ポリアミド 12 エラストマー層を有する 炭素繊維強化ポリアミド 12 積層板の機械的特性評価[†]

田中 和人* 大野 花甫里** 片山 傳生* 長谷 朝博***

Evaluation of Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Polyamide 12 Laminates with Polyamide 12 Elastomer Layers

by

Kazuto TANAKA*, Kahori OHNO**, Tsutao KATAYAMA* and Asahiro NAGATANI***

Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) with laminated construction has excellent mechanical properties, while interlaminar delamination can be easily induced by external impact. To prevent delamination and to improve the impact resistance of CFRP, the addition of interlayers with high toughness material has been reported. Recently, Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (CFRTP) using thermoplastic as a matrix is expected to be applied to the automotive industry instead of CFRP, which require curing time. Thermoplastic elastomer (TPE) are expected to contribute to improve the impact and vibration damping properties of CFRTP because TPE has rubber like elasticity without chemical crosslink and can be molded in the same way as thermoplastics. In this study, CF/PA12 laminates with PA12 elastomer layers were molded and the effects of the quantity of PA12 elastomer layers on its mechanical properties were clarified. PA12 elastomer has a good impregnation property just as PA12, and the absorbed energy in impact test and the loss factor in vibration test of CF/PA12 laminates are improved by addition of PA12 elastomer layers.

Key words:

CFRTP, Carbon fiber, Polyamide 12, Thermoplastic elastomer, Polyamide 12 elastomer, Impact property, Damping property

1 緒 言

航空宇宙機器を中心に利用されていた熱硬化性樹脂をマトリックスに用いた CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) を代表とする繊維強化複合材料の積層板は、優れた静的強度を有する反面、衝撃により繊維で強化されていない層間にはく離を生じやすいという欠点を有する^{1),2)}。構造部材は、メンテナンス時の工具落下や雹、石などの異物の衝突を受ける可能性が高く、衝撃への耐性が必要とされている。また、これらの部材においては、位置精度の向上や搭載機器の信頼性確保などの面から、振動低減が求められる。層間で損傷を抑制し衝撃への耐性を高める方法として、層間に高じん性材料を挿入する方法が開発されている³⁾。CFRP においては、EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) コンパウンドや熱可塑性ポリウレタンなどを層間に挿入することで、衝撃特性や振動減衰特性が向上することが報告されている^{4),5)}。これらの CFRP は、マトリックスに熱硬化性樹脂を用いているため、成形時に硬化時間を要し、成形後には不融となる。一方、熱可塑性樹脂は成形時間が短く、加熱することで再び熔融させることが可能なため^{6),7)}、生産性やリサイクル性に優れる。したがって、この熱可塑

性樹脂をマトリックスに用いた CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics: CFRTP) の各種輸送機器の構造部材への適用が期待されており^{8),9)}、CFRTP においても、衝撃特性や振動減衰特性に優れた材料の開発が必要である。

熱可塑性エラストマー (Thermoplastic Elastomer: TPE) は化学的架橋を行わずにゴム状弾性を発現する共重合体で、接着剤や改質剤として利用されている。この TPE は熱可塑性樹脂と同様の成形加工が可能であるため^{10),11)}、CFRTP と一体化することで衝撃特性や振動減衰特性の向上が期待される。CFRTP のマトリックスとしては、成形性や炭素繊維との界面接着性に優れるポリアミド樹脂 (Polyamide: PA) が注目されており^{12),13)}、その中でも耐衝撃性や耐吸水性に優れる PA12 樹脂の利用が期待される^{14),15)}。PA12 エラストマーは PA12 をハードセグメント、ポリエーテルをソフトセグメントとする TPE であり、PA12 樹脂との熱溶着性や相溶性に優れることから¹⁶⁾、CF/PA12 積層板の層間に挿入する材料として適していると考えられる。

そこで、本研究では、PA12 樹脂および PA12 エラストマーの引張特性、動的粘弾性特性評価を実施するとともに

[†] 原稿受理 平成30年2月10日 Received Feb. 10, 2018 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 同志社大学 生命医科学部医工学科 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷
Dept. of Biomed. Eng., Doshisha Univ., Tatara-miyakodani, Kyotanabe, 610-0394.

** 学生会員 同志社大学大学院 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷
Dept. of Biomed. Eng., Doshisha Univ., Tatara-miyakodani, Kyotanabe, 610-0394.

***正 会 員 兵庫県立工業技術センター 材料・分析技術部 〒654-0037 神戸市須磨区行平町
Dept. of Materials and Analysis, Hyogo Prefectural Institute of Technology, Suma, Kobe, 654-0037.

に、PA12 エラストマー層を有する CF/PA12 積層板を成形した。また、3 点曲げ試験による曲げ特性評価、シャルピー衝撃試験および落錘式衝撃試験による衝撃特性評価、片端固定定常加振法を用いた振動試験による振動減衰特性評価を実施することで、積層板における PA12 エラストマー層の体積分率が機械的特性に及ぼす影響を明らかにした。

2 供試材および実験方法

2・1 供試材と成形条件

樹脂とエラストマーフィルムの引張特性評価には PA12 樹脂フィルム (3014U, 宇部興産, 厚さ 100 μm) および PA12 エラストマーフィルム (9040X1, 宇部興産, 厚さ 100 μm) を用いた。また、射出プレートの動的粘弾性特性評価には PA12 樹脂射出プレート (3014U, 宇部興産, 厚さ 1 mm) および PA12 エラストマー射出プレート (9040X1, 宇部興産, 厚さ 1 mm) を用いた。

CF/PA12 積層板の強化繊維には、炭素繊維平織物ドライファブリック (パイロフィル織物, 目付 200 g/m^2 , 積層構成[0°/90°], 三菱ケミカル) を, マトリックス樹脂には, PA12 樹脂 (3014U, 宇部興産) の不織布 (クラレ試作品, 目付 42.5 g/m^2) を用い, 層間に挿入する材料には, PA12 エラストマーフィルム (9040X1, 宇部興産, 厚さ 100 μm) を用いた。

CF/PA12 積層板は, 成形圧力を 2 MPa, 成形温度を 230 °C, 加圧保持時間を 300 s として, 平板用金型を取り付けたプレス射出ハイブリッド成形機 (佐藤鉄工所) により成形した。積層板の厚さは, 1.6 mm および 2.4 mm の 2 種類とし, それぞれの積層構成は[0°/90°]_{4s}, [0°/90°]_{6s}である。層間に挿入する PA12 エラストマーフィルムの枚数は, 厚さ 1.6 mm の積層板の場合, 0 枚, 3 枚 (マトリックスのうち 33 %が PA12 エラストマーに相当する。以下%のみ記載), 5 枚 (55 %) の 3 種類, 厚さ 2.4 mm では 0 枚, 1 枚 (7.3 %), 2 枚 (15 %), 3 枚 (22 %), 5 枚 (37 %) の 5 種類として, Fig. 1 に示すように積層板の中央部分の PA12 樹脂不織布の代わりに PA12 エラストマーフィルムを積層し, 繊維体積含有率はすべての試験片で 50 %となるようにした。なお, 積層板の名称は, 厚さ 1.6 mm で PA12 エラストマーフィルムの枚数が 5 枚の場合, t1.6-E5 のように称することとする。また, 積層板内部の含浸状態の観察には, X 線 CT の一種である高分解能 3DX 線頭微鏡 (リガク, nano3DX) を用いた。測定条件は管電圧を 30 kV, 管電流を 40 mA とした。積層板の繊維体積含有率は, 積層板中央部から切り出した試験片寸法 60 mm × 60 mm, 質量 10 g の試験片に対し, 小型プログラム電気炉 (アズワン, MMF-2) を用いて燃焼法により算出した。

2・2 樹脂およびエラストマーの特性評価

PA12 樹脂および PA12 エラストマーのフィルムの引張特性は, 小型卓上試験機 (島津製作所, EZ-graph) を用いて評価した。なお, 引張変位速度は 8.4×10^{-5} m/s, 試験片形状を Fig. 2 に示すようなダンベル状 7 号形とし, 試験片

の表面はデジタルマイクロスコープ (キーエンス, VHX-5000) を用いてその場観察を行った。標点間距離は 12 mm であり, その変形から引張弾性率と引張破壊ひずみを算出した。

PA12 樹脂および PA12 エラストマーの射出プレートの動的粘弾性特性は, 動的粘弾性測定装置 (TA Instruments, DMA-Q800) を用いて引張モードで測定した。なお, 温度は 22.5 ± 1 °C, ひずみ 0.1 %, 周波数範囲は 0.1 Hz ~ 10 Hz, 試験片寸法は 40 mm × 10 mm とした。

2・3 CF/PA12 積層板の機械的特性評価

CF/PA12 積層板の曲げ特性は, 万能精密試験機 (インストロン, 5566) を用いて, 成形した厚さ 1.6 mm の積層板から 100 mm × 15 mm の寸法に切り出した試験片に対して, JIS K 7074 に基づき 3 点曲げ試験により評価した。なお, 支点間距離は 80 mm, 変位速度は 8.4×10^{-5} m/s とした。

CF/PA12 積層板の衝撃特性は, シャルピー衝撃試験および落錘式衝撃試験により評価した。厚さ 2.4 mm の積層板から 80 mm × 10 mm の寸法に切り出した試験片に対して, JIS K 7077 に基づいて, 万能衝撃試験機 (安田精機) を用いてシャルピー衝撃試験を行った。なお, ハンマーの容量は 5.0 J, 支点間距離は 60 mm とした。また, 落錘式衝撃試験は, 厚さ 1.6 mm の積層板から一辺 25 mm の正八角形に切り出した試験片に対し, 直径 40 mm の穴の空いた押さえ板を用いて固定後, 付与エネルギーを板厚 1 mm あたり 10 J として, 計装化落錘式衝撃試験機 (米倉製作所, IITM-18) に取り付け直径 10 mm の半球状のストライカーを用いて実施した。

CF/PA12 積層板の振動減衰特性は, 損失係数測定装置 (B&K) を用いて, 厚さ 1.6 mm の積層板から 250 mm × 10 mm の寸法に切り出した試験片に対し, 片端固定定常加振法により評価した。加振させた試験片の周波数応答曲線から共振周波数 f_0 と伝達関数の絶対値が最大値より 3 dB 下がった点での周波数 f_1 および f_2 を読み取り, 半値幅法を用いて式(1)により損失係数 η を算出した。

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (1)$$

試験後, 試験片の側面や破面, 断面はデジタルマイクロスコープと走査型電子顕微鏡 (日本電子, Scanning Electron Microscope: SEM, JST-6390LT) を用いて観察した。

3 結果および考察

3・1 フィルムの引張特性評価

引張試験により求めた PA12 樹脂および PA12 エラストマーフィルムの応力-変位線図を Fig. 3 に, これらから得られた引張降伏応力, 引張弾性率, 引張破壊応力, 引張破壊ひずみを Table 1 に示す。PA12 樹脂の応力-変位線図では明確な降伏点が見られるのに対し, PA12 エラストマーでは明確な降伏点が見られなかった。引張降伏応力および引張弾性率は, PA12 樹脂より PA12 エラストマー

の方がそれぞれ 77 % および 90 % 低く, 大幅に小さい値を示した. 引張破壊ひずみは, PA12 樹脂より PA12 エラストマーの方が 132 % 高く, 引張破壊強度には有意差が見られなかった.

Fig. 1 Laminated construction.

Fig. 2 Schematic drawing of No. 7 dumbbell specimen.

Fig. 3 Stress-displacement curve of tensile test for films.

3・2 射出プレートの動的粘弾性特性評価

PA12 樹脂および PA12 エラストマー射出プレートの動的粘弾性特性を Fig. 4 に示す. PA12 樹脂の $\tan \delta$ は 1.2 Hz 以下では高い値を示し, 1.2 Hz 以上ではほぼ一定の値を示した. 一方, PA12 エラストマーの $\tan \delta$ は周波数によらずほぼ一定の値を示し, 周波数が高いほど高くなる傾向が見られた. 1.2 Hz 以上の周波数領域において PA12 樹脂より PA12 エラストマーの方が高い $\tan \delta$ を示し, PA12 樹脂より PA12 エラストマーの方が低い貯蔵弾性率 E' を示した.

3・3 CF/PA12 積層板の繊維体積含有率および含浸性の評価

燃焼法により測定した厚さ 1.6 mm の積層板の繊維体積含有率を Fig. 5 に示す. PA12 エラストマーフィルム枚数が異なっても繊維体積含有率には差が見られなかった. 厚さ 1.6 mm の積層板の CF/PA12 積層板の内部を高分解能 3DX 線頭顕微鏡を用いて観察した結果とその画像からポイドを抽出した画像を Fig. 6 に, ポイド率を Table 2

Table 1 Tensile properties of films.
(N = 5, mean $\pm$ S. D.).

	PA12 resin	PA12 elastomer
Tensile stress at yield [MPa]	29 $\pm$ 0.98	6.8 $\pm$ 0.63
Modulus of elasticity in tension [MPa]	560 $\pm$ 135	58 $\pm$ 20
Tensile stress at break [MPa]	44 $\pm$ 4.2	41 $\pm$ 1.4
Tensile strain at break [%]	302 $\pm$ 24.1	701 $\pm$ 22.4

Fig. 4 Dynamic viscoelastic property for plates, measured at 22.5 °C.

に示す。PA12 エラストマーフィルム枚数によらず、ボイド率は1%以下であり、樹脂の含浸性に差はみられなかった。PA12 エラストマーはPA12 樹脂と同等の含浸性を有し、機能性を付与する材料として適していると考えられる。

3・4 CF/PA12 積層板の曲げ特性評価

3点曲げ試験により得られた応力-ひずみ線図、曲げ強度および曲げ弾性率をFigs. 7, 8, 9に示す。応力-ひずみ線図において、PA12 エラストマーフィルム枚数が多いほど、最大荷重を示した後最大荷重の10%に低下するま

でのひずみ量が大きく、延性的な挙動をすることが分かる。曲げ強度はt1.6-E0 および t1.6-E3 では差は見られなかったが、t1.6-E5 の曲げ強度はt1.6-E0 より14%低い値を示した。なお、曲げ弾性率に有意差は見られなかった。

試験片側面の観察結果をFig. 10に示す。PA12 エラストマーの有無に関わらず、圧縮側からき裂が発生し、引張側へ進展し破断した。t1.6-E0 と比較して、t1.6-E5 は中央層付近において、樹脂が伸び、延性的な破壊をする様子が観察された。これは、Fig. 3 および Table 1 に示したように、PA12 樹脂よりもPA12 エラストマーの方が大きな引張破壊ひずみを有しており、PA12 エラストマーの方が大きな塑性変形を示すためであると考えられる。

Fig. 5 Fiber volume fraction for CF/PA12. (N = 5, mean $\pm$ S. D.).

Fig. 7 Stress-strain curve of bending test for CF/PA12.

Fig. 6 3D images of CF/PA12 observed by X-ray microscope.

Fig. 8 Bending strength of bending test for CF/PA12. (N = 5, mean $\pm$ S. D.).

Fig. 9 Bending modulus of bending test for CF/PA12. (N = 5, mean $\pm$ S. D.).

Table 2 Void content.

Specimen	Void content [%]
t1.6-E0	0.08
t1.6-E3	0.14
t1.6-E5	0.06

3・5 CF/PA12 積層板の衝撃特性評価

シャルピー衝撃試験により得られたシャルピー衝撃値を Fig. 11 に示す。t2.4-E0 と比べ PA12 エラストマーフィルムの枚数が増えるにつれて、シャルピー衝撃値は高くなった。試験片の中央層付近における破面観察結果を Fig. 12 に示す。PA12 エラストマーフィルムの枚数が多いほど、繊維樹脂界面近傍の樹脂が大きく伸びている様子が観察された。PA12 エラストマーフィルムの枚数が多いほど樹脂の破壊が延性的となり、シャルピー衝撃値が高くなったものと考えられる。

落錘式衝撃試験における最大荷重および吸収エネルギーを Figs. 13, 14 に示す。最大荷重、吸収エネルギーともに PA12 エラストマーフィルムの枚数が多いほど、高くなる傾向が見られた。落錘式衝撃試験後の試験片表面を Fig. 15 に示す。PA12 エラストマーの有無に関わらずストライカーは貫通し、t1.6-E0 では衝撃負荷面に対し裏面において、貫通孔のまわりに凹凸が観察された。落錘式衝撃試験後の衝撃負荷面近傍の試験片断面の観察結果を Fig. 16 に示す。t1.6-E0 では層間にはく離が見られるのに対し、t1.6-E5 でははく離が見られなかった。一般的に、CF/EP 積層板においては、衝撃負荷面から裏面にかけて層間にはく離がピラミッド状に分布する^{17), 18)}ことが報告されている。PA12 エラストマーを挿入していない t1.6-E0 では、CF/EP の損

傷形態と同様に、衝撃負荷面に対し裏面において、層間にはく離とともに、試験片裏面で凹凸が観察されたのに対して、PA12 エラストマー層を有する t1.6-E5 ではこれらの

Fig. 12 Observation of fracture surface of middle layer of Charpy impact test for CF/PA12.

Fig. 10 Observation of side view of bending specimen.

Fig. 11 Charpy impact strength for CF/PA12. (N = 5, mean $\pm$ S. D.).

Fig. 13 Maximum load of drop weight impact test for CF/PA12. (N = 3, mean $\pm$ S. D.).

Fig. 14 Absorbed energy of drop weight impact test for CF/PA12. (N = 3, mean $\pm$ S. D.).

損傷が抑えられていた。落錘式衝撃試験後の衝撃負荷点直下における試験片断面の観察結果を Fig. 17 に示す。t1.6-E5 では t1.6-E0 よりもはく離面において樹脂が延性的に破壊している様子が観察された。このような樹脂の延性破壊により吸収エネルギーが高くなったと考えられる。なお、結果は省略するが、t1.6-E3 においても t1.6-E5 と同様の傾向が見られた。

以上のことから、t1.6-E3 では曲げ強度・曲げ弾性率を低下させることなく、衝撃特性を向上させることが可能であり、PA12 エラストマーをマトリックスの一部として用いることで、機械的特性に優れた積層板が実現できることがわかる。

3・6 CF/PA12 積層板の振動減衰特性評価

振動試験により得られた共振周波数と損失係数の関係を Fig. 18 に示す。3 次共振周波数、4 次共振周波数のどちらにおいても、共振周波数は PA12 エラストマーの枚数が多くなるにつれて低くなった。3 次共振周波数における損失係数は、t1.6-E3 および t1.6-E5 では差が見られなかったものの、t1.6-E0 と比較して高い値を示した。また、4 次共振周波数における損失係数は、PA12 エラストマーフィルムの枚数が多くなるにつれて高くなった。

一般的に、層間に高じん性材料を有する積層板において、層間フィルムの $\tan\delta$ 値や弾性率が振動減衰特性に影響する⁵⁾。Fig. 4 に示したように PA12 樹脂に比べて PA12 エラストマーの方が高い $\tan\delta$ 値を有しており、PA12 エラストマーフィルムをマトリックスとして用いた積層板が高い振動減衰特性を示したものと考えられる。したがって PA12 エラストマーフィルムをマトリックス樹脂として用いることで振動減衰特性を向上させることが可能である。

4 結 言

本研究では、PA12 樹脂および PA12 エラストマーの引張特性、動的粘弾性特性評価を実施するとともに、PA12 エラストマー層を有する CF/PA12 積層板を成形し、3 点曲

げ試験による曲げ特性評価、シャルピー衝撃試験および落錘式衝撃試験による衝撃特性評価、片端固定定常加振法を用いた振動試験による振動減衰特性評価を実施した結果、以下のことが明らかになった。

Fig. 16 Observation of cross section of specimen near impact load point after drop weight impact test of CF/PA12.

Fig. 15 Specimen of drop weight impact test for CF/PA12.

Fig. 17 Observation of cross section of specimen below the impact load point after drop weight impact test of CF/PA12.

Fig. 18 Loss factor of vibration test for CF/PA12.
(N = 4, mean $\pm$ S. D.).

1. PA12 樹脂および PA12 エラストマーフィルムの引張降伏応力および引張弾性率は, PA12 樹脂より PA12 エラストマーの方がそれぞれ 77 %, 90 %低い値を示し, 引張破壊応力には有意差がなかった. 1.2 Hz 以上の周波数領域において PA12 樹脂より PA12 エラストマーの方が高い $\tan\delta$ を示し, PA12 樹脂より PA12 エラストマーの方が低い貯蔵弾性率 E' を示した.
2. PA12 エラストマーは PA12 樹脂と同等の含浸性を有しており, 機能性を付与する材料として適している.
3. PA12 エラストマーをマトリックスの一部として用いることで, 衝撃特性および振動減衰特性の高い CF/PA12 積層板を作製することができる.

射出プレートの動的粘弾性特性評価は, 京都市産業技術研究所の橋 洋一氏にご協力いただいた. ここに記して謝意を表する.

参 考 文 献

- 1) H. Fukuda, G. Ben and H. Suemasu, "Comprehensive overview of composite materials and their technology", Industrial technology service center, pp.48-59 (2011).
- 2) C. Soutis, "Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction", Material Science and Engineering: A, Vol.412, No.1-2, pp.171-176 (2005).
- 3) H. Morita and H. Matsumoto, "Characterization on impact damage resistance of CFRP laminates under falling weight impact test", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.61, No.581, pp.127-132 (1995).
- 4) E. Stelldinger, A. Kühhorn and M. Kober, "Experimental evaluation of the low-velocity impact damage resistance of CFRP tubes with integrated rubber layer", Composite Structures, Vol.139, pp.30-35 (2016).
- 5) H. Kishi, M. Kuwata, S. Matsuda, T. Asami and A. Murakami, "Damping properties of thermoplastic-elastomer interleaved carbon fiber-reinforced epoxy composites", Composites Science and Technology, Vol.64, No.16, pp.2517-2523 (2004).
- 6) A. Gallone, M. Ariante, G. Fusco, F. F. Flores, G. Bizzarro, A. Zinno and A. Prota, "Thermoplastic composite structure for mass transit vehicle: design, computational engineering and experimental validation", 15th European Conference on Composite Materials, pp.24-28 (2012).
- 7) H. Ning, U. Vaidya, G. M. Janowski and G. Husman, "Design, manufacture and analysis of a thermoplastic composite frame structure for mass transit", Composite Structure, Vol.80, pp.105-116 (2007).
- 8) D. Mathijsen, "What does the future hold for composites in transportation markets?", Reinforced Plastics, Vol.61, No.1, pp.41-46 (2017).
- 9) A. Jacob, "Carbon fibre and cars - 2013 in review", Reinforced plastics, Vol.58, No.1, pp.18-19 (2014).
- 10) M. Mutsuda, "Direct bonding technology by chemical reactions at the interface and the applications of polyamide elastomer (PEBA)", Journal of the society of rubber science and technology, Japan, Vol.83, No.9, pp.296-302 (2010).
- 11) K. Kato, "Recent advances in thermoplastic elastomer in Japan -Application, market and material-", Journal of the society of rubber science and technology, Japan, Vol.80, No.6, pp.226-232 (2007).
- 12) S. W. Beckwith, "Thermoplastic composite resin matrices", SAMPE Journal, Vol.44, No.1, pp.70-71 (2008).
- 13) K. Tanaka, N. Hosoo and T. Katayama, "Effect of temperature on the fiber matrix interfacial properties of carbon fiber reinforced highly heat resistant polyamide resin", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.66, No.10, pp.746-751 (2017).
- 14) T. Muraki, "Polymer series", Polymer, Vol.2, No.2-3, pp.201-210 (1978).
- 15) S. M. Sapuan and H. S. Abdalla, "A prototype knowledge-based system for the material selection of polymeric-based composites for automotive components", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 29, No. 7, pp. 731-742 (1998).
- 16) Y. Takemura, "Trends and future of thermoplastic elastomers", Journal of the society of rubber science and technology, Japan, Vol.83, No.9, pp.269-276 (2010).
- 17) A. Kobayashi, S. Ogihara and S. Kasuya, "Microscopic damage due to drop weight impact in plain weave CFRP laminates", Journal of the Society of Material Science, Japan, Vol.46, No.5, pp.539-543 (1997).
- 18) B. Vieille, V. M. Casado and C. Bouvet, "Influence of matrix toughness and ductility on the compression-after-impact behavior of woven-ply thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study", Composite Structures, Vol.110, pp.208-218 (2014).