

CFRTP を活用した超軽量下肢装具の開発（第3報）

—臨床評価用試作と物性試験及びシミュレーションによる評価—

千原 健司、仙石 倫章、道家 康雄、萱岡 誠

Development of the ultralight lower extremity orthosis using Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (III)

Prototype for clinical evaluation, and evaluation of physical properties and simulation

Kenji Chihara, Tomoaki Sengoku, Yasuo Doke and Makoto Kayaoka

軽量、高強度、高剛性といった特長をもつ熱可塑性炭素繊維複合材料（以下、「CFRTP」）は、再加熱により材料が軟化し再成形できることから、人体に合わせた調整を必要とし軽量化が望まれる装具に有効と考えられる。

昨年度は、本材料を用いた装具を開発する体制と設備を整備し、基本的な設計・試作が可能であることを確認した。本年度は、昨年度の課題を踏まえて、本材料を活用した臨床評価用の下肢装具を試作し、これを物性試験及びシミュレーションにより評価した。

1. はじめに

炭素繊維は軽くて強く、鉄の約4分の1比重であり、10倍の比強度があると言われている。特に近年、自動車等へ適用され始めた CFRTP は、再加熱により材料が軟化し再成形できることから、人体に合わせた調整を必要とし軽量化が望まれる装具に有効と考えられる。

昨年度は、本材料を用いた装具を開発する体制と設備を整備し、基本的な試作が可能であることを確認し、また、CAE を用いて効率的に設計するために、シミュレーションに必要な物性値取得試験を実施し、標準試験片の曲げ特性試験によりシミュレーションの精度を評価した¹⁾。しかし、試作での成形時におけるシワの発生や、シミュレーションでの物性値取得試験の煩雑さに加え、装具形状での定量的な評価方法の確立が課題として残された。

本年度は、本材料を活用した装具がリハビリ等に有効であることを確認する臨床評価のために、成形シワの無い試作品を製作し、これを物性試験および簡易化したシミュレーションにより評価した。

2. 実験

2.1 評価用下肢装具

試作品の成形は昨年度と同様に、IR オープンで材料を加熱し、ダイヤフラム成形機（MEMBRA6, 独 Ring Maschinenbau GmbH 製）で行った¹⁾。昨年度の試作では、かかと部分の湾曲部にシワが発生する課題があった（図1(a)）。これは材料を加熱成形する際に、樹脂は型に合わせて流動するが、炭素繊維は主に織物の織り目が直交から傾くことにより型に賦形するだけであり、かかと部分の湾曲部に移動しきれなかった炭素繊維が折り重なることが大きな原因と考えられる。

そこで今回は、ふくらはぎ部分で接合できるように予め展開した形に材料を切断し、成形時にふくらはぎ部分で貼り合わすことによりシワの軽減を図った。試作品写真を図1(b)に示す。図よりシワがないことが確認で

きる。なお、今回の臨床評価の主目的は材質評価であるため、既製品のポリプロピレン製 AFO（パシフィック サプライ(株) オルトトップ AFO LH）とほぼ同形状での比較とし、材料は、炭素繊維が 3K クロス材、マトリックス樹脂が PA6 の板材（Bond-Laminates 製 TEPEX dynalite202、厚さ2mm）を使用した。

2.2 物性試験

物性試験は、コンパクト油圧加振機（株式会社島津製作所 EHF-JF20kNV-50-A10）を用いて、強度試験を行った（図2）。ふくらはぎ部分を試験機と連結し、底屈方向（鉛直下向き）に0.1mm/sの速度で45mmまで位置制御により変位させ、荷重を計測した。

試験機の詳細については、同試験機により、剛性評価及び疲労耐久評価を既製品と比較した結果を別に報告²⁾する中で記載しており、本報では省略する。



図1 (a)昨年度の試作品 (b)評価用の試作品



図2 強度試験の様子（変位45mm,荷重約400N時）

2.3 シミュレーション評価

シミュレーションは、昨年度と同様にダッソー・システムズ・ソリッドワークス社の Solidworks Simulation Premium2014 を使用した。

昨年度は、シミュレーションに必要な物性値を取得するために、引張特性試験 (JIS K7164)、面内せん断特性試験 (JIS K7019)、面内圧縮特性試験 (JIS K7018) を実施したが、時間とコストが掛かるため、材料を変更する度に実施するのは困難であると判断した。

今回、シミュレーションに必要な物性値として、繊維方向に対して 0° に切り出した試験片と、45° に切り出した試験片の曲げ特性試験 (JIS K7017) から得た物性値を用いて、昨年度に使用した材料と比較することにより推定した (表1)。

また、シミュレーション内のモデルは、物性試験と比較するため、試験に使用する試作品と同形状とし、ふくらはぎ部分に 0~400N の荷重を掛けて計算した。

表1 シミュレーションに用いた物性値

物性値	昨年の材料 (CF/PA66)	今回の材料 (CF/PA6)	単位	備考	
曲げ特性試験により得た物性値	0° 材の曲げ弾性率	49.4	51.5	GPa	JIS K7017による(5点平均値、σ=0.9)
	45° 材の曲げ弾性率	8.1	10.9	GPa	JIS K7017による(5点平均値、σ=0.6)
	0° 材の曲げ強さ	721.1	809.9	MPa	JIS K7017による(5点平均値、σ=58.8)
シミュレーションに必要な物性値	XY方向の引張り弾性率	51.7	53.9	GPa	0° 材の曲げ弾性率の比により計算
	XY面内のポアソン比	0.0453	0.0453		複合材の基本構成が同じであり同値
	XY面内せん断弾性率	1.324	1.782	GPa	45° 材の曲げ弾性率の比により計算
	XY方向の圧縮強さ	742.1	833.5	MPa	0° 材の曲げ強さの比により計算
	XY方向の引張り強さ	662.5	744.1	MPa	0° 材の曲げ強さの比により計算
	XY面内せん断強さ	127.5	171.6	MPa	45° 材の曲げ弾性率の比により計算

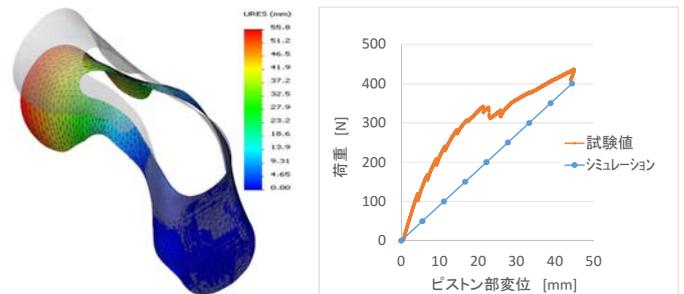


図3 (a)荷重 400N 時の変位 (b)連結部の変位-荷重曲線

3. 結果及び考察

3.1 試験結果

荷重 400N 時の変位シミュレーションの結果を図3 (a) に示す。同様の条件下での試験写真 (図2) と比較すると、くるぶしの湾曲部が左右に広がって変位する様相が再現されている。また、試験とシミュレーションにおける連結部分の変位-荷重曲線を図3 (b) に示す。変位が小さい場合には試験値の方が大きい荷重となるが、最大変位時では、互いの荷重に大差がないことを確認した。

3.2 考察

荷重 400N 時の安全率の分布を図4 (a) に示す。くるぶしの湾曲部がもっとも安全率が低く、内側層の最小主応力 (圧縮応力) がもっとも影響している (図4 (b))。しかし、実際の試験では、ふくらはぎの接合部分が破壊していた (図5 (a))。これは、内側層の最大主応力 (引張応力) がこの部分で最も高く (図5 (b))、接合強度の不足により、この箇所の破壊が先に始まったものと考えられる。なお、図3 (b) の変位-荷重曲線において、試験値の荷重が一時的に下がる変位時に、徐々に破壊が進んでいったものと推測される。

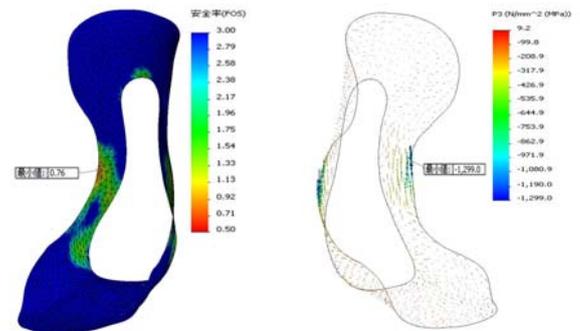


図4 (a)安全率の分布 (b)内側層の最小主応力

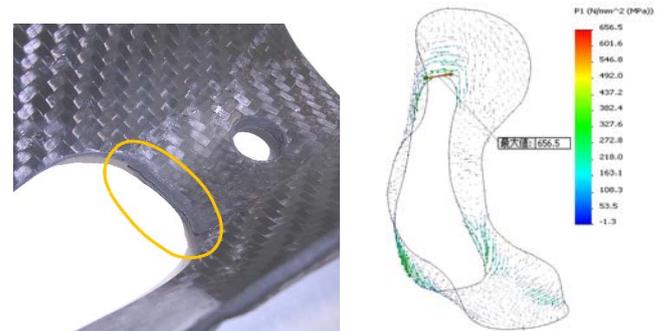


図5 (a)破壊箇所 (b)内側層の最大主応力

【謝辞】

本研究開発は、平成 26 年度より株式会社今仙技術研究所ならびに岐阜大学医学部附属病院と共同で行っており、株式会社名光ブレースの協力を受けながら実施しています。共同研究者ならびに関係者の皆様に感謝します。

【参考文献】

- 1) 千原ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.3, pp33-38, 2015
- 2) 仙石ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4, pp43-44, 2016

4. まとめ

- 1) 評価用のシワが無い CFRTP 製下肢装具を製作した。
- 2) 評価用試作品を物性試験および簡易化したシミュレーションにより評価した結果、変位および破壊の予測にシミュレーションが活用できることを確認した。

現在、試作の臨床評価を共同研究先の岐阜大学病院にて実施しており、その結果と今回の手法を踏まえて、今後、新たな CFRTP 製下肢装具を開発する予定である。