

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03760

研究課題名（和文）十字型一方向複合材料試験片の桁接合強度評価法の確立

研究課題名（英文）Development of evaluation method of joint strength for cruciform unidirectional composites

研究代表者

野田 淳二（Noda, Junji）

近畿大学・生物理工学部・准教授

研究者番号：00398992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、軽量・高強度化に優れる一方向複合材料を用いた桁構造体の信頼性評価を可能とする複合荷重状態での桁接合強度評価法を提案した。十字型一方向桁試験片に曲げ負荷および面内せん断負荷を与えることにより、接合部の曲げ負荷下はく離挙動や面内2次元せん断型はく離挙動を呈する試験法を確立した。その場観察による損傷の定量化および結合力要素を用いた有限要素法に基づく損傷進展シミュレーションを併用することにより、桁接合部のはく離挙動を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、トポロジー構造最適化した複雑なFRP桁構造物が3Dプリンタによって成形され自転車等へ実装される例や人工衛星のラティス構造体の実用等、桁構造がCFRP構造物のより高比強度化に寄与している。FRP桁構造体は、身近な生活から宇宙空間までこれまでの概念を覆す注目される構造であり、未解明であった桁接合体はく離挙動の解明は、その解明手法は学術的意義が高く、その構造体の普及は社会的意義においても価値がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, a joint strength evaluation method under multi-axial loading conditions was proposed to evaluate the reliability of crossbeam structures made of unidirectional composite materials, which are lightweight and high-strength materials. By applying bending and in-plane shear loads to a cruciform unidirectional crossbeam specimen, we established a novel test method that exhibits delamination behavior under bending load and in-plane two-dimensional shear delamination behavior at the joints.

The delamination behavior of crossbeam joints was elucidated by combining in-situ damage quantification and damage propagation simulation based on the finite element method using a cohesive element.

研究分野：複合材料

キーワード：十字型試験片 モードI型はく離 モードIII型はく離 結合力要素

### 1. 研究開始当初の背景

長繊維強化複合材料を航空機翼等の大型実構造物に適用した場合は、面内剛性や面内強度に優れるため、構造として破壊する場合は曲げによる大変形や異物衝突後の局所的な界面はく離に端を発する破壊が想定される。曲げによる破壊は構造の設計変更やシステムにより回避可能であり、局所的な界面はく離の問題は、DCB (双片持ち梁) 試験等による平板を利用した破壊モード別はく離試験でのラボ評価で十分である。これは大型構造物での局所的な界面はく離は、定常的なき裂進展方向を一方向と仮定しても問題なく、また負荷モードも単一であることが理由である。一方で、トポロジー構造最適化により考案された複雑な CFRP 桁構造物が 3D プリントを用いて成形され自転車や自動車に実装される成果が盛んに報告されているように、桁構造が CFRP 構造物より高比強度化に寄与できることが注目されている。このような小型桁構造物では、面内変形のみならず面外変形や多軸応力状態に晒される。人工衛星に用いられるラティス構造体が既に実用化されて一方向複合材料 (Unidirectional, UD 材) を用いることによる高比強度化が達成されてきたが、これは平面や円筒面への適用であり複合荷重状態は想定されないため、桁接合面の曲げ負荷下はく離挙動や 2 次元せん断型はく離挙動は未解明である。申請者が提案した図 1 の UD 材を用いた津波避難シェルター用桁構造物の圧壊挙動からも桁接合部の破壊は、曲げ負荷下はく離挙動や面内 2 次元せん断型はく離挙動が現れ、半球体桁構造物の設計を困難としていた。



図 1 津波避難シェルター用桁構造体

### 2. 研究の目的

本研究では、軽量・高強度化に優れる UD 複合材料を用いた桁構造体の健全性評価を可能とする複合荷重状態での桁接合強度評価法を提案する。十字型 UD 桁試験片に曲げ負荷および面内せん断負荷を与えることにより、接合部の曲げ負荷下はく離挙動や面内 2 次元せん断型はく離挙動を呈する試験法を確立し、その場観察による損傷の定量化および結合要素を用いた損傷進展シミュレーションを併用することにより、桁接合部のはく離挙動を解明することを目的とした。CFRP を筆頭に軽量高強度な繊維強化複合材料は広大な平板のような構造物として利用されて来たが、さらなる軽量化の要求に応える形でトポロジー最適化構造やラティス構造等の減肉効果や、3D プリント成形技術によって UD 桁構造が簡単に成形可能になるなど、桁構造体に注目されつつある。本研究はこの UD 桁構造体の接合部の健全性評価を確立するために実施され、この点に先進性と創造性がある。また、繊維強化複合材料 UD 桁接合部の曲げ負荷下はく離挙動や面内 2 次元せん断型はく離挙動を評価する試験法は存在せず、ここに学術的独自性がある。

### 3. 研究の方法

本研究では、図 2 に示すような軽量化、易接合と有利な母材樹脂の熱融着により接着した十字型 UD 桁試験片を用い、曲げ負荷下におけるモード I 型はく離挙動を呈する新たな試験法と、面内せん断負荷におけるモード III 型はく離挙動を呈する新たな試験法の開発した。本研究で開発した試験法を図 3 に示す。同図(a)のモード I 型はく離試験治具は、金属のスポット溶接継手試験法 (JISZ3137) の十字型引張試験法を応用し、曲げ負荷下におけるモード I 型はく離挙動を呈する新たな試験法として開発した。また、同図(b)のモード III 型はく離試験治具は、額縁試験片を用いた薄板せん断試験法 (ASTM D8067) を参考に、面内せん断負荷におけるモード III 型はく離挙動を呈する新たな試験法として開発した。

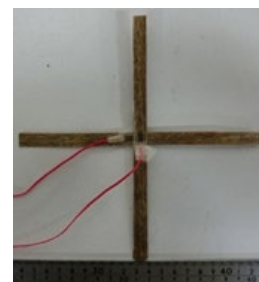
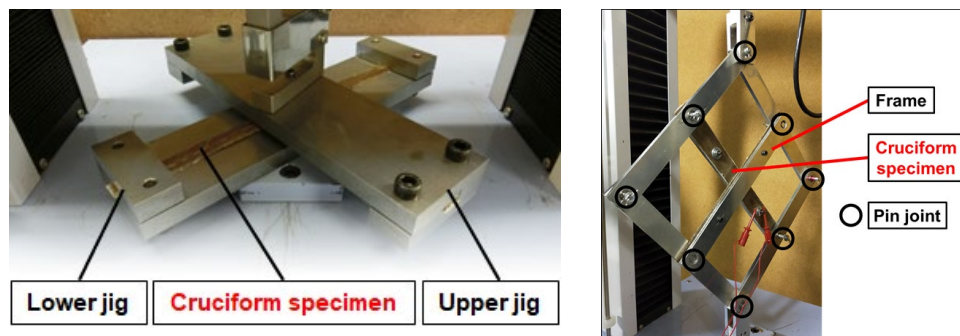


図 2 亜麻/ポリプロピレン複合材十字型試験片



(a) モード I 型はく離試験 (b) モード III 型はく離試験

図 3 開発した桁接合部はく離挙動評価試験法

本研究で開発した桁接合部はく離挙動評価試験法の妥当性を検討するため、まず母材樹脂の影響を調査した。天然繊維複合材料である亜麻 (Flax) /ポリプロピレン (PP) と Flax/epoxy を材料として選定し、十字型 UD 桁試験片を作成して、モード I 型はく離試験を実施した。次に、強化繊維の影響を調査するため、CFRP である炭素繊維 (CF) /epoxy を材料として選定し、十字型 UD 桁試験片を作成して、モード III 型はく離試験を実施した。また、本開発試験法の有用性を示すため、図 1 に示した開発中の津波避難シェルターなどの桁接合部に頻出する鋭角接合部材の評価を行った。具体的には、Flax/epoxy の桁接合角度が小さい 20° 接合材および実際の頻出角度である 36° 接合材を用意し、はく離試験を実施した。

さらに、最大応力説とき裂形成エネルギー論の観点から有限要素法内でき裂の発生および進展挙動を模擬できる結合力要素を導入して、本研究で提案した十字型はく離試験法の妥当性を評価した。結合力要素を桁接合部に導入した十字型 UD 桁有限要素法モデルを構築し、モード I 型はく離挙動と、モード III 型はく離挙動に対応した結合力および破壊靱性値を、得られた試験データとフィッティングすることで、その場観察された損傷と負荷形態、試験片寸法との関係を考察し破壊機構を解明した。

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 桁接合部はく離試験結果

十字型 UD 試験片の作成には、Flax/PP プリプレグを用いた十字型試験片を作成したが、成形

する際、1 枚同士では曲げ剛性が低く、桁の引張モードが主体的となる問題が発生したため、3 枚積層同士を交差させて成形することで図 4 のようにモード I 型はく離挙動を発生させることに成功した。モード I 型はく離試験法の開発については、荷重-変位関係と損傷観察結果を精査し、モード I 型はく離挙動の桁長さ依存性を実験的に明らかにした。次に、モード III 型はく離試験法の開発においては、2 種類の工夫を行った。まず、十字型試験片の接合部の角にアルミニウム箔を成形時に挿入することにより予き裂を導入して、初期はく離発生時の荷重-変位関係に現れる不安定な挙動を抑制することに成功した。次に、十字型試験片の中央部に円孔を設けることで、はく離進展に伴うはく離面の摩擦や残存繊維の架橋の影響を低減し(図 5)、モード III 型はく離挙動を主体的に評価する試験法へと改良した。その結果、円孔や予き裂の有無により安定した荷重-変位関係の発出および損傷進展様相が確認でき、再現性が高い面内せん断負荷におけるモード III 型はく離挙動を呈する新たな試験法を開発できた。

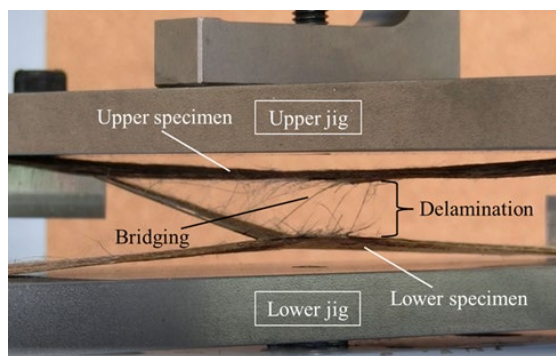


図 4 モード I 型はく離挙動の様子

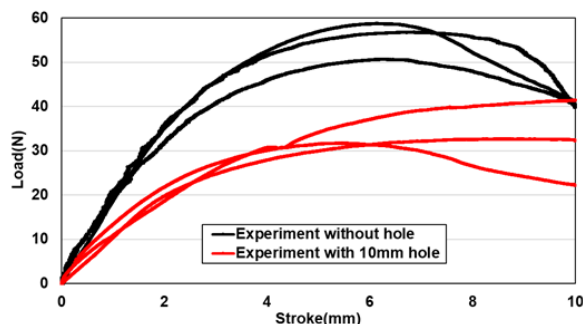


図 5 円孔入りモード III 型はく離挙動

本研究で開発した桁接合部はく離挙動評価試験法で得られる荷重-変位関係に対して、複合材料の母材樹脂の影響を調べた。図 6 に、Flax/PP と Flax/epoxy のモード III 型はく離試験結果を示す。熱可塑性樹脂を母材とした FRP は良好な成形サイクルを実現できるため、自動車産業で注目され、熱硬化性樹脂を母材とした FRP は高い機械的特性が必要な航空・宇宙分野で利用されている。同図より、熱可塑性樹脂の PP の延性変形挙動と熱硬化性樹脂の Epoxy の脆性変形挙動が顕著に荷重-変位関係に現れ、本検証よりはく離挙動に及ぼす母材樹脂の影響が評価可能であることがわかった。

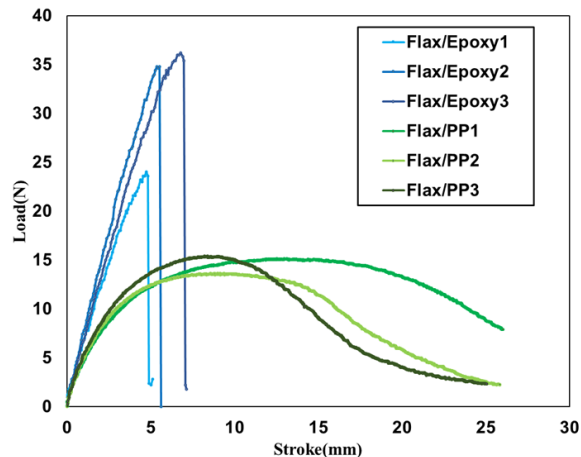


図 6 モード I 型はく離挙動に及ぼす母材樹脂の影響

次に、強化繊維の影響を目的として実施したCF/epoxyとFlax/epoxyのモードIII型はく離試験結果を図7に示す。本検証により、本来接合部のみの評価を目指した試験法であったが、桁剛性の影響が大きいことが明らかとなったため、これまでの負荷荷重-治具変位関係で評価して来たはく離挙動を、接合部負荷トルク-桁接合部角度変化関係に整理し直すことで、より正確なはく離部の挙動を評価できる手法に改良した。同図より高剛性を必要とするCFや環境親和性が高い天然繊維(Flax)を用いたはく離挙動に有意な差が見られた。

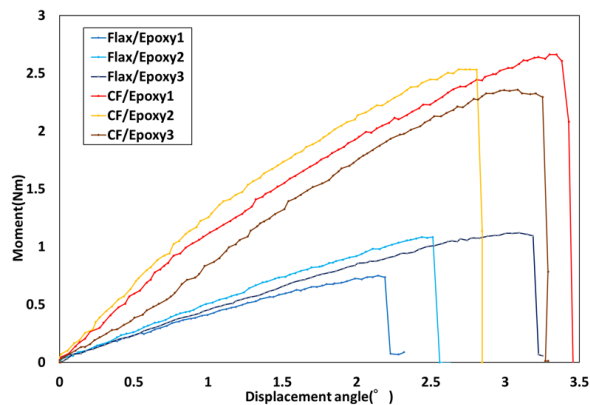


図7 モードIII型はく離挙動に及ぼす強化繊維の影響

本開発試験法の有用性を示すため、開発中の津波避難シェルターなどの桁接合部に頻出する鋭角接合部材の評価を行った。Flax/epoxyの20°桁接合材および36°桁接合材のモードIII型はく離試験結果を図8に示す。同図より、桁接合角度の依存性が明らかとなった。接合角度に依存して接合面積が変化する課題が明らかとなったが、本開発手法の汎用性を示すことはできた。なお、接合面積が変化する課題については、接合部にアルミニウム箔を用いた予き裂を導入して接合面積を一定とした試験片を用いたはく離試験を実施する予定である。

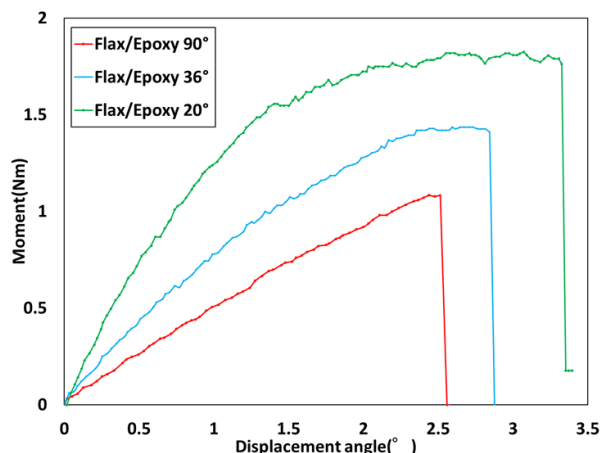


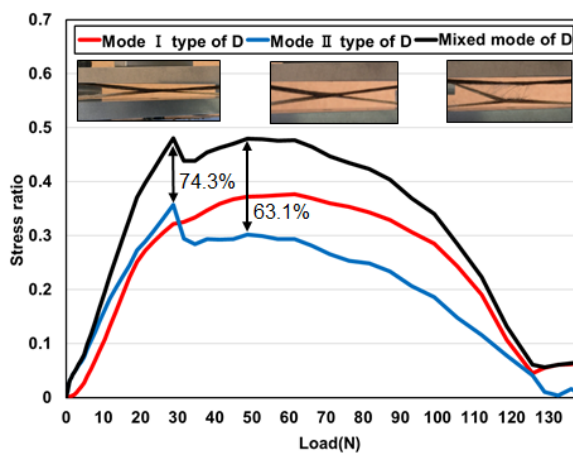
図8 モードIII型はく離挙動に及ぼす接合角度の影響

#### 4. 2 桁接合部はく離解析結果

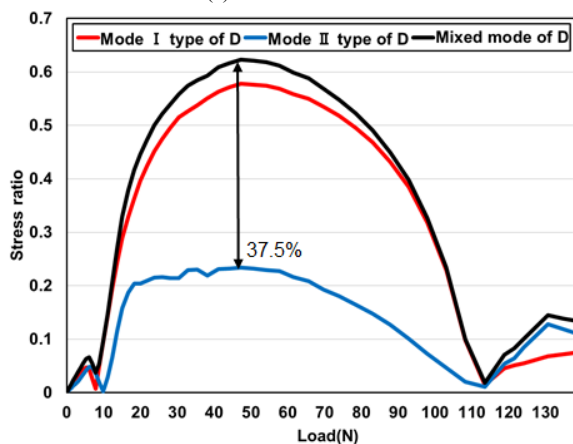
本開発試験法における接合部のはく離挙動のメカニズムを解明するため、有限要素法解析を実施した。解析モデルの特徴や得られた結果を述べる。まず、両端支持はりを2枚直交させた十字型UD桁モデルを作成し、桁接合部に2重節点からなる結合力要素を導入した有限要素法モデルを構築した。ソルバーにはANSYSver.19.0を使用し、局所座標系を用いて直交異方性を導入し、1/2モデルとして自由度を低減することにより2次要素を適用可能にして大変形解析を行った。

十字型試験片の桁長さの影響を調べるために、160mmと60mmのモデルを作成し、モードI型はく離とモードII型はく離の応力比率を解析的に調べることで、図9に示すように、桁の短長化でモードII型はく離の応力比率を63.1%から37.5%まで低減できることを明らかにした。これによりモードI型はく離支配型の十字型はく離試験法を確立した。負荷初期段階におけるモードI型はく離挙動はよく一致し、結合力要素のモードI型はく離に関するパラメータの推定に成功した。

モードIII型はく離挙動の解析結果からは、はく離した接合界面の残存繊維による摩擦の影響で大変形時に解析結果が合わない結果が現れたが、負荷初期段階におけるモードIII型はく離挙動はよく一致し、結合力要素のモードIII型はく離に関するパラメータ推定に成功した。



(a) 桁長さ 160mm



Fracture mechanism of Short beam

(b) 桁長さ 60mm

図9 モードIII型はく離挙動に及ぼす接合角度の影響

#### 4. 3 津波避難シェルターの圧壊解析

最後に、ここまでで同定した結合力要素の各モードにおけるパラメーター（結合力や破壊靱性値）を開発中の津波避難シェルターの変形解析に適用し、はく離挙動を含む荷重-変位関係を予測した結果、図10に示すように荷重負荷後の第一次座屈挙動および桁はく離挙動を経て、再度荷重が増加する別に実施した実験結果を精度よく予測することができた。

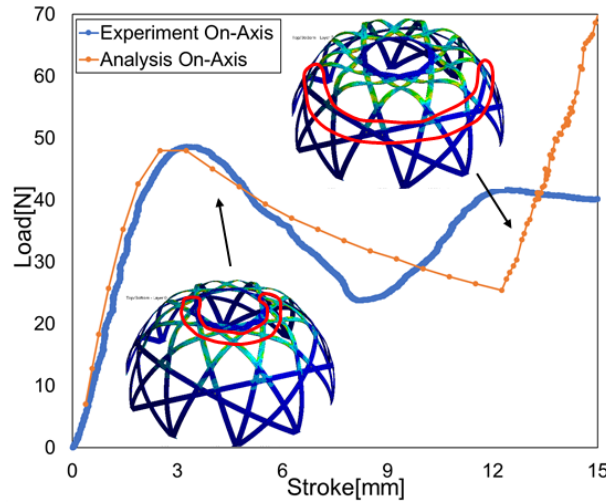


図10 津波避難シェルター構造体の圧壊解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 本田勝志, 三宅千里, 野田淳二
2. 発表標題 津波シェルター用半球体GC桁構造物の圧縮負荷下座屈挙動評価
3. 学会等名 第14回日本複合材料会議
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 J.Noda, T. Yamanaka and S. Hamada
2. 発表標題 Welding joint strength properties for cruciform natural fiber composites
3. 学会等名 23th International Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 濱田真吾, 山中大成, 野田淳二
2. 発表標題 十字型FRP接合材のはく離挙動に及ぼす強化繊維および母材樹脂の影響
3. 学会等名 日本実験力学学会2023年度年次講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河井優衣, 本田勝志, 野田淳二
2. 発表標題 燃糸GC製半球桁構造物の圧縮負荷座屈挙動評価
3. 学会等名 第15回日本複合材料会議
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Junji Noda, Taisei Yamanaka
2. 発表標題 Delamination behavior of welding joint for cruciform natural fiber composites
3. 学会等名 20th European Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junji Noda, Taisei Yamanaka, Shingo Hamada
2. 発表標題 In-plane shear delamination behavior of welding joint for cruciform natural fiber composites
3. 学会等名 6th International Conference on Materials and Reliability (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山中大成, 野田淳二
2. 発表標題 十字型試験片を用いたGC溶着接合部の面内せん断型はく離挙動
3. 学会等名 第46回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------