

論文の内容の要旨

論文題目 複雑形状CFRPの成形時内部ひずみ評価と

残留変形メカニズムの解明

氏名 高垣 和規

炭素繊維強化複合材料(Carbon fiber reinforced plastics: CFRP)は軽量, 高比強度・比剛性という特徴から, 航空宇宙分野を中心に広く使用されている. 最新鋭旅客機であるBoeing社のB787やAirbus社のA350では重量比50%以上がCFRPであり, 主要な荷重を受け持つ一次部材へも適用されている. これに伴い様々な複雑な形状を有するCFRPが必要とされている. しかし, 複雑形状CFRPでは成形時に角度変化(Spring-in)をはじめとする残留変形が発生し, 形状が設計値からずれるという不具合が発生する(Fig. 1).

複雑形状CFRPの残留変形に関しては, これまでの先行研究で実験・解析の両面から様々な要因が考えられてきたが, そのメカニズムには未だに不明確な部分が存在する. その一つの原因として, 先行研究では特に実験において成形後の形状のみで評価を行い, 成形時の内部状態評価が行われていない点が挙げられる. そこで本研究では成形時の内部ひずみ計測手法として注目され

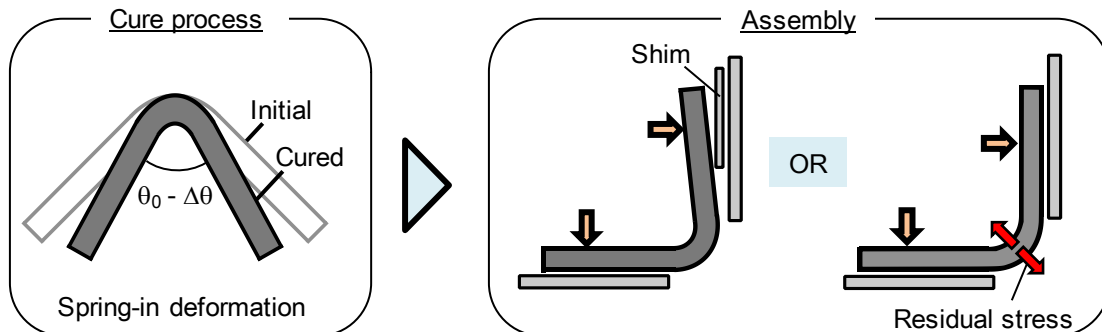


Fig. 1: Spring-in deformation in curved composites. Shimming process is required or residual stress is induced during assembly.

ている光ファイバセンサを利用した複雑形状CFRPに対する新たな計測手法を提案した。この手法により、CFRPの成形時に発生する面外せん断・垂直ひずみを評価する。また、この実験と理論・数値解析を併せることで、複雑形状CFRPの残留変形メカニズムに対する新たな知見を得た。Fig. 2に本研究の概要を示し、以下に各章を概説する。

第2章 L型材の理論・数値解析手法の開発

L型CFRPの成形時内部状態を把握するために、先行研究のC型材に関する理論モデルを拡張し、L型材のフランジを取り入れた解析を行った。C型材のモデルでは成形時に樹脂の硬化度が低い状態では硬化収縮によりせん断変形が発生し、残留変形が抑制されることが示されている。しか

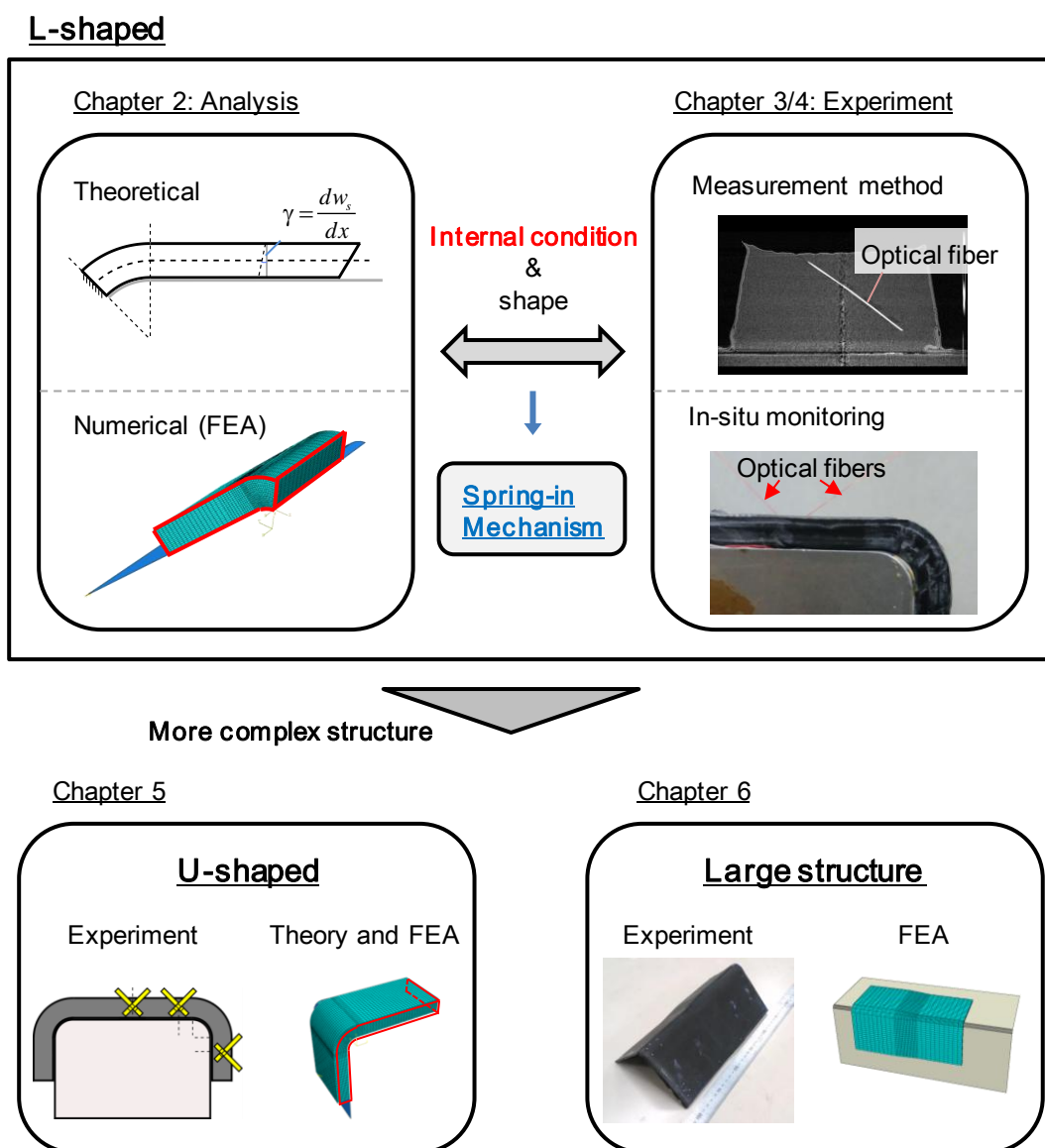


Fig. 2: Overview of this thesis.

しながら、実構造でより広く使用されるL型材ではフランジの効果により、このせん断変形が抑制される可能性が指摘されている。L型材モデルでは樹脂の弾性率、板厚、フランジ長さの効果を検証し、C型材同様せん断変形が発生するものの、フランジによりC型とは大きく異なる変形が発生することを示した。また、有限要素解析(FEA)により理論解析の妥当性および適用可能範囲を考察した。

第3章 垂直・せん断ひずみ計測技術の開発

光ファイバセンサの一種であるFiber Bragg grating (FBG)センサを使用した。面外垂直・せん断ひずみの計測・評価方法を提案した。光ファイバに発生するShear-lag現象を考慮した詳細な検討を行い、面外 $\pm 45^\circ$ 方向に埋め込んだFBGセンサを用いた、本研究で定義した「低減ひずみ」および「せん断・垂直ひずみ比」の計測法について述べた。第3章後半では光ファイバの面外斜め方向埋め込み手法を提案し、X線CT観察による光ファイバセンサの埋め込み評価を行った。

第4章 L型材における成形時内部ひずみモニタリング

第3章で提案した計測法を用いて、成形時にL型CFRP内部に発生する面外垂直・せん断ひずみの評価を行った(Fig. 3)。硬化に伴う内部状態の変化および板厚による違いを計測し、解析との比較から解析における適切な境界条件について検証した。成形後には3次元形状計測を行い、成形時のせん断変形の大きい厚肉試験片で残留変形(Spring-in)が小さくなる傾向を得た。さらに、実験・解析の結果からSpring-in変形を予測する新たな手法を提案し、従来手法よりも精度良く変形を予測した(Fig. 4)。

第5章 U型部材における内部ひずみ・残留変形

2つのフランジおよび1つのウェブから成るU型材はL型材よりも複雑な変形メカニズムが存在すると思われる。第5章ではU型部材に対し内部ひずみ計測および成形後形状計測を行い、その結果を解析結果と比較することでU型CFRPの変形メカニズムの理解を深めた。実験・解析から、硬化時のモーメント(Fig. 5)によりウェブでは反り変形(warping)が発生し、その結果フラン

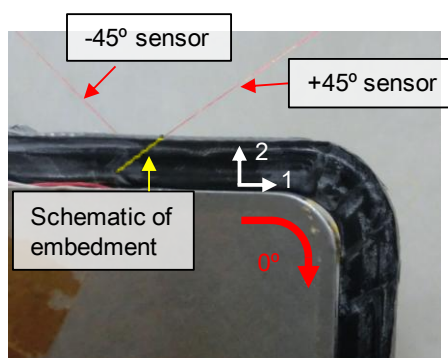


Fig. 3: Photograph of diagonally embedded FBG sensors.

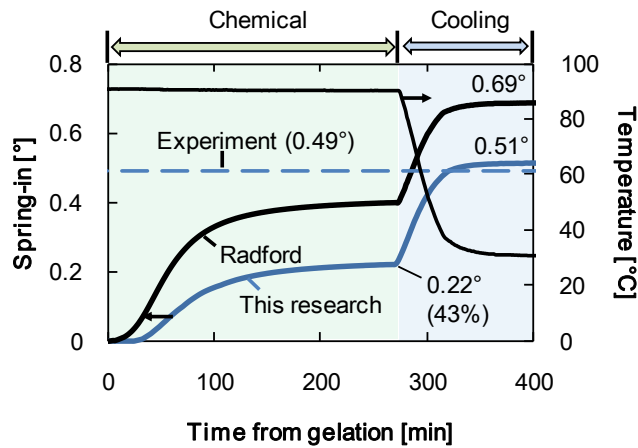


Fig. 4: Internal strain based spring-in prediction along with conventional method.

ジ部でのSpring-in角度がL型材よりも大きくなることが明らかになった。このことから、U型材はL型材の単純な重ね合わせとは異なる変形メカニズムを有することを示した。

第6章 大型部材へのひずみ計測手法の適用

板厚の変化する構造(Ply-drop-off構造)に対し、本研究で提案したひずみ計測法を使用し、大型構造への適応可能性を示した。計測結果から、同一の板厚部では長手方向でひずみの分布が生じないことが明らかになった。一方、成形後の残留変形は長手方向に分布する。これらの現象について有限要素解析を用いて検証を行った。

以上、複雑形状CFRPの内部ひずみ計測手法および理論・数値解析手法を開発し、内部状態に基づき、より詳細な残留変形メカニズムを明らかにした。

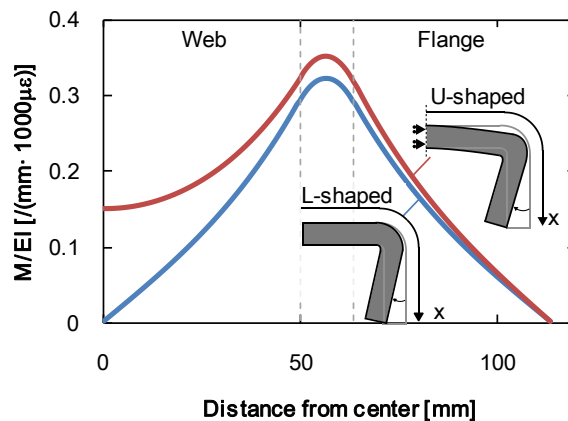


Fig. 5: Moment distribution in L- and U-shaped composites. Larger moment is induced in web area of U-shaped composite, resulting in larger deformation.