

有限要素法による鑄造ポストコア装着歯の応力解析

-セメント層の剥離が象牙質内応力分布に及ぼす影響-

高橋 衛

明海大学歯学部機能保存回復学講座歯科生体材料学分野

(指導：中嶋 裕 教授)

Finite Element Analysis of Stress Distributions in an Abutment Tooth Restored
with a Cast Post-and Core

-Influences of the Adhesion Failures in Cement Layer on the Stress Distributions
within Dentin-

Mamoru TAKAHASHI

Division of Dental Biomaterials Science

Department of Restorative and Biomaterials Sciences

Meikai University School of Dentistry

(Mentor: Prof. Hiroshi NAKAJIMA)

Abstract

Application of a cast post and core is known to increase the resistance to the root fracture of endodontically treated teeth. However, it was reported that the abutment teeth restored with a cast post-and-core has commonly been found in the dislodgment from root or root fracture. And it has been revealed the adhesion failures of cement layer occurred in advance to them.

The purpose of this study was to reveal a methods to avoid the adhesion failures in cement layer that has the influence of stress distributions within dentin on the abutment teeth restored with a cast post and core by using the three-dimensional finite element analysis.

Within the limitations of this study design, the following conclusions were drawn:

- 1.The maximum von Mises equivalent stress within the dentin with ferrule model was less than that without ferrule model regardless of amount of the load.
- 2.The area on failure of adhesion in cement layer inside the abutment teeth with ferrule model was remained in a narrow area compared to that without ferrule model. Additionally, the failure of adhesion in cement layer was occurred in an early stage at the cervix of the labial dentin.
3. MMA adhesive resin cement reduced to the adhesive failure rate in cement layer than that of zinc phosphate cement.

The results of this study suggest the failure of adhesion in cement layer have considerable effect on the stress distribution in the abutment teeth restored with cast post and core, furthermore, remaining ferrule and using of MMA adhesive resin cement could be advantage for reducing the adhesive failure in cement layer.

Key words: cast post and core, cement layer, three-dimensional finite element analysis

和文抄録

鑄造ポストコアは、歯内療法処置歯の歯根破折に対する抵抗性を増加させると考えられてきた。しかし、臨床では、鑄造ポストコアを装着した支台歯において、鑄造ポストコアの脱離や歯根破折が多く報告されている。そして、歯根破折に先立ち、セメント層の剥離が生じていることが明らかにされている。

本研究では、セメント層の剥離が生じにくい支台築造法を明らかにすることを目的として、鑄造ポストコアの装着に用いられる合着用セメント層の剥離が象牙質内応力分布に及ぼす影響について三次元有限要素法を用いて解析し、以下の結論を得た。

1. フェルルールが存在する場合には、フェルルールが無い場合に比較して、荷重量にかかわらず象牙質内に生じる最大応力値は小さくなる傾向を示した。
2. セメント層の剥離は、舌側歯頸部より発現し、フェルルールが存在する場合に剥離範囲は、狭くなる傾向を示した。さらに、セメント層における初期の接着剥離は、唇側歯頸部象牙質に発現した。
3. MMA 系接着性レジンセメントのセメント層の剥離率は、リン酸亜鉛セメントと比較して小さかった。

以上より、セメント層の剥離は、象牙質内応力分布を変化させることが示された。そして、セメント層の剥離を少なくするためには、フェルルールを付与するとともに、MMA 系接着性レジンセメントを用いることの有用性が示唆された。

キーワード: 鑄造ポストコア, セメント層, 三次元有限要素法

緒 言

歯内療法処置が施された支台歯に対してポストコアを用いた支台築造を行うことにより、歯質は補強される¹⁾といわれてきた。しかしながら、鑄造ポストコアを装着した支台歯では、メンテナンス期間中に鑄造ポストコアと一体化したクラウンの脱離や歯根破折が多く観察されている²⁾。とくに、歯根破折を生じた支台歯は、抜歯の適応となる。このような状況を避けるために支台築造歯の歯根破折に至るメカニズムの解明が必要であり、天然歯³⁻¹²⁾や模型歯¹³⁾を用いた破壊試験やシミュレーション実験による応力解析^{12, 14-21)}が行われてきた。その結果、残存歯質に付与するフェルールの有無や装着されるポストコアに用いられる築造材料や装着材料によっては、歯根部象牙質内に応力集中を引き起こし歯根破折²²⁾へ繋がるのが明らかにされている。そのため、近年では、支台築造歯におけるポストの役割は、主としてコアの保持に寄与²³⁾すると考えられてきている。

支台築造歯に対する応力解析法としては、破壊試験³⁻¹³⁾、光弾性実験¹⁵⁾、有限要素法^{14, 16-21)}が用いられている。破壊試験は、その多くが抜去歯を用いるため臨床に近い条件設定がされており、得られた結果は信頼性が高い。この方法では、象牙質表面の応力状態を測定することに対しては有効であるが、内部の応力状態を測定することは不可能である。一方、光弾性実験では、象牙質内部の応力分布を測定することは可能であるが、被験歯がエポキシ樹脂内に包埋されるため、各材料の物性値を再現することは難しいことが短所である。これに対して、有限要素法は、各構成要素である形態、材料などの条件設定が容易であるとともに、解析結果を視覚的に捉えることができることから支台築造歯の応力解析法として有効であると考えられている¹⁸⁻²⁰⁾。

支台築造体が装着された支台築造歯では、ポストコア、セメント材料、象牙質の複合体として構成されており、歯根破折は、これらセメント層、あるいは歯質、ポストコアなどの破壊に起因すると考えられる。とくに、鑄造ポストコアを装着するセメント材料は、唾液による溶解や繰り返し荷重による破壊、また、歯質、ポストコアに比較してセメント層は薄層であるとともに脆弱部分であるため破壊が生じやすい。そして、歯根破折の初期には、合着用セメント層の破壊が生じている^{8, 15)}ことから、セメント層の剥離とともに、象牙質内に局所的な応力

集中が惹起される。その結果として、歯根破折を生じると報告されている^{19, 20)}。すなわち、支台築造体を装着するために用いられるセメント層の破壊を防ぐことは、支台築造歯の術後経過に重要な役割を果たすものと考えられる。ポストコアの合着に用いられるセメント材料、とくにセメント層の荷重下での変形や破壊挙動について検討することは、歯根破折の発症メカニズムを解明する上で重要である。しかしながら、セメント層は薄層であることから実測することは困難であり、また、荷重下における挙動を把握するためには、シミュレーション実験を用いた解析が有効と考えられるものの、支台築造歯のセメント層の挙動によって象牙質内に生じる応力分布について検討した報告はみられない。

そこで、本研究では、セメント層の剥離が生じにくい支台築造法を明らかにすることを目的として、三次元有限要素法を用いて、鑄造ポストコア装着に用いるセメント材料におけるセメント層の挙動が象牙質内応力分布へ及ぼす影響について解析を行った。

材料と方法

1. 解析モデルの作製

解析モデルにおいて上顎中切歯の解剖学的形態ならびに寸法は、岡本らの報告^{17, 19-21)}に準じ、歯内療法処置後、鋳造ポストコア(歯冠相当部:コア部, 歯根相当部:ポスト部)で支台築造を行い、陶材焼付冠を装着した支台歯モデルと周囲支持組織についての三次元有限要素モデルを作製した。なお、モデルは総節点数 5656, 要素数 4738 とし、鏡像対称形のうち片側を対象とした(Fig 1)。

2. 解析条件

解析条件は、コア部の形態として歯冠部残存歯質の高さが異なる 2 種類、すなわち、歯冠部歯質が歯頸部から 3.3mm 存在し、かつフェルールがある支台歯の場合を Model 1, 歯頸部まで除去され歯冠部歯質が存在せず、かつフェルールがない支台歯の場合を Model 2 と設定した(Fig 2)。なお、ポスト部は、Model 1 および Model 2 のいずれも歯根長の 2/3, 幅径は解剖学的歯頸線の高さで歯根幅径の 1/3 とした。また、鋳造ポストコア装着におけるポストコア-象牙質間に介在するセメント層の厚みを 100 μ m とし、合着用セメント材料としてリン酸亜鉛セメントと MMA 系接着性レジンセメントを設定した。初期条件として設定した各種材料定数を Table 1 に示す。

セメント層の剥離を考慮するため、Fig 3 に示すようにセメント層内に生じた主応力を象牙質界面に対して、平行な赤矢印の分力と垂直な青矢印の分力に分解した。そして、セメント層の要素に生じた象牙質と界面に平行な分力ならびに界面に垂直な分力が、せん断接着強さ、引張接着強さより大きい要素をセメント層の剥離として捉え、剥離後はセメント層のヤング率を 1.00 MPa に変更した¹⁴⁾。ただし、象牙質界面に垂直な圧縮応力がみられる場合には、材料定数値の変更は行わなかった¹⁹⁾。なお、解析に用いた各セメント材料における剥離の閾値は、リン酸亜鉛セメント²⁴⁾および MMA 系接着性レジンセメント²⁵⁾の報告値を参考とし、せん断接着強さでそれぞれ 7.5MPa, 23.0MPa, 引張接着強さでは、1.2MPa, 15.0MPa を設定した。

荷重は、各モデルの切縁中央部に歯軸に対して舌側 45° 方向から静止荷重 50-200N を一点荷重として加えた。なお、拘束条件は、歯槽骨の底面を XYZ 方向および近遠心側面を X 方向に固定し、鏡像対称面については近遠心方向のみを固定した。

3. 応力解析

解析には三次元線形弾性体有限要素法プログラム²⁶⁾を用い、ワークステーション (Model 712/80, Hewlett Packard Company, California, USA)で行い、発現する応力を von Mises 相当応力値として算出した。解析は、セメント層については、セメント層の剥離挙動とセメント層の剥離率を算出し、セメント層内に発現する最大応力発現部位について検討した。また、象牙質では、象牙質内応力分布、および象牙質内に発現する最大応力値とその発現部位について検討を行った。

結 果

1. セメント層の固着状態における象牙質内応力分布

Fig 4 に Model 1 における 50-200N 荷重時の象牙質内応力分布を示す。セメント材料の種類および荷重量増加にかかわらず、最大応力が舌側歯根中央部外側に発現しており、象牙質内応力分布には近似した傾向がみられた。Fig 5 に Model 2 における 50-200N 荷重時の象牙質内応力分布を示す。セメント材料の種類および荷重量増加にかかわらず、最大応力が舌側歯根中央部外側に発現しており、象牙質内応力分布は、Model 1 と同様な傾向が認められた。Fig 6 に 50-200N 荷重時での象牙質内に発現する最大応力値を示す。最大応力値は、荷重量増加にともなって増加し、Model およびセメント材料の種類による差は認められなかった。

2. セメント層の剥離状態におけるセメント層の挙動と象牙質内応力分布

1) セメント層の挙動

Fig 7 に Model 1 における 50-200N 荷重時のセメント層剥離の挙動を示す。リン酸亜鉛セメントでは、セメント層の剥離が舌側歯頸部、歯冠部唇側および舌側ポスト部から認められ、荷重量の増加にともなって歯冠部唇側へ剥離範囲が拡大した。これに対して、MMA 系接着性レジンセメントでは、50N 荷重時において舌側歯頸部より剥離が認められ、150N、200N 荷重時において舌側歯頸部、舌側ポスト部および唇側ポスト先端部へと荷重量の増加にともなって剥離範囲は拡大した。しかし、この剥離範囲は、リン酸亜鉛セメントに比較して狭く、歯冠部唇側歯頸部にはみられなかった。Fig 8 には、Model 2 における 50-200N 荷重時のセメント層剥離の挙動を示す。リン酸亜鉛セメントでは、セメント層の剥離が 50N 荷重において唇側歯頸部ならびにポスト舌側先端部以外の広い範囲で剥離が生じており、荷重量が増加しても、この剥離範囲に変化はみられなかった。これに対して、MMA 系接着性レジンセメントでは、50N 荷重時に舌側歯頸部およびポスト舌側中央部付近まで剥離が認められ、荷重量の増加にともなって剥離範囲が拡大したが、リン酸亜鉛セメントと比較して、剥離範囲は狭い傾向がみられた。Fig 9 には、50-200N 荷重時における各セメント材

料における剥離率を示す。Model 1 において MMA 系接着性レジンセメントでは、200N 荷重時で剥離範囲が 23%と最も低い剥離率であるのに対して、リン酸亜鉛セメントでは、68%であった。Model 2 においてリン酸亜鉛セメントでは 50N 荷重時で 82%の剥離が生じており、荷重量が増加しても剥離範囲は変化がなかったのに対して、一方、MMA 系接着性レジンセメントでは、50-200N 荷重時で 44-73%となった。

2) 象牙質内応力分布

Fig 10 には、Model 1 において 50-200N 荷重時の象牙質内応力分布を示す。リン酸亜鉛セメントでは、50N 荷重時で舌側歯根中央部外側、100N では、舌側隣接面歯頸部外側、さらに、150N、200N では、舌側歯頸部外側に最大応力が発現した。これに対して、MMA 系接着性レジンセメントでは、荷重量の増加にかかわらず、舌側隣接面歯頸部外側に最大応力が認められ、リン酸亜鉛セメントとほぼ近似した応力分布傾向がみられた。Fig 11 には、Model 2 において 50-200N 荷重時の象牙質内応力分布を示す。リン酸亜鉛セメントでは、荷重増加にかかわらず、歯頸部隣接面内側に最大応力が発現した。これに対して、MMA 系接着性レジンセメントでは、50N 荷重時において唇側歯頸部外側、100-200N では、歯頸部隣接面内側に最大応力が認められ、歯頸部隣接面内側と唇側歯頸部外側に大きな応力が発現した。Fig 12 は、50-200N 荷重時における Model と合着用セメント材料の違いによって象牙質内に発現する最大応力値を示す。荷重量の増加にともなって、Model 2 は Model 1 よりも大きな値を示した。また、MMA 系接着性レジンセメントでは、リン酸亜鉛セメントに比較して最大応力値は小さくなる傾向が認められた。

考 察

1. セメント層における剥離状態の設定について

セメント層が固着状態では、Model やセメント材料の種類、そして、荷重増加量にかかわらず、最大応力は舌側歯根中央部外側に発現しており、象牙質内応力分布では、唇舌側的にはほぼ対称的な傾向を示していた。Ho ら¹⁶⁾は、セメント層を固着状態として、支台築造を施した上顎中切歯に対して三次元有限要素法を用いて応力解析を行った結果、唇側歯根部の歯頸側 1/3 に応力集中がみられたことを報告している。本解析の固着状態における応力分布傾向は Ho ら¹⁶⁾の報告と同様な結果を示した。しかしながら、臨床症例や天然歯、模型歯を用いた破壊試験で観察される、歯頸部を起始点とし、唇側歯根部中央外側へ発現する破折様相³⁻¹³⁾とは異なっていた。

歯根破折は、応力集中部位、もしくは脆弱な部分であるセメント層の破壊、あるいは歯質-ポストコアなどの界面において生じており、さらに歯根破折に先立ちセメント層の剥離・破壊、支台築造体の偏位が生じることが報告されている¹⁵⁾。岡本ら¹⁹⁾は、支台築造歯の有限要素法による応力解析を行うにあたりセメント層の破壊を考慮するため、象牙質-セメント層-ポスト界面を固着状態として解析を行った。この解析では、セメント層の破壊を想定するため、材料物性値を低ヤング率¹⁴⁾に変更して解析したところ、固着状態と比較して象牙質内の応力分布傾向が変化した。そこで、従来から行われている有限要素法の線形解析法において象牙質-セメント層-ポスト複合体のなかでセメント層の剥離状態の条件設定を加えることにより、臨床で観察される破折様相の結果により近い状態を Model に再現できたものと考えられる。

セメント層の剥離に関する設定は、象牙質-セメント層の界面において節点を付加し、界面破壊を想定する方法や要素内の凝集破壊を想定する方法がある。レジン系合着用セメントの破壊形式については、凝集破壊および混合破壊が大勢を占める²⁷⁾ことや、リン酸亜鉛セメントでは、象牙質に対して合着後 24 時間後において凝集破壊が多かった²⁸⁾ことから、本解析におけるセメント層の剥離では、共通の破壊様式である凝集破壊を想定した条件²⁰⁾を設定して解析を行った。

Milot ら⁷⁾は、上顎中切歯に鑄造ポストコアにより支台築造を行い、支台歯形成がベベル形態の場合、歯根部象牙質の唇舌側歯頸部 1/3 に水平的破折線を生じるが、ノンベベル形態では舌側歯頸部から斜破折線が生じることを報告している。また、Sirimai ら¹⁰⁾は、フェルールがない鑄造ポストコアによる支台築造では、歯頸部隣接面から唇側歯頸部外側への斜破折線が多かったことを報告している。本解析では、Model 1 の舌側歯頸部ショルダ一部分の応力集中部位は、Milot らの報告する破折線⁷⁾、さらに Model 2 での歯頸部隣接面内側での応力集中部位は、Sirimai らが観察した破折線¹⁰⁾と同一部位に発現している。最大応力発現部位に破折線が生じるとすれば、本解析結果は臨床において観察できる歯根破折や破壊試験での破折様相と近似することになる。

これらのことから、有限要素法を用いた支台築造歯の応力解析を行うにあたり、セメント層の剥離を想定した条件を設定する¹⁹⁻²¹⁾ことにより、臨床で観察される歯根破折の様相を推測しうる解析ができるものと考えられる。

2. セメント層の剥離について

1) フェルールの影響について

Libman ら⁸⁾は、セメント層の破壊の初期には、クラウンと歯質間においてセメント層の喪失が生じることを報告している。神山¹⁵⁾は、光弾性実験を用い、抜去歯に対して、リン酸亜鉛セメントで合着した鑄造ポストコアに口蓋側方向から連続荷重を加えるとセメント層の剥離が生じることによって口蓋側のクラウン辺縁相当部から支台築造体の脱離が生じることを報告している。本解析においてセメント層の剥離は、Model にかかわらず荷重側におけるクラウン-歯質との歯頸部舌側辺縁において生じ、荷重量の増加にともなって剥離範囲はポスト唇側部まで拡大しており、初期のセメント剥離部位は既報の結果^{8, 15)}と近似していた。土屋¹²⁾はポスト装着歯の歯質内に生じる亀裂は、根面部の唇舌的中央部のポスト近接部の歯質から生じ、歯根表面に向かう亀裂として成長すると報告しており、初期亀裂の発現した部位は、本研究の Model 2 におけるセメント層内の最大応力発現部位とほぼ一致していた。すなわち、(1) 荷重下によりクラウン辺縁部歯質におけるセメント層の剥離が生じる、(2) ポストコアの微小移動によりセメント層が破壊、(3) セメント層から象牙質へ応力が伝達

されることによって、セメント層の最大応力発現部位に近接した象牙質内に応力が集中するというプロセスが考えられる。

本解析では、Model 作製の予備実験として、抜去歯に鑄造ポストコアによる支台築造を行う際、ポストコア形成の支台歯概形成を行い、フェルルールを実測したところ、3.3 mm 存在していたことから、Model 1 におけるフェルルール量を 3.3 mm とした。また、歯頸部にフェルルール無しとして Model 2 でフェルルール量を 0 mm に設定した。その結果、Model 1 では、Model 2 と比較してセメント層の剥離範囲は狭く、また、象牙質内に生じる最大応力値も、Model 1 の方が Model 2 より小さい値を示した。鑄造ポストコアを装着した支台歯においてフェルルールがない場合と比較して、フェルルールが存在する場合の破折強さは大きい^{3,5,6,8,9)}。また、Barkhordar ら³⁾はフェルルールを 2.0 mm 存在させることで破壊荷重が増加すること、Libman ら⁸⁾は、フェルルールが 1.5 mm 以上存在することで歯質の疲労破折抵抗が有意に増加することを報告している。本研究においてもフェルルールの存在によって、セメント剥離率および象牙質内に発現する最大応力値が減少する傾向が認められた。これは、象牙質内において局所的な応力集中が生じにくいことを示唆しており、歯根破折に先立って生じるセメント層の剥離・破壊ならびに象牙質内に生じる最大応力値にフェルルールの有無が関与しているものと考えられた。

象牙質内応力分布では、Model 1 で舌側歯頸部ショルダー外側に最大応力が発現するものの、固着状態に近似した唇舌側的に対称的な応力分布がみられた。一方、Model 2 では、歯頸部隣接面内側と唇側歯頸部外側に応力集中が認められ、Model 1 と比較して応力分布傾向は異なっていた。しかし、セメント層および象牙質内における最大応力発現部位は、Model 1 と Model 2 で近似していた。抜去歯を用いた支台築造歯に繰り返し荷重を加えた場合には、荷重側歯頸部のセメント層と象牙質との界面に剥離、微少漏洩が発現する⁶⁾。また、クラウン部の非荷重側辺縁部には、歯科用セメントに不利となる引張応力の集中が生じる²⁹⁾ことや、歯科用セメントでは、せん断接着強さが引張接着強さより大きい²⁷⁾ことから、本解析におけるクラウン-歯質境界部、すなわち、歯頸部舌側辺縁部からのセメント層の剥離は、主として引張応力によって生じていると思われる。

一方、Model 1 では、セメント層の剥離範囲がポスト唇側中央部へ拡大しないのに対して、

Model 2 では、ポスト全周囲に剥離が拡大していた。このセメントの剥離範囲拡大の違い、とくに剥離が多い場合には、ポストコアを支持・維持するために存在しているセメント層が失われることで鑄造ポストコアの微小移動が起これ、局所的応力集中が生じることによって象牙質内応力分布に変化をきたしたものと考えられる。Model 1 では、舌側歯冠部の歯頸部辺縁ショルダー部に最大応力が生じているが、この歯冠部残存歯質が荷重に抵抗することで、ポスト周囲へのセメント層剥離の拡大を抑制していると思われる。これに対して、Model 2 では、歯頸部隣接面内側部に最大応力が発現するが荷重に対して抵抗する残存歯質が歯冠部に存在しないため、ポスト軸面部に生じる応力をポスト周囲の歯根部象牙質のみで担うこととなり、セメント層の剥離範囲を拡大させる要因となっていると思われる。以上より、セメント層の剥離に抵抗するためには、残存歯質のうち軸面部歯質が重要であり、とくに、荷重点に近い部位における歯冠部歯質、すなわち、フェルールの有無は、セメント層の剥離拡大を抑制することに有効であると考えられる。

2) 合着用セメント材料について

支台築造歯は鑄造ポストコア、合着用セメント、象牙質の複合体である。これらの構成要素のうち象牙質の引張強さ、せん断強さは、合着用セメントの象牙質に対する接着強さよりも大きい³⁰⁾。さらに、静的荷重による破断試験時には、最も強度の低い材料から破壊が生じる³¹⁾ことから、セメント層が最も脆弱な構成要素となっている。そのため、本研究は、鑄造ポストコアを装着時に用いる合着用セメント材料の物性値によるセメント剥離の影響について検討することとした。合着用セメントの種類としては、ヤング率および接着力の異なるリン酸亜鉛セメントとMMA系接着性レジンセメントの2種類を設定し、解析した。本研究の結果から、Model が異なっても、リン酸亜鉛セメントの剥離率は、MMA系接着性レジンセメントと比較して高かった。また、リン酸亜鉛セメントの象牙質内の最大応力値はMMA系接着性レジンセメントと比較して荷重量の増加にかかわらず、大きかったが、両者の応力分布の傾向は近似していた。

複合体における構成要素において弾性率に大きな差がある場合には、修復材料と被着体との界面が力学的に不調和となり、接着材料の破壊や修復材料の破折原因³²⁾となるこ

とが報告されている。本解析で設定したリン酸亜鉛セメントと象牙質のヤング率は近似していることから、ヤング率の小さい MMA 系接着性レジンセメントと比較して、象牙質-セメント層間での偏位は少ないと思われる。しかしながら、リン酸亜鉛セメントにおけるセメント層の剥離率は高く、また、最大応力値も大きく発現していた。Dejakら³³⁾は、ヤング率の異なるセラミックインレーとコンポジットインレーを装着した歯質におけるレジンセメントの界面に生じる応力について有限要素法を用いて解析した結果、インレー体のヤング率を増加させてもセメント界面に生じる応力値の変化がわずかであったことを報告している。また、海渡ら²⁹⁾は有限要素法によるクラウン装着時におけるセメント材料としてヤング率の異なる物性値を設定しセメント層の挙動を検討した結果、セメント層のヤング率の違いは応力値の差異としてあらわれるが、その影響は少なかったと報告している。一方、セメント層における接着に関しては、リン酸亜鉛セメントに比較して MMA 系接着性レジンセメントによる接着強さが大きい²⁷⁾ことから、各セメント材料における剥離の閾値を設定した。その結果、フェルールの無い Model 2 において荷重量の増加にともなってセメント層の剥離は増加したが、50N、100N 荷重時においては、剥離率が MMA 系接着性レジンセメントと比較してリン酸亜鉛セメントでそれぞれ 188%、137%の剥離率を示した (Fig 9)。これらのことから、合着用セメント材料の物性値に関しては、ヤング率と比較して接着強さによる設定条件がセメント層の剥離範囲や最大応力の発現に影響を及ぼしており、セメント層の剥離を減少させるためには、接着力の高いセメント材料の選択が必要と考える。さらに、臨床においては、口腔内は多湿であることから、合着用セメント材料の接着特性を引き出すための操作法や環境についても考慮することにより、さらにセメント層の剥離を減少させるものと考えられた。

結 論

鑄造ポストコアの装着に用いられるセメント層の剥離が象牙質内応力分布に及ぼす影響について三次元有限要素法を用いて検討を行った結果、以下の結論が得られた。

1. フェルールが存在する場合には、象牙質内に生じる最大応力値は小さくなる傾向を示した。
2. 合着用セメント層の剥離は、舌側歯頸部より発現し、フェルールが存在する場合に剥離範囲は狭い傾向を示した。
3. MMA 系接着性レジンセメントのセメント層の剥離率は、リン酸亜鉛セメントと比較して小さかった。

以上より、セメント層の剥離は象牙質内応力分布を変化させること、そして、セメント層の剥離を少なくするためには、フェルールを付与するとともに、MMA 系接着性レジンセメントを用いることの有用性が示唆された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始御指導、御鞭撻を賜りました機能保存回復学講座歯科生体材料学分野 中畠 裕 教授、機能保存回復学講座歯科補綴学分野 大川 周治 教授、機能保存回復学講座歯科補綴学分野 藤澤 政紀 教授、ならびに機能保存回復学講座保存治療学分野 横瀬 敏志 教授に深く感謝申し上げます。

また、直接ご教示とご助言を頂きました機能保存回復学講座歯科補綴学分野 岡本和彦 准教授に感謝の意を表します。さらに本研究にあたり御援助、御協力いただきました機能保存回復学講座歯科生体材料学分野 日比野 靖准教授ならびに機能保存回復学講座歯科生体材料学分野の諸先生方に心より御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 花村典之:2.支台築造の目的. In:支台築造, 医歯薬出版. 東京, pp 6-8, 1990
- 2) 福島俊士, 坪田有史:支台築造の予後成績. 日補綴歯会誌 **45**, 660-668, 2001
- 3) Barkhordar RA, Radke R and Abbasi J:Effect of metal collars on resistance of endodontically treated teeth to root fracture. J Prosthet Dent **61**,676-678, 1989
- 4) Sorensen JA and EngelmanMJ : Ferrule design and fracture resistance of endodontically treated teeth. J Prosthet Dent **63**, 529-536, 1990
- 5) Sorensen JA and Engelman MJ:Effect of post adaptation on fracture resistance of endodontically treated teeth. J Prosthet Dent **64**, 419-424, 1990
- 6) 渡辺厚生:支台築造に関する研究 -歯冠部残存歯質量の影響について-. 日補綴歯会誌 **34**, 7-17, 1990
- 7) Milot P and Stein RS:Root fracture in endodontically treated teeth related to post selection and crown design. J Prosthet Dent **68**, 428-435, 1992
- 8) Libman WJ and Nicholls JI:Load fatigue of teeth restored with cast posts and cores and complete crowns. Int J Proshodont **8**, 155-161, 1995
- 9) 石原正隆:支台築造された失活歯の残存歯質が破折強度および破折様相に与える影響. 鶴見歯学 **24**, 157-170, 1998
- 10) Sirimai S, Riis DN and Morgano SM:An in vitro study of the fracture resistance and the incidence of vertical root fracture of pulpless teeth restored with six post-and-coresystems. J Prosthet Dent **81**, 262-269, 1999
- 11) 長田貴幸, 割田研司, 川和忠治:歯根部歯質の残存量が支台築造した歯の破壊強度に及ぼす影響 天然歯による予備的研究. 日補綴歯会誌 **44**, 757-767, 2000
- 12) 土屋総一郎:ポスト装着歯に生じた亀裂に関する研究. 日補綴歯会誌 **47**, 671-680, 2003
- 13) 岡本和彦, 猪野照夫, 日比野 靖, 曾根峰世, 中嶋 裕, 大川周治:支台築造歯の歯根破折に関する実験的研究-歯根部歯質の残存量および支台築造法の影響について

- てー. 明海歯学, **35**, 69-75, 2006
- 14) 大塚 潔:前歯における合釘ならびに歯根部歯質の応力解析. 日補綴歯会誌 **27**, 1001-1020, 1983
 - 15) 神山範子:支台築造に関する力学的研究 ー特に脱落時の変化についてー. 鶴見歯学 **10**, 399-418, 1984
 - 16) Ho MH, Lee SY, Chen HH and Lee MC:Three-dimensional finite element analysis of the effects of posts on stress distribution in dentin. J Prosthet Dent **72**, 367-372, 1994
 - 17) 岡本和彦, 猪野照夫, 川島泰三, 天野秀雄:支台築造歯における象牙質内応力への影響 ー合着用セメントの剥離についてー. 日補綴歯会誌 **42**(99 回特別号), 95, 1998
 - 18) 谷野之紀, 黒江敏史, 佐藤範幸, 立花佳奈, 三田村好矩, 大畑 昇:3次元有限要素法を用いた支台築造の応力解析 ーファイバーポストおよび各種金属ポストの弾性係数の違いによる影響ー. 北海道歯誌 **25**, 10-18, 2004
 - 19) 岡本和彦, 猪野照夫, 天野秀雄, 荒井 学, 鈴木めぐみ, 曾根峰世:歯冠部残存歯質の有無と合着用セメント層が支台築造歯の象牙質内応力分布に及ぼす影響. 日補綴歯会誌 **48**, 602-611, 2004
 - 20) 岡本和彦, 猪野照夫, 天野秀雄, 曾根峰世, 北野香織, 中山賢一:ファイバーポストおよび鑄造ポストにおける支台築造歯の応力解析. 明海大歯誌, **33**, 220-222, 2005
 - 21) Okamoto K, Ino T, Iwase N, Shimizu E, Suzuki M, Satoh G, Ohkawa S and Fujisawa M:Three-dimensional finite element analysis of stress distribution in composite resin cores with fiber posts of varying diameters. Dent Mater J **27**,49-55, 2008
 - 22) Morgano SM:Restoration of pulpless teeth. Application of traditional principles in present and future contexts. J Prosthet Dent **75**, 375-380, 1996
 - 23) 中島正俊, 田上順次:直接法によるレジンコアとダイレクトレジンクラウン. 歯界展望 **104**, 493-500, 2004
 - 24) 吉田圭一, 舟木和紀, 棚川美佳:各種合着用セメントの諸性質. 日補綴歯会誌 **39**,

35-40, 1995

- 25) 北迫勇一, 山田敏元, 二階堂 徹, 原田直子, マイケル F バロー, 猪越重久, 高津寿夫, 増原英一:接着性レジンセメントに関する研究 -第 2 報 引張ならびに剪断接着強さについて-. 歯科材料・器械 **14**, 117-130, 1995
- 26) Zienkiewicz OC and Taylor RL:The Basis. In:The Finite Element Method Fifth edition Volume 1, Oxford, Butterworth-Heinemann, pp 127-39, 2000
- 27) 高橋 世紀, 宮本 弘平, 高田 昌樹, 安倍 敏, 遠藤 達雄, 奥田 禮一, 小松 正志:合着用セメントの新鮮抜去非包埋牛歯に対する剪断接着強さ. 日歯保存誌 **45**, 362-376, 2002
- 28) 小宮山 義和:レジン系合着用セメントに関する研究 とくに被着歯面の湿潤状態がその歯質接着性に及ぼす影響について. 日歯保存誌 **45**, 762-772, 2002
- 29) 海渡智義, 松田哲治, 亀沢広嗣, 横塚繁雄:全部鑄造冠のセメント層に関する力学的研究. 歯学 **86**, 898-913, 1999
- 30) 小田 豊:材料から見た支台築造. 接着歯学 **17**, 125-133, 1999
- 31) 小田 豊, 副島寛貫, 原田麗乃, 服部雅之, 河田英司, 吉成正雄:ファイバーポストを用いた支台築造体の破断強度. 日歯産会誌 **27**, 31-37, 2013
- 32) 加藤正治:レジンセメントで接着した歯冠色修復材料の耐衝撃性. 歯科材料・器械 **16**, 389-404, 1997
- 33) Dejak B and Mlotkowski A:Three-dimensional finite element analysis of strength and adhesion of composite resin versus ceramic inlays in molars. J Prosthet Dent **99**, 131-140, 2008

表・図

Table 1 Mechanical properties of materials in FEA model

Material	Young's modulus(MPa)	Poisson's ratio
Porcelain ¹⁷⁾	130000	0.20
Metal(gold alloy) ¹⁸⁾	95000	0.33
Dentin ¹⁸⁾	14000	0.15
Cortical bone ¹⁷⁾	10000	0.30
Sponge bone ¹⁷⁾	1500	0.30
Periodontal ligament ¹⁸⁾	10	0.49
Gutta-percha ¹⁸⁾	100	0.39
MMA resin cement ¹⁸⁾	4100	0.35
Zinc phosphate cement ¹⁷⁾	14000	0.35

図の説明

Figures

Fig.1 FEA model of a maxillary central incisor restored with post-and-core.

Fig.2 Form of finite element analysis models.

Fig.3 Analysis condition for Failure of adhesion in cement layer between dentin and cast post-and-core.

Fig.4 Distribution of von Mises stresses in dentin with the rigidity condition of cement layer on Model 1.

Fig.5 Distribution of von Mises stresses in dentin with the rigidity condition of cement layer on Model 2.

Fig.6 Maximum von Mises stress values in dentin with the rigidity condition of cement layer to dentin and cast post-and-core under increasing loads.

Fig.7 An areas of adhesion failure in cement layer under increasing loads on model 1.

Fig.8 An areas of adhesion failure in cement layer under increasing loads on model 2.

Fig.9 Adhesion failure rate in cement layer to dentin and post-and-core under increasing loads.

Fig.10 Distribution of von Mises stresses in dentin with adhesion failure on cement layer under increasing loads on model 1.

Fig.11 Distribution of von Mises stresses in dentin with adhesion failure on cement layer under increasing loads on model 2.

Fig.12 Maximum von Mises stress values in dentin with adhesion failure on cement layer to dentin and cast post-and-core under increasing loads.

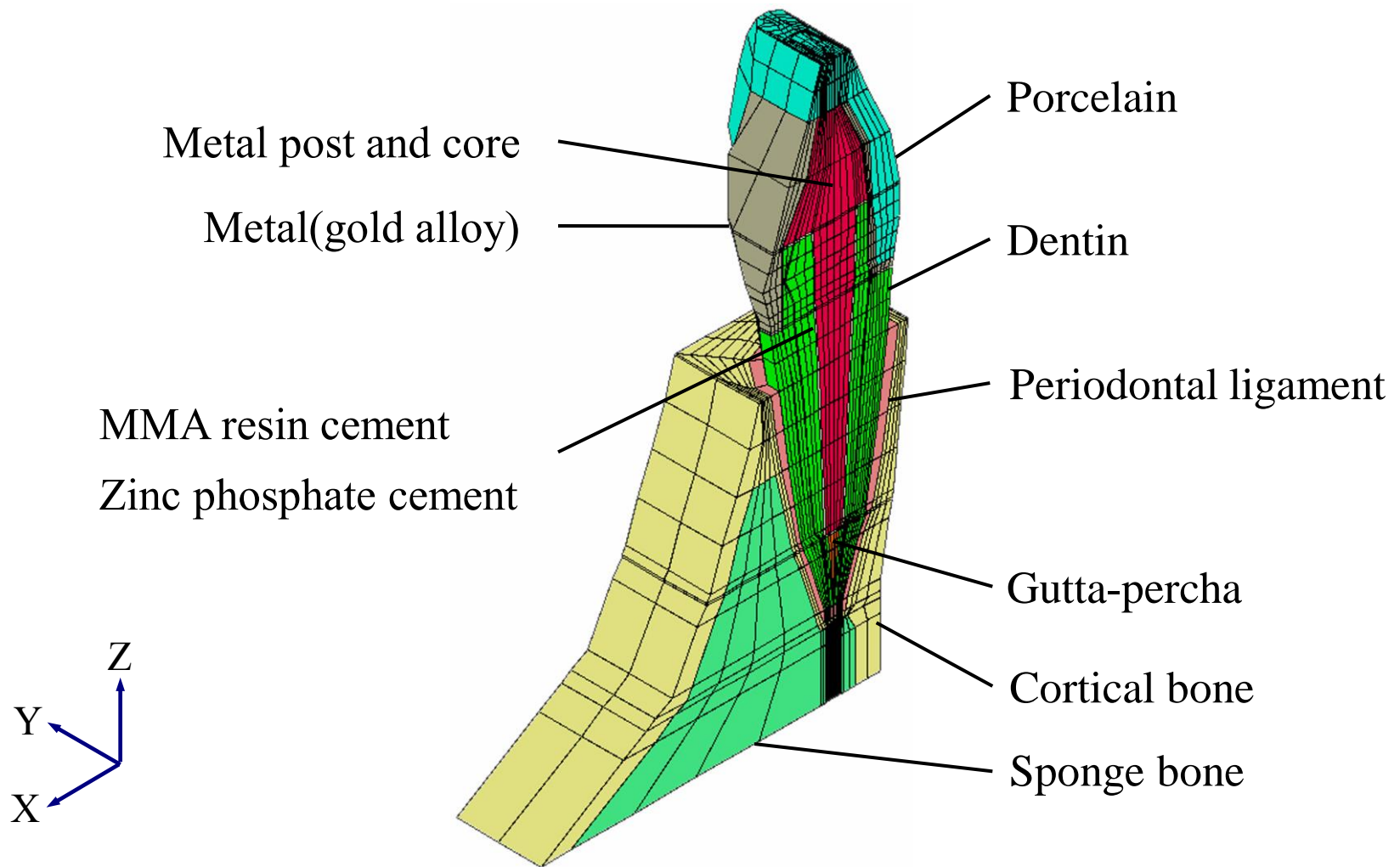
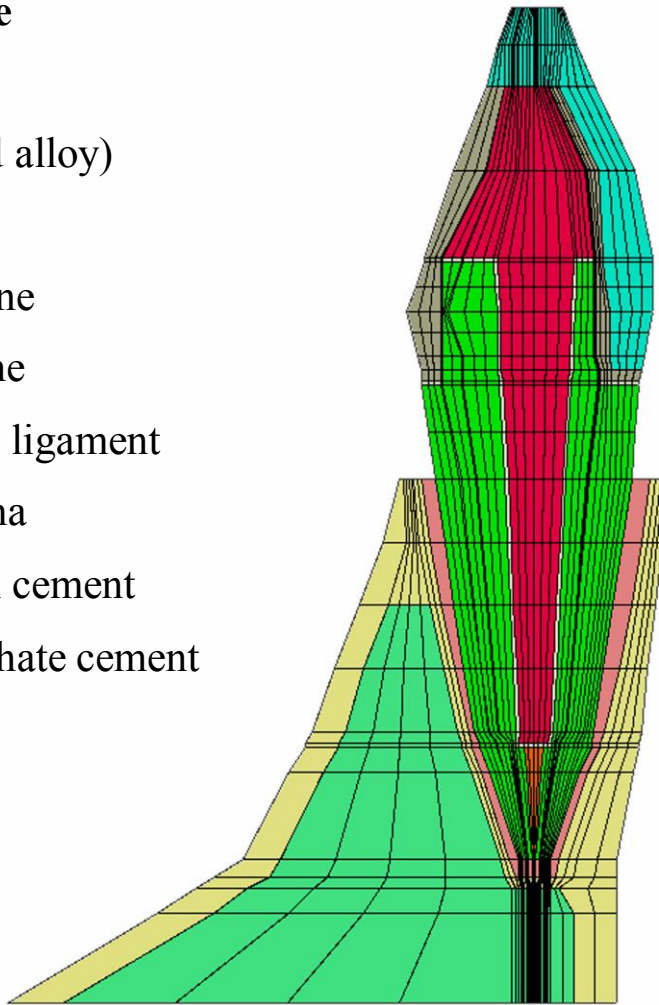
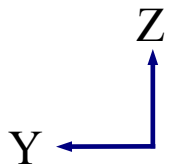


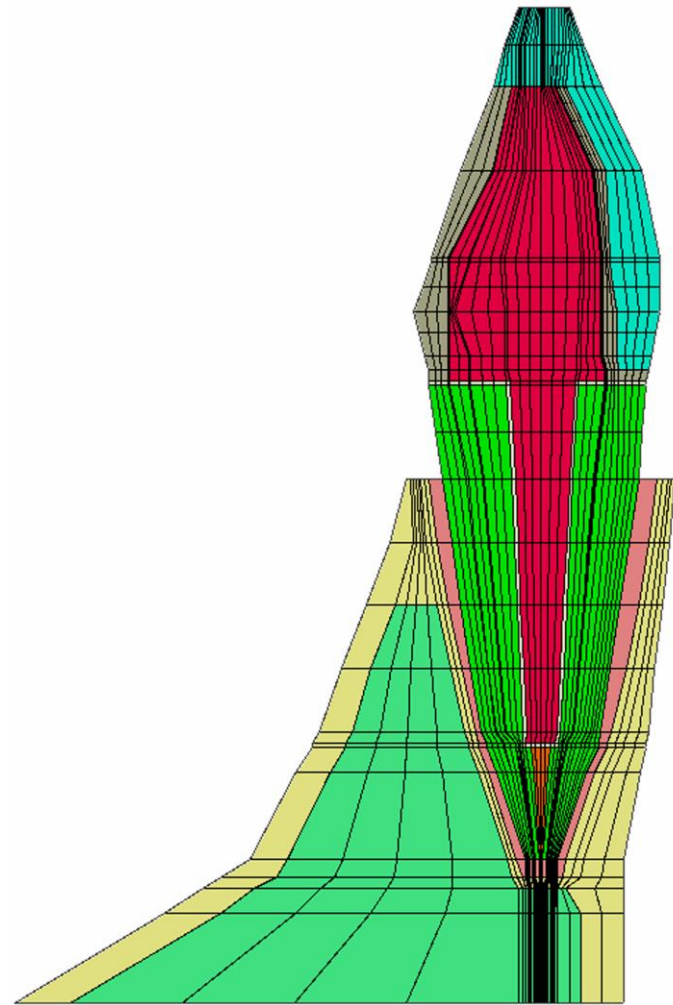
Fig 1 FEA model of a maxillary central incisor restored with cast post-and-core

Material table

- Porcelain
- Metal (gold alloy)
- Dentin
- Cortical bone
- Sponge bone
- Periodontal ligament
- Gutta-percha
- MMA resin cement
- Zinc phosphate cement



Model 1 ; Crown with ferrule



Model 2 ; Crown without ferrule

Fig 2 Form of finite element analysis models

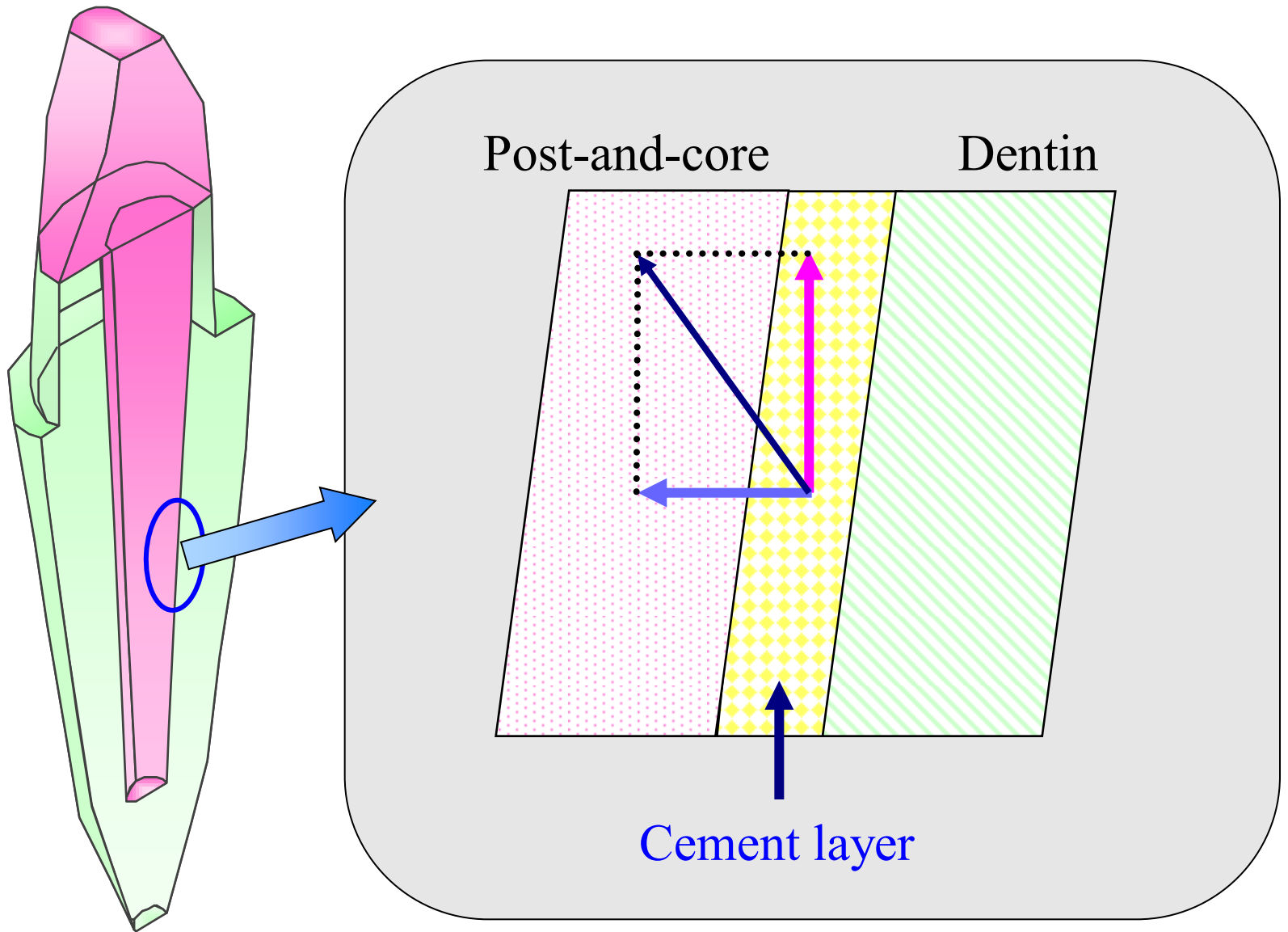


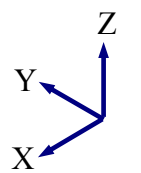
Fig 3 Analysis condition for Failure of adhesion in cement layer between dentin and cast post-and-core

→: Location of maximum stress

(MPa)

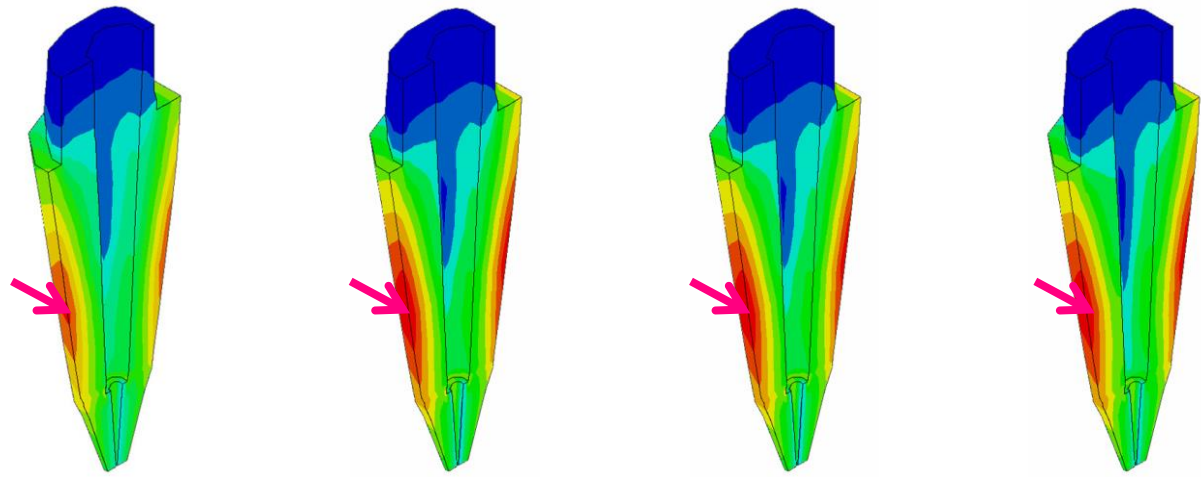
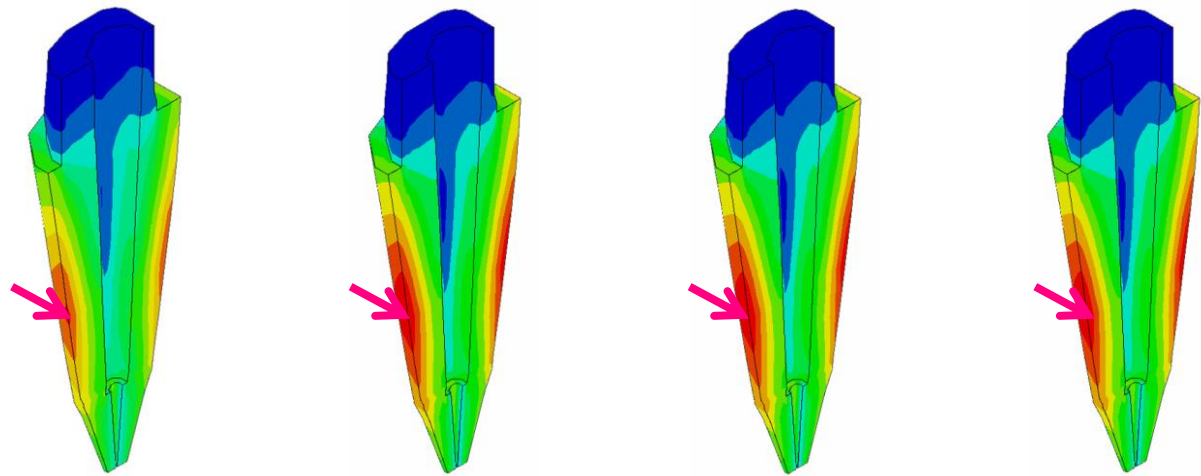
Max

Min



Zinc phosphate
cement

MMA resin
cement



50 N

100 N

150 N

200 N

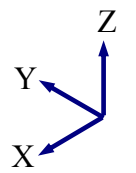
Fig 4 Distribution of von Mises stresses in dentin with the rigidity condition of cement layer on Model 1

→: Location of maximum stress

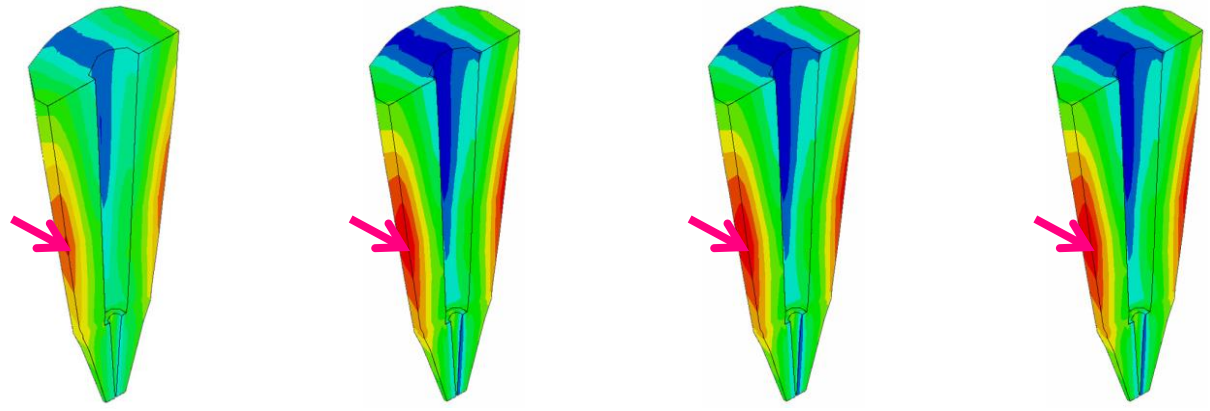
(MPa)

Max

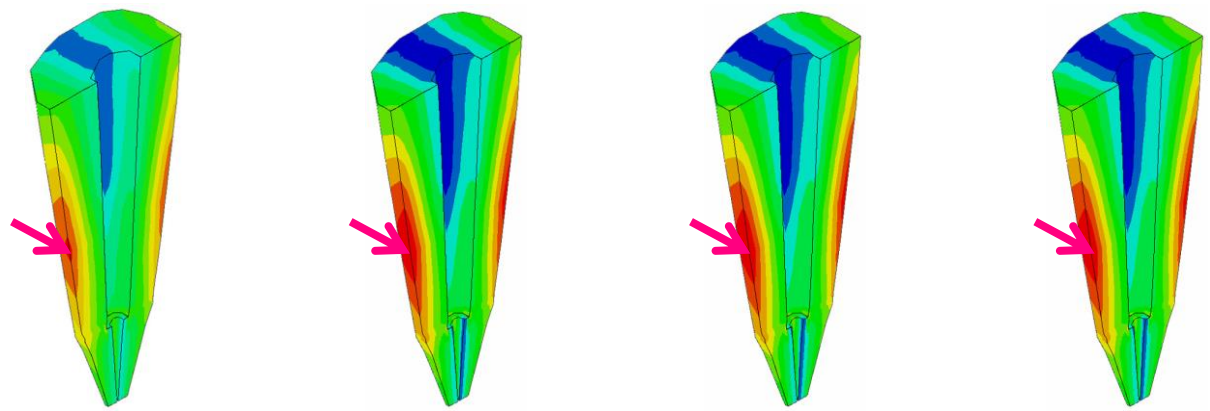
Min



Zinc phosphate
cement



MMA resin
cement



50 N

100 N

150 N

200 N

Fig 5 Distribution of von Mises stresses in dentin with the rigidity condition of cement layer on Model 2

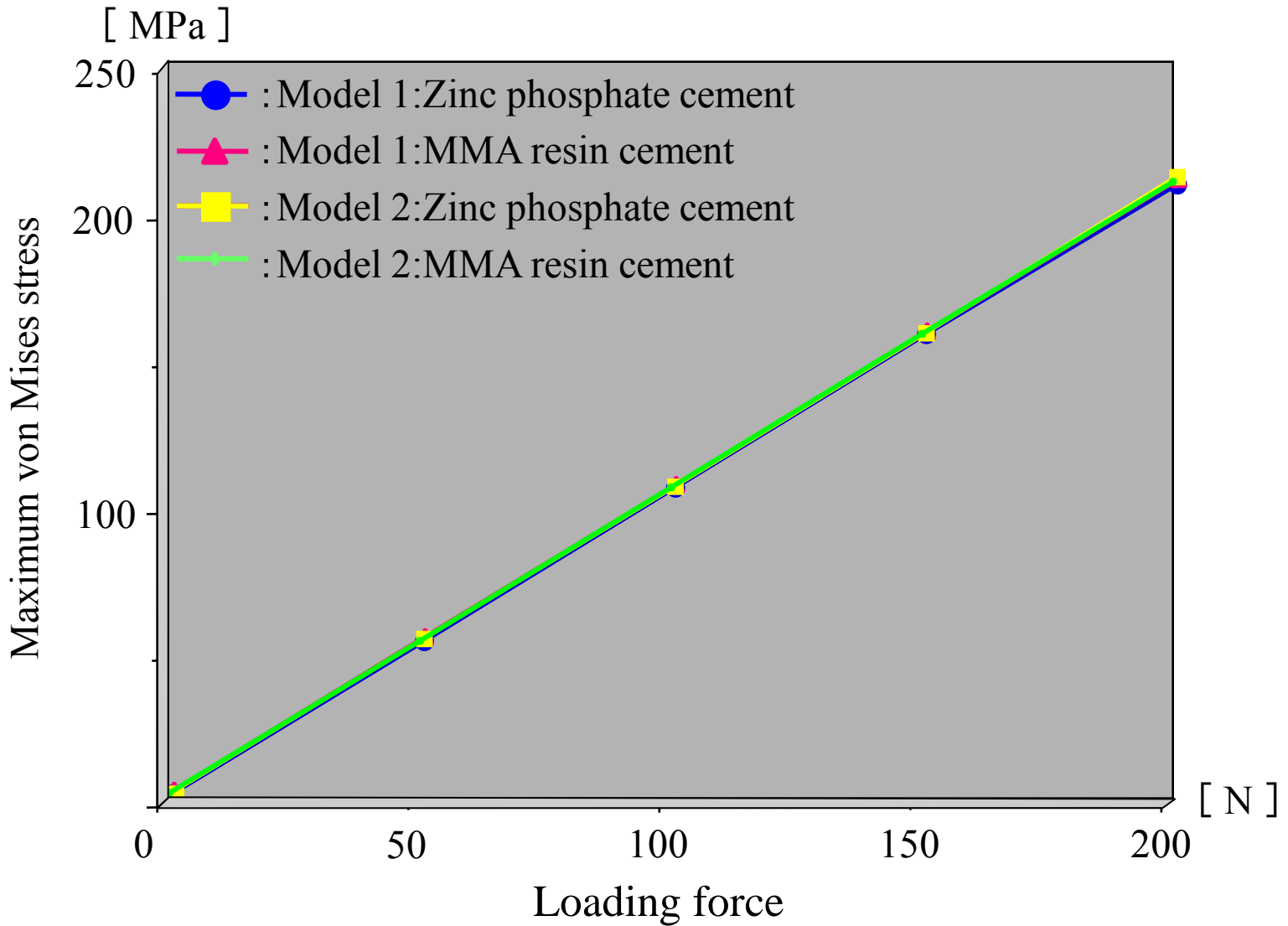
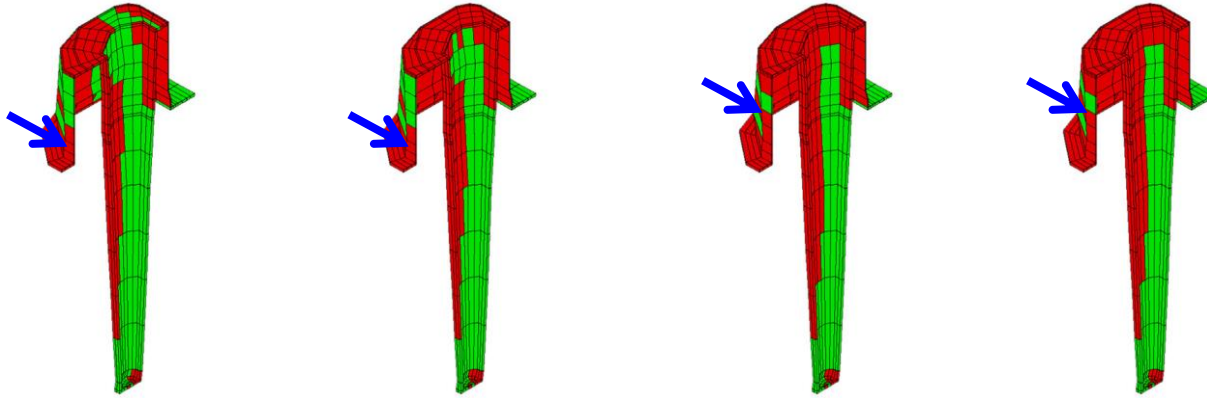


Fig 6 Maximum von Mises stress values in dentin with the rigidity condition of cement layer to dentin and cast post-and-core under increasing loads

→: Location of maximum stress

■ Adhesion sustained
■ Adhesion failure

Zinc phosphate
cement



MMA resin
cement

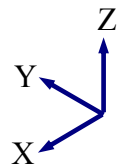
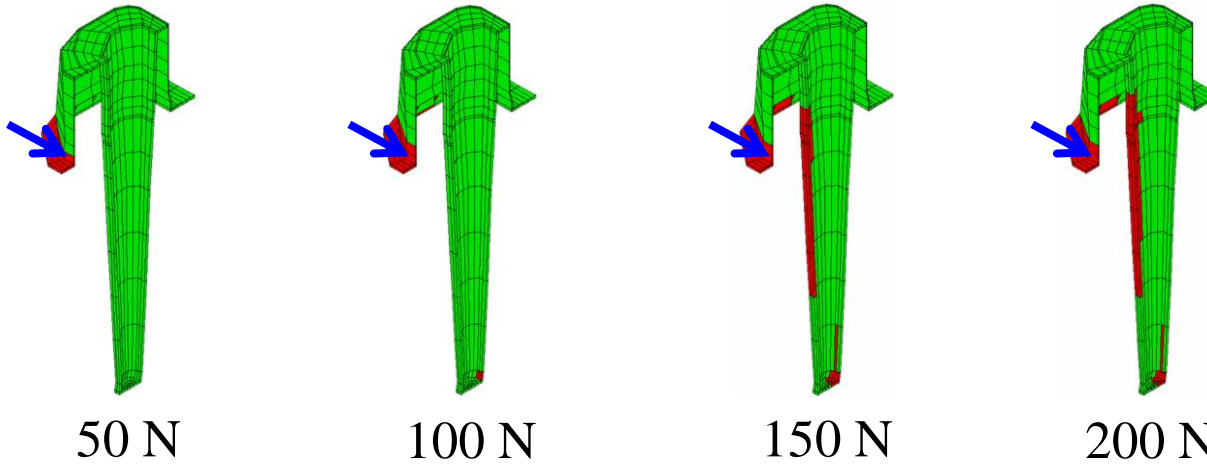
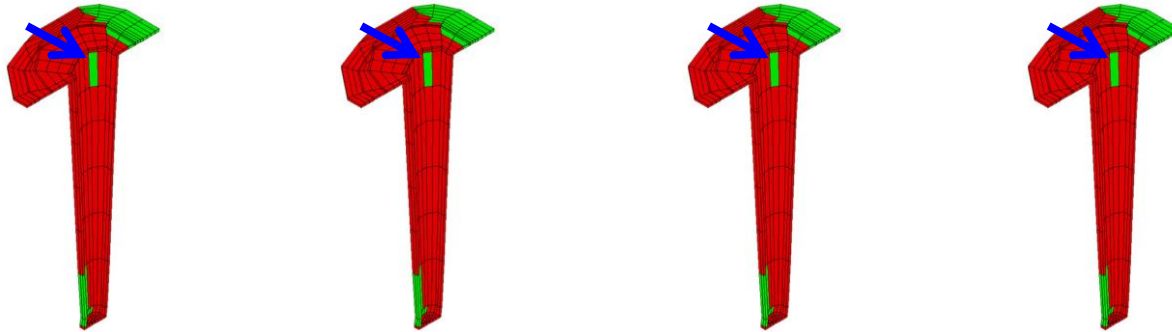


Fig 7 An areas of adhesion failure in cement layer under increasing loads on Model 1

→: Location of maximum stress

■ Adhesion sustained
■ Adhesion failure

Zinc phosphate
cement



MMA resin
cement

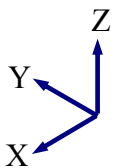
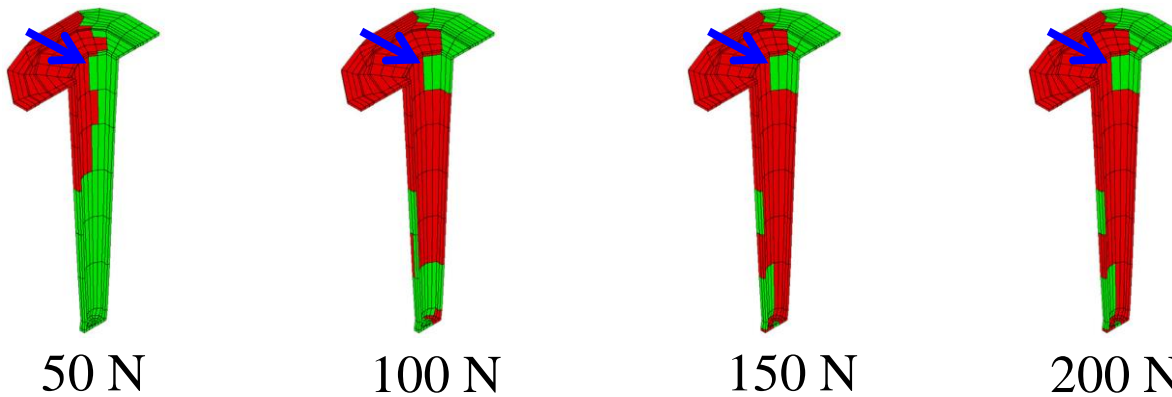


Fig 8 An areas of adhesion failure in cement layer under increasing loads on Model 2

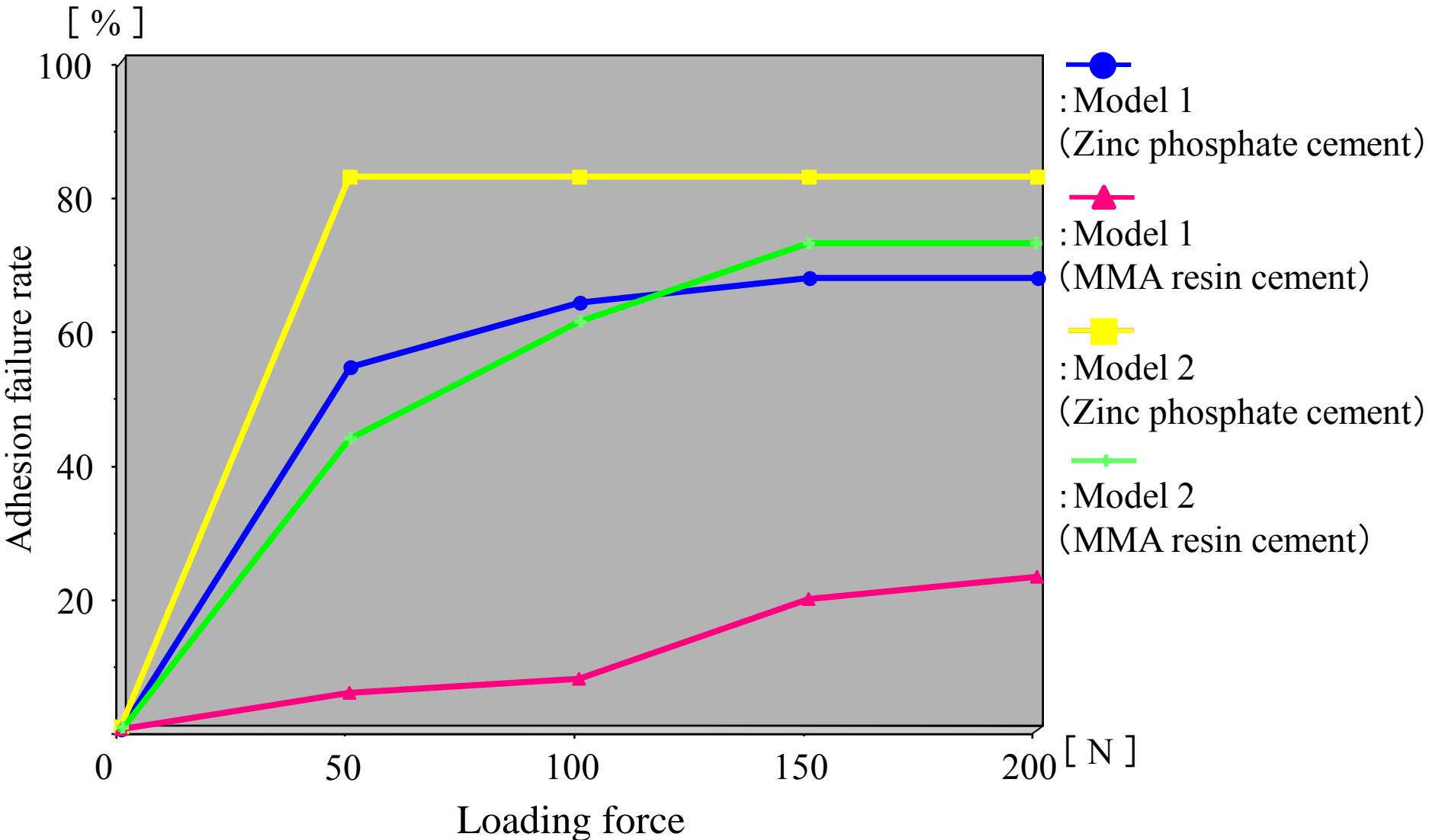


Fig 9 Adhesion failure rate in cement layer to dentin and post-and-core under increasing loads

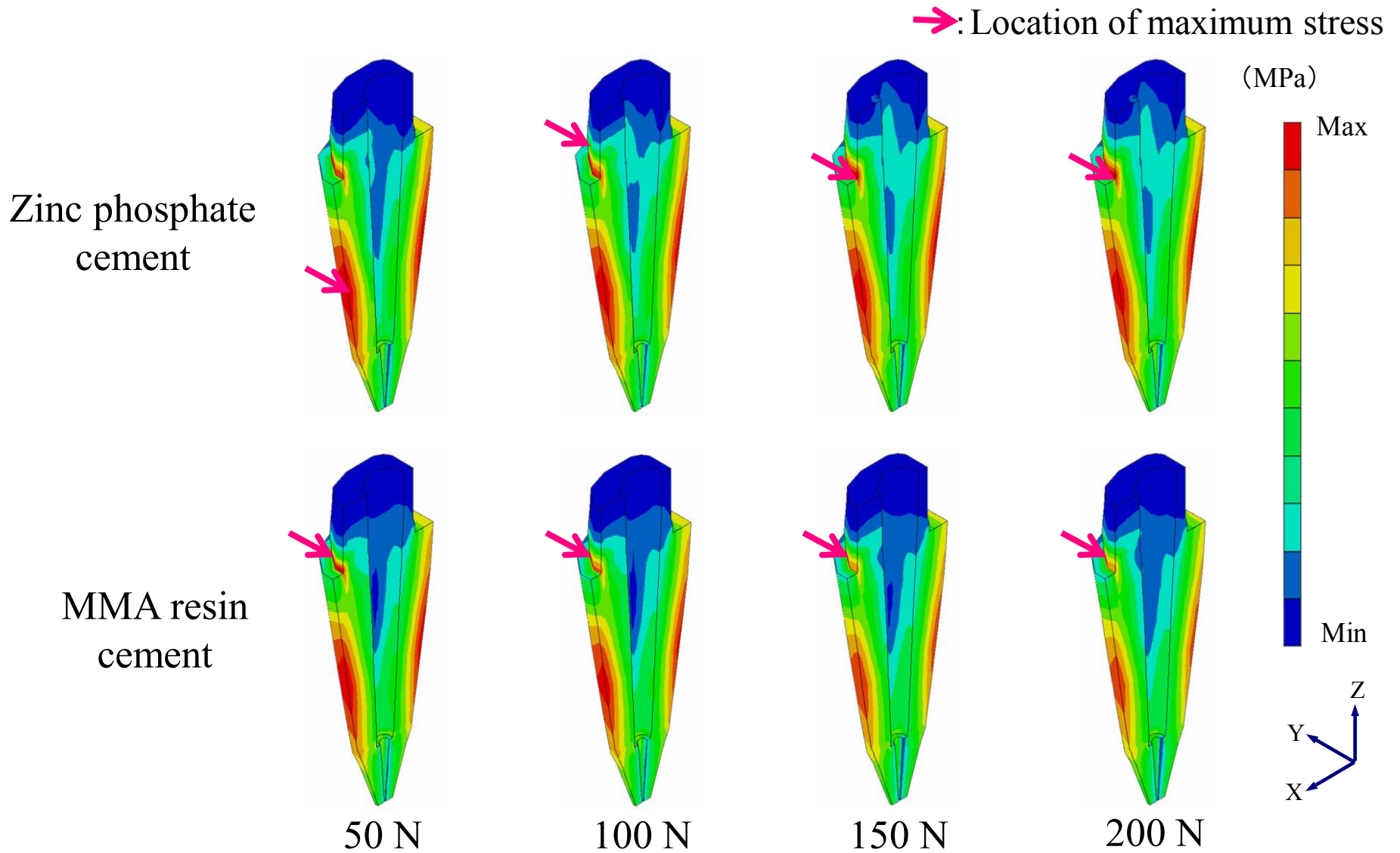


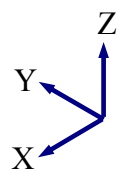
Fig 10 Distribution of von Mises stresses in dentin with adhesion failure on cement layer under increasing loads on Model 1

→: Location of maximum stress

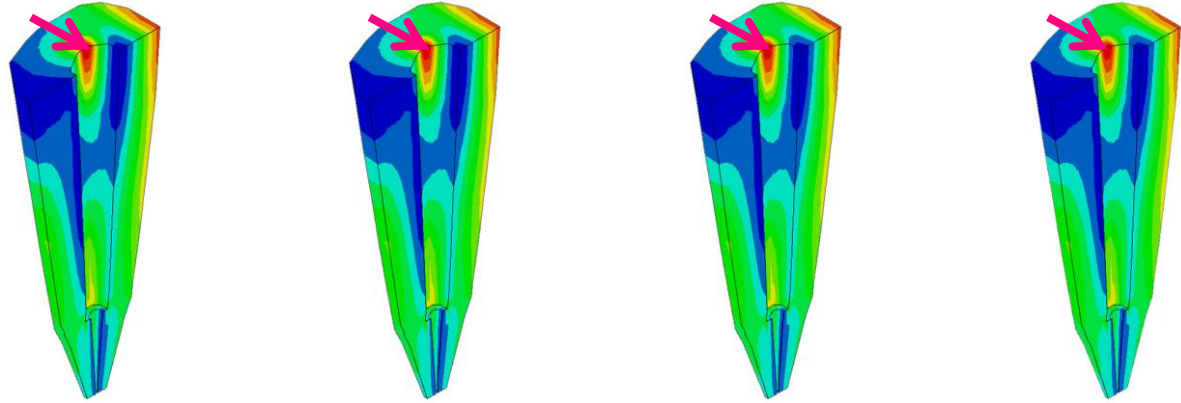
(MPa)

Max

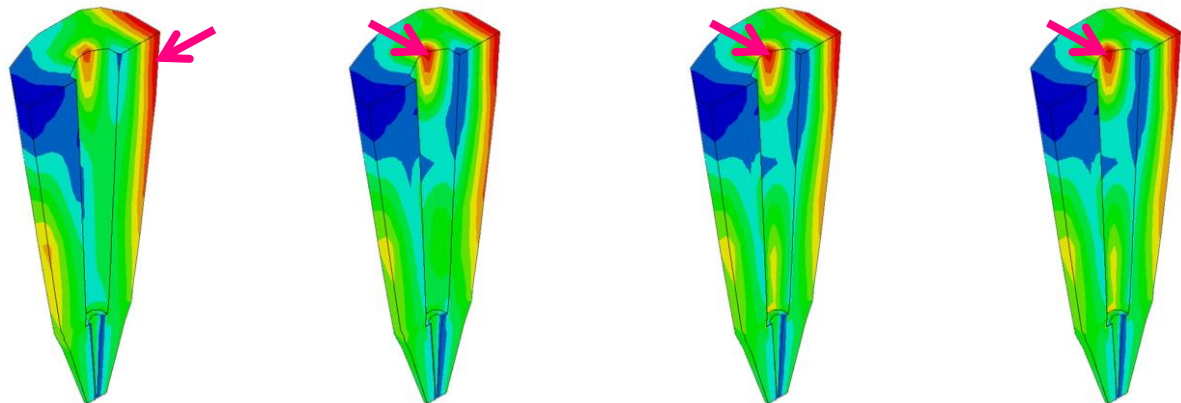
Min



Zinc phosphate
cement



MMA resin
cement



50 N

100 N

150 N

200 N

Fig 11 Distribution of von Mises stresses in dentin with adhesion failure on cement layer under increasing loads on Model 2

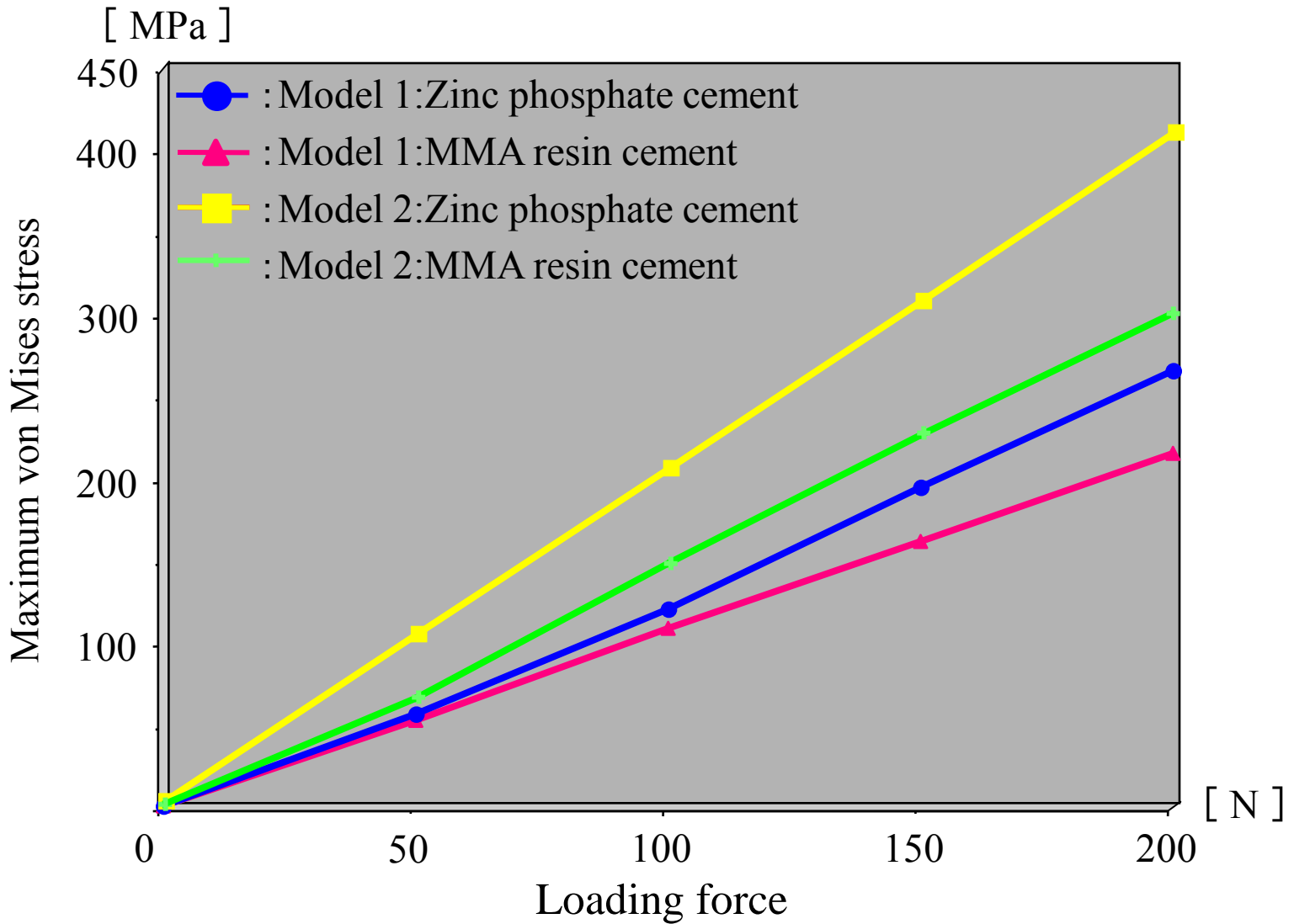


Fig 12 Maximum von Mises stress values in dentin with adhesion failure on cement layer to dentin and cast post-and-core under the increasing loads