

Fabrication of a Functionally Graded Dental Composite Resin Post and Core by Laser Lithography and Finite Element Analysis of its Stress Relaxation Effect on Tooth Root

(光造形法による傾斜機能型コンポジットレジン築造体作製の試みと、その応力緩和効果の有限要素法応力解析による検討)

学位論文内容の要旨

【目的】歯内療法後の歯への金属鑄造体による支台築造法は、長い間行われてきたその実績と信頼性から歯科臨床で広く受け入れられている術式である。過去には、支台築造で挿入される金属ポストにより歯根が補強されると考えられてきたが、近年の多くの研究報告は否定的な意見である。ポストと象牙質との弾性率の違いにより発生する応力集中が歯根破折を引き起こす問題の1つとしてあげられている。そこで、ポスト部に発生する応力集中を緩和させ歯根破折を防止する支台築造法を目指して、光造形法を応用しコンポジットレジンのフィラー含有率を変化させることにより、ポスト部の弾性率を傾斜させた傾斜機能型コンポジットレジン築造体を考案した。本研究では、始めにコンポジットレジンを用いた補綴物作製に必要となる最適な光造形条件を決定するために、基礎的な造形能の検討を行った。次に、築造体のポスト部のフィラー含有率を積層間で変化させて造形した傾斜機能型コンポジットレジン築造体の試作をおこない、さらにその応力緩和効果を、有限要素法による応力解析によって検討した。

【方法】光造形装置には、シーメット社製 SOUP400GH を用いた。本装置は、レーザスポット径 0.2mm で紫外線レーザ光を出力し、操作中のレーザ出力は 11-14mW であった。使用したコンポジットレジンのベースレジンには、UDMA(50mol%)に TEGDMA(50mol%)を加えた混合モノマーに、紫外線重合性を付与するためにベンゾインメチルエーテル(1wt%)を添加したものをを用いた。

1) 最適作製条件:不定形シリカ 70wt%(平均粒径 2.0 μ m)をフィラーとしたコンポジットレジンペーストを作製し使用した。最適造形条件の決定には以下の測定を行い、分解能、積層間の結合性、造形後のモデルの安定性の観点から検討した。

a) 硬化幅の測定:コンポジットレジン表面をレーザ光で走査して得られた硬化帯の幅をレーザ走査速度 200, 250, 300, 350(mm/sec)に対して測定した。

b) 硬化深度の測定:10 \times 10mmの正方形の形状データを用意し、コンポジットレジンペースト表面をレーザ走査した。この時のレーザ走査速度と走査線間隔を変化させ、光重合部の厚みを測定し硬化深度として評価した。レーザはx方向のみの1回走査とし、走査速度 150, 200, 250, 300, 350(mm/sec)、走査線間隔 0.2, 0.3, 0.4(mm)とした。

c) 造形後の重合収縮:レーザ走査条件によっては重合が不完全であることが予想され、造形後のモデルの安定性を評価する為に光造形条件を変えて造形したモデルに対し加熱重合を行い、それに伴う線収縮率から検討した。10 \times 10 \times 1mmの試料を作製し、150 $^{\circ}$ C 2時間の加熱処理前後の寸法変化から線収縮率を測定した。

d) 以上の結果から最適造形条件を求め、コンポジットレジンクラウンの作製を行った。

2) 傾斜機能型コンポジットレジン築造体:フィラーとしてガラス繊維粉末(直径 13 μ m, 平均長 70 μ m)を 0, 9, 18, 27, 36, 45, 54, 64wt%それぞれ添加して 8種のコンポジットレジンペーストを

作製した。

a) 傾斜型築造体の作製：光造形装置を使用して、ポスト先端より 1mm ごとに 0, …, 64wt% と順にコンポジットレジンフィラー含有率を変えて積層造形を行い、ポスト部の弾性率を傾斜させた傾斜型築造体の作製を試みた。

b) 有限要素法解析：2次元有限要素法によって、メタルコアおよび従来型のレジンコアと比較し、傾斜型築造体のポスト部の応力緩和効果について検討した。解析に使用したモデルは、ポスト長 9mm、ポスト先端直径 2mm の築造体を装着した上顎中切歯歯根を想定した。荷重は、歯軸に対し 45 度の角度で口蓋側方向から静止荷重 10N を加えた。境界条件は、歯根長軸に対し根尖側 10mm に位置する歯根表面を固定した条件と、根尖側 4mm に位置する歯根表面を固定した条件とした。解析した築造体は、12%Au-Pd 鑄造築造体 (Metal)、チタン製既製ポストを挿入した従来型のコンポジットレジン築造体 (CR) (フィラー含有率 64wt%)、チタン製既製ポストを挿入した傾斜型築造体 (FG) である。

【結果と考察】1) レーザ走査速度が速くなるほど硬化幅、硬化深度とも小さくなり、走査速度 300mm/sec で硬化幅 0.28mm であった。硬化深度は、走査速度 300 mm/sec、走査線間隔 0.3mm のときが最も硬化深度が小さく、0.11mm であった。走査速度 350 mm/sec ではモデルの作製ができなかった。造形後加熱重合による線収縮率は、走査速度 300mm/sec、走査線間隔 0.24mm で 0.4% であり、光照射量が最も多い造形条件走査速度 50mm/sec、走査線間隔 0.2 mm と比較してもその差は 0.1% 程度の小さなものであった。以上から、分解能がよいこと、積層間の結合性が得られ 3次元モデルが作製可能であること、造形後のモデルの安定性がよいことから、最適光造形条件として走査速度 300mm/sec、走査線間隔 0.2-0.26mm とし、最適条件下で作製したクラウンは、マージン部分に積層による段差が一部見られるものの外形の曲面は十分再現されていた。2) 最適造形条件下で光造形することにより、フィラー含有率を積層時に段階的に変化させ弾性率がポスト先端部の約 3GPa からコア部の約 10GPa へ変化する傾斜構造をもつ築造体が作製可能となった。応力解析の結果は、歯根 10mm 固定時では CR と FG の間で特に差異は認められなかった。先端に向かって弾性率が低下する傾斜型ポストは、ポスト先端部の応力を緩和する代わりに歯頸部付近で応力集中が起り、ポスト自体の破折が危惧されたがそれを示唆する応力分布像は見られなかった。歯根 4mm 固定条件では、Metal はポスト先端部で大きな応力集中が見られた。Metal と比較して CR と FG は発生する応力値は小さく、CR と FG の比較では、FG のポスト先端部の応力は CR より約 3割減少していた。今回の解析から、傾斜型築造体はポスト先端の応力を緩和させる可能性が示唆された。

【結論】

コンポジットレジン補綴物を造形するための最適な光造形条件は、走査速度 300mm/sec 走査線間隔 0.2 から 0.26mm と求められ、その応用としてコンポジットレジンによるクラウンの作製が可能となった。さらにポスト部の弾性率を傾斜させた傾斜機能型築造体の作製が可能となり、有限要素法解析からポスト先端部に発生する応力集中の緩和効果が確認され、ポストに傾斜型機能を付与する有効性が示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 畑 昇

副 査 教 授 亘 理 文 夫

副 査 教 授 川 崎 貴 生

学 位 論 文 題 名

Fabrication of a Functionally Graded Dental Composite Resin Post and Core by Laser Lithography and Finite Element Analysis of its Stress Relaxation Effect on Tooth Root

(光造形法による傾斜機能型コンポジットレジン築造体作製の試みと、その応力緩和効果の有限要素法応力解析による検討)

審査は、主査及び副査が一堂に会し、研究内容とそれに関連した学科目を中心として口頭試問による試験を行った。その後、審査委員の合議を元に主査がその結果をまとめた。

本研究は、歯根破折を起こしにくい支台築造法を目指し、ポスト部の弾性率を傾斜させた傾斜機能型築造体を光造形によって作製し、さらにその応力緩和効果を有限要素法により解析し検討した。

【材料及び方法】光造形装置には、シーメット社製 SOUP400GH を用いた。ベースレジンとして UDMA (50mol%) に TEGDMA (50mol%) を加え、紫外線重合性を付与するためにベンゾインメチルエーテル (1wt%) を添加したものを用意し、これにフィラーを添加してコンポジットレジンを作製した。

1) 最適作製条件：不定形シリカ 70wt% (平均粒径 $2.0\mu\text{m}$) をフィラーとしたコンポジットレジンペーストを作製し使用した。分解能、積層間の結合性、造形したモデルの安定性の観点から最適造形条件の決定した。

a) 硬化幅の測定：コンポジットレジン硬化帯の幅をレーザ走査速度 200, 250, 300, 350 (mm/sec) に対して測定した。

b) 硬化深度の測定： $10\times 10\text{mm}$ の正方形のモデルを光造形し、その厚みから評価した。走査速度 150, 200, 250, 300, 350 (mm/sec)、走査線間隔 0.2, 0.3, 0.4 (mm) に対し、測定を行った。

c) 造形後の重合収縮：造形したモデルに対し 150°C 2 時間の加熱重合を行い、それに伴う線収縮率から検討した。

d) 以上の結果から最適造形条件を求め、クラウンの作製を行った。

2) 傾斜機能型コンポジットレジン築造体：フィラーとしてガラス繊維粉末 (直径 $13\mu\text{m}$, 平均長 $70\mu\text{m}$) を 0, 9, 18, 27, 36, 45, 54, 64wt% それぞれ添加してコンポジットレジンペーストを作製した。

a) 傾斜型築造体の作製：ポスト先端より 1mm ごとに 0, …, 64wt%と順にコンポジットレジンのフィラー含有率を変えて積層造形を行って傾斜型築造体の作製を試みた。

b) 有限要素法解析：解析モデルは、築造体を装着した上顎中切歯歯根を想定し、荷重は歯軸に対し 45 度の角度で口蓋側方向から静止荷重 10N を加えた。境界条件は、歯根長軸に対し根尖側 10mm に位置する歯根表面を固定した条件と、根尖側 4mm に位置する歯根表面を固定した条件とした。比較解析した築造体は、12%金銀パラジウム鑄造築造体、チタン製既製ポストを挿入した従来型のコンポジットレジックラウン築造体（フィラー含有率 64wt%）、チタン既製ポストを挿入した傾斜型築造体である。

【結果と考察】 1) 最適光造形条件：走査速度 300mm/sec での硬化幅は 0.28mm となり、硬化深度は走査速度 300mm/sec 走査線間隔 0.2mm の造形条件下で 0.16mm となった。加熱重合による線収縮率は、走査速度 300mm/sec で 0.4%であり、本装置の最適造形条件を分解能、成形性、造形後の重合収縮の観点から走査速度 300mm/sec 走査線間隔 0.2-0.26mm 積層間隔 0.1mm と決定した。最適条件下でコンポジットレジンクラウンの作製が可能となった。 2) 傾斜型築造体：最適造形条件下で光造形することにより、弾性率がポスト先端部の約 3GPa からコア部の約 10GPa へ変化する傾斜構造をもつ築造体が作製可能となった。有限要素法解析から、メタルコアと比較して従来型レジンコアで認められたポスト先端部の応力緩和は、傾斜型築造体でさらに最大応力値が約 30%減少したことから、一層の応力緩和効果が期待できることが示された。

【結論】

コンポジットレジンの最適光造形条件を求め、その応用として均一組成のコンポジットレジンクラウンの作製が可能となった。さらにポスト部の弾性率を傾斜させた傾斜機能型築造体の作製が可能となり、有限要素法解析からポスト先端部に発生する応力集中の緩和効果が確認され、ポストに傾斜型機能を付与する有効性が示された。

各審査委員が行った主な質問は、以下の通りである。

- 1) 光造形装置における、コンポジットレジンモデルの作製方法について。また、その問題点と解決方法について。
- 2) 実験で用いた重合開始材について、その材料の特性と、硬化状態をさらに向上するための改善点について。
- 3) 加熱重合による線収縮率の測定をどのように行い、またその結果から得られたモデルの安定性の評価が妥当なものであったのかどうか。
- 4) 実験 1 と 2 で、フィラーの種類を変えた理由について。また、それぞれのフィラーの特性と、重合性に与える影響について。
- 5) 作製したクラウンの適合性について。
- 6) 有限要素法解析における、拘束点の設定位置と、結果に与える影響について。
- 7) 有限要素解析モデルで、既製金属ポストを挿入した状態を想定して解析した理由について。
- 8) 本研究の臨床応用への展望について。

これらの質問に対して、論文申請者から明快な回答ならびに説明が得られ、さらに今後の研究についても明確な方向性を持っていると判定した。

審査委員は全員、本研究が学位論文として十分値し、申請者が博士（歯学）の学位を授与される資格を有するものと認めた。