

論文審査の結果の要旨

氏名 水口 周

修士（工学）水口 周 提出の論文は、「損傷検知・修復機能を有する知的 CFRP サンドイッチ構造に関する研究」と題し、6章と補足よりなる。

航空宇宙機の軽量化要求が厳しくなる中、炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP）の優れた特性を最大限に引き出すことが可能なサンドイッチ構造が注目されている。サンドイッチ構造とは、二枚の薄い高強度表皮を厚い軽量コア（ハニカムもしくは発泡材）に接着し構造効率を高めたもので、極めて高い比剛性と比強度を実現した構造である。しかし、工具の落下や石の跳上げなどによる面外衝撃荷重によって、コアの破損、表皮のデント（くぼみ）、接着層剥離などの損傷が生じる可能性がある。これらの損傷は、従来の非破壊検査法では検出が困難な場合がある。本研究では、これらの損傷を発生直後に検知し、さらには力学的特性を回復することが可能な、損傷検知・修復機能を有する知的 CFRP サンドイッチ構造を提案し、その実証を行うことを目的とする。

第1章は「序論」であり、本研究の背景についてまとめ、従来研究の問題点を総括するとともに、本研究の目的と構成について述べている。

第2章は「面外集中荷重を受けるサンドイッチ構造の理論解析」であり、表皮の面外方向変形とコアの破壊の相互作用に焦点を絞り、独自の理論解析モデル“Segment-wise Model”を構築している。衝撃損傷の最も重要な力学挙動である表皮のデント形成メカニズムを明らかにするとともに、損傷検知・修復に効果的な物理パラメータを抽出している。サンドイッチ構造に発生する衝撃損傷は複雑な現象であるため、従来のモデルではその力学挙動を過度に単純化していたが、Segment-wise Model ではハニカムの周期的形状に基づいて複数の Segment に分割し、その各 Segment にハニカムの複雑な面外方向破壊挙動を導入することで、表皮とコアの相互作用挙動を正確にモデル化することに成功している。また、損傷進展解析および実証実験によって、デント形成メカニズムを定量的に解明している。

第3章は「知的サンドイッチ構造の提案」であり、第2章の損傷検知・修復技術のアイデアに基づき、近年発展の著しい分布型光ファイバセンサ技術と形状記憶合金（SMA）ハニカムを用いた知的サンドイッチ構造を提案している。

第4章は「光ファイバセンサを用いた衝撃損傷検出」であり、近年開発された高分解能分布型ひずみ計測システムを用いた衝撃損傷検知システムを構築している。まず、計測の空間分解能内での不均一ひずみ場によってセンサ応答であるブリルアンスペクトルのピーク幅が広がることを実験的、理論的に明らかにしている。次に第2章で確立した Segment-wise Model から算出されたデントに沿った不均一ひずみ場を用いてセンサ網の応答シミュレーションを行い、ブリルアンスペクトルの変化を用いることで目視発見が困難な大きさの衝撃損傷を検出できることを明らかにすると同時に、センサ密度の決定方法を含めた具体的な損傷検出手法を提案している。さらに、実証試験を行い、大型サンドイッチ構造に発生した微小な衝撃損傷を検出可能なモニタリングシステムを確立している。

第5章は「SMA ハニカムを用いた衝撃損傷修復」であり、まず SMA ハニカムの作製方法を確立するとともに、SMA ハニカム単体の面外方向の高い損傷修復能力を示している。次にサンドイッチ構造が

特に優れた特性を示す曲げおよび面内圧縮荷重下での SMA ハニカムの損傷修復能力を評価している。四点曲げ試験では、損傷発生後は表皮のたわみによる表皮間距離の減少に加え、表皮の局所曲げ変形とコアのせん断変形のカップリングによって曲げ剛性が著しく低下したが、試験片加熱後には形状、剛性共に完全に回復している。また面内圧縮試験では、損傷導入後にはデントの成長を伴う破壊モードの変化が生じ圧縮強度が大幅に低下したが、試験片加熱後には SMA ハニカムの形状と力学的特性が復元し、圧縮強度が完全に回復している。以上により、自己修復機能を有する SMA ハニカムコア材料の高いエネルギー吸収特性を生かした損傷許容性が高い構造の可能性を示している。

以上要するに、本論文では、CFRP サンドイッチ構造の損傷を発生直後に検知し、さらには低下した力学的特性を回復することが可能な、損傷検知・修復機能を有する知的 CFRP サンドイッチ構造を提案し、その実証を行うことに成功している。本論文で得られた成果は、CFRP サンドイッチ構造の信頼性向上に大きく寄与するものであり、複合材料工学、非破壊評価工学の新しい発展に大いに寄与する有益な知見を与えている。

なお、本論文の一部は共同研究の成果でもあるが、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって博士（科学）の学位を授与できると認める。