

局所加熱法を用いた炭素繊維強化プラスチックスの 二次成形中における変形メカニズムの解明

東京都立大学 システムデザイン学部 機械システム工学科
教授 小林 訓史
(2021年度 一般研究開発助成 AF-2021017-B3)

キーワード：炭素繊維強化熱可塑性プラスチック，二次成形，局所加熱，曲げ加工

1. 研究の目的と背景

義足の構成要素の1つである義足ソケットは脚の断端を収納し体重を支持すること、さらに生体の動きを義足に伝達する役割があるため、使用者の体型に応じた形状と軽量性、高強度な機械的特性が必要である。このような背景から、義足ソケットの材料として炭素繊維強化プラスチックス(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics)が使われてきた¹⁾。

義足ソケットの作製手順として、まず断端の形状をかたどる採型を行い、その採型をもとに石こうモデルを作製する。そして、その石こうモデルを型としてチェックソケットと呼ばれる義足ソケットを作製し、仮合わせを行う。現在、このチェックソケットは熱可塑性プラスチックスを用いることが多く、実際に装着した後の不具合に対してヒートガンなどで局所加熱することで、形状を修正することができる。一方、チェックソケットは強度が低く、重いという欠点がある。仮合わせが終了すると、本ソケットと呼ばれる日常的かつ長期間使用される義足ソケットを作製する。現在、本ソケットには母材樹脂に熱硬化性プラスチックスを用いた炭素繊維強化熱硬化性プラスチックス(CFRTS: Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Plastics)が用いられている。CFRTSは軽量・高強度である一方、化学反応で硬化するため再成形ができず、義足ソケット自体で体形の変化などに対応する微調整が不可能である。

そこで、これらの欠点を解決する材料として、母材樹脂に熱可塑性プラスチックスを用いた炭素繊維強化熱可塑性プラスチックス(CFRTP: Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics)の活用が注目されている。CFRTPは熱を加えると軟化し、冷却すると固化することから、成形後の微調整も可能となる。したがって、微調整を行うチェックソケットの機能と、軽量で高強度な本ソケットの機能を両方合わせ持った材料といえる。CFRTPを義足ソケットに用いることで仮ソケットの作製を省略できるため、作業工程の短縮に繋がり、製造コストの低減が期待される。

義足ソケットを微調整する際は、修正箇所を局所加熱し、局所的に形状を変化させることが望まれる。CFRTPを局所加熱した場合、母材樹脂が加熱部では溶融し非加熱部では溶融しないため、その状態で二次成形を行うと、加熱/非加熱部で変形に対する層間すべり量が異なる。そうすると、加熱/非加熱境界部で繊維が留まり、面外うねりや層

間はく離、繊維破断などが発生すると予想される。しかし、このようにCFRTPを局所加熱した場合の変形挙動についての研究は見当たらない。

本研究では、CFRTPの局所加熱における変形挙動を調査することを目的とする。予備加熱として局所加熱後、V曲げ成形を実施し、曲げ成形に伴う構造変化や損傷に着目する。成形条件として局所加熱する範囲や繊維体積含有率(Volume Fraction of Fiber: V_f)を変化させ、そのときの変形挙動を調査する。

2. 実験方法

2・1 供試材

本研究では、強化繊維に炭素繊維 TORAYCA T700SC-12000(中弾性率・高強度・フィラメント数12000本、東レ製)を用いた平織基材(CK6261C、東レ製)、母材樹脂に熱可塑性ポリアミド6(Polyamide 6: PA6)(アミランCM1017、東レ製)を使用した。

PA6樹脂については、粒径1mm程度のペレットを、粉碎機(WB-1、大阪ケミカル製)を用いて最大出力で粉碎しパウダー状にした後、JIS Z 8801-1(2006)に準拠した試験用ふるい(目開き425μm、東京スクリーン製)で選別した。

2・2 加熱圧縮成形

CFRTP積層板は、ホットプレス機を用いた加熱圧縮成形で作製した。成形方法として比較的簡便な成形方法であり、良好な含浸状態が得られるPowder法を用いた。金型にパウダー状樹脂と平織基材を交互に配置した後、ホットプレス機に設置し、加熱圧縮することでCFRTP積層板を作製した。作製した積層板の寸法は150mm×150mmである。

CFRTPの V_f がV曲げ成形時の変形挙動に対して及ぼす影響について調査するために、高含浸率かつ低 V_f のCFRTP積層板を作製した。平織基材に対して1層ずつ加熱圧縮成形を行った予備含浸基材とパウダー状樹脂を交互に配置し、加熱圧縮成形することで作製した。以下、作製したCFRTP積層板で予備含浸を行っていないものをRef、予備含浸基材を用いたものをPIと呼ぶ。

2・3 繊維体積含有率測定

作製した積層板の実 V_f を測定するために、JIS K 7075(1991)に準拠した燃焼試験を実施した。

V_f は(1)式より算出した. (1)式において W_f は CFRTP 積層板中の炭素繊維の質量分率, ρ_{CFRTP} は CFRTP 積層板の密度である. W_f , ρ_{CFRTP} はそれぞれ(2), (3)式より算出される. (2)式において m_{burned} は燃焼試験後の PA6 を熱分解させ取り除いた炭素繊維の質量, m_{dry} は空气中における平板 CFRTP の質量である. また, (3)式において m_{water} は水中における CFRTP 積層板の質量である. (3)式はアルキメデスの原理に基づき, 乾燥質量 m_{dry} , 水中質量 m_{water} を測定することで ρ_{CFRTP} を算出している.

$$V_f = W_f \times \frac{\rho_{\text{CFRTP}}}{\rho_f} \quad (1)$$

$$W_f = \frac{m_{\text{burned}}}{m_{\text{dry}}} \times 100 \quad (2)$$

$$\rho_{\text{CFRTP}} = \frac{m_{\text{dry}}}{m_{\text{dry}} - m_{\text{water}}} \times \rho_{\text{water}} \quad (3)$$

(V_f : 繊維体積含有率 [vol%], W_f : 繊維質量含有率 [mass%], ρ_{CFRTP} : 平板 CFRTP 密度 [g/cm^3], ρ_f : 炭素繊維密度 [g/cm^3], m_{burned} : 燃焼後炭素繊維質量 [g], m_{dry} : 平板 CFRTP 乾燥質量 [g], m_{water} : 平板 CFRTP 水中質量 [g], ρ_{water} : 水の密度 [g/cm^3])

2・4 V曲げ成形

二次成形時における連続繊維織物 CFRTP の変形挙動を調査するために, V曲げ成形を行った. 試験片は2・2節で得られた CFRTP 積層板からダイヤモンドキンバレー(マルト一製)を用いて $150 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ に切り出した. 試験片の呼称を(成形方法) - (予備加熱方法)とする. サンプル数はすべての条件に対して3本である.

本研究では, CFRTP を V曲げ成形するときの予備加熱として局所加熱を行った. 局所加熱範囲は試験片中央部 15 mm , 30 mm , 45 mm とした. ホットプレス機に局所加熱治具を設置し, 300°C で 300 s 局所加熱した. 局所加熱治具の温度を計測するため, 局所加熱治具に熱電対を設置し, 加熱時の温度を計測した. 以下, 局所加熱範囲が 15 mm のものを LH15, 30 mm のものを LH30, 45 mm のものを LH45 と呼ぶ.

試験片中央部を局所加熱した場合, 試験片中央部の樹脂は溶融するが, 局所加熱範囲外の試験片端の樹脂は固化したままである. その状態で V曲げ成形を行うと, 加熱部では曲げに伴う層間すべりが生じるが, 非加熱部では樹脂が固化したままで層間すべりは発生しづらいため, このことが面外うねりや層間はく離, 座屈の原因となると考えられる. つまり, 層間すべりが試験片端においても生じる場合, V曲げ成形時の欠陥は発生しづくなると考えられる. そこで本研究では, 予備加熱として局所加熱すること以外

に, 試験片全面を加熱した場合の変形挙動についても調査した. 全面加熱はホットプレス機に試験片を配置し, 試験片全体を加熱した. 以下, 全面加熱した試験片を WH と呼ぶ.

V曲げ成形時における試験片の温度低下を防止するため, デジタル温度調節器 (TC-1000A, アズワン製) とシートヒーターを用いて, V曲げ金型を予め加熱した. 金型の加熱はデジタル温度調節器を最大出力に設定し, 600 s 行った. V曲げ成形前の金型温度をサーモグラフカメラ (FLIRi7, FLIR SYSTEMS 製) で測定すると約 30°C であった.

治具を加熱後, 予備加熱した試験片を V曲げ治具に配置し, 荷重を負荷した. 局所加熱後から試験機に配置されるまでの時間は約 10 s 程度である. 成形荷重は 6 kN , 成形時間は 20 s , 保持時間は 300 s である.

2・5 断面観察

成形後の V曲げ試験片の繊維束の損傷, 繊維配列, 樹脂・繊維流動を確認するため断面観察を行った. 断面にエメリーペーパー (#180~2000, 理研コランダム製) を用いて研磨した後, パフ盤とアルミナスラリー(アルミナ粒径: $\sim 0.3 \mu\text{m}$)を用いて鏡面研磨を施した. 鏡面研磨が施された断面をズームレンズ (VH-Z100R, KEYENCE 製)を取り付けたマイクロスコープ (VHX-970F, KEYENCE 製)を用いて撮影した. 倍率は繊維1本が確認できる程度とし, 得られた断面画像は画像処理ソフトを用いて連結した. 断面画像は, V状頂点から加熱/非加熱境界部を含む範囲で撮影した.

3. 実験結果および考察

Fig.1, Fig.2 に Ref-LH15, Ref-LH45 のときの加熱/非加熱境界部付近の断面画像を示す. Ref-LH15, Ref-LH45 とともに面外うねりが加熱/非加熱境界部で観察され, その周辺の繊維には面外うねりに伴う繊維破断が観察された. 損傷の種類については, Ref-LH15, Ref-LH45 において局所加熱範囲の大きさでは差は見られなかった. また, Ref-LH15, Ref-LH45 ともに試験片全体で層間はく離が観察された.

Ref-LH15, Ref-LH45 ともに試験片全体に層間はく離が観察された原因として, 試験片の V_f が低く層間の樹脂量が少なかったことが考えられる. また, Fig. 3 に PI-LH30 のときの加熱/非加熱境界部付近の断面画像を示す. PI-LH30 の断面画像を観察すると, 加熱/非加熱境界部付近で層間はく離は観察されず, 試験片全体でも層間はく離の発生は少なかった. ここで, Fig.4 に CFRTP_Ref と CFRTP_PI の実 V_f 測定結果を示す. Fig.4 より, 実 V_f は CFRTP_Ref, CFRTP_PI それぞれ $66.9 \pm 3.7 \text{ vol\%}$, $38.7 \pm 0.6 \text{ vol\%}$ であった. このことから, CFRTP_PI は CFRTP_Ref と比べて低 V_f であり, 層間の樹脂量が多いことが分かる. このことから層間の樹脂量が増加すると, 層間はく離が抑制される傾向が示された. また, Fig.4 より, 面外うねり

が加熱/非加熱境界部で観察された。

面外うねりは CF RTP_Ref, CF RTP_PI とともに予備加熱として局所加熱した場合に加熱/非加熱境界部付近で観察された。局所加熱時に面外うねりが発生した原因として、以下のことが考えられる。試験片を V 曲げ成形する場合、層間でせん断応力が発生する。このせん断応力を打ち消すよう層間すべりを伴いながら試験片が変形する。しかし、局所加熱した場合は、加熱部では樹脂が溶融しているため層間すべりが発生するが、非加熱部では樹脂が固化したままのため層間すべりは発生しない。したがって、加熱/非加熱境界部で繊維が留まり、面外うねりが発生したと考え

られる。

また加熱/非加熱境界部付近での面外うねりの原因を調査するため、予備加熱を試験片全体に行った PI-WH のときの V 曲げ後試験片と加熱/非加熱境界部付近の断面画像を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、加熱/非加熱境界部付近には面外うねりは発生していないかった。局所加熱の場合は境界部での繊維の留まりが原因で面外うねりが発生していた一方で、全面加熱では層間すべりが試験片端部でも発生するため繊維の留まりが発生せず、面外うねりが発生しなかったと考えられる。これは試験片端部が階段状になつてることからも確認された。

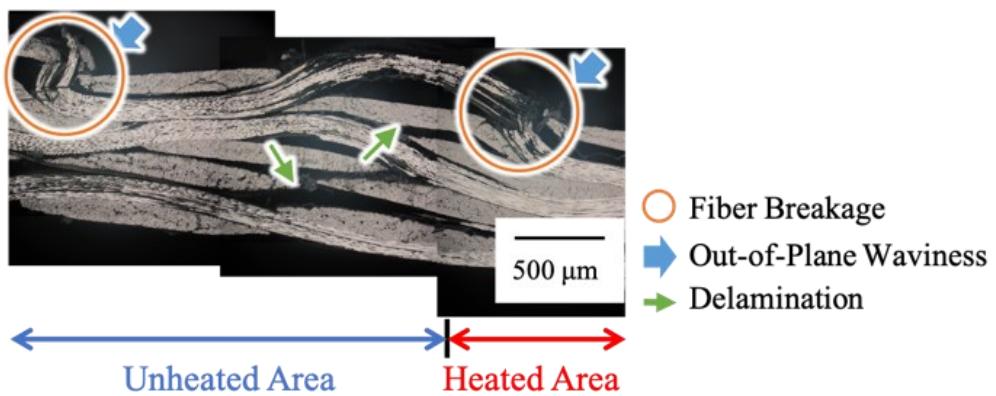


Fig. 1 Cross-section observation of specimen (Ref-LH15).

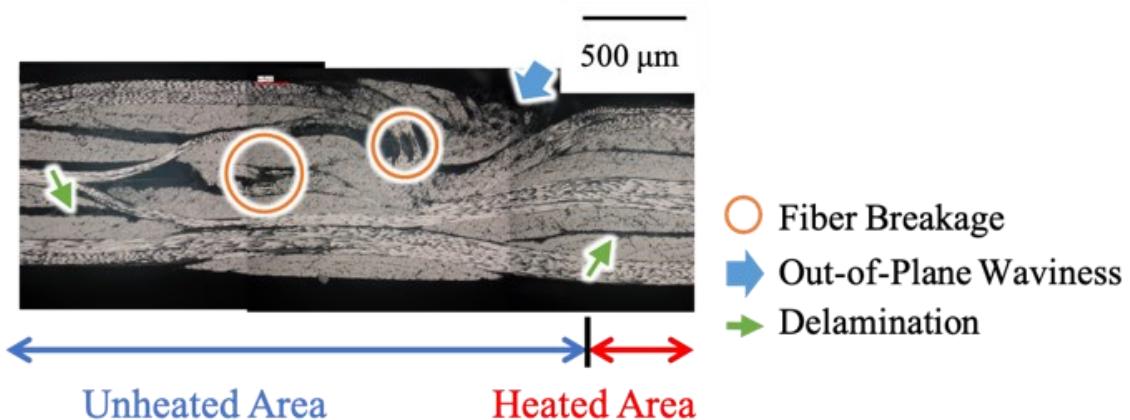


Fig. 2 Cross-section observation of specimen (Ref-LH45).

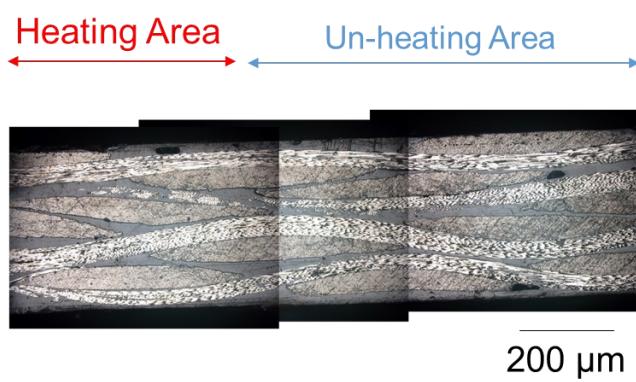


Fig. 3 Cross-section observation of specimen (PI-LH30).

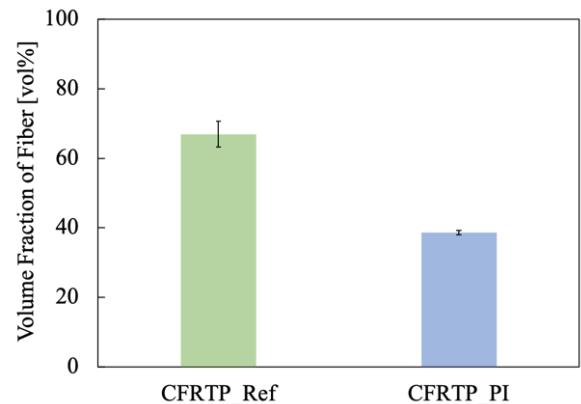


Fig. 4 The measurement results of volume fraction of fiber.

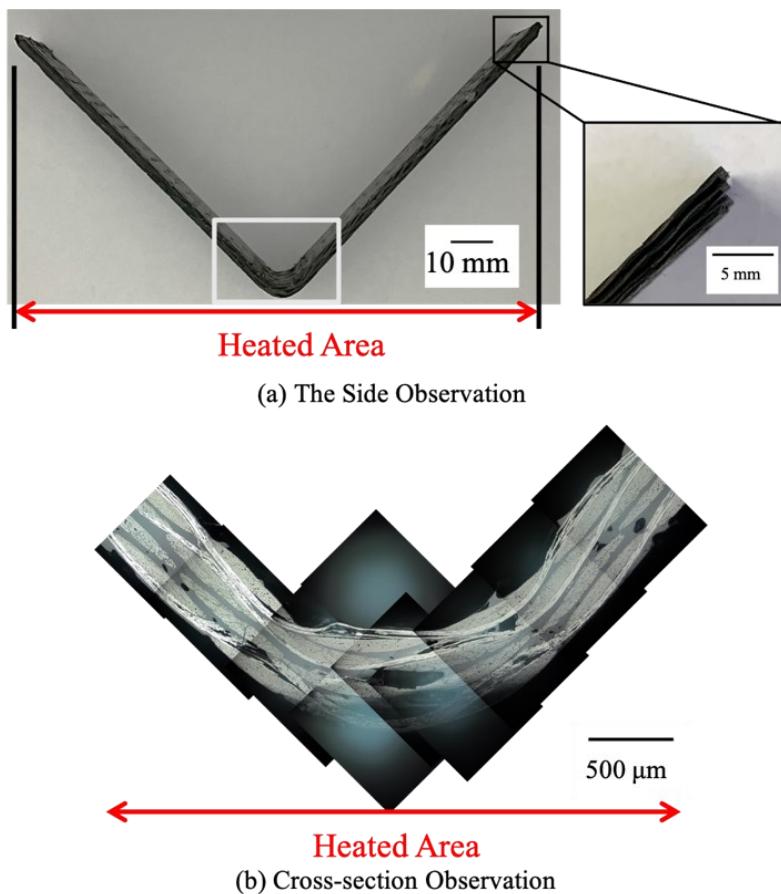


Fig. 5 Cross-section observation of specimen (Ref-w/oTC-LH15).

4. 結言

CFRTP_Ref 試験片に対して予備加熱として局所加熱した後, V 曲げ成形を行った結果, 加熱/非加熱境界部で面外うねりが観察され, 試験片全体で層間はく離が観察された. 層間はく離については CFRTP_PI 試験片との比較で, 層間の樹脂量が関与している可能性が示唆された. 面外うねりについては加熱/非加熱境界部での纖維の留まりが影響している可能性が示唆された.

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団による一般研究開発助成(AF-2021017-B3)の助成を受けて実施された. ここに深く謝意を表する.

参考文献

- 1) Nurhanisah M. H., Saba N., Jawaid M., Paridah M. T.: *Green Biocomposites*. Springer. (2017), 141.