

一方向連続繊維プリプレグを用いた薄肉円筒殻 CFRP 部材の アングルプライによる衝撃吸収性能への影響

大竹 聖^{*1} 松本 尚也^{*1} 笠松 忍^{*2} 呉 文宝^{*2}
小林 一景^{*2,3} 黒田 純平^{*2,3} 加藤 英晃^{*4} 成田 正敬^{*4}

A Study on the Effect of Angle Plies on the Impact Absorption Performance of Thin-Walled Cylindrical-Shell CFRP Members Using Unidirectional Continuous Fiber Prepregs

by

Hijiri OTAKE^{*1}, Naoya MATSUMOTO^{*1}, Shinobu KASAMATU^{*2}, Wenbao WU^{*2},
Ikkei KOBAYASHI^{*2,3}, Jumpei KURODA^{*2,3}, Hideaki KATO^{*4} and Takayoshi NARITA^{*4}

(Received on Mar. 31, 2025 and accepted on Jul. 2, 2025)

Abstract

Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are known to be lightweight and strong. Previous research has shown that CFRP exhibits complex strength characteristics depending on the conditions at the time of lamination, which change depending on the orientation of the laminated fibers and the order in which they are laminated. The authors have been studying the application of CFRP to the crush zone at the front of an automobile. In this study, we focused on CFRP with carbon fibers laminated at a 45° angle, and produced test specimens with different numbers of angle plies. We measured the crushing behavior of these test specimens using a drop weight test and examined the effect of the number of layers of angle plies on the impact absorption performance of the component. As a result, within the scope of this study, it was thought that not only the fiber direction close to the direction of the impact by the drop weight, but also other fiber directions, including the fiber direction at 0°, would be supported, making the material more resistant to impact. It was also found that the crushing process was different even when the amount of energy absorbed relative to the amount of crushing was the same.

Keywords: Material, Carbon fiber reinforced plastic, Impact absorption, Uni direction, Drop-weight test

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)とは、母材となる樹脂が強化材である炭素繊維で強化されている複合材料の一種である。炭素繊維の特徴として、ガラス繊維強化プラスチックに用いられるガラス繊維に比べて軽量で弾性率も5倍程度のもので製造可能である。またCFRPはフィラメント数や単繊維径、積層方向、織り方などによって強度特性が変化するため設計自由度が高い材料である¹⁾。CFRPの特徴として、軽量かつ高強度であることが挙げられる。UD(Uni Direction)プリプレグ(以下、UDプリプレグ)において、比重は鉄の約1/5、アルミ合金の約1/2、比強度は鉄の約20倍、アルミ合金の約8倍ある²⁾。しかし、これらの物性値は製造原料や製造方法によって異なる。

加えてCFRPは部材内の繊維方向に応じて異方性を持つことが知られている³⁾。一般的なCFRP部材はこの異方性を持つプリプレグを複数枚積層して製作される。CFRPの衝撃吸収に関する諸研究では積層層間の剥離によって衝撃エネルギーの吸収がなされているという報告がある³⁾。このように積層された繊維の配向とその積層された順番に応じてポアソン比が1以上となる場合や、単純な引張荷重に対してねじれを発生させる場合も報告されており、積層時の条件によって複雑な強度特性を示すことが報告されている⁴⁻⁶⁾。

一方、CFRPの応用例として、自動車の衝撃吸収部材として用いる検討が行われている。自動車前面部には衝撃を効率よく吸収し、乗員を保護するクラッシュブルゾーンが設けられている⁷⁾。クラッシュブルゾーンには主要骨格であるフロントサイドメンバ(以下FSM)と、その先端に交通事故時の衝撃エネルギーを吸収するクラッシュボックス(以下CB)が設けられている。ベルト着用重傷者の損傷主部位は2番目に脚部が多く、ベルト非着用時は

*1 工学研究科機械工学専攻修士課程

*2 総合理工学研究科

*3 総合科学技術研究所

*4 工学部機械システム工学科准教授

脚部が最も多くなっている⁸⁾。このことは、FSM は車室足元部付近からフロア下に潜り込むように屈曲して配されるため、FSM が変形すると乗員の下肢部へ傷害を引き起こすためと考えられる⁹⁾。また、フロント部にエンジンを搭載している自動車の場合、エンジンを損傷し車両火災など二次被害を生む可能性も考えられる¹⁰⁾。よって、CB が効率よく衝撃エネルギーを吸収し FSM より先行して圧潰する必要がある。超小型車（1～2 人乗り用のコンパクトな EV）の活用が近年推進されているが、際立った需要拡大には至っていない。超小型車は重量と空間確保の面で、従来存在する FSM や CB を備えていない。超小型車は衝突安全性能の低さが普及の勢いが鈍い一因であるが¹¹⁾、少ない圧潰量で多くのエネルギー吸収が要求されるため対策は困難を極める。そこで従来の自動車では、エネルギー吸収部材として、スチールやアルミなどの金属が多く用いられており検討も多くみられるが¹²⁾、車体の軽量化や衝撃吸収性能向上を目的として、CFRP が注目され、国内外問わず研究が盛んに行われている^{13,14)}。粉碎された破片や層間の剥離などをすべて含めた破壊機構とエネルギー吸収性能の定量的な関係は未解明であり、解析においても課題が残されている段階である^{15,16)}。

これまで CB や FSM 屈曲部単体にてシミュレーション¹⁷⁾や材料¹⁸⁾、形状¹⁹⁾などの多方面から様々な検討が行われてきた²⁰⁻²²⁾。屈曲部を有する FSM に対するエネルギー吸収部材として有効的な CB に用いる材料として、CFRP の使用の検討も行われている。しかしながら、CFRP を用いた積層構成や各層の配向により、設計者が意図した強度・剛性を具現化するための設計指針について言及しているものはみられない。

これまでに、著者らは配向の異なる薄肉円筒殻の CFRP 試験片を製作し、落錘試験により衝撃吸収性能を評価した。それぞれ $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ と $[90^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]$ の順で、軸方向と周方向に繊維を積層した場合、軸方向が多い試験片で衝撃吸収に効果があることが確認されている²³⁾。また、軸方向から繊維方向を 45° 傾けたプリプレグを一部積層した試験片を製作し、 $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ と $[45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ]$ の 2 種類の試験片の衝撃吸収性能を比較したところ、 45° 傾けたプリプレグも衝撃吸収性能を持つことがわかった²³⁾。しかしながら上記試験片のようなアングルプライの CFRP 試験片の衝撃吸収性能について、詳細な検討は行われていない。

そこで本研究は、炭素繊維を軸方向に対して 45° 度方向に積層した CFRP に着目し、アングルプライの積層数を変化させた試験片を製作した。落錘試験によりこれらの試験片の圧潰挙動を衝撃荷重と軸方向変位の推移等から評価し、アングルプライの積層数が部材の衝撃吸収性能に与える影響について検討を行った。

2. UD プリプレグを用いたアングルプライ試験片の作製

試験片は、Fig. 1 のように繊維が一方方向のみに存在する UD プリプレグを使用して製作した。本研究で使用した UD プリプレグは三菱ケミカル製 TR350G125S で、炭素繊維



(a) Overall view



(b) Unidirectional carbon fiber in UD prepreg

Fig. 1 Photograph of UD prepreg.

繊維タイプは PAN24t、樹脂タイプは高靱性エポキシ、炭素繊維質量は 125 g/m^2 、厚みは 0.120 mm である。

プリプレグを用いて RFI (Resin film infusion) で試験片を成型した。RFI 法とは、型に積層したプリプレグを専用のフィルムでパッキングした後、パック内を減圧し加熱を行う成形方法である。試験片を作製するにあたって、UD プリプレグと、治具にはステンレス製の長さ 100 mm 、外径 50.8 mm の円筒を使用した。試験片のサイズは、内径を 50.8 mm 、長さを 100 mm とし、外径は試験片の厚みに個体差が存在するため、積層数のみを揃え 5 層とした。試験片の形成には、Fig. 1(a) のように切り出したプリプレグを積層する面に対して離形処理を行った治具に巻き付けて積層を行った。実際にプリプレグを巻き付ける際の様子は、Fig. 2 に示す通りである。

Fig. 3(a) に試験片の寸法と配向を示した通り、UD プリプレグの繊維方向が試験片の周方向になるものを 0° 、軸方向になるものを 90° とした。そこに Fig. 3(b) に示したように、これまでの角度に対して -45° と 45° 方向になる繊維方向を設定した。これらを 5 層積層して試験片の作製を行い、以下のような配向で積層し、5 種類の試験片を作製した。各試験片の配向はカッコ内に示した。左側が試験片内側の 1 層目であり、スラッシュで区切られた数値が各層の炭素繊維の方向を示している。

試験片 A $[0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ]$

試験片 B $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]$

試験片 C $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$

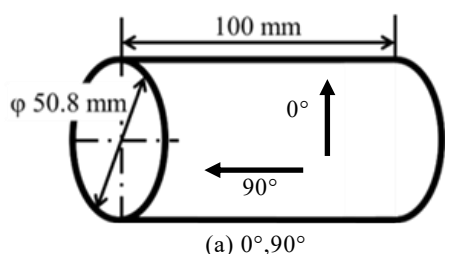
試験片 D $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ]$

試験片 E $[45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$

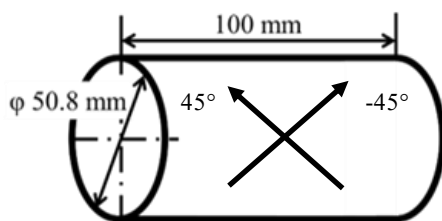
本論文では、 $\pm 45^\circ$ の積層数を 1 層から 5 層へと増加させたことによる比較と、 0° と $\pm 45^\circ$ の比較を行う。加熱後に繊維の歪みが出るために 45° と -45° の枚数になるべく揃



Fig. 2 Manufacturing test specimens.



(a) 0°, 90°



(b) -45°, 45°

Fig. 3 Schematic diagram of specimen made by UD.



Fig. 4 Before calcination process.

える必要がある。そのため、試験片 A～E は、試験片 A の 45° が 1 層含まれる試験片を基準に、45° と -45° を交互に 0° と置き換えた。

積層した試験片をプリプレグからの樹脂漏れを防ぐた



Fig. 5 Photographs of manufactured test specimen.

めにブリーザークロスで包む。ブリーザークロスとプリプレグの間には、ブリーザークロスが熱によって付着しないようにするためにリリースフィルムで包む必要がある。そして真空引きするためにバックフィルムという耐熱性と耐強度のあるフィルムで袋状にする。ここまでの作業が完了し、真空ポンプのホースとバックフィルムに取り付けたバルブを連結させた状態を Fig. 4 に示す。試験片は各 5 個ずつ作製し、5 回ずつ実験を行った。実際に製作した試験片を Fig. 5 に示す。

3. 製作した CFRP 試験片に対する落錘試験

3.1 落錘試験装置

試験片を落錘衝撃試験装置の下部に設置し、ロードセル（共和電業製 LC-20TV）にて荷重を、レーザ変位センサ（KEYENCE 製 LK-G500）にて圧潰量を測定した。レーザ変位センサの設定等を行うため、分離型コントローラ（KEYENCE 製 LK-G3000）を用い、電源ユニット（KEYENCE 製 KZ-U3）を電源に用いる。また、データロガー（KEYENCE 製 NR-500）を用いてデータを出力する。Fig. 6 に落錘体、ロードセル、レーザ変位センサを含む、落錘式試験装置の写真及び概要を示す。

3.2 実験条件と方法

CB の圧潰は静的試験でも確認することができるが、本研究では実際の自動車の衝突事故等を再現するため、動的試験の一種である落錘試験を行った。落錘衝撃試験を行うことで、試験片に対して軸方向からの荷重を加えることができ、試験片の圧潰を確認することができる。本研究では、落錘体に初速度を与えない自由落下式である。自由落下させる落錘体の高さを h [m]、重力加速度を g [m/s²] とすると、試験片に衝突する時点の落錘体の速度 v [m/s] は次式で表される。

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

日本国内で発生している車両事故の過半数が 30 km/h 以下の低速域で発生している²⁴⁾。また、今後は先進安全自動車 (ASV) の発展が進み、衝突被害軽減ブレーキによる、更なる低速域での衝突事故の割合増加が見込まれる²⁵⁾。

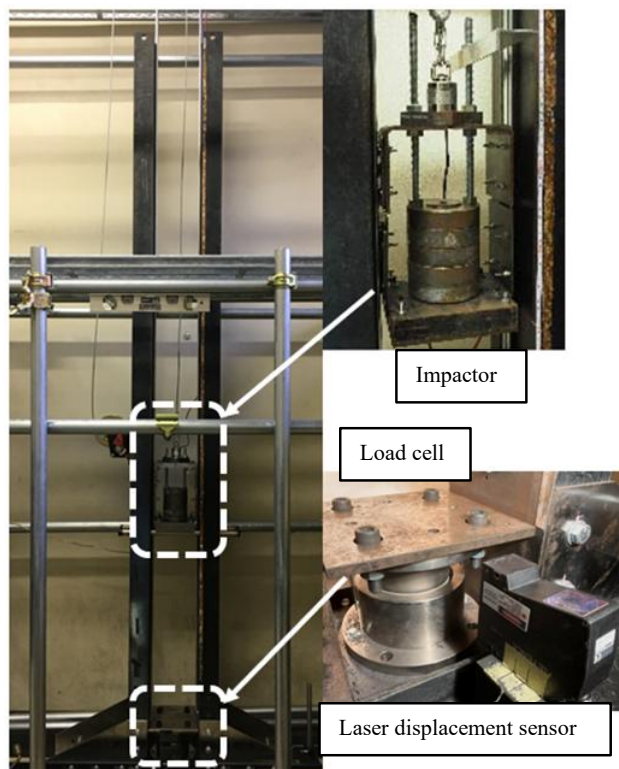


Fig. 6 Photograph of drop weight test device.



Fig. 7 Photograph of specimen fixation method.

以上より、低速域での衝突事故を想定し、落錘体の衝突速度をおよそ 25 km/h に設定するため、式(1)より落錘高さは 2.5 m とした。また、予備実験より、試験片に十分な衝撃を与えることができ、かつ完全に破壊されずに繊維の圧潰のプロセスを確認できる落錘体の質量を確認したところ、17.9 kg であることがわかった。そのため、本実験で使用する落錘体の質量は 17.9 kg とする。試験片の固定は Fig. 7 のように、固定板に低融点金属 U アロイを用いて行った。

3.3 評価方法

実験によって得られたデータをもとに、荷重を縦軸、変位を横軸に配置した荷重－変位線図の作成を行う。ここで用いる荷重とは、落錘体が試験片に与えている荷重を計測するのではなく、試験片が落錘体からの衝撃に耐える反力を計測している。また、荷重－変位線図の面積は、

試験片のエネルギー吸収量であり、エネルギー吸収量－変位線図を作成することができる。本論文では、これら 2 つの線図によって評価を行う。

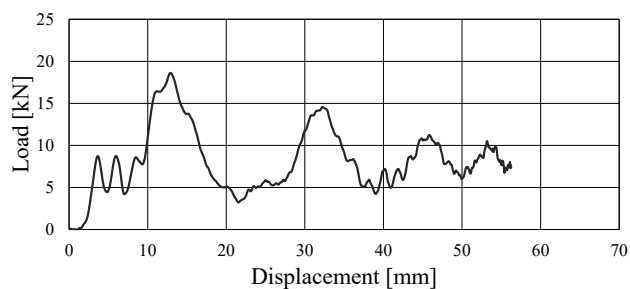
4. 実験結果と考察

先行研究から、荷重が加わる方向に近い繊維方向が多く含まれる試験片で高い衝撃吸収性能が得られることを確認している。周方向である 0° よりも $\pm 45^\circ$ のほうが落錘体による衝撃の方向と角度が近いので、5 層のうち $\pm 45^\circ$ の積層数が多いほど荷重ピークは大きく、圧潰量は少なくなると考えられたが結果は異なった。Fig. 8 に 5 種類の試験片の荷重－変位線図を示した。同図(a)は試験片 A[$0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ$]、(b)は試験片 B[$0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ$]、(c)は試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]、(d)は試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]、(e)は試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]のそれぞれの荷重－変位線図である。 $\pm 45^\circ$ の積層が 4 層含まれる試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]の荷重ピークが最も大きくなり、その他の試験片はほぼ同じ大きさとなった。圧潰量に関しては $\pm 45^\circ$ の積層が 4 層含まれる試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]が最も少なく、 $\pm 45^\circ$ の積層が 2 層含まれる試験片 B[$0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ$]が最も大きくなり、その他の試験片はほぼ同量となった。 $\pm 45^\circ$ の積層が 5 層の試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]は $\pm 45^\circ$ の積層が 4 層の試験片よりも荷重ピークと圧潰量共に小さくなり、 $\pm 45^\circ$ の積層が 3 層の試験片とほぼ同じとなった。これらのことより、落錘体による衝撃の方向と角度が近い繊維方向だけではなく、 0° の繊維方向を含むことにより他の繊維方向を支持し、衝撃に強くなるのではないかと考えられる。

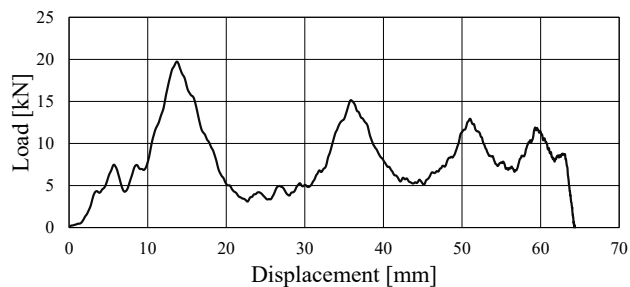
ここで、 $\pm 45^\circ$ の積層数が 3～5 層の試験片 3 種類、試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]、試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]、試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]を Fig. 9 のエネルギー吸収量－変位線図に示した。試験片 D[$45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$]のみ、圧潰量が 15 mm の辺りから他の試験片 2 種類と比較してエネルギー吸収量が多くなった。このことより、これらの試験片 3 種類から、圧潰量が一定以下である場合にはどの配向を CB に選択しても十分な機能を果たすと考えられる。また、試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]と試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]は、圧潰量に対するエネルギー吸収量もほぼ等しい結果となった。Fig. 10(a)に試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]、(b)に試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]の落錘試験終了後の写真を示す。この 2 つの試験片は試験結果の数値はほぼ等しくなるにも拘わらず、圧潰の様子が異なることがわかる。試験片 C[$45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$]は繊維が裂け開放するように圧潰していたのに対し、試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]は繊維が細かく破壊されていたことがわかる。この差は、試験片 E[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ$]が直交する繊維方向が交互に積層されているためではないかと考えられる。

5. 結言

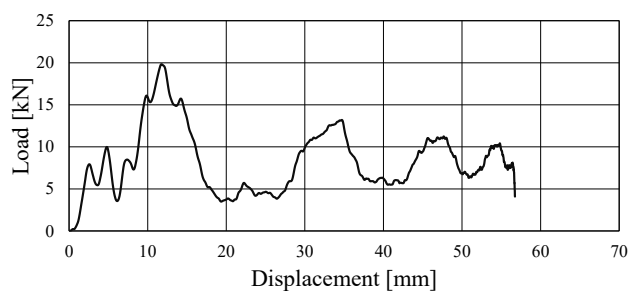
本論文では、低速域での衝突事故に対する CFRP 製 CB



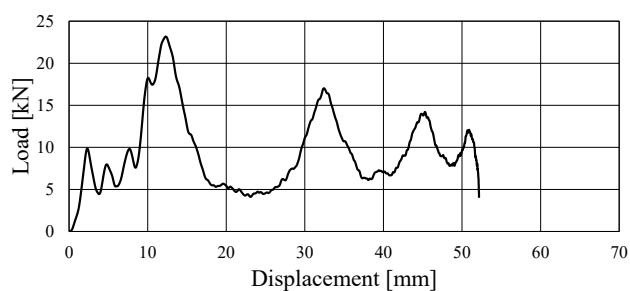
(a) Specimen A $[0^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ]$



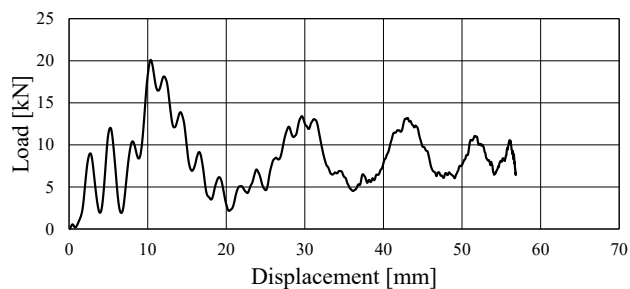
(b) Specimen B $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]$



(c) Specimen C $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$



(d) Specimen D $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ]$



(e) Specimen E $[45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$

Fig. 8 Load displacement diagram of test piece.

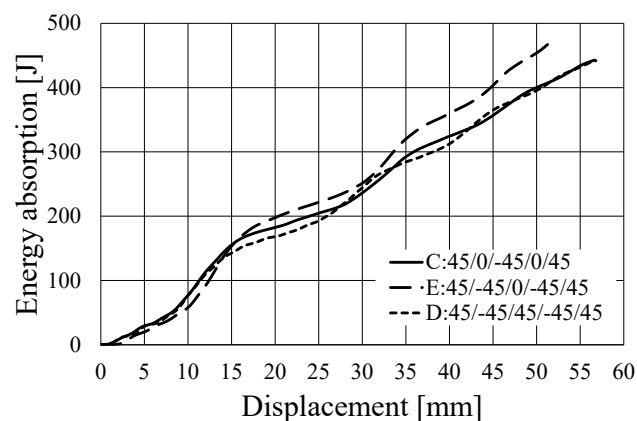


Fig. 9 Relationship between energy absorption and displacement



(a) Specimen C $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$



(b) Specimen E $[45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$

Fig. 10 Photographs of test specimen after testing.

を、設計者が意図した強度・剛性を具現化するために実験を行った。UD ブリプレグを用いた円筒型 CFRP 試験片を 5 種類作製し、これらに対して低速域の衝突を再現した落錘試験を行い、試験片の配向の違いによる衝撃吸収性能の変化に関する検討を行った。その結果、本論文の範囲においては落錘体による衝撃の方向と角度に近い繊維方向だけではなく、周方向の繊維により他の繊維方向を支持し、衝撃に強くなるのではないかと考えられる。また、圧潰量に対するエネルギー吸収量が等しい場合であっても、圧潰過程が異なることが確認された。

今回はシミュレーションや計算方法が確立されていない為、動的試験により各配向の比較を行った。しかしながら、実験結果とシミュレーションや計算の妥当性を、同時に検討し確認を行う必要があると考えており、これが今後の課題になる。加えて、CB として実用化する際に適切な圧潰過程や破片の形状を、人体や事故発生後の二次被害への影響を検討していきたい。

参考文献

- 1) 島村 昭治, 宮入 裕夫, 複合材料-複合化技術と材料の多機能化, 実教出版株式会社, pp.73-76(1986).
- 2) スーパーレジン工業株式会社, CFRP の物性と特徴 <https://www.super-resin.co.jp/cfrp/properties/>
- 3) 濱田 泰以, 中谷 有, FRP 円筒の非軸方向におけるエネルギー吸収特性, 日本機械学会論文集 A 編 64 巻 619 号, 819-824(1998).
- 4) 粕谷 平和, 根本 圭一, 衝撃軸圧縮荷重を受ける複合材料積層円筒殻の動的応答, 日本機械学会論文集 A 編 59 (558), 454-460(1993).
- 5) 粕谷 平和, 根本 圭一, 衝撃負荷を受けるアングルプライ積層円筒殻の動的応答, 東海大学紀要 工学部 32 (1), 191-200(1992/10/30).
- 6) 足立 廣正, 長谷川 照夫, 平織強化 CFRP 材における繊維方向のヤング率の評価, 日本複合材料学会誌 30 (3), 120-125(2004).
- 7) 国土交通省, 独立行政法人自動車事故対策機構, 自動車アセスメント衝突安全性能評価事故時に人を守る技術(2020).
- 8) 国土交通省, 事故の全体俯瞰のグラフ等(平成 16 年), 俯-48(2005).
- 9) 国土交通省, 令和 6 年事故・火災情報の集計結果について, (2025).
- 10) 桜井実, オフセット前面衝突時の下肢障害の発生状況に関する実験的検討, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.4, p.117-122(1997).
- 11) 鬼本大輝, 大賀涼, 杉町敏之, 櫻井俊彰, 槇徹雄, ミニカーのフルラップ前面衝突時における乗員傷害に関する研究, 日本交通科学学会誌 第 19 巻 第 2 号 42-52, 令和元年.
- 12) Ahmad Baroutaji, Mustafa Sajjia, Abdul-Ghani Olabi, On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, Thin-Walled Structures, 118(2017).
- 13) 金 炯秀, 邊 吾一, 青木 義男, 自動車のフロントサイドメンバ用 CFRP 角柱の衝撃実験と解析, 日本複合材料学会誌 34 (2), 51-59(2008).
- 14) Hongyong Jiang, Yiru Ren, Xiaochuan Liu, Qiduo Jin, Enhancing residual energy-absorption of perforated CFRP tube by a critical transition of failure mechanism, Composite structures, 253(2020).
- 15) 松永尚徳, 末村紘志, 3 CFRP 衝撃解析精度の向上, CFRTP の低コスト成形加工技術の開発(第 7 報)
- 16) 高橋 清久, 木村 昌樹, 原川 和久, 伴 菊夫, 酒井 哲也, FRP 積層板の弾性率と強度の解析, 繊維学会誌 40 (1), T7-T12(1984).
- 17) 公益社団法人 自動車技術会, Reduced Model による前面衝突時の車体変形予測技術の開発, 自動車技術会論文集 50 (4), 1102-1107(2019).
- 18) 公益社団法人 自動車技術会, 1180MPa 級超高張力鋼板を適用したエネルギー吸収部材の衝突性能評価, 自動車技術会論文集, 54 (6), 1133-1138(2023).
- 19) 康井 義明, 細見 光史, 鬼武 章, 衝撃軸圧縮荷重を受ける各種多角形薄肉断面構造部材の動的エネルギー吸収特性, 軽金属 55 (6), 252-258(2005).
- 20) 古越 新, 康井 義明, 衝撃軸圧縮荷重を受ける自動車用フロントサイドメンバ屈曲部の強度特性, 東海大学紀要工学部, Vol.49, No.2, pp.73-80(2009).
- 21) 陳 玳珩, 他 2 名, 軸方向に周期的波を有する薄肉円錐型吸収部材の軸圧潰特性, 日本機械学会論文集, 第 77 巻, 第 774 号, pp. 261-270(2011-2).
- 22) 石神 征春, 康井 義明, PS26 各種断面形状を持つ車両用フロントサイドメンバのエネルギー吸収特性(ポスターセッション), M&M 材料力学カンファレンス 2008 (0), PS26-1-PS26-2(2008).
- 23) 大竹 聖, 高 耀東, 松本 尚也, 小林 一景, 黒田 純平, 加藤 英晃, 成田 正敬, 一方連続繊維ブリプレグを用いた薄肉円筒殻 CFRP 部材の配向が衝撃吸収性能に与える影響に関する研究, 東海大学紀要工学部, Vol. 64, No.1, 35-40(2024).
- 24) 国土交通省, 事故の全体俯瞰のグラフ等(平成 16 年), 俯-93(2005).
- 25) 国土交通省, 自動車総合安全情報, <https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/#plan>