

博士論文（要約）

連続炭素繊維強化複合材料（CFRP）薄板の
プレス成形性評価手法

瓜屋 祐

近年、構造材料について衝突安全性の向上と軽量化を両立する高比強度化への要求が高まっている。中でもCarbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)が注目されている。CFRPは高強度な繊維と低比重な熱硬化性樹脂を組み合わせ、鋼に対して引張強度が約2倍程度、比重が約4分の1程度と高比強度な材料である。一方で、脆く変形しにくいいため薄板に硬化した後の成形は困難とされてきた。硬化後のCFRP薄板のプレス加工が実現できれば、生産性が高く安価なCFRP部材製造の可能性が広がる。先行研究において100°Cの温度制御とダミー薄板を用いた成形を適用することで硬化後のCFRP薄板のプレス成形の可能性が示されたため、次の段階としてプレス成形性評価手法の確立、変形機構の解明、プレス成形物の特性評価手法の確立が望まれる。本研究では、金属プレスの成形性試験を援用してCFRP薄板が金属と同程度の成形性を持つことを示し、成形性試験中の温間の応力ひずみ特性や試験中の試験片の観察から変形機構を解明し、成形後の成形物の強度が十分であると示すことを目的としている。

対象とする材料は東レ性のプリプレグ・トレカである。繊維はT700SCという引張強度4.9GPa程度のもので、マトリクスの樹脂はエポキシ#2592という汎用の高靱性エポキシである。このプリプレグを求める積層構造に積層して130°Cに加熱し、硬化時間2時間で硬化させて板材を得た。一方向材の層については最外層の繊維方向を0°として、配向角の角度をその配向角の一方向材として表すこととした。クロス材については綾織構造をTWとし、最外層の繊維方向と織物の繊維方向を合わせて積層した。板厚はそれぞれ一方向材が0.1mm、クロス材が0.22mmである。成形性試験に用いた構造は[0/0/0/0/0]、[0/90/0/0/90/0]、[0/90/TW/90/0]、[0/90/0/TW/0/90/0]という4種類の積層構造である。一方向構造と繊維が直交する構造の成形性を確認するためにこれらの構造を対象とした。

金属の成形性試験には、引張試験に代表される機械的特性に関する基礎的試験と、特定の成形に対する成形限界を求める模擬的試験がある。曲げ・深絞り・張出し・伸びフランジの4つの変形のプレス成形性が評価されることが一般的である。産業的にプレス成形可能性を調べる試験は成形四試験と呼ばれ、それぞれの変形に対して曲げ試験、深絞り試験、エリクセン試験、穴広げ試験を行うことで指標を得ることができる。

曲げモーメントによる変形を曲げ変形と呼び、三点曲げ試験などの曲げ先端の割れを評価する試験がある。ただしCFRP薄板の単純曲げでは曲げ内側に圧縮力によるシワが生じる。曲げ先端部の割れ、もしくは層間の剥離を評価するためには、曲げの際に引張荷重を負荷して縮み変形にならないようにする必要がある。そこでFigure 1に示す様に両端を固定して先端部分の破壊を測定する引張曲げ試験を提案した。得られた荷重やストロークは、塑性曲げに関する理論式を導入することで、曲げ先端部分の応力とひずみに換算して曲げ性を評価した。その結果、熱硬化性樹脂のCFRPを100°Cに加熱して成形を行うと、曲げ先端部の繊維方向のひずみが3%程度まで弾性変形し成形荷重が低下した。荷重が低下した後の変形は塑性変形となり形状凍結した。型の制限

から最大で28%程度という曲げ部のひずみを実現した。加熱による樹脂の軟化、拘束の低減効果に加え、外側のダミー薄板による表面の拘束効果によって塑性変形が実現できたと考えられる。金属の曲げ試験では曲げの先端部分に30%程度のひずみが負荷されて割れが生じるため、金属と同程度の曲げひずみを実現できることが確認された。熱可塑性樹脂フィルム層を構造に含むと強度が元の強度に比べて約1~2割程度低下するものの、加熱時に層間が滑ることで見かけの板厚が小さくなり成形性が向上することが確認された。

ブランクの周方向・半径方向ともに引張荷重が負荷される変形が張出し変形である。一般的に金属薄板の張出し性はエリクセン試験によって評価を行う。このエリクセン試験を参考にしてCFRP薄板の張出し試験を行った。張出し性の指標となるエリクセン値は、半球形状のパンチでプレスして破断した際のパンチのストロークである。得られた荷重とストロークを、LippmannとChakrabartyの塑性力学の解析式を用いて、球頭先端部の応力とひずみに算出した。解析式のストロークと接触角に関する方程式は解くことができないため、線形に近似して関係性を求めた。パンチ径20 mm, ダイ穴径23 mmのエリクセン試験においては材料が穴に流入し、耳ができたことから絞りの影響が大きく見られた。そこでGFRPのタブを接着剤で試験片と固定する固定手法を提案し、寸法もパンチ径8 mm, ダイ穴径11 mm と変更して拘束力を高めて試験を行った。[0/90/0/0/90/0]の構造に対して4.62 mmというエリクセン値を示した。金属材料ではパンチの球頭部の半径とエリクセン値が同程度の時に十分な張出し量とされている。CFRP薄板の4.62mmという値は球半径の4mm以上であり、張出し変形が十分に可能である事が示された。

周方向への圧縮・半径方向への引張の変形を伸びフランジ変形と呼ぶ。一般的に金属薄板の伸びフランジ性は穴広げ試験によって評価する。金属の穴広げ試験を参考にしてCFRP薄板の伸びフランジ性を評価し、金属の伸びフランジ性と比較した。伸びフランジ性は穴広げ率を用いて評価される。冷間の穴広げ試験に関して、繊維が直交した構造の限界穴広げ率は、ストロークから換算した値で約30%を示し、温間試験結果は40%以上の値を示した。しかし成形後の穴径から換算した限界穴広げ率を見ると5%~10%となり、3分の1程度までスプリングバックすることが分かった。穴広げの試験片を観察すると、穴広げの曲げの内側に繊維方向に亀裂が進展した。穴縁に進展する亀裂を評価できなかつたため、穴縁に曲げモーメントのかかる試験方法は伸びフランジ性を評価するのに不適切であることが分かった。穴縁に曲げモーメントがかからないように平底パンチを用い、試験片の絞込みや亀裂の進展を抑えるためにGFRP薄板のタブを用いて固定した。成形後の穴径から換算した限界穴広げ率は最大で20%程度となった。自由端の引張変形では穴縁の樹脂と繊維の間の界面や樹脂自体の亀裂が進展しやすく、伸びフランジ性は金属に比べて小さい値となった。

これまで紹介した引張曲げ変形、張出し変形の応力ひずみ特性に関して考察を行い、

温間の単軸引張変形時の応力ひずみ試験の観察から平面方向の変形機構を考察した。引張曲げ試験に関しては曲げの先端部の応力ひずみ線図から特性を評価した。ひずみが5%までの領域で応力が低下する点を持ち、その後、同程度の応力を維持する結果が得られた。Figure 2 に示す曲げ部の断面図のように、破壊時には座屈による繊維の破断、もしくは層の亀裂により全体の破壊に至る。冷間では荷重がほぼゼロまで下がり、亀裂が進展して全体が破壊していると考えられる。温間では荷重が低下せず、樹脂の塑性変形とマイクロクラックの進展により変形していると考えられる。張出し試験に関しては球頭の先端部の応力ひずみ線図から特性を評価した。3%程度のひずみまでは弾性変形を示し、20%以上まで塑性変形して破壊した。弾性変形から塑性変形にモードが変わり、破壊に至るまでは公称応力が低下していた。このことから樹脂の塑性変形が生じて繊維間の樹脂や界面が段階的に破壊し、繊維にせん断応力がかかり、繊維が破断して全体の破壊に至ることが考察として得られた。温間での変形挙動を知るため、電気炉で加熱する温間引張試験を行った。温間引張試験では荷重が振動する結果が得られた。その時の試験中の観察から、繊維は破断せずに金属のネッキングのようなモードで変形することを確認した。成形試験中の応力ひずみ特性の観察と、温間引張試験中の挙動、試験片の観察から、繊維と樹脂が相対的に変形することを確認した。加熱により、樹脂と繊維の摩擦拘束が低減し、スティックスリップの様な変形をしたものと考えられる。

成形後の試験片の強度を評価するため引張曲げ試験後に引張試験を行った。はじめに3 mmの曲げ深さで引張曲げ成形をした。その試験片を沸騰させた熱湯の中に入れて曲げ戻し変形をさせ、GFRP板をタブとして取り付けて引張試験を行った。荷重ストローク関係から公称応力・公称ひずみを換算して応力ひずみ線図とした。引張曲げ試験片の強度は元の強度に比べて7割程度の強度を示した。試験片の断面図から、繊維が破壊されずに樹脂や界面が破壊した場合に強度が残存するという知見が得られた。

本研究をまとめると、金属の成形性試験を援用してCFRP薄板の成形性を評価する手法を提案した。曲げ、張出し性については金属と同程度の成形性を示したが、伸びフランジ性については、自由端がある場合にそこから亀裂が進展しやすいため、成形性が低いことが示された。温間の応力ひずみ特性から、樹脂の軟化、塑性変形、微視的な損傷と層間や繊維／樹脂間の界面の滑りが発生することでCFRPが変形することが示された。引張曲げ成形後の試験片は断面の観察において層間や樹脂の損傷が見られたが、引張試験によって強度が十分発現することが示された。これまでに現象として見られた樹脂の塑性変形や微視的な損傷、界面の滑りを含めたモデル化が今後の理論的な課題となる。

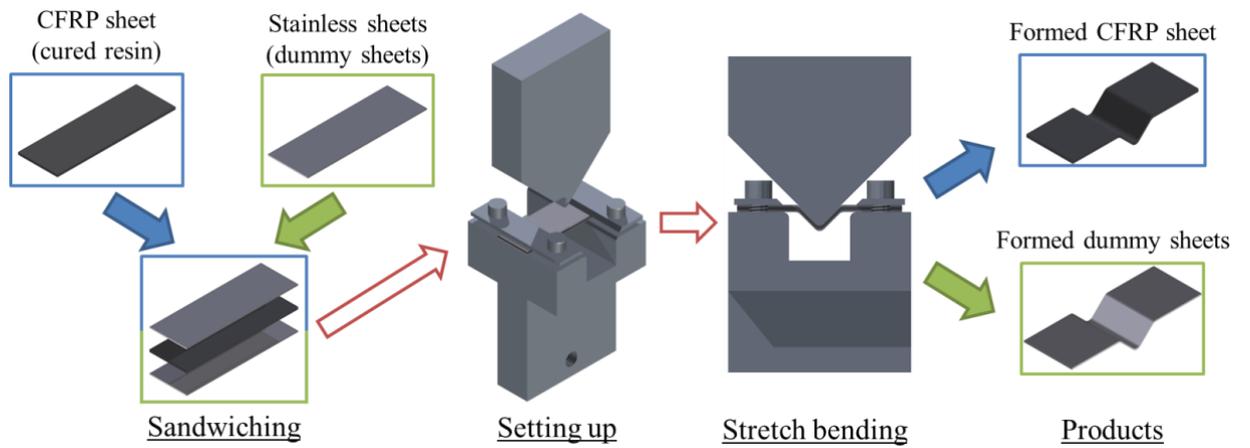


Figure 1 Setup of tensile bending test and image of the die.

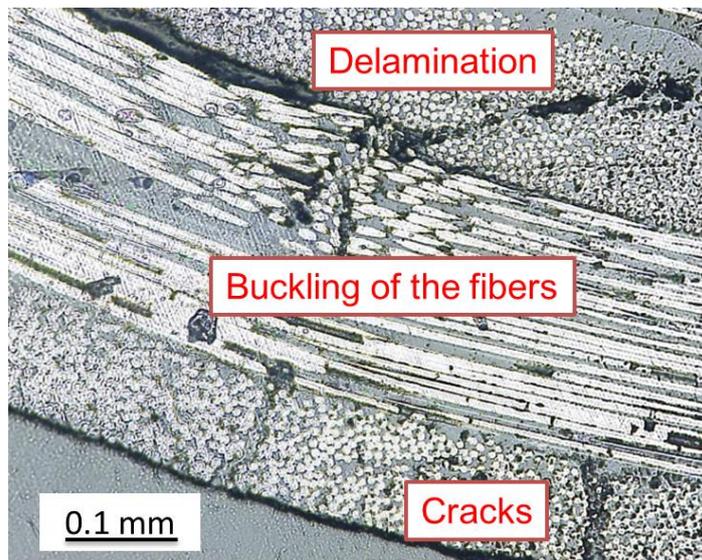


Figure 2 Cross-sectional image of the stretch bent specimen with [0/90/0/0/90/0] structure on delamination, buckling of the fibers, and cracks.