

学位論文題名

審美性繊維強化プラスチックおよび各種矯正ワイヤーと
ブラケット間の懸垂式摩擦試験による摩擦特性評価

学位論文内容の要旨

緒言

筆者らは、歯科矯正治療におけるマルチブラケット装置に用いる審美性に優れた FRP ワイヤーを開発し、これまでに同ワイヤーの機械的特性を明らかにしてきた。マルチブラケット装置を用いた歯科矯正治療には、ワイヤーに沿ってブラケット滑走させる治療手段も含まれているため、ワイヤー-ブラケット間の摩擦特性に関する検討を進める必要がある。

これまで、ワイヤーとブラケットの摩擦特性に関して多くの報告がなされてきたが、それらの多くはブラケットスロットにワイヤーが挿入された状態で摩擦力の計測を行っており、ブラケットスロット内でのワイヤーの歪み、スロット端部における曲げモーメント、結紮力等により接触関係が多様化するために、得られる結果に差があるものと考えられる。各素材間の摩擦特性を純粹に抽出し比較検討するためには各素材間の摩擦特性とワイヤー、ブラケット間の幾何学的関係の条件を明確に分離する必要がある。この目的のため懸垂式摩擦試験機と試験用治具を試作し、ブラケット素材の平坦な一面とワイヤーとの接触関係という単純化された状況における特性評価を行い、次に矯正ワイヤーがブラケットスロット内の二面に接触している状態で摩擦試験を行い、試作 FRP 審美矯正ワイヤーおよび市販金属製ワイヤーとブラケットスロット内面との摩擦特性について比較検討した。

材料と方法

1. FRP および金属ワイヤー

直径 0.018 インチ (0.45 mm) のステンレス製矯正用ワイヤー、Ni-Ti 系矯正ワイヤー CPSA[(25.0%)CaO- (18.13%)P₂O₅- (31.49%)SiO₂- (25.38%)Al₂O₃]ガラスファイバーと UDMA マトリックスからなる FRP ワイヤー(ガラス繊維径 20 μm、繊維体積分率 V_f50%、ガラス繊維一方向配向、円形断面、光重合法により作製)を長さ 30mm に切断し試験片として用いた。

2. ブラケット

0.022 インチスロットの多結晶アルミナ製ブラケット、ポリカーボネートブラケット、単結晶アルミナ製ブラケット、ステンレス製スタンダードブラケットを使用した。

4. 摩擦試験

筆者らが試作した懸垂式摩擦試験機を用い、ブラケットのウィング部分を削除し、ブラケットスロット内の一面を露出させたものと二面を露出させたものを作製し、前者を用いて行った試験を一面接触摩擦試験、後者を用いたものを二面接触摩擦試験とする。ワイヤーにブラケットを上方向から圧接し、万能試験機のクロスヘッドの移動によりブラケットを水平方向に牽引し、摩擦力を測定した。そしてその最大値を一面接触試験においては最大静止摩擦力、二面接触試験においては見かけの最大静止摩擦力とした。一般に最大静止摩擦力と垂直抗力の間には次式で表される比例関係が成り立つ。

$F = \mu N$ F : 最大静止摩擦力、 N : 垂直抗力、 μ : 静止摩擦係数

そこで、垂直抗力-摩擦力散布図において最小二乗法で得られる近似線の傾きを求め、それを一面接触試験においては摩擦係数 μ とし、二面接触試験においては、みかけの静摩擦係数 μ' とした。

結果

FRP ワイヤーでは多結晶ブラケットとの摩擦力が非常に大きく、単結晶ブラケットおよび SS ブラケットとの摩擦力は非常に小さいという特徴的な傾向を示した。また、NiTi ワイヤーおよび SS ワイヤーは多結晶ブラケットとの摩擦力は大きく、それ以外のブラケットとの摩擦力は小さいという傾向は類似していた。また、二種の金属ワイヤーに共通してみられる特徴は、ポリカーボネートブラケットとの摩擦力が最も小さいということである。

FRP ワイヤーは多結晶セラミックブラケットとの組み合わせにおいては高い摩擦力を示すが、その他のブラケットとの組み合わせでは金属ワイヤーとほぼ同等かそれ以下の値を示す。全ての組み合わせについて一面接触、二面接触とも、類似した摩擦特性を示した。

考察

ワイヤーが臨床的にブラケットスロットに挿入された状態では、ワイヤーが屈曲したりスロット端部において過度に圧接されたりする可能性がある。これらはワイヤーとブラケットの接触関係の幾何学的特異性に起因するものであり、それ故にワイヤーおよびブラケットの素材間の摩擦特性を明らかにすることは困難であったと考えられる。懸垂式摩擦試験機においては、垂直抗力を増大させてもその方向は計測開始時には常に鉛直下向きで安定し、ワイヤーは水平な台座の上に固定されているため垂直抗力の増大に伴うワイヤーのたわみが生じない。また、二面接触試験において懸念される、スロット端部での過度の圧接は、ブラケットの牽引方向をワイヤーの長軸方向と一致させる事で回避が可能である。このような構造によってワイヤーとブラケットの副次的な接触関係を排除し、ブラケットとワイヤー表面の、より単純な条件下での摩擦特性を解明し得ることが示唆された。

一面接触摩擦試験は各素材の表面性状のみによって決定される摩擦特性を知ることが目的とし、二面接触摩擦試験はワイヤーが結紮力によってスロット内の隅角部に圧接され、他の力が作用しない状態での摩擦特性を知ることが目的とするものである。これら二つの試験結果がほぼ相似な関係を示したことから、

ワイヤーの歪み、矯正力などの要因が作用しなければ、ワイヤーはスロット内においても素材間の摩擦特性のみを反映する可能性が示唆される。過去の多くの研究におけるブラケット-ワイヤー間の摩擦特性に関する報告には多様なものがあり、相反するものさえあることを鑑みると、臨床的な状況下における摩擦特性を規定する要因は素材間の表面摩擦特性だけではなく、ワイヤーとブラケットの幾何学的関係やワイヤーに作用する矯正力の方向や大きさ等も影響していることが示唆される。

結論

新しい懸垂式摩擦試験機を製作し、各種ワイヤー、ブラケット間の摩擦特性について一面的接触、二面的接触について調べた。その結果、ワイヤー、ブラケット間の幾何学的関係に由来する影響を取り除き、ほぼ純粋に素材間の摩擦特性を評価することが可能となった。一面的接触、二面的接触とも類似した摩擦特性を示すが、ワイヤーがブラケットスロット内の二面に圧接されている状況での摩擦係数は、一面に圧接されているときの $2^{1/2}$ 倍という理論値に近い値を示す傾向が見られた。

FRPワイヤーは多結晶セラミックブラケットとの組み合わせでは、他のどの組み合わせよりも大きな摩擦抵抗を示すが、単結晶セラミックブラケット、ポリカーボネートブラケット、およびステンレスブラケットと組み合わせると、一面的接触の場合と同様に二面的接触の場合でも金属ワイヤーと同等あるいはそれ以下の摩擦抵抗を示す可能性が示唆された。

臨床的な状況下における摩擦特性は素材間の表面摩擦特性だけではなく、ワイヤーとブラケットの幾何学的関係やワイヤーに作用する矯正力にも大きく影響をうけている可能性が示唆された。

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

学 位 論 文 題 名

審美性繊維強化プラスチックおよび各種矯正ワイヤーと ブラケット間の懸垂式摩擦試験による摩擦特性評価

審査は審査担当者が一同に会して約2時間かけて行った。まず申請者に本論文の概要の説明を求め、その後に口頭試問の形式で提出論文の内容及び関連分野について試問した。

申請者は論文の概要を以下のように説明した。

歯科矯正治療において屈曲された矯正ワイヤーの弾性回復力はブラケットを介して歯に伝達される。このときこの弾性回復力を矯正力として効果的に作用させるためにはワイヤーとブラケット間の摩擦力ができるだけ小さいことが望ましい。近年開発中の審美性繊維強化プラスチック (FRP) ワイヤーにとってもその摩擦特性を知ることが重要である。しかし、従来の測定法ではブラケットスロット内でのワイヤーのひずみ、スロット端部における曲げモーメント、結紮力などの幾何学的特異性に起因する影響が混在し、材料本来の摩擦特性を求めることが困難であった。本研究ではワイヤーとブラケットスロット間の、単純でかつ再現性の高い摩擦試験が可能な懸垂式摩擦試験機を試作することにより、FRP 矯正ワイヤーおよび市販矯正ワイヤーの摩擦特性評価を行った。

【材料と方法】ステンレス製、Ni-Ti系、およびガラスファイバーとUDMAマトリックスからなるFRP構造の各矯正用ワイヤー(直径はいずれも0.45mm)を、また0.022インチスロットの多結晶アルミナ製、ポリカーボネート製、単結晶アルミナ製、ステンレス製の各ブラケットを供試体とした。

試作した懸垂式摩擦試験機にウィング部分を削除したブラケット材を取り付け、ブラケットスロット内の平面を使用して一面接触摩擦試験を、直交する二面を用いて二面接触摩擦試験を行った。懸垂式摩擦試験機においては、垂直抗力を増大させてもその方向は計測開始時には常に鉛直下向きで安定し、ワイヤーは水平な台座の上に固定

されているため垂直抗力の増大に伴うワイヤーのたわみが生じない。また、二面接触試験において懸念される、スロット端部での過度の圧接は、ブラケットの牽引方向をワイヤーの長軸方向と一致させる事で回避が可能である。

垂直抗力-摩擦力図において最小二乗法で得られる近似線の傾きから、一面接触試験における摩擦係数 μ 、二面接触試験のみかけの静摩擦係数 μ' を求めた。

【結果と考察】全てのワイヤーに対して多結晶ブラケットは摩擦力が大きく、単結晶ブラケットおよびSSブラケットの摩擦力は小さかった。FRPワイヤーは多結晶セラミックブラケット以外のブラケットとの組み合わせでは金属ワイヤーとほぼ同等かそれ以下の値を示した。二種の金属ワイヤーはポリカーボネートブラケットとの摩擦力が最も小さかった。また、全ての組み合わせについて一面接触、二面接触とも、類似した摩擦特性を示し、二面接触における摩擦係数は、一面接触時の $\sqrt{2}$ 倍という理論値に近い値を示す傾向が見られた。

【結論】試作した懸垂式摩擦試験機により、ワイヤー、ブラケット間の幾何学的関係に由来する影響を取除き、ほぼ純粋に素材間の摩擦特性を評価することが可能となった。FRPワイヤーは多結晶セラミックブラケットに対して大きな摩擦抵抗を示すが、単結晶セラミック、ポリカーボネート、およびステンレスでは金属ワイヤーと同等以下であった。一面および、二面接触摩擦試験の結果はほぼ相似な関係を示したことから、臨床の複雑な幾何学的位置関係やワイヤーの歪み、ワイヤーに作用する矯正力などの要因が作用しなければ、ワイヤーはスロット内においても素材間の摩擦特性を反映する可能性が示唆された。

現在、FRPワイヤーが矯正用ワイヤーとして開発されているが、実際の治療に応用していくためにはワイヤーとブラケット間の摩擦特性が正しく評価されなければならない。本研究は、純粋な試料表面性状のみによる摩擦特性を計測する懸垂式摩擦試験法を新たに開発し、この方法を用いて各種のワイヤーとブラケット間の摩擦特性を計測している。得られた結果はこの試験法の有効性を示すとともに、FRPワイヤーは多結晶セラミックブラケットとの間に大きな摩擦抵抗を示すが、単結晶セラミック、ポリカーボネートおよびステンレスブラケットの間では金属ワイヤーと同等あるいはそれ以下の摩擦抵抗を示すことを明かにした。この結果はFRPワイヤーを臨床に応用していくために重要な情報を提供したものと、高く評価できる。

口頭試問において、審査担当者から、

- 1) 本研究の目的
- 2) 本計測方法を開発した経緯
- 3) 多結晶セラミックブラケットで摩擦係数が高い理由
- 3) 潤滑剤の効果
- 4) 今後この研究を進めていく方向性

などの試問が成されたが、いずれに対しても明快な回答が得られた。以上から、申請者は本研究に直接関係する事項のみならず、関連分野における基礎的、臨床的な広い

知識を有していると認められた。よって審査担当者は口頭試問の結果に合格の評価を与え、申請者は博士（歯学）の学位を授与される資格を十分に有するものと認めた。