

CFRP板の曲げ特性(第1報)

藤本俊二 中村仁 藤田雅彦 友近宏 平岡芳信

Bending characteristics of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) Plates (Part 1)

FUJIMOTO Syunji, NAKAMURA Hitoshi, FUJITA Masahiko,
TOMOCHIKA Hiroshi and HIRAOKA Yoshinobu

炭素繊維強化プラスチック(以下 CFRP と呼ぶ)板を製品等の構成部材として使用する場合、使用方法に応じた機械的特性や力学的な挙動を知っておく必要がある。そこで、本研究では、CFRP 製造の中で最も一般的なプリプレグ材をオートクレーブにより熱成形し、試作した厚みの異なる CFRP (クロス素材積層板、Unidirectional(UD):一方向積層板及び Cross-Ply(CP):直交積層板)を3点曲げ試験することにより、曲げ特性に対する積層構成や厚みの効果を評価した。曲げ強度、曲げ弾性率とも厚みの影響は小さく、曲げ荷重の入力方向に直角方向に繊維が配向されている場合で最大となった。

キーワード：プリプレグ、CFRP、オートクレーブ、3点曲げ、曲げ強さ、曲げ弾性率

はじめに

近年、CFRP の加工技術は世界中で研究が進められており、飛行機やスポーツ用品では既に実用化されている。今後は、車や日常商品等にも活路が広がろうとしている^{1)~5)}。

愛媛県内には、CFRP 製造メーカーがあるため、その周辺に、優れた CFRP 加工技術や利用技術を有する企業群の集積が望まれている。CFRP は様々な分野で活用され始め出したため、鉄等と比べると依然高価なものであるがコストは低下してきており、CFRP の製造方法の中でも、プリプレグシートを用いた成形が比較的安価であると言われている。

そこで、本研究では、現在、CFRP の基材として一般的に使用されている、プリプレグ素材がクロス材で作られている“クロスプリプレグ”、一方向積層プリプレグ“UD-プリプレグ”に着眼し、これらを基に熱成形した“クロス-CFRP”及び“UD-CFRP”の機械的特性についての評価を行った。

実験方法

1. 供試材料

(1)プリプレグ

東レ(株)製のクロスプリプレグ (3252S-15)、UD-プリプレグ (F63438-05P)を供試材として使用した。

それぞれのプリプレグは、長手方向に対して繊維方向が同一となるように所定枚数積層したプリプレグと長手方向に対して繊維の配向性が異なるように積層したプリプレグを作製した。

(2)熱成形

上述の積層プリプレグを包装後、真空引きしながら、オートクレーブ ((株)羽生田鉄工所製、ダンデライオン DL-2010) で高温高压加熱処理 (0.7MPa、120℃×2時間) を行い、熱成形した後、大型試料精密切断機 ((株) マルトー社製 MC-733) で切断し試験片を作製した。

(3)3点曲げ試験片

3点曲げ試験片として、熱成形した積層プリプレグを表1に示す各種サンプル (15mm×100mm) に切り出して作製した。表中の配向性は、試験片の長手方向に対する繊維方向を示すもので、作製した試験片を以降、クロス-CFRP (0°)、クロス-CFRP (0-45°)、UD-CFRP (0°)、UD-CFRP (90°)、UD-CFRP (0-90°) と呼ぶこととした。

2. 3点曲げ試験方法

CFRPの3点曲げ強さ及び曲げ弾性率の測定は、JIS K7074に準拠して行った。すなわち、圧子半径5mm、支点半径2mmの3点曲げ試験治具を用い、試験片の支点間距離80mmとし、試験速度は5mm/minとした。万能材料試験機（(株)島津製作所製 AG-I 50kN）を用いて試験を行い、曲げ変位と荷重の測定結果から、曲げ強さ及び曲げ弾性率を評価した。なお、測定は常温で行い、測定結果は、各5個の平均値で示した。

表1 3点曲げ試験片

素材	配向性	全積層数	厚み[mm]	記号
クロス	0°	4	1.0	[0°] ₄
		8	2.0	[0°] ₈
		12	2.4	[0°] ₁₂
		16	3.8	[0°] ₁₆
	0°/45°	24	5.5	[0°] ₂₄
		8	2.0	[0°/45°] ₈
UD	0°	16	3.9	[0°/45°] ₁₆
		24	5.5	[0°/45°] ₂₄
		8	1.2	[0°] ₈
		16	2.3	[0°] ₁₆
	90°	24	3.4	[0°] ₂₄
		36	5.1	[0°] ₃₆
		8	1.2	[0°] ₈
	0°/90°	18	2.5	[0°] ₁₈
		36	5.0	[0°] ₃₆
		8	1.2	[0°/90°] ₈
		16	2.3	[0°/90°] ₁₆
	0°/90°	24	3.4	[0°/90°] ₂₄
36		5.1	[0°/90°] ₃₆	

3. CFRPの断面の写真

CFRPの断面及び表面の写真は、デジタルマイクロスコープ（(株)キーエンス製 VHX-100F）で撮影した。

結果と考察

1. クロス-CFRPの曲げ特性

(1) 曲げ強さ

クロス-CFRP (0°)、(0-45°)の厚みに対する曲げ強さの測定結果を図1に示す。図1より、配向角0°のみの積層の場合は、曲げ強さが厚み1mmの場合を除いて、厚みに依存することなくほぼ一定(800MPa弱)であった。配向角が0-45°の積層の場合についても、ほぼ一定(600MPa強)であった。0-45°積層材の積層材の曲げ強さは0°のみの積層材の曲げ強さより20%程度小さいことが分かった。

(2) 曲げ弾性率

クロス-CFRP (0°)、(0-45°)の厚みに対する曲げ弾性率の測定結果を図2に示す。図2より、クロス-CFRP (0°)、クロス-CFRP (0-45°)ともに厚みによらず、それぞれ値が一定であった。クロス-CFRP (0°)は曲げ弾性率が約50GPaであり、クロス-CFRP (0-45°)のそれは40GPa弱であった。クロス-CFRP (0-45°)はクロス-CFRP (0°)に比べ、曲げ弾性率は20%強小さくなることが分かった。

(3) 断面の写真

24層積層したクロス-CFRP (0°)及びクロス-CFRP (0-45°)の断面と表面の写真写真1、2に示す。写真1(a)断面より、クロス-CFRPは、CFRPが網の目状になっているため、炭素繊維は断面から見ると白く波打って見ることができる。黒く見える個所は樹脂で埋まっている。その断面は、空隙

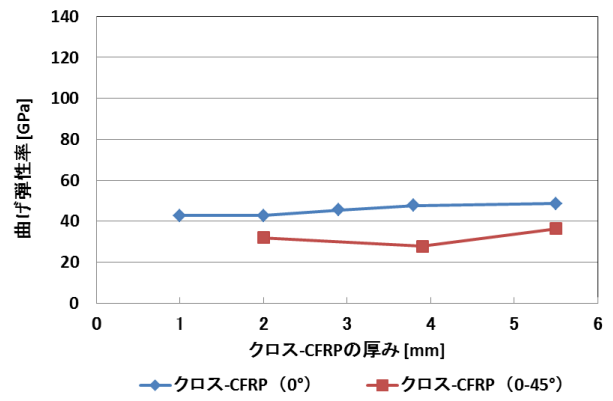
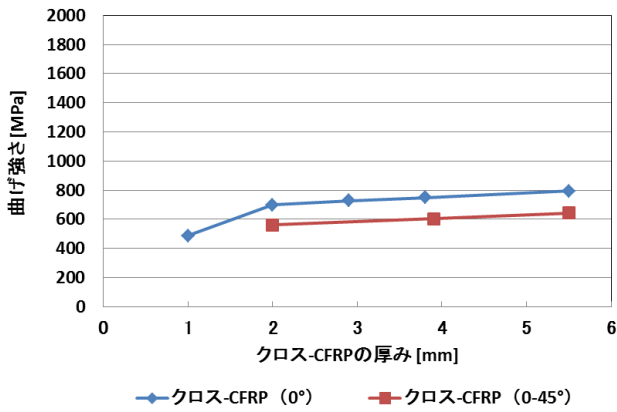
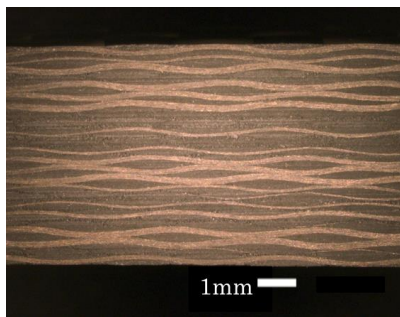
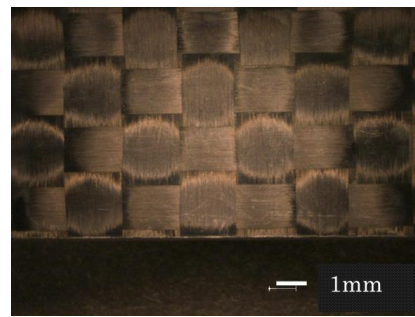


図1 クロス-CFRPの強度に及ぼす厚みの影響 図2 クロス-CFRPの弾性率に及ぼす厚みの影響

がなく24層が積層していることが確認できた。また、写真2(a)より、クロス-CFRP(0-45°)も、クロス-CFRP(0°)と同様に、炭素繊維が白く波打って見ることができるが、炭素繊維の束の数は、半減していた。また、写真1(b)、写真2(b)より、クロス-CFRP(0°)及び(0-45°)の表層は、ござめ編み、うろこ編み等に代表される竹の編組技術に通じる和の印象があり、和風住宅に適する意匠性が示された。

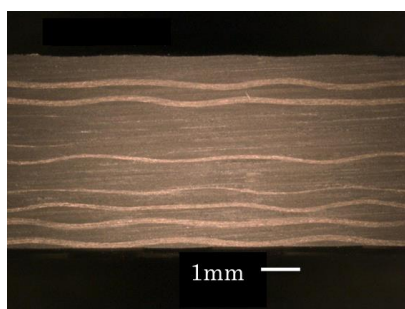


(a) 断面

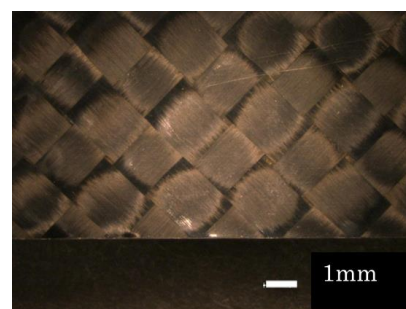


(b) 表面

写真1 クロス-CFRP(0°)



(a) 断面



(b) 表面

写真2 クロス-CFRP(0-45°)

(4) 破断面の写真

クロス-CFRP(0°)及び、クロス-CFRP(0-45°)の破断状態を写真3に示す。写真3(a)より、クロス-CFRP(0°)は、下述するUD-CFRPの場合とは異なり、引張応力の掛かる荷重面の反対面からクラックが発生することが示された。クロス-CFRP(0-45°)においても同様であり、荷重反対面の反対面からクラックが生じ、その伸展段階で構造上弱い部分に広がっていることが分かった。積層法によって、破断状態が異なることが示された。

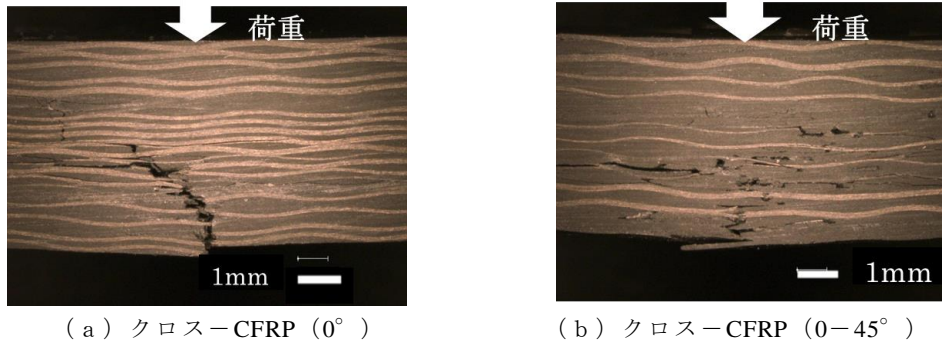


写真3 クロス-CFRP の破断

2. UD-CFRP の曲げ特性

(1) 曲げ強さ

UD-CFRP (0°)、(90°)、(0-90°)の厚みに対する曲げ強さの測定結果を図3に示す。図3より、曲げ強さは炭素繊維の配向性の影響を大きく受けることが分かった。配向角が90°のみのCFRPでは曲げ荷重をすべて構成材であるプラスチックのみで支えることになるため、CFRPの強度が反映されない結果となっている。また、配向角が0°は、荷重を長手方向に配向した炭素繊維で効率的に受けることができるため、最も大きな値を示した。これは、試験片の厚みの増加に対して曲げ強さが低下する傾向にあるのは、試験片の厚みに関係なく支点間距離を一定(80mm；厚み2mmの試験片に適用する値)で行ったことにより圧子と試験片との接触部に応力が集中したことが原因であると考えられた。

上述のクロス-CFRP(0°)は、素材の繊維配向角が0°と90°平面上で交互に繰り返される構造であるため、構成的には、UD-CFRP(0-90°)に近い。そこで、曲げ強度を比較すると、UD-CFRP(0-90°)の方が約20%高いことが分かった。これは立体的な配置を有するクロス材の方が荷重面での有効面積が減少することに起因すると考えられた。

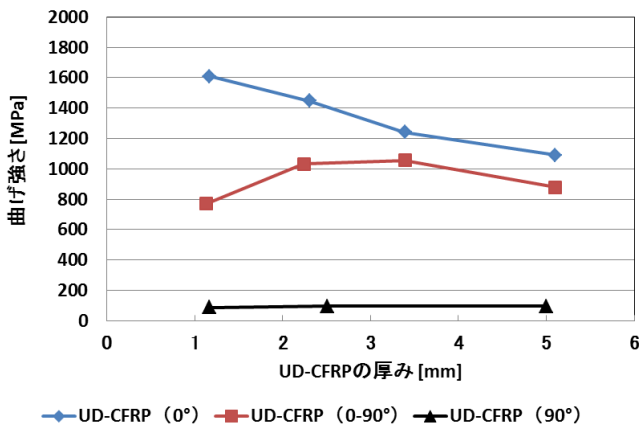


図3 UD-CFRP の曲げ強さに及ぼす厚みの影響

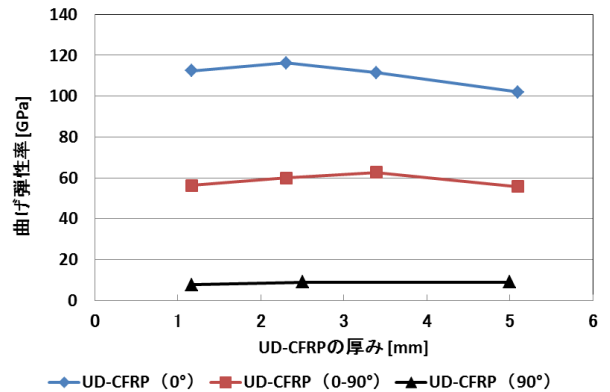
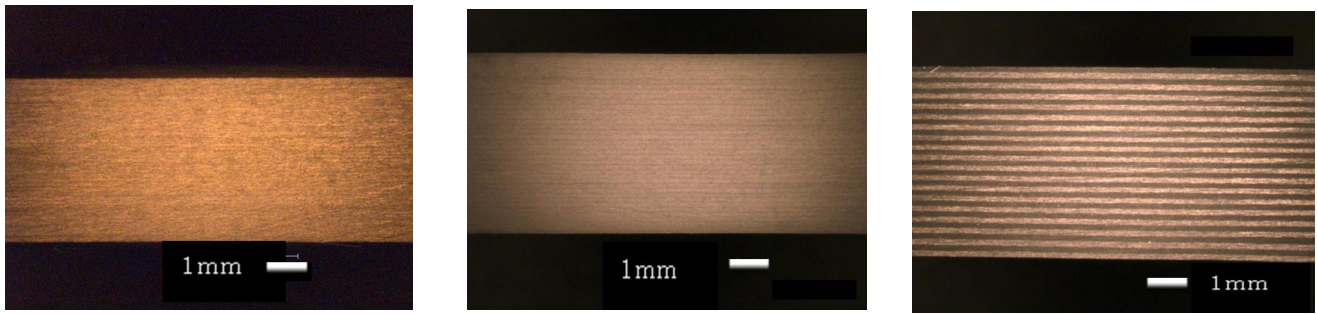


図4 UD-CFRP の曲げ弾性率に及ぼす厚みの影響

(2) 曲げ弾性率

UD-CFRP (0°)、(90°)、(0-90°)の厚みに対する曲げ弾性率の測定結果を図4に示す。図4より、明らかなように、曲げ弾性率に及ぼす繊維配向性の影響は大きい、厚みの影響は小さいと言える。厚みの変化に対する曲げ弾性率変化は若干あるものの、曲げ強さのような変動はない。今回測定した材料系では、0°配向のCFRPでは約110GPa、90°配向のCFRPでは、約10GPaである。0-90°と交互に直交方向に配向したCFRPでは、曲げ弾性率は、0°配向のCFRPと90°配向のCFRPのほぼ中央値(平均値)である約60GPaとなっていることから、UD素材の場合は、曲げ弾性率が、0°配向CFRP材と90°配向CFRP材の並列モデルにより計算できることがわかった。

さらに、上述のクロス-CFRP(0°)の曲げ弾性率の結果と上方から見たときの構成が同じであるUD-CFRP(0-90°)の曲げ弾性率の結果を比較すると、クロス-CFRP(0°)のそれが約50GPaに比べて、UD-CFRP(0-90°)は60GPaであり、20%の差異があることが分かった。



(a) UD-CFRP (0°)

(b) UD-CFRP (90°)

(c) UD-CFRP (0-90°)

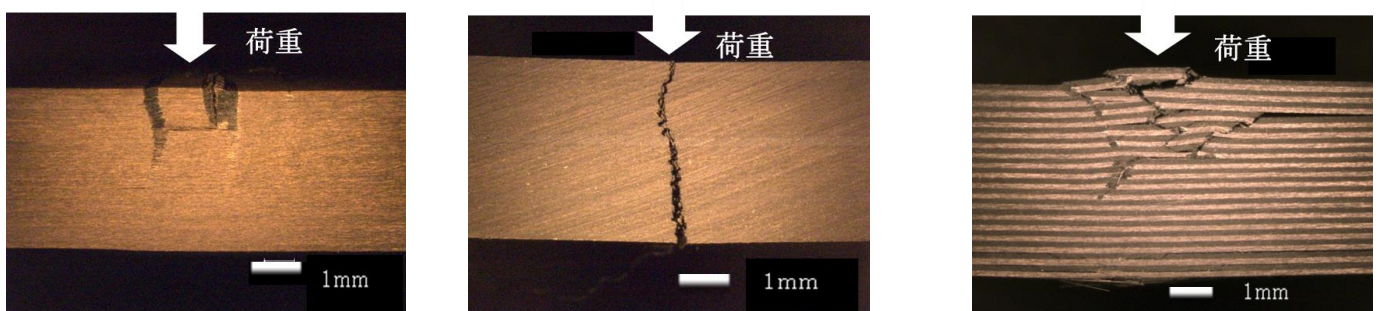
写真4 UD-CFRP の断面

(3)断面の写真

UD-プリプレグを36層積層したUD-CFRP (0°)、UD-CFRP (90°)及びUD-CFRP (0-90°)の断面の写真を写真4に示す。写真4(a)(b)より、UD-CFRPは、CFRPが直線状になっているため、炭素繊維は断面から見ても表面から見ても直線状であった。写真4(c)より、その断面は、空隙がなく36層が積層していることが確認できた。また、写真には示さないが、UD-CFRPの表層は、意匠的観点から評価した結果、直線から構成させるシャープな印象があり、建築家やデザイナーが手掛けるモダン住宅、デザイン住宅に適する意匠であった。

(4)破断面の写真

UD-CFRP (0°)、UD-CFRP (90°)及び、UD-CFRP (0-90°) (いずれも36層積層材)の破断後の断面の状態を写真5に示す。矢印の先端が荷重点を示す。すべての写真から判断できることは、クロス材とは異なり、すべて破壊の起点は荷重点側にあることである。UD-CFRP (0°)では、荷重点付近の表面の繊維が最も大きな圧縮応力を受けることにより座屈変形し、許容応力を超えて破壊が始まり(繊維が折損)、破壊進展の際に途中で層間剥離に転じたものとみることができた。UD-CFRP (90°)では、材料に働く応力が最も大きな2点(荷重点;圧縮応力、厚み方向反対側の荷重点下;引張応力)を結ぶようにクラックが伸びていた。UD-CFRP (0-90°)では、荷重点付近から発生したクラックが、厚み方向に進展しながら、途中で強度の弱い層間に伸びていた。この時に、荷重点と反対側の表面に近い層間でも相関クラックが発生していることも確認された。



(a) UD-CFRP (0°)

(b) UD-CFRP (90°)

(c) UD-CFRP (0-90°)

写真5 UD-CFRP の破断断面

ま と め

愛媛県産業技術研究所に導入されたオートクレーブにより熱成形し、大型試料精密切断機で切断したCFRP板(クロス-CFRP及びUD-CFRP)の3点曲げ試験を行い、以下の結果を得た。

1. クロス-CFRP

クロス-CFRPの積層材においては、曲げ強度、曲げ弾性率ともに厚みによらずほぼ一定の値を有す

ることが分かった。これらの値は繊維の配向角の影響を受け、クロス-CFRP (0-45°) の曲げ強度は、クロス-CFRP (0°) の約 80% であった。同様に、クロス-CFRP (0-45°) の曲げ弾性率は、クロス-CFRP (0°) の約 75% であった。

クロス-CFRP 板の曲げ試験時の破壊は、荷重面の反対の面（下面）から、起こることが分かった。
2. UD-CFRP

UD 素材のみの CFRP 積層材においては、曲げ弾性率は、厚み依存せずほぼ一定である。ただし、クロス材の場合と同様に繊維配向角の影響を大きく受ける。交互に配向角を変えた素材では、力学モデルとして並列モデルを用いることができることが分かった。一方、曲げ強さは、繊維配向性の影響が大きいものの、破壊間際の材料内の応力バランスが繊維配向角により異なるため単純に並列モデルとして考えることは困難であることが分かった。

UD-CFRP 板の破壊は、クロス-CFRP 板の場合とは異なり、荷重面側の圧子接触部付近から生じ、積層の仕方により破断モードが異なることが確認できた。

文 献

- 1) 吉村治・森大介・宇田啓輔・笠森正人・山本孝・永井章裕・忍久保正治・斉藤博嗣・松井醇一：組紐技術を用いた CFRP 製品の開発, 石川県工業試験場研究報告, **58**, 37-38 (2009).
- 2) 森大介・吉村治・宇田啓輔・永井章裕・忍久保正治：組紐を用いた FRP 用立体高性能基布の開発, 石川県工業試験場研究報告, **59**, 35-38 (2010).
- 3) 奥村航・木水貢・長谷部裕之：熱可塑性樹脂複合材料の研究, 石川県工業試験場研究報告, **60**, 39-42 (2011).
- 4) 松永尚徳・西田裕紀・池田慎哉・下原伊智朗・藤井敏男・松葉朗・河野洋輔：CFRTP の低コスト成形加工技術の開発（第 1 報）, 広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告, **54**, 1-4 (2011).
- 5) 松永尚徳・西田裕紀・山下弘之・藤井敏男・大井正巳・松葉朗・河野洋輔：CFRTP の低コスト成形加工技術の開発（第 2 報）, 広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告, **55**, 5-8 (2012).