

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20747

研究課題名（和文）長下肢装具用の高意匠でしなやかなCFRP製板ばね・弾性ヒンジの設計開発と評価

研究課題名（英文）Design evaluation of CFRP leaf spring/elastic hinge employed for knee ankle foot orthosis

研究代表者

名波 則路（Nanami, Norimichi）

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：20755524

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、積層板の一部を波状にし、局所的にばね定数を低下させて1自由度を持たせた波状積層板の曲げ特性を解析上で取得することを目的とした。まず、実験における曲げ特性と解析における曲げ特性を比較するため、2種類の波状積層板を作製し、実験的に曲げ特性を取得した。次に、平板および波状積層板の解析モデルを作成し、曲げ特性に関する解析をおこなった。そして、解析モデルの妥当性を検証した上で解析上の平板および波状積層板の曲げ特性を比較した。その結果、波状積層板は、波状形状を任意の方向に付与することで剛性変化をもたらすので、下肢装具設計においても、形状の異方性をうまく活かす設計ができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CFRP（炭素繊維強化プラスチック）の適用範囲が拡大され、デザイン性や快適性をもつ福祉機器の開発が促進できる。また、コストの低減と試作時間の短縮が期待できる数値解析実験を利用した設計手法を提案することで、CFRP製ばねに注目を浴び、CFRPばね製造におけるハイサイクルな生産システムの構築が促進される。さらに、CFRPのもつ軽量・高弾性な材料特性を活かして、動力補助を必要としない無動力製品の開発を行うことが可能で、高齢者への歩行アシスト機器や障がい者の方への補装具、介護ロボットのアーム部分、肉体的負担軽減のための作業アシスト機器などの医療福祉分野で当該研究が応用可能である。

研究成果の概要（英文）：We are able to predict the bending behavior of the corrugated composite leaf spring by computational simulation. For investigating the advantage and feasibility of the corrugated composite leaf spring, the bending behavior of the corrugated plate was compared to that of the flat plate in computational simulation. The simulation result of the corrugated plate with an arc in the longitudinal direction agreed extremely well in bending rigidity and strength with its experimental result. A good agreement between the experiment and the simulation of the corrugated plate with an arc in the transverse direction was assured by reducing the interlaminar strength of cohesive behavior in computational simulation. These results validated the computational model to predict the bending behavior of a corrugated plate. It was concluded that geometric anisotropy of the corrugated composite leaf spring could be useful in the design of lower limb orthoses.

研究分野：材料力学

キーワード：下肢装具 板ばね 波状 CFRP FEM 曲げ特性

1. 研究開始当初の背景

交通事故や転落などにより脊髄を損傷すると、脳からの神経信号が途絶え、運動麻痺が生じる。脊髄損傷者の多くは運動麻痺によって車いすでの生活を余儀なくされ、骨・筋萎縮、循環系疾患や生活習慣病の発現リスクの増加を招く。日本国内では毎年約 5,000 人が新たに脊髄損傷と診断され、受傷者総数は 10 万人以上にのぼると報告されている。脊髄損傷に伴う医療費は身体障害そのものへの充当に加えて、車いす生活上の諸制約や二次障害の発生などの大きな潜在的社会損失をはらんでおり、医療の充実とともに脊髄損傷者の社会的支援は急務の課題とされる。また、Figure 1 に示すように脊髄損傷者の医療費と介護費を合わせた費用総額は年間 3,480 億円と推計され、大きな社会的損失となっている。

脊髄損傷者の身体機能を維持するためには装具を使った歩行リハビリが重要であり、装具歩行を行うことで麻痺した神経や筋肉の萎縮防止、生活習慣病などのリスク抑制が期待できる。しかし、従来の装具は金属とプラスチックを主構造材とした機械的な製品であるため、耐久性や重量、価格などの課題がある。また、装具装着・脱着時に脊髄損傷者は身体的・精神的な負担を強いられ、加えて現在使用されている装具には『使ってみたい』と思わせるような意匠性の高い装具が存在しない等の背景がある。

現在、下肢装具の足底部関節では、動きを制限するのが一般的であり、足底部分には硬質素材が使用されており足部関節の可動性を阻害している。しかし、足部関節角度可動域の低下は転倒の原因となることも明らかにされているため、関節の自然な背屈を妨げないことが重要である。そのため、健常者と同じ動きが再現可能なばね関節機構が求められている。そして、下肢装具の構造部材に適用されている炭素繊維強化複合材料(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)は大きな弾性変形および比強度を有していることからばね関節機構に適用することは有用だと考えられる。しかし、CFRP を用いてばね関節機構を十分に再現した事例はないため、ばね関節機構に適用可能な板ばねを再現する。

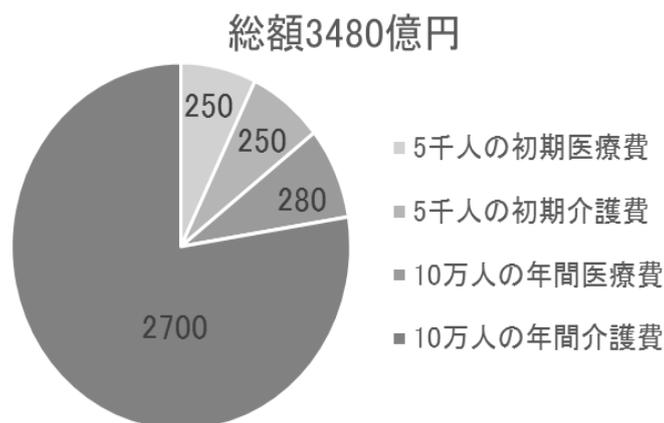


Figure 1 脊髄損傷の社会的損失費用

2. 研究の目的

下肢装具は注文設計であるため、使用者の体格に適した形状を個別に検討することは困難である。そのため、本研究では、積層板の一部を波状にし、局所的にばね定数を低下させて1自由度を持たせた波状積層板の曲げ特性を解析上で取得することを目的とした。まず、実験における曲げ特性と解析における曲げ特性を比較するため、2種類の波状積層板を作製し、実験的に曲げ特性を取得した。次に、平板および波状積層板の解析モデルを作成し、曲げ特性に関する解析をおこなった。そして、解析モデルの妥当性を検証した上で解析上の平板および波状積層板の曲げ特性を比較した。

3. 研究の方法

(1) 試験片作製

初めに、母材樹脂にエポキシ樹脂を用いた平織プリプレグ(W-3101/Q-112J, 帝人株式会社製)を7層積層した。そして、円弧を5つ付与できるようにオートクレーブ成形をおこない、厚さ1.5mm、円弧の半径2.5mmの波状CFRP積層板を作製した。成形条件は成形温度130℃、成形時間3h、成形圧力0.3MPaである。成形した積層板から長さ160mm、幅25mmおよび試験片長手方向に対して繊維が0/90となるように切り出して試験片を得た。この時、試験片短手方向に円弧が付

くようにしたものを試験片_T、試験片長手方向に円弧が付くようにしたものを試験片_Lと記す。

(2) 4点曲げ試験方法

本試験ではテンシロン万能試験機(RTC-1350A, ORIENTEC 社製)を用いた。試験速度は5mm/min, 荷重レンジは5kN, 支点間距離は80mm, 荷重間距離は40mmとした。また, 試験片中央部での変位を測定するために読み取り顕微鏡を用いた。荷重-変位線図における弾性域内の傾きから曲げ剛性を算出した。

(3) 解析モデル

本研究では有限要素解析ソフトにAbaqusを使用し4点曲げ解析モデルを作成した。解析モデルはシェル要素を用いて平板, 試験片_Tを模擬したモデル(以後, 試験片_Tモデル)および試験片_Lを模擬したモデル(以後, 試験片_Lモデル)を, 剛体要素を用いて荷重ピン, 支持ピンをそれぞれ作成した。それらをアセンブリすることで4点曲げ解析モデルを作成した。平板の寸法はモデルの軸方向に対して長さ160mm, 幅25mm, 厚さ1.5mmとし, 試験片_Tモデル, 試験片_Lモデルはそれぞれ試験片_Tおよび試験片_Lの寸法に合わせた。平板, 試験片_Tモデルおよび試験片_Lモデルの材料には一方向CFRPを適用させており, 積層数を14層, 積層構成を $[0/90]_7$ とした。また, 繊維・樹脂破壊を模擬するためにHashin損傷発生進展基準を用いた。これらに必要な物性をTable 1に示す。試験片_Tモデルでは, 実験において層間破壊が見られたため, 層間破壊を模擬する必要がある。そのため, 積層構成が $[0/90]$ のシェル要素を7層積層し, シェル間の相互作用として粘着接触挙動を定義し, その物性をTable 2に示す。これにより, 粘着層を模擬し, 層間破壊を取り入れた解析モデルを作成した。荷重ピン, 支持ピンの寸法は半径3mm, z軸方向の長さを25mmとした。荷重ピンに平板, 試験片_Tモデルおよび試験片_Lモデルそれぞれy軸方向に強制変位とした。支持ピンは全てのモデルで完全固定とした。ただし, 平板, 試験片_Tモデルおよび試験片_Lモデルと両ピンの相互作用として接触を定義し, 接触時に摩擦力が生じ, 摩擦係数を0.168とした。

Table 1 Mechanical properties and fracture energy of UD-CFRP

UD-CFRP					
E_1 [GPa]	100	X_T [MPa]	2280	G_{β} [N/mm]	12.825
E_2 [GPa]	7.25	X_C [MPa]	1440	$G_{\beta c}$ [N/mm]	8.1
ν_{12}	0.27	Y_T [MPa]	57	G_m [N/mm]	0.1285
G_{12} [GPa]	5.07	Y_C [MPa]	228	G_{mc} [N/mm]	0.513
G_{13} [GPa]	5.07	S_2 [MPa]	71		
G_{23} [GPa]	5.07	S_T [MPa]	35.5		

Table 2 Interface properties of cohesive behavior

cohesive					
T_n [MPa]	45	G_n [N/mm]	0.45	K_n [N/mm ³]	460000
T_s [MPa]	51	G_s [N/mm]	1	K_s [N/mm ³]	230000
T_t [MPa]	51	G_t [N/mm]	1	K_t [N/mm ³]	230000

4. 研究成果

試験片_Tの実験結果と試験片_Tモデルの解析結果をFigure 2に示す。Figure 2より, 実験結果と解析結果で曲げ剛性は一致している。しかし, 曲げ強度においては与えた変位内で試験片_Tモデルは破壊しなかった。これは, 解析に用いた層間強度の文献値が大きかったため破壊しなかったと考えられる。そこで, 層間強度の文献値を1/2倍, 3/4倍にして, 解析をおこなった。その結果, 層間強度を3/4倍にした時, 解析において層間剥離が生じ, 実験結果と解析結果は一致した。そして, 実験での層間強度が文献値より低かった理由として, 試験片_Tに確認された樹脂リッチ領域が考えられる。次に, 試験片_Lの実験結果と試験片_Lモデルの解析結果をFigure 3に示す。Figure 3より, 実験結果と解析結果で曲げ剛性および曲げ強度は一致している。以上の結果より, 曲げ特性の評価における波状積層板の解析モデルは妥当だと考えられる。

次に, 解析上で取得した平板および波状積層板の曲げ剛性をTable 3に示す。Table 3より, 平板と試験片_Lモデルの曲げ剛性を比較すると, 試験片_Lモデルの方が平板より大きくなった。

その後、平板と試験片_Lモデルの曲げ剛性を比較すると、試験片_Tモデルの方が平板より20%程度小さくなった。以上の結果から、下肢装具の足底部関節に使用した場合、長手方向には剛性低下により、関節の自然な背屈を模擬でき、短手方向には剛性上昇により、歩行時のふらつきが抑制できると考えられる。そのため、波状積層板は、波状形状を任意の方向に付与することで剛性変化をもたらすので、下肢装具設計においても、形状の異方性をうまく活かす設計ができる。

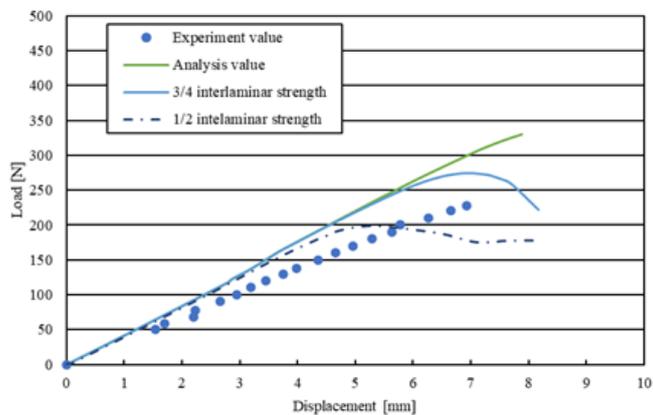


Figure 2 Load-displacement curves of the specimens _T.

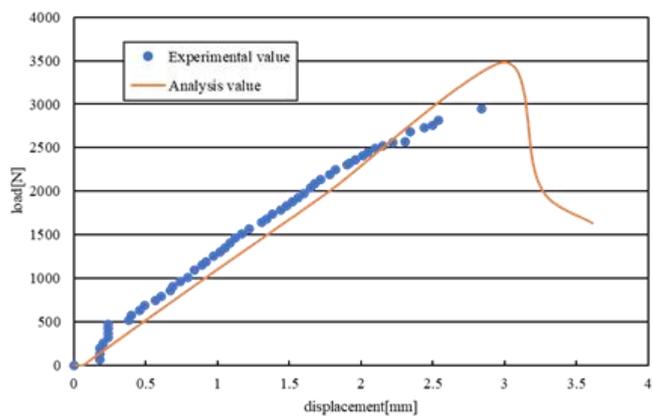


Figure 3 Load-displacement curves of the specimens _L.

Table 3 Bending rigidities of the flat and corrugated plates

	flat	Model of test specimen L	Model of test specimen T
Bending rigidity [N/mm]	53.9	1160	42.3

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松井 克樹, 名波 則路, 仲井 朝美
2. 発表標題 波状板ばねの曲げ特性
3. 学会等名 第13回日本複合材料会議 (JCCM-13)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	松井 克樹 (Matsui Katsuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------