

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560111

研究課題名(和文) 確率変動を考慮した複合材料積層補強平板の圧縮特性評価

研究課題名(英文) Probabilistic Evaluation of compression strength of composite laminated stiffened plates

研究代表者

末益 博志 (Hiroshi, Suemasu)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：20134661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：フランジ/スキン間の剥離に注目して、複合材料補強平板の圧縮強度の確率特性の評価を試みた。フランジとスキンの接着部端からの剥離発生に関して、破壊力学的な評価により比較的良好な破壊強度を推定できることを実験的に確認した。曲がりはり試験により層間引張り強度の測定し、結果を確率的に評価した。この評価方法を使うことにより、(応力特異点を除いて)強度を確率的に評価することができた。これらの結果をもとに、複合材料製補強平板の有限要素法解析を実施し、スキン・フランジ接着部端からの破壊する補強板の強度評価をした。計算結果は、補強板の圧縮実験結果と比較的良好一致した。

研究成果の概要(英文)：Probabilistic evaluation of compressive strength of composite stiffened plate is studied by focusing the debonding of the interface between the skin and frange. The failure of the skin/frange interface was discussed fracture mechanically first and the toughness of the skin/frange interface can be used to predict the debonding of skin/frange interface. Then, the interlaminar tensile strength of the laminate was measured and the interfacial strength was probabilistically evaluated. Finally, a finite element analysis was performed for a composite stiffened panel. The failure load and the expected position of failure mechanically assessed agreed well with the experiment done at JAXA before.

研究分野：航空機構造材料

キーワード：複合材料 補強板 層間剥離 確率特性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 炭素繊維強化複合材料構造は、高比強度・高比剛性という特徴を生かし地球温暖化防止の一手段としてだけでなく、機械構造物の性能向上に資する材料として注目されている。しかし、複合材料構造は、異方性や不均質といった材料パラメタが多いだけでなく成形条件、環境、偶発的損傷などの不確定要因により最終強度が大きく影響を受けるため、複合材料構造開発には大量のデータ取得に起因するコストの大幅な増加や、安全側に過ぎる設計基準による重量増加を起し、複合材料本来の特性を生かしきれない状況にある。

(2) 複合材料構造の設計をさらに複雑にしている要因は、金属構造に比べて、寸法や材料特性の基準値からのばらつきが大きいだけでなく、一つの実現構造物内でその空間的な変動が無視できず、数学的に困難に思われる確率過程の概念を考慮した解析が肝要となることである。また剥離の発生・進展抵抗は、荷重条件だけでなく破壊の履歴にも大きく依存するなど、破壊規準をどのように設定するか等を含めて未解決の多くの問題が残されている。

(3) 複合材料製補強平板構造がすでに作製・実用に供されているが、大型航空機の開発においては多くの問題が生じ、開発が遅れたことは周知の事実である。これは破壊機構が明確でないことやそのばらつきの原因に対する理解が不十分なため、想定外の不具合が発生することに起因している。座屈後設計を行うと、補強板の剥離が起点となった破壊をするので、最終強度の確率的な変動がさらに大きくなるのが憂慮される。

## 2. 研究の目的

航空機の複合材料構造設計では、複合材料の破壊靱性が低いこと、様々な損傷モードからの破壊が発生すること、またその特性のばらつきなど信頼性の低さ等により、安全性確保のために座屈後設計が許されないなど設計基準が厳しく制限され、その高比強度・高比剛性にもか

かわらず、全体構造としてほとんど軽量化に寄与できない状態である。補強板構造でこの状況を打破するためには、座屈後の強度と信頼性を保証することが肝要である。本研究では、複合材料製の補強平板構造の圧縮破壊問題に関して、確率的な評価を取り入れ、複合材料製の補強平板構造の座屈後設計の導入に資すること、さらには複合材料損傷許容設計法に新たな方向を見出すことが目的である。確率的解析を行うに当たっては、複合材料構造の確率データがほとんどなく、どのようなモデル化が妥当か判断がつかない状態であり、実構造解析に有効な材料特性の確率的評価方法を明確化することも本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

座屈後の強度決定要因として最も可能性の高いフランジ部からの剥離基準を明らかにするべく実験と数値解析により破壊の評価を行った

### (1) 実験

- 層間引張り強度の測定と結果の確率的な評価法の提案
- 応力集中部からの破壊の破壊力学的な取り扱い方の可能性の評価

### (2) 有限要素解析

各基礎試験用試験片に対応した有限要素モデルに関して応力解析を行った。さらに補強板モデルに関して座屈および座屈後解析を実施した。ここでフランジ端に微小クラックを導入し、仮想クラック閉口法 (VCCT) を用いて座屈後のエネルギー解放率を算出した。この結果を確率的に整理し、破壊確率を整理した。

## 4. 研究成果

層間引張り強度を空間的に分布する欠陥に起因する (空間的なマルコフ過程) と考えて実験的に得られた破壊強度を整理するこ

とで、実験結果を図1のように整理できた。この仮定を数値解析に取り込むことは比較的容易であり、破壊発生の数値モデル化への道を見出せたと考えている。

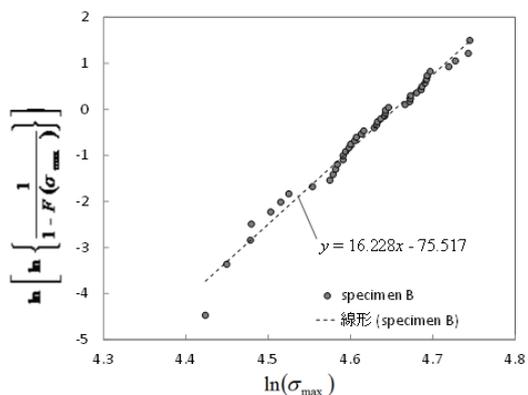


図1 層間引張り強度のワイブル紙プロット

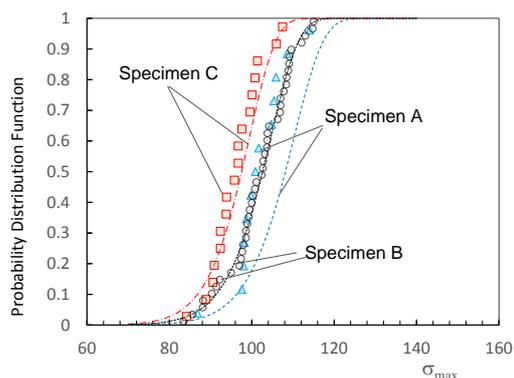


図2 層間引張り強度分布の推定値と実験値の比較

フランジ端からの剥離発生に関しては、フランジ端の処理状況によって図3のように強度が大きく変動するが、フランジ端に大きな樹脂だまりが存在する場合を除いて発生した剥離などの損傷が最終的に接着部へのクラックとなって進展している。このことから、最終強度を決定する要因として、小さな欠陥の不安定進展が最終強度を決定する要因と推論される。ここではこの問題を単純化してクラック長さがゼロの極限のクラックの進展条件を最終強度と仮定して強度推定を試みた(図4)。剥離発生荷重の推定が可能であることを実験結果と比較することにより見出した。

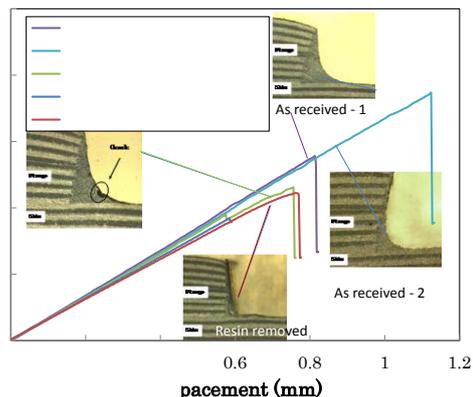


図3 曲げ試験結果とフランジ端の状況

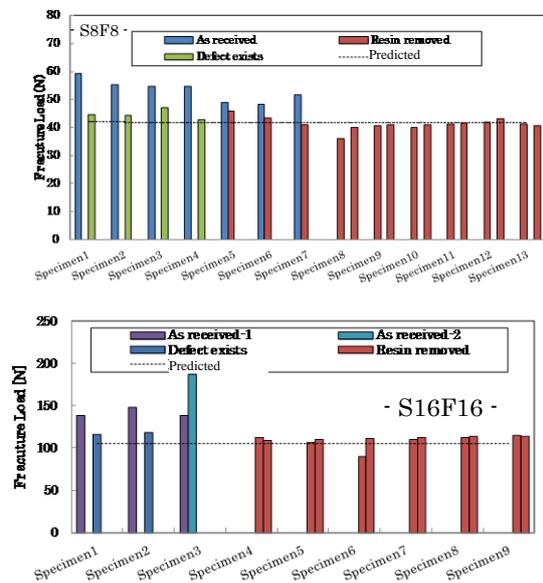


図4 曲げ試験結果と標準試験から得られた材料の破壊靱性値からの推定値の関係

破壊の基礎材料定数を考慮して、補強板の有限要素解析を行った。図5のようなモデルを作成し、角部を細分化して微小長さのクラックを模擬し、仮想クラック閉口法を用いてエネルギー解放率の計算を行った。

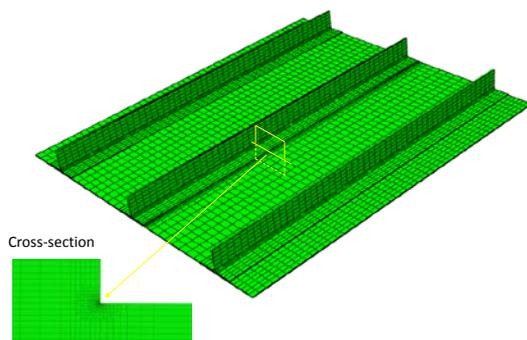


図5 補強板の有限要素モデル

座屈モードを図6に示した。座屈モードおよび座屈荷重は実験結果とはほぼ一致するが、二次座屈荷重は少し異なった値となった。このモデルに関して非線形静解析を行い、剥離端でのエネルギー解放率の値を求めた。このときのエネルギー解放率の分布を図7に示した。実験では破壊は試験片の中央近くで生じたが、本解析結果は、エネルギー解放率の絶対値が最大となる点は、試験片中央部で、モードIの成分が最大となる点（破壊が最も起き易いと考えられる点）は試験片の固定端近くとなっている。この結果とフランジ端の破壊靱性の空間的なばらつきを考慮することにより、破壊強度の確率的特性だけでなく破壊起点の確率まで含めた予測が可能であると判断できる。

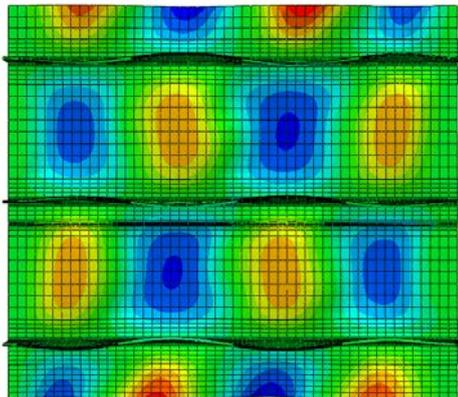


図6 一次の座屈モード

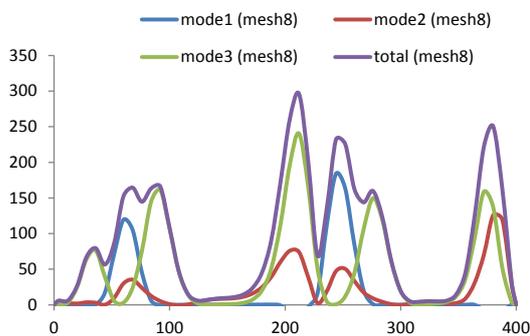


図7 フランジ縁でのエネルギー解放率分布 (端面変位 2.8mm)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- (1) 市来誠, 末益博志, 二重らせん損傷を有する複合材料積層板の圧縮荷重下における衝撃損傷進展メカニズム, 日本機械学会誌, 81, 826, 2015.
- (2) H. Suemasu, Y. Tanikado, Damage growth behavior and interlaminar fracture resistance of CFRP laminates under shear fracture mode, *Advanced Composite Materials*, in press
- (3) 末益博志, 滝澤慎太郎, 森本哲也, 北條正弘, L字型試験片を用いた4点曲げ試験による炭素繊維強化複合材料の層間引張り強度の確率論的評価法, 日本複合材料学会誌, 41, 3, 2015.
- (4) H. Suemasu, M. Ichiki, Analytical study on low compressive strength of composite laminates with impact damage, *Composite Structures*, Vol.105, 2013.
- (5) 市来誠, 末益博志, 青木雄一郎, 衝撃損傷を有するCFRP積層板の圧縮挙動と破壊現象に関する考察, 日本複合材料学会誌, 第38巻, 第6号, 2012
- (6) Hiroshi Suemasu, Yosuke Naito, Katsuhisa Gozu, Yuichiro Aoki, Damage Initiation and Growth in Composite laminates During Open Hole Compression Tests, *Advanced Composite Materials*, 21, 3, 2012

[学会発表] (計 9 件)

- (1) H. Suemasu, M. R. Wisnom, X. C. Sun and S. R. Hallett, Damage Estimation in Nonlinear Laminates Subjected to a Transverse Concentrated Load, ICCM 20, July, Copenhagen, Denmark, 2015.
- (2) 赤木亨慈, 末益博志, 大櫛和貴, 杉本直, 引張り荷重下での切り欠きを有する炭素繊維複合材料積層板の損傷累積挙動に関する実験的考察, JCCM 6, 2015年3月
- (3) 大櫛和貴, 末益博志, 赤木亨慈, 杉本直, 引張り荷重下での切り欠きを有する炭素繊維複合材料積層板の損傷累積挙動に関

- する実験的考察, JCCM 6, 2015 年 3 月
- (4) 佐藤泰基, 松崎史典, 末益博志, 森本哲也, 加藤久弥, 安岡 哲夫, CFRP積層板の2連フラスナー継手の強度および破壊メカニズムに及ぼすバイパス力の影響, JCCM 6, 東京理科大学, 2015年3月
- (5) 赤木亨慈, 末益博志, 大櫛和貴, 杉本直, 切り欠きを有するCFRP積層板の損傷進展メカニズムに関する研究, 複合材料シンポジウム, 秋田大学, 2014年9月
- (6) 末益博志, 滝澤慎太郎, 森本哲也, L字型CFRP積層板の層間引張り強度の確率特性, 複合材料シンポジウム, 秋田大学, 2014年9月
- (7) H. Suemasu, K. Akagi, K. Ohkushi, S. Sugimoto, Effect of Initial Notch-tip Damage on Failure Behavior of Composite Laminates, 10th Canada-Japan Workshop, 19-21, Vancouver, Canada, August 2014.
- (8) H. Suemasu, M. Ichiki, M. R. Wisnom, Evaluation of Impact Damage in Nonlinear Laminates Subjected to a Transverse Concentrated Load, 16th US-Japan Conference on Composite Materials, University of California San Diego, Sept. 8~10, 2014
- (9) 末益博志, 関大吾, 市来誠, 杉本直, 衝撃損傷発生メカニズムに関する実験的考察, 第56回構造強度講演会, 浜松市, 2014年8月.
- (10) H. Suemasu, M. R. Wisnom, X. C. Sun, S. R. Hallett, an analytical study on multiple delaminations and instability in nonlinear plate subjected to transverse concentrated load, 13<sup>th</sup> Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, Nagoya November 11-13, 2013
- (11) M. Ichiki, H. Suemasu, Y. Aoki, Prediction of compression after impact strength based on instability of delamination, the 19<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials, Montreal, Canada, July, 2013.
- (12) 赤木亨慈, 末益博志, 杉本直, 貫通孔を有する複合材料積層板の損傷累積挙動の微視的観察, JCCM 5, 京都, 2013年3月.
- (13) 滝澤慎太郎, 末益博志, 森本哲也, 北篠正弘, L字型CFRP積層板の4点曲げ試験による層間引張強度測定と屈曲部曲率半径の影響, JCCM 5, 京都, 2013年3月.
- (14) H. Suemasu, M. Ichiki, Analytical Study on Low Compressive Strength of Composite Laminates with Impact Damage, UK-Japan Workshop, U. of Bristol, UK, March 24-27, 2013
- (15) 末益博志, 谷角 勇介, せん断応力下での層間剥離進展抵抗, 第37回複合材料シンポジウム, 2012年10月
- (16) H. Suemasu, Y. Tanikado, Delamination Propagation Behavior and the Fracture Toughness of Composite Laminates under Shear Fracture Mode, 15th US-Japan Conference on Composite Materials, U. of Texas, USA, Sept, 2012.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

末益 博志 (上智大学・理工学部・教授)  
研究者番号: 20134661

### (2)研究分担者

長嶋 利夫 (上智大学・理工学部・教授)  
研究者番号: 10338436