

令和 4 年度 防衛装備庁  
安全保障技術研究推進制度

# 研究成果報告書

## ランダム配向FRPの耐衝撃性の解明と 最適設計技術開発

令和 5 年 5 月

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所が実施した令和4年度「ランダム配向FRPの耐衝撃性の解明と最適設計技術開発」の成果を取りまとめたものです。

## 0. 研究背景

繊維強化プラスチック（FRP）は、輸送機器等の輸送・移動中の消費エネルギーを軽減させる軽量素材として有望であり、民生自動車や一般旅客機への適用が進められている。しかし、FRPの素材コストや部品製造コストの高止まり、あるいは高まる要求に対して安全性と信頼性の確保が不十分、かつ実績が不足していることへの懸念から、実用化は限定的である。そのような中、長繊維ストランド（繊維束）を繊維配向がランダムになるように層状に積層した繊維強化複合材料（以後、ランダム配向FRP）は、生産性の高い製造方法を実現できるという特徴から、我が国だけでなく、欧米はじめ世界的にも研究・開発対象として学術的にも産業的にも注目されるようになってきた。

ランダム配向FRPの全ての繊維は比較的長く（数十mm以上）保たれていて、面内方向に配備され、つまり、繊維束と樹脂の層構造を成す。したがって、面外方向には繊維による強化作用がほぼ働かない。これは、連続繊維の積層材でも同様である。よって一般的には、繊維破断あるいは層間剥離が起きると一気に亀裂が進展し、破壊起点時の強度が高くても、脆性的に破壊が進むため破壊エネルギーは著しく低い。しかし、長繊維のランダム配向であれば、損傷が発生しても、その進展は多層に波及してトータルの剥離面積が広くなり、破壊エネルギーが高くなるという仮説が立てられる。

つまり、ランダム配向FRPは、長くカットされた不連続繊維の束がテープ状に薄く並べられており、その束が繊維配向を分散させて積み重なった層構造を有するという特徴から、高い耐衝撃性能を実現できる見込みがある。これは、破壊時の損傷進展プロセスが多様であり、様々なモードが複雑に組み合わさっていることが要因であると考えられる。特に、テープが層状であることから、層間せん断破壊エネルギーが従来の連続繊維積層材より高い見通しがある。これら破壊モードを、材料を構成する、繊維・樹脂それぞれの特性、繊維長さや層間接着特性によって制御できる可能性がある。加えて、これら種々の破壊モードを解明するためには、高精度に特性を検出する試験法が必要である。速度条件によって変化する材料特性を正確に評価するには、試験機の世界制御系や計測系、試験片をセットする治具の影響も精細に調査し設計する必要がある。

以上より、ランダム配向FRPの衝撃破壊現象を、繊維長さや樹脂の塑性挙動などを考慮した力学モデルを考案して、理論式に展開して解明する。これによって、破壊エネルギーを決定する材料特性因子を探究して、繊維配向の不確定性も考慮した設計手法を具現化することを目的とする。同時に、耐衝撃性能を評価する上で、高速変形を材料に与える制御系や、荷重や変位の計測系の精度の高さが非常に重要である。特に、本材料の破壊主因子である層間せん断特性を評価する際、強度だけでなく、塑性変形や損傷進展も精細に検知して、力学モデルに適用できるパラメータを決定する必要がある。従来の試験法ではこれらを精度良く評価できていなかった。そこで、面外せん断特性の動的な挙動を評価する試験法を新規に提案することも目的とする。動的曲げ挙動、および動的引張挙動についても試験方法の高精度化を目指し、ランダム配向FRPの耐衝撃性の発現メカニズムを包括的に明らかにする。

## 1. 委託業務の目的

### 1. 1 研究課題の最終目標

本研究では、以下の目標値を設定した、ランダム配向 FRP の耐衝撃性の高精度な評価設計技術を開発することを目指す。

- ①破壊強度の予測精度誤差：5%以下
- ②破壊エネルギーの予測精度誤差：5%以下

### 1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

ランダム配向 FRP の各種破壊挙動は、テープ間の層間剥離が複雑に進むことが実験的に分かっており、層間の逐次破壊が破壊エネルギーを増加させる大きな要因であることが受託者

の過去の研究から示されてきた。しかし、層間破壊進展と材料そのものの曲げや引張の破壊挙動を定量的に結びつけるメカニズムは未だに解明されていない。その原因として、主に以下の4つのポイントが考えられる。

- (1) 既存の試験法だけでは層間破壊特性評価に信頼性がない。
- (2) ランダム配向積層構造がゆえに、層間破壊進展挙動に不確定性が存在し、破壊挙動を統計的に扱う必要がある。
- (3) 動的挙動を評価する際、試験機や治具等機械系に依存する振動やノイズを検知してしまい、特に高速であるほど増幅されるため、広い速度領域での材料本来の速度依存性が解明できていない。
- (4) 曲げと引張の動的破壊挙動が層間力学特性に依存するという理論モデルが存在しない。

したがって、先述の目標に対する要素課題は、以下の4つが挙げられる。

- (1) 層間せん断特性の試験法と損傷メカニズム解析法を提案する
- (2) 材料内部構造の不確定性を考慮した特徴量と層間せん断特性の力学パラメータが強い相関を示す関係性を見出す
- (3) 高ひずみ速度領域において、材料本来の力学特性を検出可能な曲げや引張の試験方法を提案する
- (4) 材料特徴量から任意の速度における強度や耐衝撃性を予測する力学モデルを提案し、実験との誤差が5%以下となる設計手法を構築する

各要素課題における具体的な方策を以下に記す。

- (1) 層間にせん断応力が与えられた時の、応力ひずみ関係の精度の高い検出を目指す。既存の試験法にも、層間せん断強度を評価するものは存在するが、切り欠き溝加工を施した試験片を用いる場合、溝近傍に応力集中が生じてしまい、適切な応力の計算が困難であった。これを解決する試験片形状や負荷方式、さらに損傷発生・進展の可視化方法を探究する。
- (2) まず(1)の試験法と従来の層間破壊靱性評価試験法(DCB試験やENF試験)を用いて、ランダム配向FRPにおける層間の損傷進展挙動を明らかにする必要がある。次に、繊維長の違いによって、損傷進展の経路が確率的に異なることが推測できる。損傷進展に影響を与える、繊維長に依存する特徴量・統計量を見出す。
- (3) (1)の試験法に加え、曲げ試験や引張試験でも速度依存性を検証する必要があるが、高速になるほど、試験機系の振動や計測系のノイズが載りやすくなる。これを制御系・計測系、および信号処理によって、本来の材料の高速条件における曲げ、引張、層間せん断の各種特性を明瞭にする。
- (4) (3)で明らかになった曲げや引張の動的挙動と、(2)における層間損傷挙動との関係性を定量的に説明しうる理論を構築する。それによって、繊維長や樹脂特性、層間接着特性をパラメータとして、材料の強度・耐衝撃性の予測・設計手法を構築する。

### 1. 3 要素課題に対する実施項目及び体制

それぞれの要素課題(1)から(4)に対する実施項目を以下に記す。また課題(5)として、分担研究機関との連携のため、「プロジェクトの総合的推進」を加える。

#### (1) 高信頼層間せん断試験法と損傷進展可視化法の開発

層間せん断の既存の試験法はJIS K7092やASTM D3846に規格として存在する。従来の形状による試験法は、一方向や疑似等方の連続繊維積層材を対象とした試験法であり、層間の強度のみを評価する試験法である。このため、面外せん断変形の領域が狭く、切り欠き溝底部に応力集中が発生してしまうために、真の層間せん断強度を求める評価法とは言えず、また、変形がほとんどないまま亀裂が進展して破壊してしまうため、層間剥離進展の様子を観察するが出来なかった。そこで、以下を実施する。

### (1a) 新規試験片形状の提案および損傷同定法の開発（担当：島津製作所）

目違いの切り欠き溝深さを深くして、せん断変形領域を広げる新規試験片形状を考案し、最適な溝のオーバーラップ量や溝間距離を調べる。せん断ひずみの様子は、DIC（画像相関法）によって比較することができ、実際のひずみ集中や分布を検証する。また、当該新形状試験片を用いて、負荷除荷試験を実施して、層間せん断の損傷発生や損傷進展を定量的に評価する。

### (1b-1) 損傷進展可視化法の開発（担当：島津製作所）

一方、層間せん断の損傷発生や進展の様子を、三次元 X 線 CT 装置内に設置可能な圧縮試験機を用いて、(1a)の試験片の面外せん断負荷時の損傷発生や進展の検出可能性を実験的に調査する。

### (1b-2) 損傷進展可視化法を用いた繊維強化状態の把握（担当：海技研）

(1b-1)において、圧縮試験機に設置可能で、かつ、X 線 CT の X 線が透過しやすい支持治具を設計する。また、本手法によって層間せん断による損傷発生や進展が確認された後、異なる繊維長や樹脂違いが損傷挙動に与える影響を詳細に調査する。同時に、テープの重なり方が異なる試験片を用いて、損傷挙動の違いを把握する。

## (2) 材料構成と損傷進展係数の関係性の定量化

ランダム配向 FRP は、繊維配向分布の不均一性だけでなく、テープエッジの重なり方・密集度の不確定性も存在する。特に、層間剥離を主とする亀裂進展においては、あるテープ間から別の組み合わせのテープ間に進展が移行しなければならない。よって、その移行の頻度とテープエッジの密集度には関係性があると容易に想像できる。そこで、以下を実施する

### (2a-1) 繊維配向度等テープ積層状態解析手法の確立（担当：島津製作所）

ランダム配向 FRP は、繊維配向分布が面内に均一でないため、ひずみの不均一性が生じる。さらに、テープエッジが密集しているところでもひずみ増加が見られる。これらを、三次元 X 線 CT により取得した内部三次元画像解析により繊維配向やテープエッジ内部構造の定量化を行う。

### (2a-2) 繊維配向解析手法による損傷パラメータ定量化（担当：海技研）

一方、(2a-1)で確立した手法によって、繊維長違いの強化内部構造を比較・分析を行い、(2b)の力学挙動との関連性を説明しうる損傷パラメータの定量化を行う。

### (2b) 損傷進展係数の評価および詳細剥離現象観察（担当：海技研）

既存の Double Cantilever Beam (DCB) 試験や、End Notched Flexure (ENF) 試験を用いて、剥離における損傷進展の様子を詳細に観察し、損傷進展抵抗係数を評価する。これと、(1)の損傷進展可視化試験法による結果と比較を行い、相関性を検証する。これによって、テープ重なり具合と、亀裂進展抵抗や剥離エネルギーとの関係性を定量化する。テープ重なり具合は、1 つのテープの繊維長さに依存するので、複数種類の繊維長さを有する材料を用意して、繊維長さや破壊強度や破壊エネルギーの関係性を求めて、テープ重なり具合における亀裂進展方向の確率的な拡がりから経路を判別し、剥離エネルギーを確率論的に算出する理論式を提案する。

## (3) 高速試験における材料特性検知の高精度化（担当：島津製作所）

動的力学試験は、高速であるほど運動エネルギーが増大するため、高い計測精度を確保するには試験機の高度な制御が必要になる。また、荷重や変位を計測する際にも、試験機の機械的あるいは電氣的なノイズが取得したい現象・信号に対して大きくなる、という問題が存在する。例えば、あるプラスチック平板試験片を衝撃三点曲げ試験を実施すると、低速度より高速度の方が荷重信号に特定の波が載っていることが分かる。

この波の振動数は、試験片の固有振動数に依るものであることが明らかになっているが、本来なら、曲げ剛性や強度は速度依存性が存在し変化があるはずだが、高速になるほど振動が顕著になり、評価できていない。つまり、試験機に取り付けられたロードセルに、材料の変形に抵抗する反力だけでなく、衝撃を与えられた振動による信号がストライカーを介して重なって伝播する

ために、本来検出したい抵抗力だけを抽出できていないことを示唆している。これを解決する、高精度な材料力学特性を計測可能な試験機（信号処理含む）を開発する。

#### (4) 耐衝撃性能の設計理論の構築（担当：海技研）

曲げや引張の破壊挙動や強度の速度依存性を(3)で開発した試験機・機械によって評価・分析を行う。破面観察や損傷進展中の挙動を高速ビデオカメラで把握して、層間亀裂進展の速度による影響を解析する。この時、FRPの曲げ強度の速度依存性や温度依存性は、マトリックス樹脂の粘弾性特性に主に影響を受けることは、過去研究によって明らかになっている。しかし、層間剥離挙動や、繊維長の影響がどのように強度を決定しているかについては考慮されていない。

(2)の実施項目において、繊維長の違いがどのように損傷進展係数に影響を与えるかを定量的に証明した上で、曲げや引張の破壊強度やエネルギーとの関係性を取得し、層間損傷進展係数から各種強度・破壊エネルギーを予測する力学モデルを構築する。

#### (5) プロジェクトの総合的推進（担当：海技研）

各要素課題に関する研究の進捗を管理し、現象解明と理論構築を海技研が主体的に実施し、試験法開発と精度検証を島津製作所が実施して、理論と実験の両面から目標達成に向けて取り組む。また、本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究のさらなる進展に努める。なお、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知する。

## 2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

ランダム配向FRPの耐衝撃性の高精度な評価設計技術の開発に資するために設定した以下の目標について、

①破壊強度の予測精度誤差：5%以下

②破壊エネルギーの予測精度誤差：5%以下

曲げ挙動における数値解析シミュレーションを、新しい試験法から得た適切な材料特性を設定した材料モデルを考案して実行したところ、荷重変位関係から得られる曲げひずみ・曲げ応力曲線は下図（後述する図8に再掲）に示す結果となった。ここで、実線が10個の試験結果の平均を表し、丸印のプロットがシミュレーションによる結果を表す。破壊強度は、曲げ応力の最大値とし、破壊エネルギーは図中の曲げひずみ0%から3%までの曲げ応力を曲げひずみで積分した単位体積当たりエネルギーと定義した。それにより、破壊強度と破壊エネルギーの実験結果とシミュレーション結果の誤差は、

- 破壊強度について、実験結果が405MPa、シミュレーション結果410MPaとなり、誤差は約1.2%程度
- 破壊エネルギーについて、実験結果が8.9N/mm<sup>2</sup>、シミュレーション結果が9.3N/mm<sup>2</sup>となり、誤差は約4.3%程度

となった。したがって、破壊強度および破壊エネルギーの数値解析シミュレーションによる予測値が実測値との誤差5%以下を達成した。

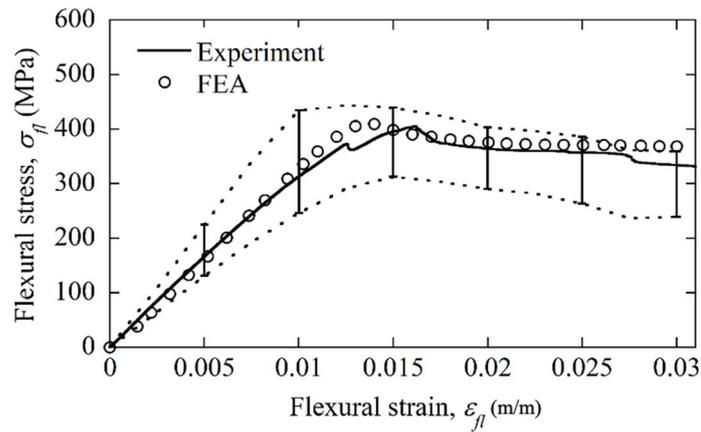


図. 曲げ応力ひずみ曲線の実験と数値解析の比較

### 3. 委託業務における研究の方法及び成果

#### (1) 高信頼層間せん断試験法と損傷進展可視化法の開発

##### (1a) 新規試験片形状の提案および損傷同定法の開発

層間せん断の既存の試験法は JIS K7092 や ASTM D3846 に規格として存在する。従来の形状による試験法は、一方向や疑似等方の連続繊維積層材を対象とした試験法であり、層間の強度のみを評価する試験法である。このため、面外せん断変形の領域が狭く、切り欠き溝底部に応力集中が発生してしまうために、真の層間せん断強度を求める評価法とは言えず、また、変形がほとんどないまま亀裂が進展して破壊してしまうため、層間剥離進展の様子を観察するが出来なかった。

そこで、目違いの切り欠き溝深さを深くして、せん断変形領域を広げる新規試験片形状を考案し、最適な溝のオーバーラップ量や溝間距離を調べた。せん断ひずみの様子は、DIC (画像相関法) によって比較することができ、実際のひずみ集中や分布を検証した。

この新提案試験法を用いて繊維長の異なる 3 種類の材料で比較・検証したところ、図 2 に示す破断の様子およびせん断応力ひずみ関係曲線が得られた。これより、繊維長が異なっても、初期線形挙動や最大せん断応力は大きく差がないが、破断するまでの伸びが、繊維長が長いほど大きくなることを確認できた。

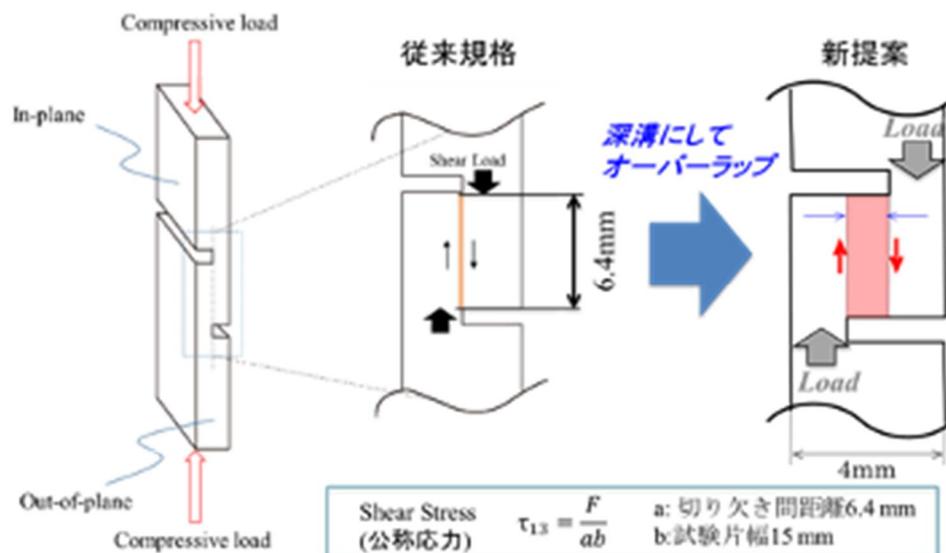


図 1. 層間せん断特性を取得するための新方式試験法

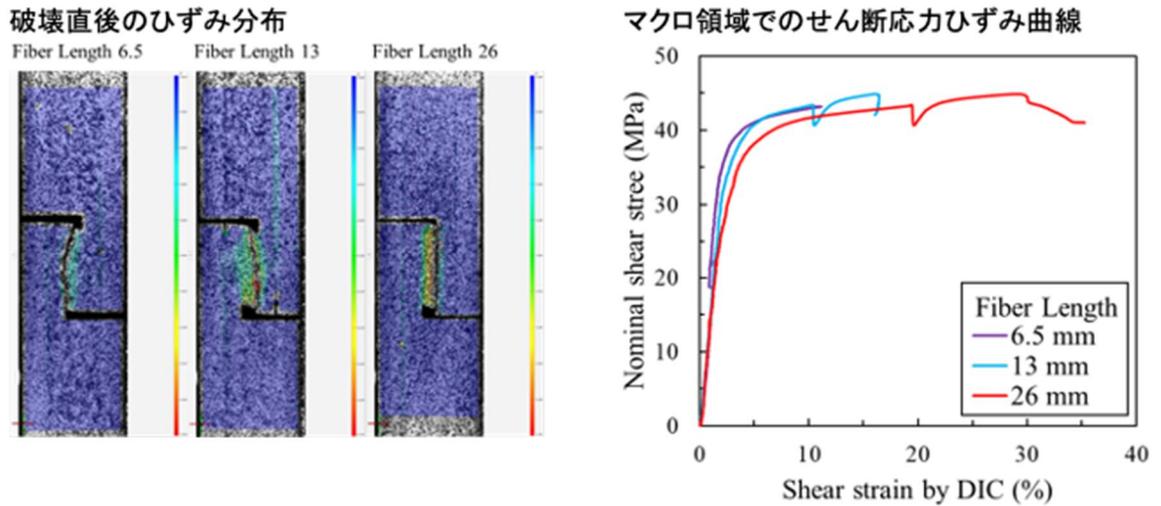


図 2. 繊維長 3 種類のせん断試験結果  
 - 破断直後のひずみ分布 (左) 、せん断応力ひずみ関係曲線 (右) -

次に、速度依存性を評価するための試験条件・試験機仕様を調査し、試験片を抑える治具と試験片の間の摩擦力による計測誤差を極力小さくする治具を開発した。本治具を用いて試験を実施したところ、破断ひずみも繊維長に依存し、速度が上がると下がる傾向が示された。

#### (1b-1) 損傷進展可視化法の開発

三次元 X 線 CT 装置内に設置したまま圧縮せん断試験が可能な In-situ 試験機を用いて、負荷中の試験片内部の様子を可視化する手法を検討した。特に、試験片を抑える治具については、いくつか材質の異なる治具を用いて、X 線の透過性の最適化、さらに、試験片に余計なダメージが生じないように、剛性も適切になるように工夫した。図 3 に、X 線 CT 装置内に設置した In-situ 試験機およびセッティングの様子を示す。また、空間分解能が最適になる撮像条件や、試験機構造の検討を行い、せん断変形に伴う損傷の発生を定量的に評価できる手法を確立した。

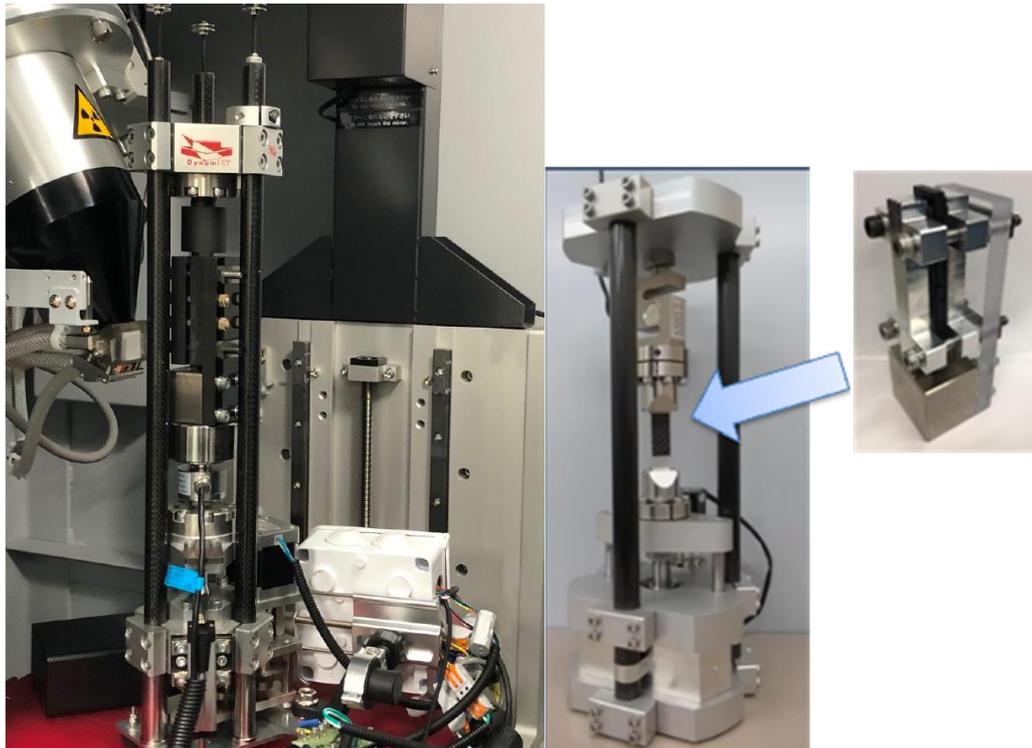


図3. X線CT内 In-situ 試験機のセッティングの様子

## (1b-2) 損傷進展可視化法を用いた繊維強化状態の把握

(1b-1)で検証した評価法を用いて、せん断負荷中のランダム配向FRP内部の損傷発生の検出精度を確認した。これより、せん断変形していくと最終的にはせん断破壊が生じて荷重が一気に落ちるが、それ以前に、荷重がある程度飽和して、変形のみ進んでいる状態の内部撮像結果を見ると、損傷が少しずつ発生していることが分かった。特に、ランダムテープのエッジ近傍において、X線画像中の空隙が広がっていて、明らかに損傷が検知できた。

## (2) 材料構成と損傷進展係数の関係性の定量化

### (2a-1) 繊維配向度等テープ積層状態解析手法の確立

三次元X線CTにより取得した内部画像データを用いて、繊維配向を含むテープ重なり具合の定量化手法（内部強化構造パラメータの導出手法）を検討した。その結果、層ごとに配向テンソルを抽出することで、繊維強化構造を定量評価できることが分かった。

### (2a-2) 繊維配向解析手法による損傷パラメータ定量化

(2a-1)で確立した手法によって、繊維長違いの内部強化構造を比較・分析を行った。その結果、配向のばらつき度合いが可視化でき、特に繊維長が長いほど、配向テンソルがやや偏っていることが分かった。

## (2b) 損傷進展係数の評価および詳細剥離現象観察

試験片観察システムを用いて、亀裂近傍の損傷程度と破壊靱性特性との相関性を検証し、また、異なる繊維長のランダム配向FRPを用いて、破壊靱性値の比較を行った。図4に、モード1破壊靱性値を評価するためのDCB (Double Cantilever Beam) 試験、およびモード2破壊靱性値を評価するためのENF (End Notched Flexure) 試験の様子を示す。この時、亀裂進展長さの計測は、亀裂先端近傍部を拡大して詳細に観察が可能な顕微鏡による観察画像と、試験機が測定する荷重変位関係を同期させたシステムを構築して、亀裂進展長さを精度良く計測することによって、破壊靱性の分析性能を向上させた。荷重変位と亀裂先端近傍画像を同期させた操作画面を図5に一例を示す。亀裂進展長さは、観察システムの画面上でデジタル計測し、その瞬間の荷重-変位曲線の傾きからコンプライアンスを測定することで、亀裂進展に伴うエネルギー解放率を評価し、破

壊靱性値を求めた。モード1およびモード2における、異なる繊維長における破壊靱性値の評価結果から、繊維長が長い方が、破壊靱性値が高く評価されていることが分かった。

DCB試験によるモードⅠ破壊靱性評価      ENF試験によるモードⅡ破壊靱性評価

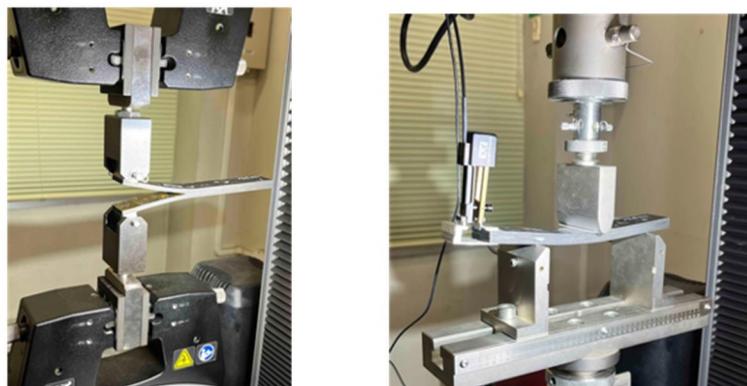


図4. DCB 試験（左）と ENF 試験（右）の様子

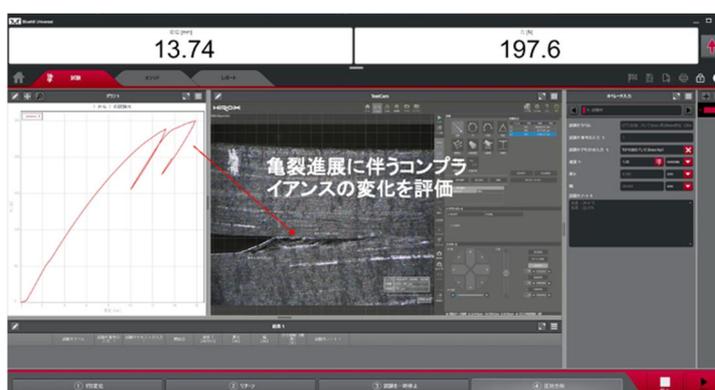


図5. DCB 試験における荷重変位と亀裂先端拡大画像の同期画面

### (3) 高速試験における材料特性検知の高精度化

図6に示すストライカーの高速制御が可能な油圧式高速試験機を用いて、JIS K7084に準拠した衝撃曲げ試験を実施するに先立ち、曲げ変形中にロードセルが検出する振動信号の発生要因を、有限要素法による数値シミュレーションによって分析した。曲げ試験条件を境界条件として、固有値解析を実施し、その固有値解析結果から振動数と変形モードの関係が明らかになった。

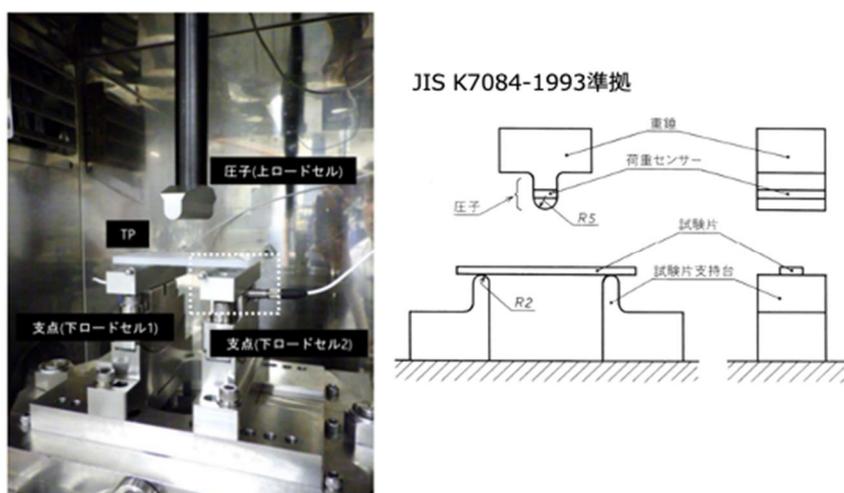


図6. 衝撃曲げ試験の試験片設置の様子および概略図

次に、実験と条件を合わせて、ストライカーの速度 1.5m/s で試験片に曲げ変形を与えた時の反力の時系列データ、およびその周波数解析を行った。これより、荷重信号の主な振動成分が分かった。この振動成分は、実際の実験結果からも得られており、材料固有の成分であることから、実験による曲げ試験結果の振動成分を評価することによって、材料の弾性特性を評価できることが示唆された。

上記の結果を踏まえて、衝撃曲げ試験における振動成分をローパスフィルタ等で除くことによって、最大曲げ変形に伴う材料の強度を評価することができるようになる。その結果を踏まえて、衝撃曲げ試験における、曲げ強度の速度依存性を実験により評価した。材料はマトリックス樹脂 2 種類を用いて、それぞれ繊維長の条件を変えた試験片によって、ストライカー速度を 5 通り変えた曲げ試験を実施した。その結果、曲げひずみ速度と曲げ強度の関係が評価でき、いずれの材料においても概ね速度上昇によって曲げ強度が増加している傾向が分かった。

#### (4) 耐衝撃性能の設計理論の構築

繊維長が特性分布にどのように影響を与えるかを統計的に理解できるようにするため、引張試験によって画像相関法を用いてひずみ分布を取得し、面内の任意の区画におけるひずみの自己相関係数を 2 つの区画の相対距離に応じて求めていく評価方法を提案した。その結果を図 7 に示す。図中、左図は引張負荷方向の距離に応じた自己相関係数の傾向、右図は直角方向（引張試験片の長手方向に対する幅方向）の距離に応じた自己相関係数の傾向をプロットした線図を示す。負荷方向では、繊維長によって明らかに相関係数の下がり具合が異なり、繊維長が短いほど、短い相対距離の段階で相関係数が小さくなっていくことが分かる。また、およそ繊維長の半分の距離で、相関係数が 0 に漸近していることが分かる。これにより、任意の位置における繊維強化係数と、一定距離離れた近傍における係数の相対関係を定量的に評価することができる。つまり、ランダム配向 FRP の特性ばらつきを統計的に扱うのに活用すべき特徴量が示唆された。

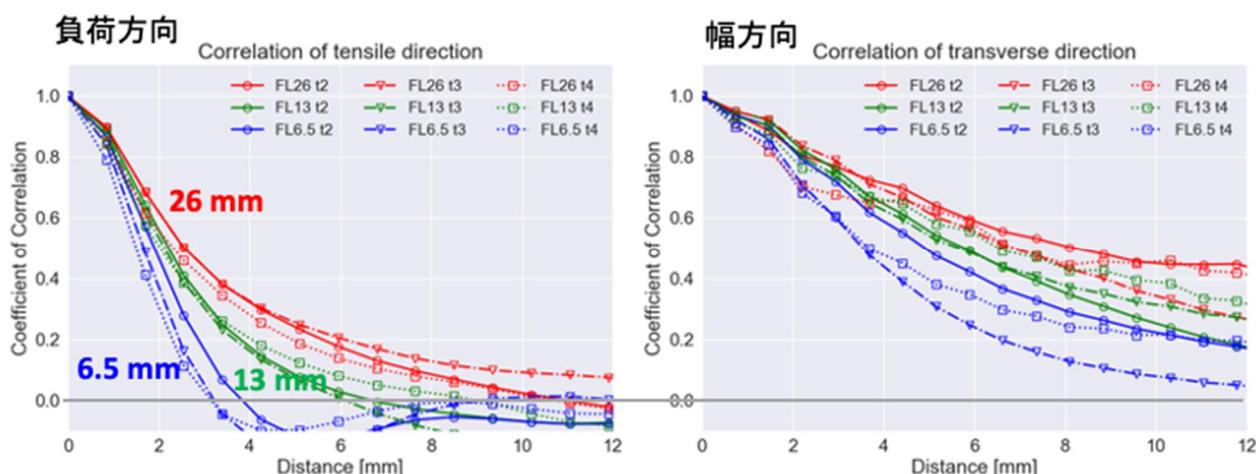


図 7. ひずみ分布の自己相関係数分析結果

研究開発項目 (1)、(2)、(3) の結果から、ランダム配向 FRP の層間せん断特性はマトリックス樹脂の特性に大きく依存すると推測でき、面内引張や面内圧縮では降伏後に直ちに損傷が発生して破断まで脆性的に亀裂が進むのに対して、層間せん断はほとんど損傷が発生せずに、マトリックス樹脂の塑性挙動を主要因とする延性挙動を示すことが言える。このことから、数値解析シミュレーションにおいて適用する材料モデルを提案することができ、せん断に関わる損傷開始ひずみや損傷進展プロセスを設定した。

3 点曲げ試験による曲げ応力・曲げたわみの関係曲線および数値シミュレーションによる再現曲線を図 8 に示す。これより、この材料モデルによる有限要素数値シミュレーションによる結果から、実験を精度よく再現できることが確認でき、材料モデルの妥当性が示された。すなわち、本委託事業における目標である、曲げの強度と破壊エネルギーの誤差を 5%以内とする予測精度を実

現できた。

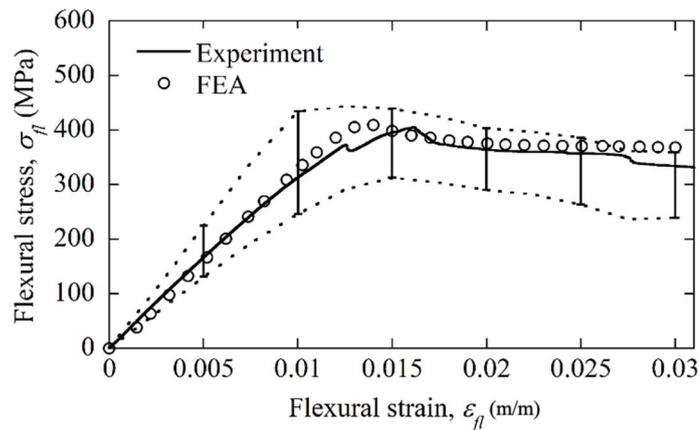


図 8. 曲げ特性のシミュレーションと実験の比較

次に、シミュレーション結果を踏まえて、衝撃破壊エネルギーを向上させるための材料設計技術を検討した。研究項目(3)の結果から、繊維長によって曲げ強度が異なること、さらに研究項目(2)の結果から、繊維長が長い方が破壊靱性値が高いことが分かり、層間剥離進展範囲が広がることによって、靱性値が高くなること、すなわち、破壊エネルギーが向上することが示唆された。そこで板の構造を複数繊維長による層構造とするハイブリッド構造を考案した。この構造を数値解析シミュレーション上に再現して、実験と同様の条件で三点曲げの変形をシミュレーションした結果を図9に示す。左図は単一材料の高速衝撃曲げ試験の、右図はハイブリッド構造材の高速衝撃曲げ試験の、それぞれ荷重-ストローク特性を表している。単一材料の場合、高速度試験では最大荷重到達後に瞬時に板厚が全断面破断してしまうが、ハイブリッド構造の場合は、ストライカーが当たる層から順に破壊が進み、その過程で層間の剥離が進展するため、脆性的な破壊を抑制する効果があったことが分かる。したがって、本試行のような構造を用いることによって、ランダム配向 FRP の耐衝撃吸収性能を大幅に向上させる可能性があることが示唆された。

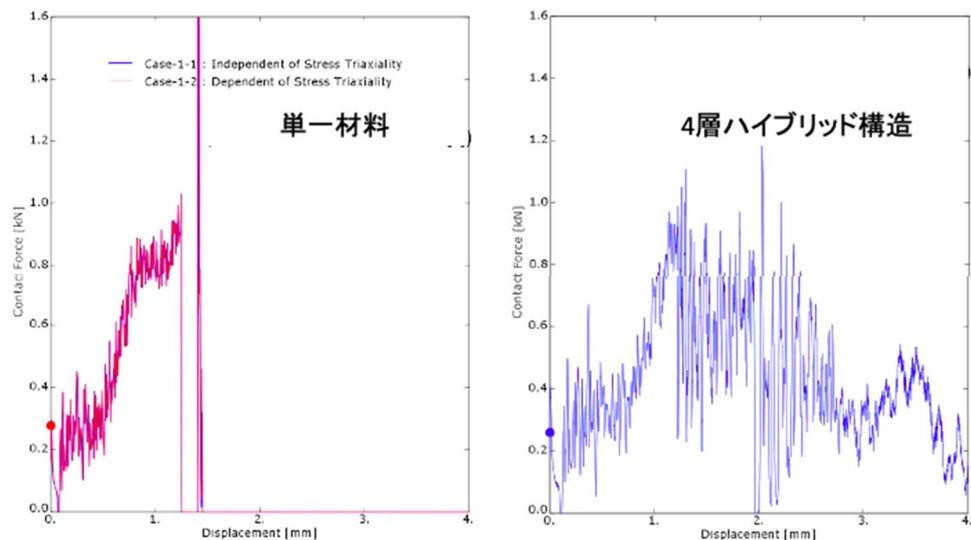


図 9. 曲げ挙動の数値解析結果 - (左)単一材料 (右)ハイブリッド構造

#### 4. 委託業務全体の成果

##### 4. 1 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果

ランダム配向FRPは、面内に長繊維の一方方向ストランドあるいは一方方向テープが、繊維配向がランダムに配置した積層構造であるため、評価範囲によってその弾性特性が変動するという特徴が知られていた。しかし、その変動には、材料製作時のばらつきや計測誤差も含まれるため、材料が本来有している確率的な特徴を把握する指標がなかった。

本研究では、材料固有の確率的な特性を見出すために、研究開発項目(4)で実施したDICによる面内ひずみ分布の自己相関係数を導出したところ、距離に応じた相関係数の減少傾向が繊維長に依存することが分かった。この自己相関係数の導出の方法について、ISO(国際標準化機構)で提案することとなり、本材料に対する理解や設計ガイドラインを設計者・使用者に提示できる期待が出てきた。

#### 4. 2 研究課題の発展性(間接的成果を含む)

本材料の性能を設計可能な材料モデル化技術やシミュレーション技術を構築できたことで、特に材料メーカーと材料特性向上あるいは安全等信頼確保が必要な工業製品への適用拡大のための議論を深めることにつながった。具体的には2社の材料系民間企業と共同で研究を進めることとなった。今後さらにランダム配向FRPを開発するメーカーが増え、認知度が広がることで、適用拡大につながると考えている。

#### 4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

本材料の設計材料モデル構築に必要な新たな試験法を創出することになり、その従来試験法に対する優位性について学会等での発表を行い、また関連する特許出願を行った。

### 5. プロジェクトの総合的推進

#### 5. 1 研究実施体制とマネジメント

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、参画機関の連携・調整を行った。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、状況に応じて、優先順位を見直し、目的達成までの道筋を参加者で共有し、定期的な会合を開催した。

#### 5. 2 経費の効率的執行

特筆すべき取り組み事例は特になし

### 6. まとめ、今後の予定

ランダム配向FRPは国内外で注目されつつあり、様々な企業、研究機関でも研究開発が活発に行われるようになってきている。そのため、本事業で開発した、材料特有の物性値や確率的な指標の分析、評価方法がデファクトスタンダードになる可能性があるかと期待できる。材料メーカーとは設計技術について、試験機メーカーとは評価技術について、引き続き成果を共有しながら、適用拡大に向けて取り組んでいく予定である。

### 7. 研究発表、知的財産権等の状況

#### (1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	1件
学会発表	2件
展示・講演	2件
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況

該当なし

(3) その他特記事項

該当なし