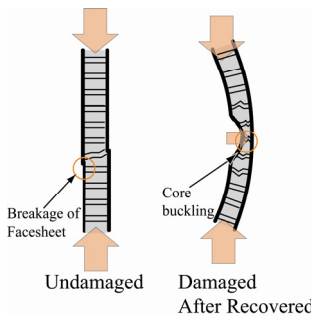


図8 試験片の破壊の様子

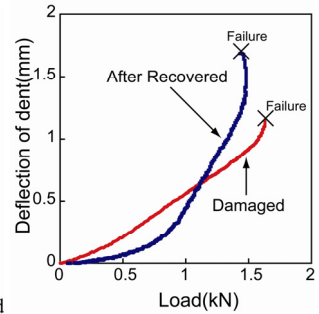


図9 デントの成長

4. まとめ

衝撃損傷を与えたSMAハニカムサンドイッチパネルを加熱すると、形状が回復し、それにより曲げ剛性が戻ることを示した。また、面内圧縮強度に関しては強度が戻らなかったが、形状回復により表皮のたわみをなくし、コアの面外圧縮強度を戻すことで、サンドイッチパネルの面内圧縮強度ができる可能性を示すことができた。