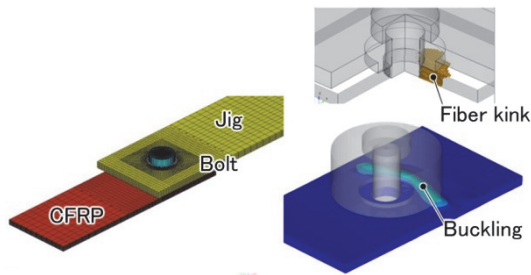


組合せ荷重が作用する機械継手部における 複合材の損傷シミュレーション技術

Numerical Simulation by Damage Modeling
in Composite Mechanically-fastened Joints under Combined Loading



橋爪 良輔^{*1}
Ryosuke Hashizume

永友 勇也^{*2}
Yuya Nagatomo

佐藤 幸宏^{*1}
Yukihiro Sato

須原 正好^{*3}
Masayoshi Suhara

江崎 浩司^{*4}
Koji Esaki

清水 隆之^{*5}
Takayuki Shimizu

繊維強化プラスチック(FRP)に代表される複合材構造の製品適用に向けては、構造信頼性を確保するために多数の試験を要し、開発期間が長期化する点が課題となる。当社では複合材料の複雑な損傷を数値解析上で表現し、逐次的に損傷の進展をシミュレートし、強度を高精度に予測する解析技術の開発に取り組んでいる。本報では、複雑な荷重条件となりやすく、多様な破壊モードを示すため、これまでは事前の強度予測が困難であった機械継手部について、損傷の発生、及び進展までを解析し、要素試験や内部観察との比較・評価事例を紹介する。

1. はじめに

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)に代表される複合材料は、比強度・比剛性の高さと、疲労・腐食に対する耐久性の高さから、構造軽量化を目的として航空宇宙機器の主構造部材としても積極的に採用されており、近年は高級車やスポーツカーなど一部の車種ではあるものの自動車にも適用されるようになってきている。

複合材構造の適用における課題の一つは、航空宇宙機器など高い信頼性が要求されるため必要な確認試験が非常に多くなることである。その理由として、複合材は、強度・弾性率などの機械的性質が強い異方性を示すとともに、強化材である繊維と母材である樹脂という異なる材質の組み合わせによって破壊の様相が複雑に変化するためである。

このような背景から、数値シミュレーションによって、開発試験を可能な限り代替しようとする“Virtual Testing”の実現に向けた取り組みが各所で進められており、当社でも製品開発への適用を目指した研究開発に取り組んできた^{(1),(2)}。

本報では、荷重条件・環境条件・積層構成・板厚などの設計諸因子によって継手強度や破壊様相が複雑に変化するため事前予測が困難であり、試験数が増加する傾向にあるボルトやリベット等の機械継手部に対し、シミュレーションを実施した事例^{(3),(4)}を説明する。

2. 複合材機械継手の損傷シミュレーション技術

2.1 複合材機械継手の破壊モード

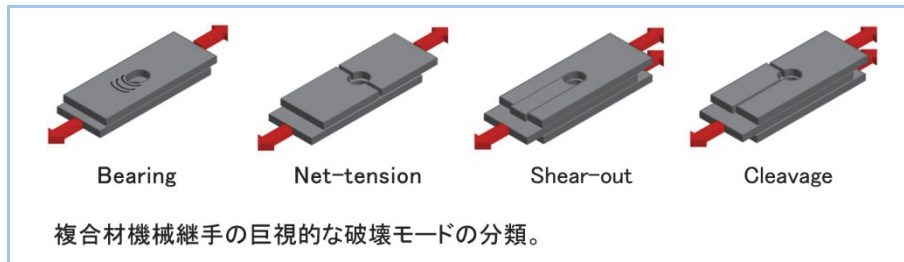
複合材機械継手の巨視的な破壊モードは図1のように大別される⁽⁵⁾。機械継手と複合材の面圧伝達荷重である Bearing 荷重と、複合材自体を伝達する Bypass 荷重の組合せ荷重が負荷されると、それらの作用比率によって静的破壊荷重が変化する。したがって、この組合せ荷重条件での強度を試験で取得する必要がある。

*1 総合研究所 強度・構造研究部

*2 総合研究所 製造研究部

*3 総合研究所 強度・構造研究部 技術士(航空宇宙部門) *4 総合研究所 強度・構造研究部 主席研究員 工博

*5 総合研究所 強度・構造研究部 主席研究員

図1 複合材機械継手の破壊モード⁽⁵⁾

2.2 損傷シミュレーション技術の概要

複合材の損傷シミュレーション技術は、複合材の破壊過程において発生・進展する微視損傷の挙動を、複合材の各層の要素及びその界面に対する材料構成則としてモデル化し、非線形有限要素法を用いて巨視的な破壊挙動や強度を予測するものである。

まず、要素内部に対しては、繊維破断・繊維キンク・樹脂割れといった微視損傷をLaRC則と呼ばれる破壊基準(NASA・Langley Research Centerを中心に研究開発が進められた)で予測し、連続体損傷力学(Continuum Damage Mechanics:CDM)に基づいて損傷進展時のエネルギー散逸を考慮した軟化挙動をモデル化している⁽⁶⁾。

また、層間はく離や、スプリッティングなどと呼ばれる強化繊維に沿って発生・進展する面内き裂は、要素界面において発生・進展するき裂としてモデル化することができる結合力要素(Cohesive Zone Element:CZE)でモデル化した⁽⁷⁾。

2.3 解析モデル

解析モデルを図2に示す。汎用有限要素ソルバーであるAbaqusを使用し、試験片評価部の各層ごとにソリッド要素で要素分割を行い、治具・ボルト・試験片はそれぞれ互いに接触する条件としている。要素内部における微視損傷の発生・進展挙動は、ユーザー定義サブルーチンとして独自にコーディングしたものを組み込んで解析を行った。

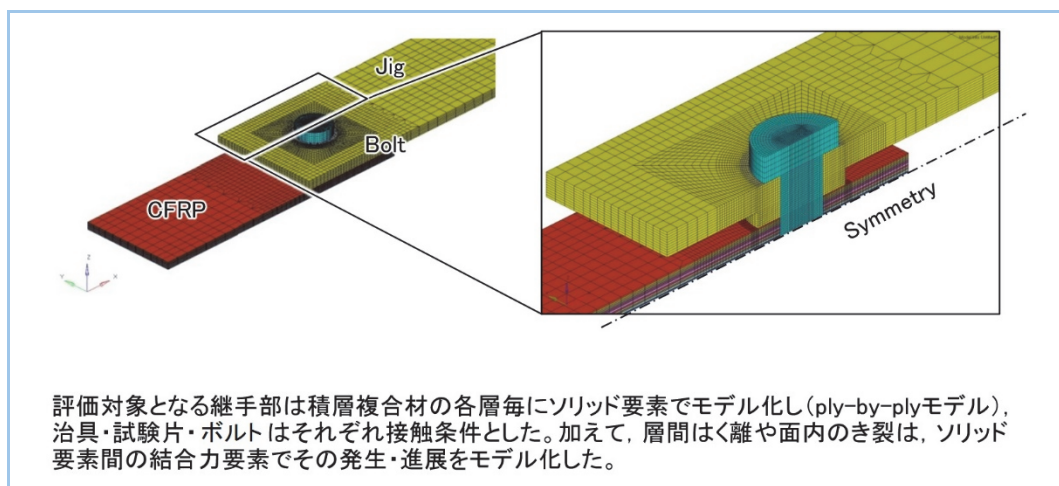


図2 解析モデル

3. 損傷シミュレーション結果と要素試験結果の比較

3.1 損傷発生に対する比較

損傷の発生に対して要素試験及び内部観察との比較を行った。積層構成や板厚などを変えた5種類の試験片に対し、異なる最大引張荷重まで負荷した後に除荷し、試験片を取り外してX線CT及び光学顕微鏡で断面を観察し、微視損傷が発生した荷重を特定することで解析による予測結果と比較した。

一例として基準となる24層擬似等方積層条件での断面観察結果を図3に示す。ここでは、異なる3段階の最大引張荷重に対する断面観察画像を示しており、一番小さい負荷荷重である下

段の断面観察画像では損傷が認められない一方、中段及び上段のより大きい負荷荷重における断面観察では、いずれも繊維キンクと呼ばれる形態の損傷が認められた。したがって、下段及び中段の負荷荷重の間で損傷が発生していると考えられる。

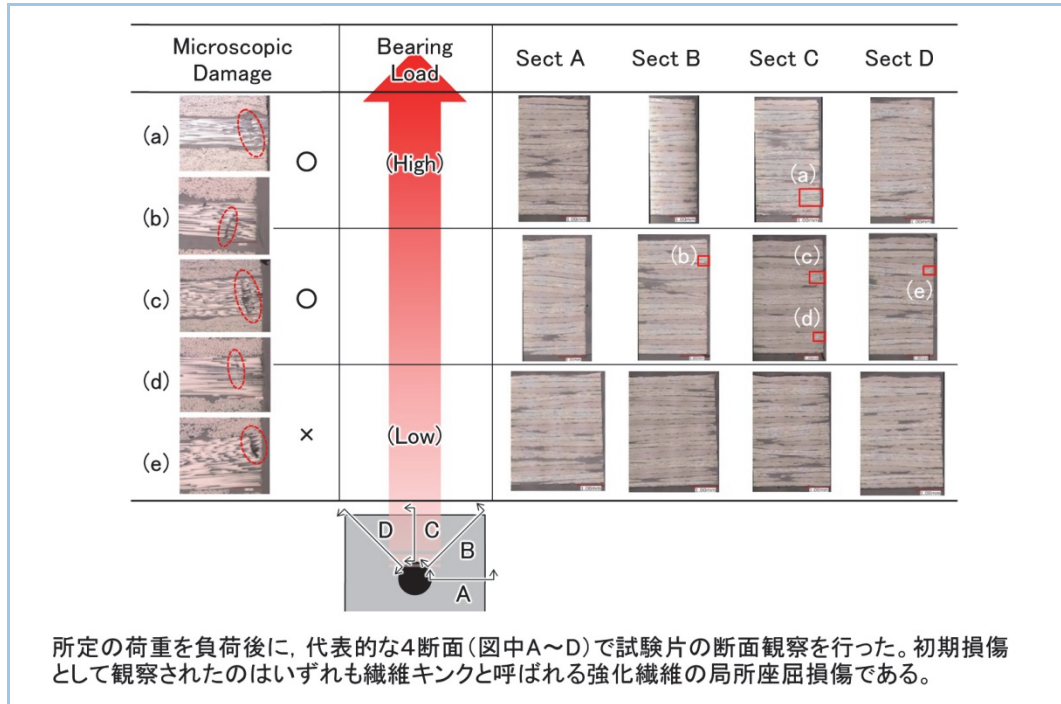


図3 断面観察画像の例

このようにして特定した全ての試験片条件に対する損傷発生荷重と、解析による予測結果を図4に示す。エラーバーは、下限が断面観察によって損傷の発生が認められなかった負荷荷重の最大値であり、上限が損傷の発生が認められた負荷荷重の最小値を表している。試験片条件により差はあるが概ね精度良く試験結果を予測できていることが確認できた。

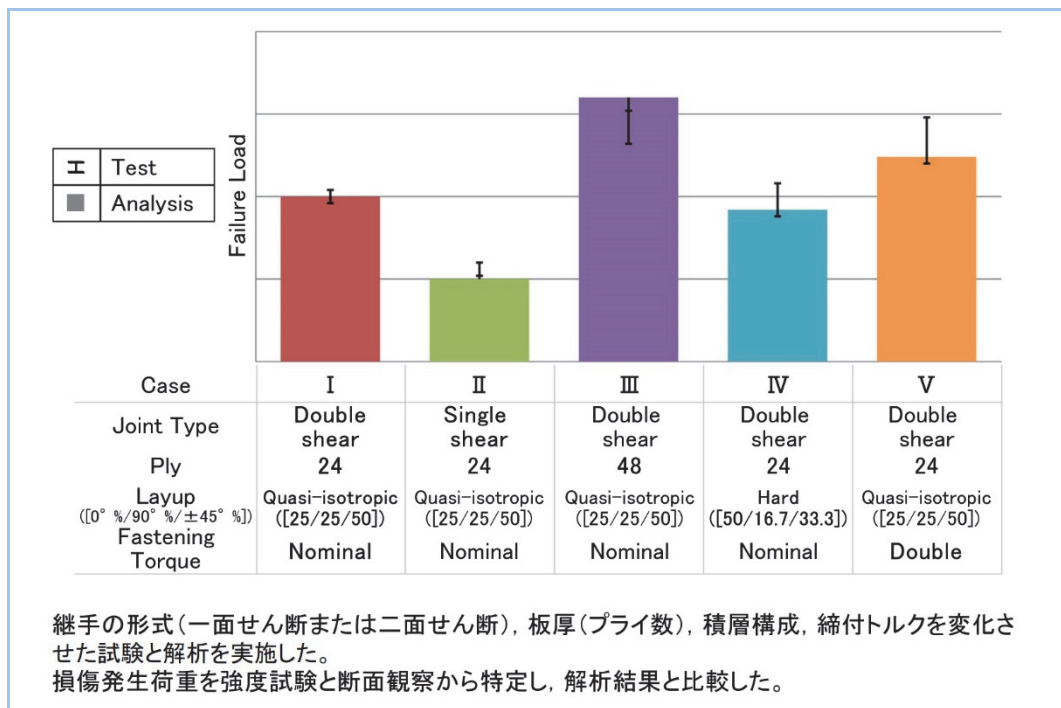


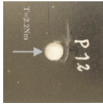
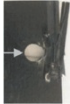
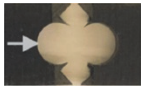
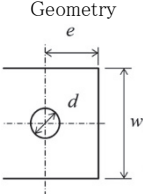
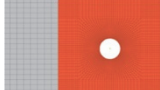
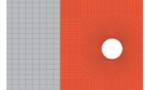
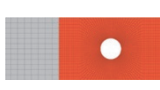
図4 損傷発生に対する解析及び試験の結果

3.2 損傷進展挙動に対する比較

次に、損傷進展挙動に対する比較結果を示す。損傷進展挙動については、破壊モードに対するシミュレーションと要素試験の比較を行った。複合材機械継手は、試験片の寸法を変化させることで巨視的な破壊モードが変化することが報告されている⁽⁸⁾。そこで、表1に示す寸法の試験片に対し、試験との比較により、破壊モードの変化を解析で予測できることを確認した。

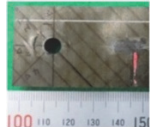
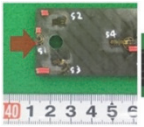
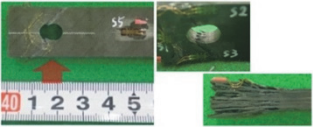
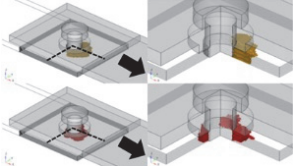
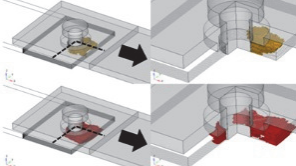
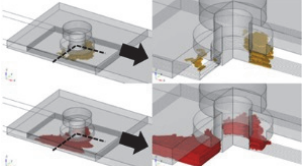
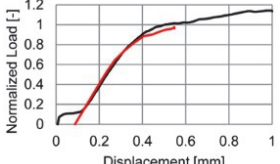
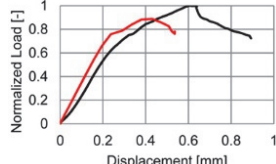
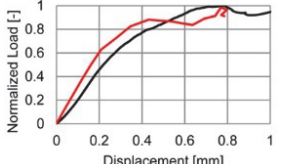
表2は試験及び解析の結果を比較したものである。解析結果は試験における破壊モードの変化を予測できており、破壊荷重も±15%以内で予測できた。面圧破壊 (Bearing) となる条件では、繊維キンク損傷が支配的となった。一方、試験片の穴と自由端までの距離 (表中 e) や試験片の幅 (表中 w) 等の寸法が小さくなると樹脂割れ損傷が支配的になり、それぞれ Shear-out や Net-tension に近い破壊モードに変化する様子が試験と解析の両方で確認できた。加えて、このような場合は穴縁を起点として発生した樹脂割れ損傷が自由端まで進展することで荷重低下が生じる様子が解析及び試験の結果から確認できた。

表1 破壊モード変化を確認した解析及び試験のケース一覧

		Bearing	Shear-out	Net-tension
Failure Mode ⁽⁸⁾				
Geometry  FE Model				
	w/d	5	5	3
	e/d	2.5	1.5	2.5

上段に示すような破壊モードとなることを想定し、試験片寸法を設定した。

表2 破壊モード変化を確認する試験及び解析の結果比較

	Bearing	Shear-out	Net-tension
Test			
Simulation ■ : Kink ■ : Matrix cracking			
Load-Displacement — : Test — : Simulation			

損傷進展解析により、微視損傷の発生・進展と巨視的な破壊モードの関係性を確認した試験と解析の結果。解析結果は繊維キンクで損傷したと判定された要素は黄色 (■), 樹脂割れで損傷したと判定された要素は赤 (■) で示されている。

3.3 破壊荷重に対する予測結果との比較

最後に、組合せ荷重に対する強度予測精度を確認した結果を図5に示す。図5には表2に示した Bearing 荷重のみが作用する条件以外の荷重条件に対する解析での破壊モードも併せて示す。解析での破壊荷重は試験結果と比較し±15%程度の差であり、破壊モードも試験結果と解析結果で一致していることが確認できた。特に、Bearing 荷重と圧縮の Bypass 荷重が作用するケー

スでは、微視損傷と層間はく離の進展によって生じる局所座屈の発生位置が、圧縮の Bypass 荷重のみが作用する場合と比べて変化する現象をシミュレーションで再現することができた。

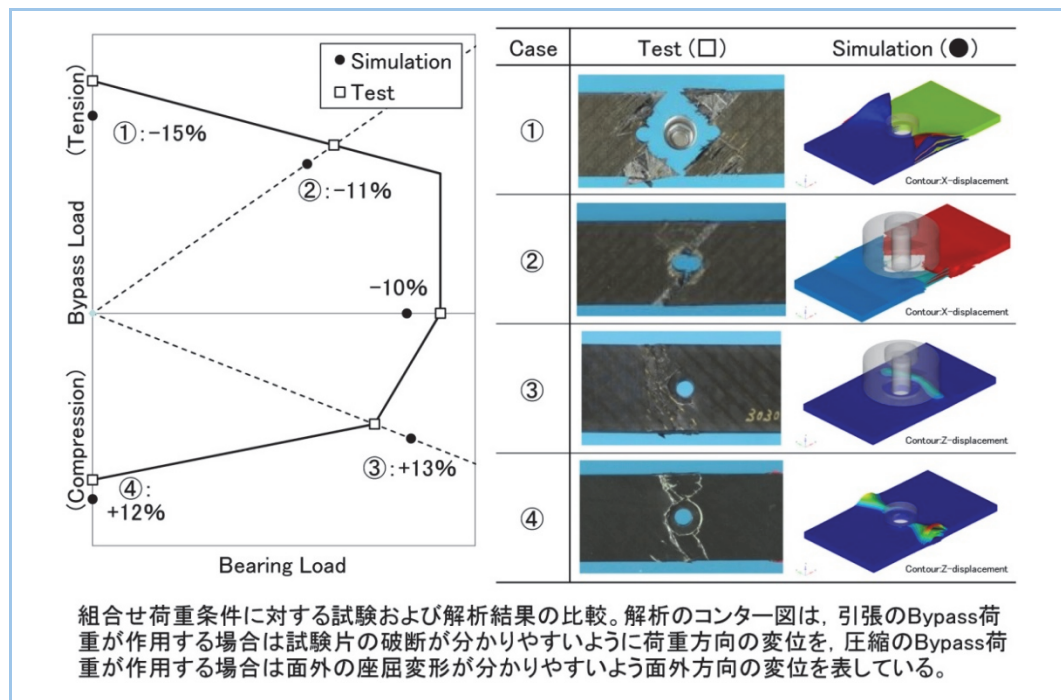


図5 組合せ荷重条件に対する強度予測結果

4. まとめ

本報では、荷重条件により多様な破壊モードを示す機械継手を例として、複合材内部の微視損傷の発生・進展挙動を詳細にモデル化することで、強度を精度良く予測できるシミュレーション技術を開発したことを紹介した。このようなシミュレーション技術により開発試験を削減し、製品のコストダウンと開発期間短縮に向けた取り組みを推進していく。また、製品設計の初期段階でより詳細な損傷リスク評価と対策の合理化を進め、信頼性向上や構造軽量化などの製品価値向上にも寄与できると考えている。

今後は、機械継手のみならず要素試験から部分構造試験に至る多種多様な事例に本技術を適用し、その予測精度と信頼性を確認していくとともに、本シミュレーション技術の改良と適用範囲の拡大を目指していく。

参考文献

- (1) 佐藤幸宏 ほか、損傷現象をシミュレートする複合材の強度予測技術、三菱重工技報 Vol.55.55 No.2 (2018)
- (2) Sato, Y. et al., Progressive failure analysis for impact damage and compressive strength of composite laminates, Mechanical Engineering Journal, Vol.4 No.5 (2017) p.16-00710
- (3) 橋爪良輔 ほか、複合材継手の損傷発生荷重予測手法の研究、第 9 回日本複合材料会議(JCCM-9) 講演論文集 2B-04 (2018) p.1
- (4) 橋爪良輔 ほか、CFRP ボルト継手に対する損傷進展解析技術の開発、第 10 回日本複合材料会議(JCCM-10) 講演論文集 2C-04 (2019) p.1
- (5) Composites UK Ltd, JOINING OF FIBRE-REINFORCED POLYMER COMPOSITES - A Good Practice Guide, (2020)
- (6) Pinho, S.T. et al., Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites, Journal of Composite Material, Vol.46 (2012) p.2313-2341
- (7) Hallet, S.R. et al., The open hole tensile test: a challenge for virtual testing of composites, International Journal of Fracture, Vol.158 (2009) p.169-181
- (8) P.P.Camanho et al., A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials, Composite Science and Technology, Vol.66 (2006) p.3004-3020

