

論文の内容の要旨

論文題目 複合材T-jointの製造時残留応力の評価及び
破壊進展の抑制

氏 名 久田 深作

炭素繊維強化複合材料(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)は高比強度・高比剛性などの利点から特に航空宇宙分野での利用が拡大している。CFRPを構造材料として利用する際の課題として、T-jointなどの接合部材への適用が挙げられる。T-jointは2つのL型材、スキン及び隙間を埋めるデルトイドから構成されており、垂直部材と水平部材の面内荷重を伝達する重要な役割を担う。T-jointでは成形時の硬化収縮及び熱収縮応力によってデルトイド内に亀裂が発生する事例が報告されており、機械荷重が低下することが問題となっている。また、デルトイド内で発生した亀裂がフランジとスキンの接着界面を容易に進展し最終破壊に至ることは、航空機の安全性に関わる重要な課題である。現状では大量のボルト締結により構造信頼性を確保しており、軽量で一体成形できるCFRPの利点を活かしきれていない。

複合材T-jointの機械荷重に対する挙動に関して多くの研究が行われている一方で、成形過程に主眼をおいた研究は非常に限定的である。また、現在提案されているZ-pinや縫合などの界面強化機構では初期破壊強度や疲労特性の低下などの問題があり、ボルト締結に代わる理想的な手段とは言えない。そこで本研究では複合材T-jointの特性向上及び構造信頼性の向上を目的として、複合材T-jointの成形破壊に関する研究と亀裂進展抑制に関する研究の大きく分けて2つの問題に取り組む。Figure. 1と併せて以下に各章の概要を示す。

第2章 T-jointデルトイド部の成形時ひずみ計測

光ファイバを用いてT-jointデルトイド部の成形時ひずみ分布計測を行った。また、層間樹脂層の配向が異なる3種類のデルトイド(ランダム、横配向、縦配向)を作製し、T-jointの成形破壊に対する層間樹脂層の影響を評価した。取得したひずみ分布(Fig. 2)から、デルトイドの頂点に近いほどL型材などの強い拘束を受けて大きな応力が生じることが推定された。また、層間樹脂層の配向によってデルトイドの内部状態及び破壊様式が変化することを示した。成形時のデルトイド内部のひずみ分布と成形破壊様式の関係から、デルトイド部の成形破壊ではデルトイド各隅に対する垂直応力及びそれらの大小関係が重要であると予想した。

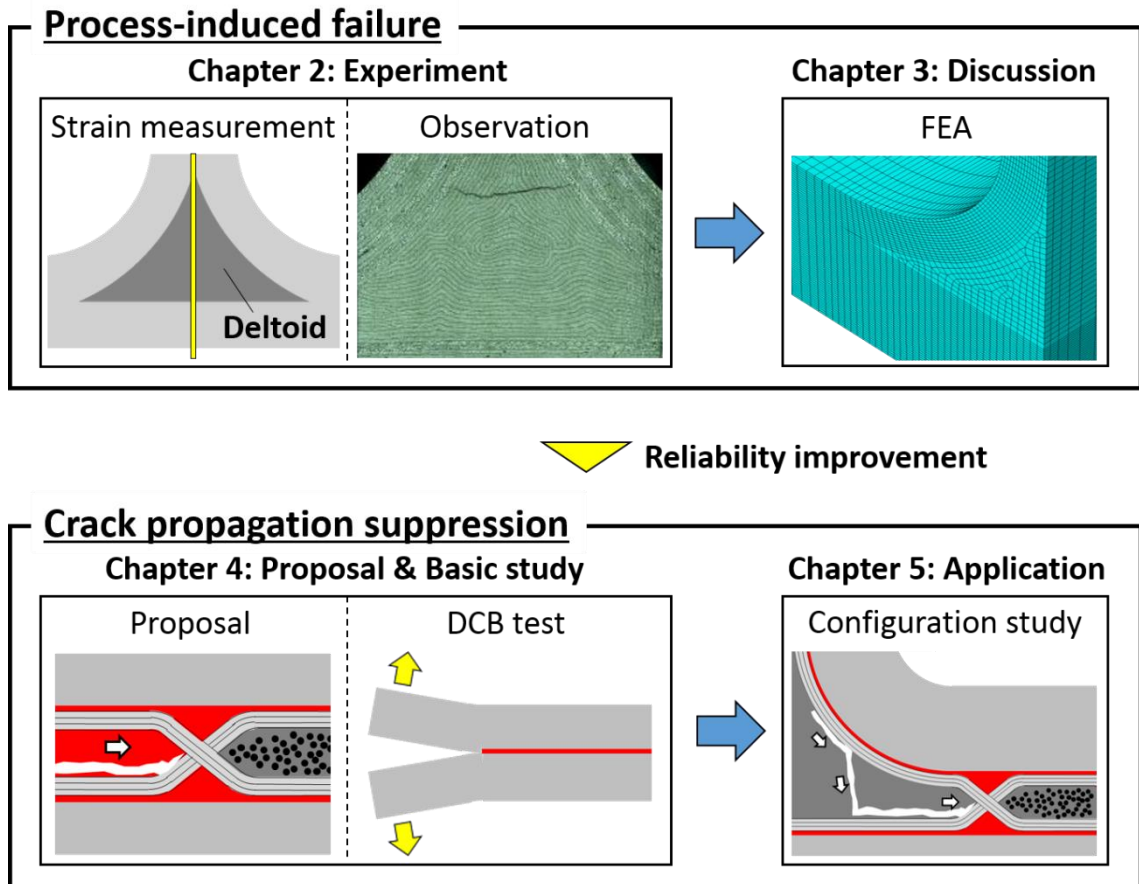


Fig. 1 Overview of this thesis.

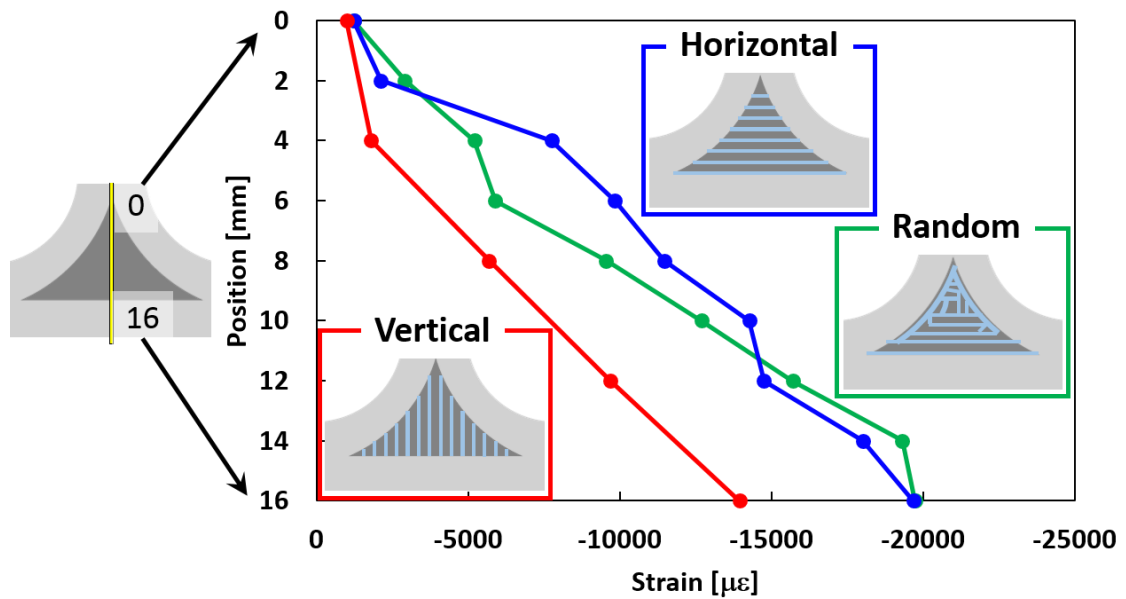


Fig. 2 Comparison of strain distribution of three types of specimens at room temperature.

第3章 T-jointデルトイド部の成形破壊指標及び抑制手法に関する考察

2章での実験結果を基に有限要素解析を行った。解析で得られたデルトイド内部の応力状態と破壊様式の比較から、2章で予想されたようにデルトイド部の成形破壊ではデルトイド各隅に対する垂直応力及びそれらの大小関係が重要であることを示した。また、有限要素解析の結果を踏まえ、T-jointデルトイド部の成形破壊に対する指標について検討した。検討の結果、応力基準の指標では実際の成形破壊箇所を再現できない一方で、エネルギー基準の指標のピークは成形破壊箇所と非常に良く合致することを示した(Fig. 3)。さらに実験及び解析結果を踏まえ、デルトイド部の成形破壊を抑制する構造(トライアングルデルトイド構造)を提案し、有効性を検証した。成形時ひずみ計測及び有限要素解析の結果から、提案構造によってデルトイドの全ての隅に対する垂直ひずみ・垂直応力を抑制できることを示した。また、冷却試験によって実際に成形破壊が抑制できることを示した。

第4章 接着界面における亀裂進展抑制機構の提案

Virtual crack closure technique(VCCT)を用いてT-jointのフランジ-スキン界面における最終破壊の破壊モードについて検討した。検討の結果、T-jointの最終破壊ではモードI亀裂進展が支配的であることが示されたため、亀裂開口を抑制するためにFig. 4のクラックアレスタ構造を提案した。提案構造では0°材の架橋によって亀裂の開口が抑制され(Fig. 4A)、90°材が0°材間で架橋することで架橋した0°材が被着体との接着界面で剥がれることを抑制する(Fig. 4B)。従って、亀裂が進展するためには0°材か90°材いずれかの炭素繊維を切断する必要があるため、高い亀裂進展抵抗が期待される。実際にDouble cantilever beam(DCB)試験によって、提案したクラックアレスタ構造を導入することで見かけのモードI破壊靱性及びエネルギー吸収特性が著しく向上することを示した。また、DCB試験と有限要素解析の結果から、クラックアレスタの積層構成の影響を評価した。

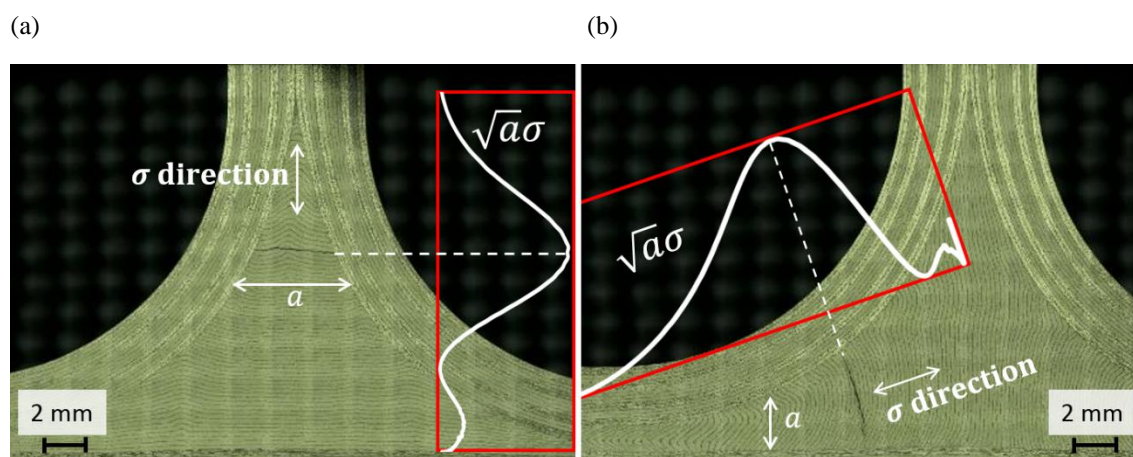


Fig. 3 Comparison of energy-based failure criteria and actual failure place.

(a) Horizontal-aligned deltoid. (b) Vertical-aligned deltoid.

第5章 T-jointに対するクラックアレスタの導入

4章で提案したクラックアレスタ構造をT-jointに導入し、引張試験によって有効性を検証した。クラックアレスタをT-jointのフランジ-スキン界面に導入することで亀裂進展が抑制され、初期破壊強度を低下させることなくT-jointの損傷許容性が著しく向上することを示した(Fig. 5)。また、クラックアレスタの効率的な配置について検討し、クラックアレスタはデルトイド付近のフランジ-スキン界面及びスティフナ界面の3箇所に導入することが効率的であることを示した。さらにクラックアレスタの積層構成の影響を評価し、積層構成によって破壊様式やエネルギー吸収特性が異なることを示した。

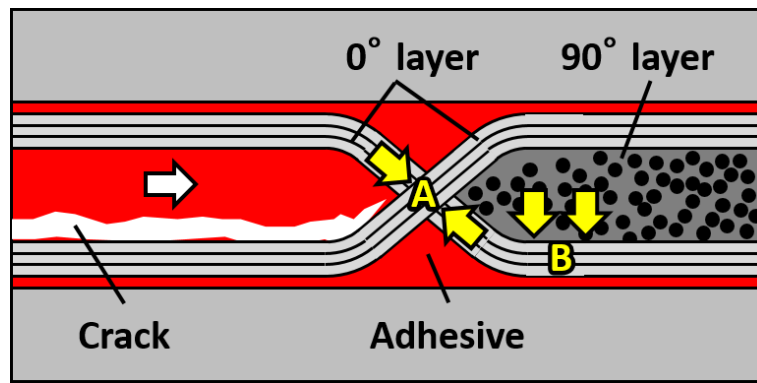


Fig. 4 Schematic of fiber-reinforcement-based crack arrester.

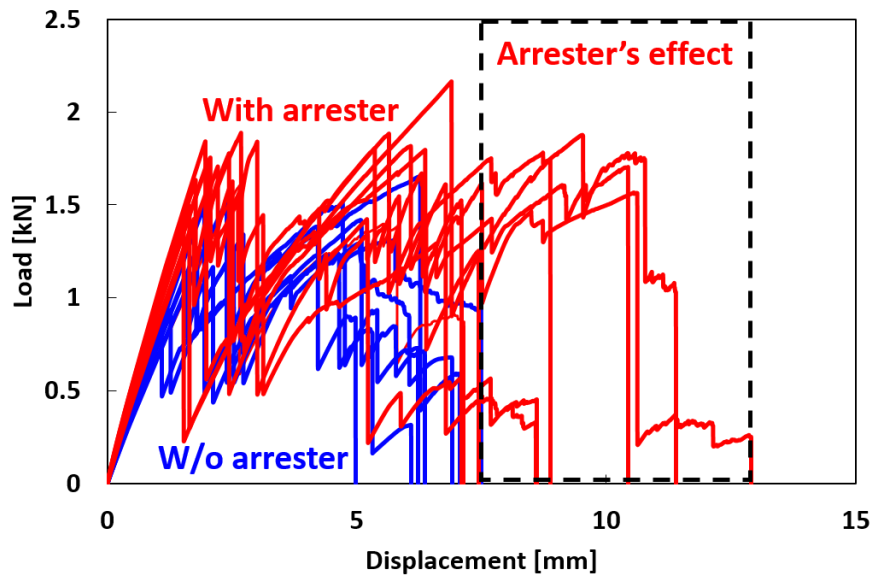


Fig. 5 Load-displacement curves of the T-joint specimen without the arrester and the specimen with the arrester.