

学位論文題名

光重合法による曲げおよびねじり剛性を有する

審美性矯正ワイヤーの試作

学位論文内容の要旨

【緒言】

マルチブラケット装置による矯正治療は、ワイヤーの弾性回復力である矯正力により歯を移動させることで不正咬合の改善を図るものである。通常、治療の中期以降では剛性が高く断面が角形のワイヤーを用いる。角形ワイヤーが選択される主な理由の一つは、ワイヤーのねじりの力を用いたトルク力を歯に与えることが可能となるからである。

これまで患者の心理的背景を考慮し、審美的にすぐれたワイヤーを開発することを目的として $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (以下、CPSA)ガラス繊維とPMMAの複合材料である繊維強化プラスチック型審美性矯正ワイヤー(以下、FRPワイヤー)の開発が進められてきている。このワイヤーにおけるねじり特性については研究されておらず未だ不明であり、従来のワイヤーの成形法である引拔成形法においては角形ワイヤーの成形は不可能である。そこで、本研究ではFRPワイヤーのねじり特性に影響する材料学的要因の解析を目的に、ワイヤーの形状を自由に成形し得る光重合法を新たに用い、試作したワイヤーの曲げ特性およびねじり特性の評価とマトリックス材の改良による機械的特性の変化について検討した。

【材料および方法】

用いたCPSAガラス繊維(ユニチカグラスファイバー)は繊維径約 $20\mu\text{m}$ で、ワイヤーの長軸方向への一方向配向型とした。3種類の異なるマトリックス材を用いてUDMA系レジン(サンメディカル)を用いたポリマーベースおよびコンポジットレジン(CR)ベースのFRPワイヤーを試作した。また、コンポジットレジンの機械的特性に対するフィラー含有量の影響を調べるため、①ライトフィルⅡP(松風、フィラー含有量85wt%)、②クリアフィル フォトSC(クラレ、81.5wt%)、③エピック-フロ(サンメディカル、67wt%)にそれぞれのベースレジンを添加してフィラー含有量を30wt%まで段階的に下げ、これを用いた繊維無配合のワイヤー(以下、CRワイヤー)も調製した。コントロールとしては0.017インチ×0.025インチのNi-Ti系ワイヤー(UNITEK)とCo-Cr系ワイヤー(RMO)を使用した。

試料の成形方法は、まずガラス繊維を γ -MPTS(信越化学)により表面処理を施した。断面が丸形のFRPワイヤー(以下、丸形FRPワイヤー)の成形には、ポリエチレンチューブ内に繊維を挿入し、チューブ内にマトリックス材を注入して光照射を行った。断面が角形のFRPワイヤー(以下、角形FRPワイヤー)の成形には、繊維にマトリックス材を含浸させ、金属枠型を用いて上下面をガラス板で圧接し光照射を行った。光照射はペンシルタイプの可視光線照射器(LUXOR, ICI)により120秒間の照射を行った後に、多目的光照射器(α -ライトⅡ, モリタ)により5分間の光照射を加えた。さらに、 100°C 恒温中に20分間保持した。FRPワイヤーのガラス繊維体積分率(以下、 V_f)は成形に用いた繊維

重量から算出した。なお、試料数は各マトリックス材につきそれぞれ5本ずつとした。

試作したワイヤー試料の曲げ特性を評価するために、3点曲げ試験をインストロン万能試験機 (Model 4204) により支点間距離 14mm, たわみ量 0 から 2mm の間での一往復の条件で行った。ねじり特性を評価するねじり試験は、金属製ブラケット (オームコ) で角形ワイヤー試料をブラケット間距離 5mm で把持し、インストロン万能試験機にて、ワイヤーにねじりを伝える補助板を垂直に 5mm まで押し下げ、ねじりをワイヤーに与えた後再び 0mm まで戻す条件で行った。

【結果】

成形したワイヤー試料の断面寸法は丸形 FRP ワイヤーで 0.478mm ϕ (SD; 0.011)mm, 角形 FRP ワイヤーでは 0.432 (SD; 0.011) $\times$ 0.645 (SD; 0.011)mm であった。

得られたポリマーベース FRP ワイヤーの曲げ-たわみ曲線から、曲げ荷重は負荷時、除荷時ともにたわみ量にほぼ比例して変化することがわかった。また、試験後の永久変形量は極めて小さく、ほぼ完全な弾性回復をしていた。次に、負荷時のたわみ量 0.5mm で計測した荷重は、 V_F が上がるにつれほぼ直線的に増加し、従来の引抜成形法による FRP ワイヤーと近似直線の傾きはほぼ同等であった。この曲げ特性に対しねじり特性は、ねじり角 14° におけるねじり荷重が 0.06N で、これは Ni-Ti ワイヤーの約 1/10, Co-Cr ワイヤーの約 1/20 で大幅に小さい値であった。

そこで、ねじり特性に対するマトリックス材の影響を検討することを目的として、マトリックス材にコンポジットレジンを用いた。試作した CR ワイヤーによるねじり試験の結果から、マトリックス材のフィラー含有量が増加するとねじり荷重も増大する傾向がみられ、特に 70wt% 以上になると急激に増大することがわかった。CR ベース FRP ワイヤーの曲げ荷重においては高い V_F 依存性が認められたが、ねじり荷重は V_F が増加してもわずかにしか増大せず、 V_F 依存性は低いことがわかった。

各種 FRP ワイヤーの曲げ荷重は Ni-Ti に対し、ポリマーベースでは約 6 割、CR ベースではそれぞれ約 7 割 (エピック-フロ)、約 9 割 (フォト SC) の値であった。ねじり荷重はポリマーベース FRP ワイヤーに対し、CR ベースではそれぞれ 2.2 倍 (エピック-フロ)、4.0 倍 (フォト SC) に増加し、結果として Ni-Ti ワイヤーの約 1/2 にまでねじり特性が向上した。

試作したワイヤーの外観は、ポリマーベース FRP ワイヤーがほぼ無色透明、CR ベース FRP ワイヤーは白色半透明であった。また、いずれの FRP ワイヤーも金属ワイヤーと比較すると、歯冠色からの隔たりが少なくより審美性にすぐれていた。

【考察】

ポリマーベース FRP ワイヤーのねじり荷重は低かったが、これは本 FRP ワイヤーの強化繊維が一方配向型であるため、ワイヤー外形がねじり変形しても内部のガラス繊維には回転をともなうねじりが生じないためと考えられる。

【結論】

1. 光重合法を FRP ワイヤーの成形に用いることで、種々の断面形状のワイヤーを簡便に試作することが可能になった。
2. 新たに光重合法で試作したワイヤーと従来の引抜成形法によるワイヤーの曲げ特性はほぼ同等であり、金属ワイヤーに匹敵する曲げ荷重を示した。
3. コンポジットレジンのねじり荷重は、含まれるフィラー含有量に依存し、70wt% を越える付近から急激に増加した。
4. CR ベース FRP ワイヤーにおける曲げ荷重の繊維体積分率 (V_F) 依存性は高かったが、ねじり荷重の V_F 依存性は低く、ねじり荷重は主としてフィラー含有量に依存することがわかった。
5. マトリックス材にコンポジットレジンを用いることで、ねじり特性は金属

(Ni-Ti)ワイヤーの約1/2にまで向上した。
6. 試作したFRPワイヤーはいずれも透明または白色半透明であり、従来の金属ワイヤーには無いすぐれた審美性を有していた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	飯田	順一郎
副査	教授	亘理	文夫
副査	教授	大畑	昇
副査	助教授	今井	徹

学位論文題名

光重合法による曲げおよびねじり剛性を有する 審美性矯正ワイヤーの試作

審査は主査・副査が一同に会して口頭でなされ、はじめに本論文の要旨の説明を求めた。申請者からは以下のような内容についての論述がなされた。

マルチブラケット装置による矯正治療の中期以降では、断面が角形で剛性の高いワイヤーを用いることが多い。開発を進めてきた繊維強化プラスチック型審美性矯正ワイヤーについて、このような形状および機械的特性を具備したものの試作を目的として本研究を行った。

【試料および方法】

1. 試料

成形方法に新たに光重合法を用いて、CPSAガラス繊維とUDMA系レジンまたはコンポジットレジン(CR)との複合によるFRPワイヤーを作製した。さらに、コンポジットレジン単体での機械的性質を評価するために、フィラー含有量を調整したマトリックス材からなるCRワイヤーも調製した。

2. 機械的特性試験

ワイヤー試料の曲げ特性・ねじり特性を評価するために、3点曲げ試験およびねじり試験を行った。なお、コントロールとして、0.014インチおよび0.017×0.025インチのCo-Crワイヤー、Ni-Tiワイヤーを用いた。

【結果】

1. ポリマーベースFRPワイヤー

ワイヤー試料の平均断面寸法は丸形FRPワイヤーで0.478mmφmm、角形FRPワイヤーでは0.432×0.645mmであり、内部はガラス繊維が偏在なく概ね均等に分散している構造であることがSEM像により観察された。

曲げ-たわみ曲線から、曲げ荷重はたわみ量にほぼ比例して変化しており、永久変形量は極めて小さく、ほぼ完全な弾性回復をしていた。なお、Co-Crワイヤーに対しては、 V_F (繊維体積分率)56%のFRPワイヤーがほぼ匹敵する荷重値を示していた。たわみ量0.5mmでの荷重は、 V_F が上がるにつれほぼ直線的に増加しており、UDMAおよびガラス単体の値を結んだ直線と今回得られた近似直線は近接し

ていることから、試作したワイヤーについて複合則が成り立っていることがわかった。一方、ねじり荷重はNi-Tiワイヤーの約1/10、Co-Crワイヤーの約1/20で大幅に小さい値であった。

2. CRベースFRPワイヤー

CRワイヤーからは、フィラー含有量が増加するとねじり荷重も増大する傾向がみられ、特に70wt%以上になると急激に増大する特性があることがわかった。

CRベースFRPワイヤーの曲げ荷重においては高い V_f 依存性が認められたが、ねじり荷重は V_f が増加してもわずかにしか増大しなかった。これに対し、フィラー含有量の増加によるねじり荷重の増大は大きく、ねじり特性はマトリックスに含まれるフィラーの量に強く依存していることがわかった。また、CRベースFRPワイヤーのねじり荷重はポリマーベースFRPワイヤーの4倍に増加し、結果としてNi-Tiワイヤーの約1/2になった。

試作したワイヤーの外観は、ポリマーベースFRPワイヤーがほぼ無色透明、CRベースFRPワイヤーは白色半透明であり、歯冠色からの隔たりが少なく審美性にすぐれていた。

以上の結果から学位申請者は、(1)光重合法をFRPワイヤーの成形に用いることで、従来より成形してきた丸形に加え角形のワイヤーも簡便に試作することが可能になった。(2)マトリックス材にコンポジットレジンを用いることで、Ni-Tiワイヤーの1/2にまでねじり特性が向上した。(3)試作したFRPワイヤーはいずれも透明または白色半透明であり、従来の金属ワイヤーには無いすぐれた審美性を有していた、と結論した。

以上の論述に引き続き各審査委員より口頭で試問が行われた。試問内容は実験方法、結果の信頼性、考察、今後の展望および関連分野の内容など多岐にわたるものであったが、申請者はいずれにも明快な回答、説明を行った。

本研究において申請者は光重合法を応用し、これまで困難とされてきた審美性矯正用角形FRPワイヤーの成形を実現し、臨床上必要であるねじり剛性をマトリックス材にコンポジットレジンを用いることで解決した。加えて本論文はその理工学的な背景を明快に説明したものである。

現在、矯正臨床において、患者の心理的背景から、審美的な矯正用ワイヤーが求められており、複合材料を応用した開発が進められている。それには臨床上必要な機械的特性を保持している必要があり、本研究で開発されたねじり剛性を有した角形ワイヤーの矯正臨床における意義は大きいものがあるだけでなく、本研究で明快に説明された複合材料におけるねじり特性に対する理工学的、材料学的な説明は、今後の研究、開発に対して大きく寄与するものと考えられる。加えて、試問の内容から、申請者は臨床的ならびに基礎的な広い学識を有しているものと認められた。従って、申請者は博士(歯学)の学位を授与される資格を有するものと認められた。