

東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
基盤科学研究系 先端エネルギー工学専攻  
2009年9月修了 修士論文要旨

## CFRP積層板のボルト接合部における 繊維圧縮損傷と強度に関するシミュレーション

学生証番号 76220 氏名 灘部 岳晃  
(指導教員 武田 展雄 教授)

Key Words : Composite Material, Finite Element Analysis, Failure Mechanism, Mechanically Fastened Joints

炭素繊維強化プラスチック (Carbon fiber reinforced plastics, CFRP) は比強度・比剛性に優れているため、航空宇宙分野を中心に幅広く用いられている。これらのCFRP構造において、ボルト接合部はよく用いられている構造要素の一つである。ボルト接合部に生じる損傷を把握し、強度を正確に評価することが必要とされている。特に強度はボルト締め付け量に依存して変化する。ボルト接合部の強度と最も深く関係しているのは繊維圧縮損傷、すなわちキンク損傷である。本研究ではこのキンク損傷の発生・進展過程を再現するボルト接合構造モデルを提案した。あわせてボルト接合強度試験を行い、キンク損傷観察結果と比較することで、ボルト締め付けによる強度変化のメカニズムを検証した。また積層板内部のひずみ解析を行い報告されているひずみ計測結果と比較した。

はじめにボルト接合部の面圧破壊試験を行い、損傷進展過程を観察した。供試材は、CFRP T700S/2500(株)東レ)を用いた。実験結果の荷重変位曲線を観察したところ、荷重はある値に達したところで低下し、その後小さな荷重低下を繰り返しながらほぼ一定となった。損傷進展過程の各段階における積層板を切断し、内部の損傷を観察した。積層板面外方向キンク、面内方向キンクが観察された。またボルト締め付け量が多いほど、キンク損傷発生荷重は大きくなった。すなわちボルトの締め付けによってキンク損傷発生がおさえられ、そのために強度が上がった。

実験結果をふまえ、有限要素コードABAQUSを用いて有限要素モデルを構築し、ボルト接合部のキンク損傷発生・進展シミュレーションを行った。解析結果を実験結果と比較するため、実験の試験片にあわせたモデルを構築した。そして有限要素解析を3つのステップに分け、ステップ1でボルトを締め付け、ステップ1で得た積層板押し込み量に応じた変位をステップ2で境界条件として定義し、損傷解析を行うことでキンク損傷発生荷重を算出し、ステップ3で損傷進展シミュレーションを行った。本解析の損傷モデルでは、損傷を各固体要素の剛性低下で表した。損傷はキンク損傷とマトリックス損傷を考え、キンク損傷の損傷発生基準には3つの応力基準を適用した。1つ目は通常の圧縮応力による損傷発生基準、2つ目はせん断応力を用いた損傷発生基準、3つ目はキンク発生が締め付けにより抑えられる現象を考慮した、繊維方向圧縮応力を厚み方向応力で割った損傷発生基準である。マトリックス損傷にはHouらの式を用いた。ボルト締め付け量とキンク損傷発生荷重の関係に関し、解析結果と実験結果を比較した。損傷発生基準として厚み方向応力を用いたものが実験結果と最もよくあうことが分かった。この損傷発生基準は締め付けによって損傷発生が抑制されるという意味で、キンク損傷発生の微視的メカニズムを考慮した形とも考えられる。解析の結果、適切な損傷発生基準を用いることで、実験結果に適合する解析結果を得られることが明らかになった。そしてボルト締め付け効果をキンク損傷発生応力に反映させた上で、損傷進展シミュレーションを行った。実験結果の軟X線写真の損傷領域と解析結果の0°層内のキンク損傷領域は概ね一致した。

またボルト接合部解析モデルを修正し、損傷進展過程での積層板内部のひずみ解析を行った。荷重方向に対して繊維が垂直な層、90°層には、マトリックスの塑性を考慮して塑性解析を行い、損傷進展後の塑性ひずみ分布を調べた。この塑性ひずみが除荷後残留ひずみとして残ると考え、塑性ひずみ解析結果と、報告されている光ファイバセンサによる残留ひずみ計測結果との比較・検証を行った。損傷領域が光ファイバ計測位置に達すると、残留ひずみ分布が大きく変化し、センサにより損傷検知可能となることから、解析によっても確認された。