

学 位 論 文 題 名

審美性矯正ワイヤーの水中浸漬による
影響とコーティング処理に関する研究

学位論文内容の要旨

【緒言】

繊維強化型プラスチック審美性矯正ワイヤー（以下、FRP ワイヤー）はガラス繊維に生体親和性に優れた $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ガラス、マトリックス材に PMMA 樹脂を用いて外形約 0.5 mm に引抜成形した審美性に優れる線材料である。これまでの室温乾燥条件による FRP ワイヤーの研究では、ワイヤー外径を変えずに繊維の体積分率を変化させることで Ti-Ni 系ワイヤーから Co-Cr 系ワイヤーまでの広い範囲の矯正力が発揮できることを明らかにしてきた。本研究では、最大 30 日間までの水中浸漬が FRP ワイヤーの機械的特性に及ぼす影響を調べ、さらに吸水による機械的特性の劣化を防ぐため、ワイヤー表面へのコーティング処理の材料と方法を検討することを目的とした。

【試料および方法】

1. 試料

ワイヤー材料として繊維体積分率 50% の FRP ワイヤーを用いた。コーティング材として、シリコーンゴム、フッ素樹脂および Bis-GMA の 3 種類を選択した。コーティング方法にはディップ法を用い、Bis-GMA にはさらにワイヤー長軸に対して垂直方向に手指圧により回転させるロール法、およびロール法とディップ法を組み合わせたロールアンドディップ法（以下、R&D 法）も用いた。ディップ法の引上速度は手動引上では 1.5~2cm/min、機械引上では 1cm/min と 6cm/min とした。

2. 実験方法

水中浸漬試験は水温 37℃ に 10, 20, 30 日間および JIS 規格 K-6911 に準拠した水温 100℃ での 1, 2, 3 時間の浸漬を行った。機械的特性試験として、クロスヘッドスピード 1cm/min、標点間距離 14mm、最大たわみ 2mm の設定で 3 点曲げ試験を行った。機械的特性の浸漬による影響を、たわみ 1mm での負荷時荷重値 (Deactivating load: P_D) と除荷時荷重値 (Activating load: P_L) から算出した荷重維持率 $= P_D/P_L \times 100(\%)$ を用いて、定量的に評価した。FRP ワイヤーとコーティング材との界面の接着状態を観察するため、光学顕微鏡および SEM でコーティングワイヤー断面を観察した。また、最大たわみ 2mm の状態を再現した治具に試験後のワイヤーを装着し、SEM で最大引張応力集中部近傍を観察した。

【結果】

I. 未処理ワイヤーの 37℃ 水中浸漬試験

浸漬 10 日目以降での未処理ワイヤーは、たわみ 1.5 mm を越えた領域で急激な荷重降下を示した。荷重維持率は、浸漬前では 80% 以上であったが、浸漬 10 日目で 10% 以下に低下し、30 日目まで同様であった。SEM 像では、浸漬前には FRP 構造の破壊は観察されなかったが、浸漬 30 日目のものではガラス繊維の破断およびガラスマトリックス界面間の剥離が認められた。

II. 各種コーティングワイヤーの 37℃水中浸漬試験

シリコンゴムおよびフッ素樹脂によるコーティングワイヤーは浸漬 10 日目以降すでに未処理ワイヤーとほぼ同様なヒステリシス挙動を示し、荷重維持率も浸漬初期から低下し、浸漬 30 日目では約 30% であった。SEM 像からコーティング膜の剥離や FRP ワイヤー表面の一部露出が認められた。しかし、Bis-GMA コーティングワイヤーでは浸漬 30 日目まで良好な弾性回復を示し、荷重維持率も浸漬 30 日目まで 50% 以上を維持した。ワイヤー断面像からシリコンゴムコーティングでは 15~152 μm と不均一なコーティング膜の剥離が、フッ素樹脂では膜厚が 2~33 μm と薄いため一部にワイヤー表面の露出が観察されたが、Bis-GMA では表面全体を均一な厚さで完全に被覆していた。

III. Bis-GMA コーティングワイヤーの水中浸漬試験

1. コーティング方法依存性

コーティング効果を短期間で判定するために以下 100℃浸漬試験を行い、最適試料作成条件を求めた。ロール法で作製したコーティングワイヤーでは 100℃浸漬 1 時間目にすでにたわみ 1.5 mm 付近から、ディップ法では 1.8 mm 付近から急激な荷重降下を呈したが、R&D 法では浸漬 3 時間目まで良好な弾性回復を示した。荷重維持率においても、浸漬 1 時間目からロール法とディップ法では約 5 % まで急激な低下を示したのに対し、R&D 法では浸漬 3 時間目まで約 60~80% を維持し、良好なコーティング効果を示した。ワイヤー断面像から、ロール法で作製したワイヤーでは表面の微細な凹凸にもコーティング材が浸透していたが、凸部の完全な被覆は困難であった。ディップ法および R&D 法ではコーティング膜がワイヤー外周をほぼ均一に円形に被覆していた。

2. 引上速度依存性

引上速度 6cm/min では膜厚が約 274 μm と厚く、機械的特性も膜厚の影響による荷重値の上昇を示したが、引上速度 1cm/min では膜厚が約 119 μm と薄くなり、機械的特性も未処理ワイヤーと同等であった。

3. 37℃浸漬時間依存性

100℃浸漬試験で得られた最適条件で作製したコーティングワイヤーについて 37℃浸漬試験を行った結果、浸漬 30 日目まで良好な弾性回復を示した。荷重維持率においても未処理ワイヤーに比較して、コーティングワイヤーでは 60~80 % と高い値を示した。最大引張応力集中部近傍では浸漬前、浸漬 30 日目ともワイヤー表面全体をコーティング材が被覆し、ガラス繊維の露出およびコーティング膜の亀裂や剥離は認められなかった。

【考察】

最大 30 日間の浸漬試験により、FRP ワイヤーは浸漬初期から曲げ荷重と弾性の低下を示した。SEM 像よりガラス繊維の局所的な破断およびガラスマトリックス界面間での剥離が観察されたことから、機械的特性低下の原因として FRP ワイヤーの吸水による影響が考えられたため、コーティングの必要性が生じた。

コーティング材としてシリコンゴム、フッ素樹脂および Bis-GMA の 3 種類を検討し、操作性、膜厚と均一性、および低感水性の点から Bis-GMA が最も優れていた。また、コーティング方法ではワイヤー表面との優れた機械的密着性を示すロール法と均一なコーティング膜を得られるディップ法（引上速度 1cm/min）を組み合わせた R&D 法がワイヤー表面と水とを隔離することができたために最良の結果を示した。

100℃および 37℃水中浸漬試験のいずれもワイヤーの機械的特性への影響は定性的に類似し、変化に要する時間が異なっていた。これは 100℃の高温では吸水効果が加速され、短時間で吸水飽和に達するためと考えられ、コーティング処理の優劣を短期間に判断できる上で有効であった。

SEM 像では未処理の FRP ワイヤー表面にはガラス繊維の露出が認められたのに対し、コーティングワイヤーの表面にはコーティング膜のみが観察され、ワイヤーの露出は認められなかった。これにより、ワイヤーの吸水が低下し、機械的特性の劣化が減少したものと考えられた。

これより、Bis-GMA コーティングは水中浸漬の影響を低減する上で非常に有効であったと考えられた。

【結論】

FRP ワイヤの機械的特性に及ぼす水中浸漬の影響を調べ、機械的特性の低下を防ぐため種々のコーティング処理を試み、その効果について検討した結果、FRP ワイヤ表面への BisGMA コーティング処理により吸水による機械的特性の低下を改善することが可能となり、臨床応用を実現する上で極めて有効な手段であると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 亘 理 文 夫

副 査 教 授 中 村 進 治

副 査 教 授 大 畑 昇

学 位 論 文 題 名

審美性矯正ワイヤーの水中浸漬による 影響とコーティング処理に関する研究

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

繊維強化型プラスチック審美性矯正ワイヤー（FRP ワイヤー）はワイヤー外径を変えずに繊維の配合率を変化させることで、室温乾燥条件下では金属ワイヤーの広範囲な矯正力を発揮できることが調べられている。本研究は、FRP ワイヤーのより臨床に則した条件である水中浸漬の影響を調べるとともに、吸水による特性劣化を防ぐため、ワイヤー表面へのコーティング材料、方法を検討することを目的とした。

【試料および方法】

1. 試料

ワイヤー材料として繊維体積分率 50% の FRP ワイヤーを用いた。コーティング材として、シリコンゴム、フッ素樹脂および Bis-GMA の 3 種類を選択した。コーティング方法にはディップ法を、Bis-GMA にはさらにロール法、およびロール法とディップ法を組み合わせたロールアンドディップ法（R&D 法）も用いた。

2. 実験方法

水中浸漬は 37℃ に 10, 20, 30 日間および 100℃ に 1, 2, 3 時間の浸漬を行った。機械的特性試験として、最大たわみ 2 mm までの 3 点曲げ試験を行った。機械的特性への影響を、たわみ 1 mm での負荷時荷重値と除荷時荷重値から算出した荷重維持率で定量評価した。界面の接着状態を光学顕微鏡、SEM で観察した。また、最大たわみ 2 mm を再現した治具にワイヤーを装着し、SEM 観察した。

【結果】

I. 未処理ワイヤーの 37℃ 浸漬試験

未処理ワイヤーの荷重維持率は浸漬前では 80% 以上であったが、浸漬 10 日目で 10% 以下に低下し、30 日目まで同様であった。SEM 像では、浸漬 30 日目以降のものではガラス繊維の破断および界面剥離が認められた。

II. 各種コーティングワイヤーの 37℃ 浸漬試験

シリコンゴムおよびフッ素樹脂コーティングワイヤーは浸漬 30 日目には荷重維持率が約 30% まで低下した。SEM 像からコーティング膜の剥離やワイヤー表面の一部露出が認められた。しかし、Bis-GMA コーティングワイヤーでは浸漬 30 日目

まで 50% 以上を維持した。ワイヤー断面像からシリコーンゴムでは 15~152 μm と不均一な膜の剥離が、フッ素樹脂では膜厚が 2~33 μm と薄いため一部にワイヤー表面の露出が観察されたが、Bis-GMA では表面全体を均一な厚さで完全に被覆していた。

Ⅲ. Bis-GMA コーティングワイヤーの水中浸漬試験

1. コーティング方法依存性

コーティング効果を早期に判定するため以下 100℃ 浸漬試験を行い、最適作成条件を求めた。荷重維持率は、ロール法とディップ法では浸漬 1 時間目から約 5% まで急激な低下を示したのに対し、R&D 法では浸漬 3 時間目まで約 60~80% を維持し、良好なコーティング効果を示した。断面像から、ロール法では凸部の不完全な被覆が観察されたが、ディップ法および R&D 法ではワイヤー外周をほぼ均一に円形に被覆していた。

3. 37℃ 浸漬時間依存性

100℃ 浸漬試験で得られた最適条件で作製したコーティングワイヤーについて 37℃ 浸漬試験を行った結果、浸漬 30 日目まで荷重維持率は 60~80% と高い値を示した。最大引張応力集中部近傍では浸漬前、浸漬 30 日目ともワイヤー表面全体をコーティング材が被覆していた。

【考察】

浸漬試験により、FRP ワイヤーは浸漬初期から曲げ荷重の低下を示した。SEM 像よりガラス繊維の破断および界面剥離が観察され、この原因として FRP ワイヤーの吸水による影響が考えられたため、コーティングの必要性が生じた。

材料としてシリコーンゴム、フッ素樹脂および Bis-GMA の 3 種類を検討し、操作性、膜厚と均一性、低感水性の点から Bis-GMA が最も優れていた。また、方法ではワイヤー表面との優れた機械的密着性を示すロール法と均一な膜厚を得られるディップ法を組み合わせた R&D 法が最良であった。

100℃ および 37℃ 浸漬試験とも浸漬劣化の傾向が定性的に類似していた。これは 100℃ では吸水効果が加速され、短時間で吸水飽和に達するためと考えられ、コーティング効果を早期に判定する上で有効であった。

SEM 観察では、曲げ試験時もワイヤーの露出は認められず、吸水率の低下と機械的特性劣化の減少に寄与したのと考えられた。

以上より、Bis-GMA コーティングは水中浸漬の影響を低減する上で極めて有効であることが示唆された。

以上の論述に引き続き実験方法、結果、考察、展望及び関連分野についての質疑応答を行い、申請者はいずれにも明快な回答、説明を行った。

本研究は、FRP ワイヤーの審美性を損なうことなく、浸潤環境下での機械的特性劣下の低減を実現した。本方法の独創性は今後の矯正歯科臨床の発展に寄与すること大である。よって、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た。