原 著 論 文

臼歯部ブリッジの力学的検討

— 歯槽骨の吸収を伴う支台歯の場合 (第2報) —

(単根支台歯における3次元有限要素法と2次元有限要素法の比較)

松尾 浩一 沖本 公繪 日永田裕子
寺田 善博 平安 亮造

Stress Analysis of Posterior Bridge

— Case of Abutment Teeth with Reduced Periodontal Supporting Tissue (Part II) —
(Stress Distribution of 3-Dimensional Finite Element Model and
2-Dimensional Finite Element Model on the Single Rooted Tooth)

Kouichi Matsuo, Kimie Okimoto, Hiroko Hieda,
Yoshihiro Terada and Ryozyo Hirayasu

Abstract : In the first report, the two dimensional finite element analysis was performed on the bridge model through a computer in order to learn the effect of such two factors as the resorption of the alveolar bone and the number of abutment teeth against the stress distribution of the supporting tissue of the bridge which is subject to the occlusal force. Furthermore, the results of the finite element analysis under vertical load were compared between the three and the two dimensional models of single rooted tooth in order to study the relation between the three dimensional resorption state of the alveolar bone and the two dimensional model. The models used in study, however, were extremely simplified. Moreover, the periodontal membrane was not modeled and the influence of the lateral load was not considered. Based on these background, in this report, more practical three dimensional model was created including the periodontal membrane. In addition, two two-dimensional models of bucco-lingual and mesio-distal cross sections of three dimensional one were created.

The loading direction and the degree of alveolar bone defect were varied by each model. The load was given vertically, bucco-laterally and lingual-laterally. Alveolar bone defect were three cases of 0, 1/3 and 2/3 defect of the root length. The comparison of the results of the finite element analysis performed on the total of 18 cases and those of first report resulted in as follows.

1. The periodontal membrane has stress breaking effect on the alveolar bone surrounding teeth.

2. In the extremely-stressed part, the three dimensional model tends to show higher stress value than the two dimensional one.

3. In the laterally loaded case, the load part generates tensile stress and opposite side, compressive stress around the cervical part. Around the apical part, the two stresses are reversed.

4. As bone defect progresses, the stress to be generated increases. For example, equivalent stresses generated at the periodontal membrane in the vertically-loaded three dimensional model were 1.0, about 1.5 and about 2.3 in terms of 0, 1/3 and 2/3 defect respectively.

Key words: three dimensional finite element method, alveolar bone, resorption, abutment teeth, stress distribution

I. 緒 言

われわれは第1報¹⁾において、支持歯槽骨の吸収を伴う支台歯に、永久固定としてブリッジを装着した場合、咬合力が残存支持組織にどのような力学的影響を与えるのか、また歯槽骨の吸収程度により応力はどのように変化するか、さらに支台歯数を増加した場合の影響などを明らかにする目的で2次元有限要素法により解析し、結果について比較検討を行った。加えて、2次元有限要素法ではシミュレート出来ない3次元的な歯槽骨吸収状態が、2次元とどのように対応しているのかを知るために、同一形態の2次元と3次元単根支台歯モデルで垂直荷重下の応力解析を行い、比較検討を行ったが、このとき使用したモデルは歯牙と支持歯槽骨を極端に単純化しており、かつ歯根膜の存在を考慮していない。しかしながら、歯根膜の存在が歯牙およびその支持組織の応力負担に対し、大きな影響を与えるであろうことは論を俟たない。そこで今回は、歯根膜を含む支台歯および支持組織をモデル化して、前回の解析結果と比較するとともに、垂直荷重下のみならず、側方荷重下においても3次元モデルと2次元モデルについてより詳細な比較を行った。

II. 方 法

下顎小白歯と同部の支持組織の3次元モデル化に際して、歯冠部は金属冠被覆とし、歯根周囲には歯根膜を設け、下顎骨は皮質骨と海綿骨に分けた。また、各部の寸法比は成書^{2,3)}を参照し、解析を著しく複雑にしない範囲で、解剖学的計測値に近づけた。3次元モデル化には立方体要素を用い、要素数は1,368個、節点数は1,791個

である。拘束は下顎骨の近遠心端で、図1に示すように行った。図中、●はXYZ方向に拘束した点、▼はXZ方向、▽はX方向、□はXY方向に拘束した点である。

今回の実験でモデル化された領域における、咬合力に対する骨の支持は、下顎骨体部の剪断抵抗力にその大部分を依存していると考えられる。下顎骨体部を1つの単純な梁として考えた場合、この解析で定義したような荷重条件に対して発生する断面の剪断応力は、骨の中心軸上で最大となり、骨表面でゼロになるような放物線を描くはずである。図1に示すように拘束点とその方向を設定したのは、各拘束点に生じる反力が、全体としてこの剪断応力に近似するような形で発生するように考慮したためである。モデルの設定は骨欠損のないもの、歯牙周囲歯槽骨が1/3欠損するもの、および2/3欠損しているものの、3種類とした。荷重条件は、支台歯中央垂直荷重および、頬側からの水平荷重、舌側からの水平荷重の3ケースで、すべて一点集中荷重である。なお、荷重の大きさについては、今回はモデルどうしの比較が目的であったため、実際の咬合力との比定は行っていない。また、同形態の2次元モデルについては3次元モデルの各々の歯牙中心線を含む頬舌の断面、および近遠心的断面と同形態のものを設定し、平面四角形要素を用いた。歯槽骨欠損なしのモデルのとき、前者で要素数144、後者で122、節点数はおおよそ171、151である。2次元モデルの拘束条件は下顎骨の側面と下面のすべての節点をおおよそYZ軸方向、XZ軸方向で拘束した。以上をまとめたものを図1に示す。なお、解析には前回同様応力学研究所の計算機と富士通FEM IVを用いた。図2は今回の解析結果の評価比較に用いた要素で、A～Nは歯牙、a～rは歯根膜、1～20は歯槽骨上にある。比較はこれらの要素に生ずる相当応力と主応力を用いて行った。ところで、モデル化に際し、根尖部の形態は台形としたが、この場

図 1 解析に用いたモデル

図 2 比較参照要素

合偶角部に不自然な応力集中が起こることが懸念された。そこでわれわれは頬舌断の 2 次元モデルを用い、根尖部を台形にしたもの、やや角を丸めたもの、放物線形にしたもの、の 3 種類の根尖部形態をモデル化し、同一条件下での応力値を比較検討した結果、歯牙、歯根膜上の応力値は三者の間でほとんど差がなかった。しかし歯槽骨の部分では、比較参照要素図上の 6 と 7 および 14 と 15 の間に存在する要素において、台形の根尖部を有するモデルについては高い応力の発生が認められた。以上の予備解析の結果に基づき、われわれは簡便のため根尖部形態を台形とし、上記の歯槽骨上の要素を比較の対象から外すことにした。なお、作成したモデルの各材料の材料定数は過去の報告⁴⁾を勘案して決定した(表 1)。

欠損なし、破線は骨欠損 1/3、一点破線は骨欠損 2/3 のものを示す。これは以降の図でも同様である。欠損の影響に関しては、歯牙では根尖部付近で大きな影響があり、点 G, H では骨欠損 2/3 のケースで欠損なしのケースの約 2.9 倍になった。これに対し、歯頸部では点 A, N 上で骨欠損 2/3 のケースの場合、欠損なしのケースの約 1.1 倍となり、あまり影響が出なかった。一方、歯根膜では根尖部と歯頸部の応力値の変化は等しく、欠損が 1/3, 2/3 と進むに従い応力値はおおの約 1.5 倍、約 2.3 倍(3 次元モデルにおける比較)と増加している。3 次元と 2 次元の比較では、骨欠損に伴う応力値の変化傾向は同じであるが、応力集中が著明な歯牙根尖部においては明らかに 3 次元モデルのほうが大きな応力値を示す。

III. 結 果

1. 垂直荷重時

1) 相当応力

(1) 近遠心断面における比較(図 3)

上が 3 次元モデル、下が 2 次元モデルの場合である。部位は左から歯根表面(A~N)、歯根膜(a~r)、歯牙周囲歯槽骨(1~20)要素の応力値となっており、実線は骨

表 1 材料定数表

	ヤング率 (kg/mm ²) (Young's modulus)	ポアソン比 (Poisson's ratio)
皮質骨	1,400.0	0.45
海綿骨	500.0	0.30
歯根膜	1.0	0.45
歯 牙	1,500.0	0.30
金属冠	8,000.0	0.33

図 3 垂直荷重時の相当応力比較・近遠心(上: 3 次元, 下: 2 次元)

図4 垂直荷重時の相当応力比較・頬舌(上:3次元,下:2次元)

図5 垂直荷重時の主応力・2次元/近遠心
(上:最大主応力,下:最小主応力)

歯根膜と歯槽骨の応力変化は歯牙ほど著明ではないが、歯根膜では3次元モデルは2次元モデルの約1.4倍の応力値を、歯槽骨では約0.7倍の応力値を示した。

(2) 頬舌断面における比較(図4)

歯牙および歯根膜では図3とほぼ同じ傾向を示している。歯槽骨でグラフが対称形を示さず、舌側の応力値が頬側よりも大きくなっているのは、歯槽骨の解剖学的形態に基づいて頬側と舌側の骨の厚みを異ならせるために、頬側と舌側の要素の形態を変えたためと思われる。

2) 主応力

(1) 近遠心断面における比較(図5, 6)

2次元モデルの場合(図5)では歯根および歯根膜に生じる最大主応力、最小主応力とともに比較的大きな圧縮応力を示している。歯槽骨には圧縮応力に加え、わずかな引っ張り主応力が観察される。3次元モデルの場合(図6)も傾向はほぼ同じであるが、絶対値は3次元モデルのほうが大きくなっている。これは特に骨欠損2/3の場合の歯牙に著明であった。

(2) 頬舌断面における比較

歯牙および歯根膜はほぼ近遠心の場合と同じ傾向を示す。歯槽骨に関しては、2次元モデルの場合には、引っ張り主応力はほぼ対称形を示すが、圧縮主応力は舌側のほうが大きい値を示し、対称形を示さない。

図 6 垂直荷重時の主応力・3 次元／近遠心
(上：最大主応力，下：最小主応力)

2. 頬側荷重時

1) 相当応力による比較 (図 7)

グラフは頬舌的にほぼ対称な形を示す。垂直荷重時のように頬舌的な非対称性を示さないのは、頬側荷重時のほうが垂直荷重時に比べて、荷重によって発生する応力を主に受ける面の形が、頬側と舌側の要素の間でより差異が少ないためであろう。歯牙では応力の集中する点は、根尖部側面にある F と I および歯槽骨上縁と接する部分である。歯槽骨の欠損が進むにつれて、歯槽骨上縁と根尖部の距離は近づき、骨欠損 2/3 のグラフでは両者の応力が相乗して特定の要素 (F と I) に高い応力として表れた。歯根膜や歯槽骨に表れる相当応力は、歯牙に比べ総体的に小さいが、その中では歯槽骨上縁における応力値が高く、3 次元は 2 次元の約 1 倍 (骨欠損 1/3)、約 1.4 倍 (骨欠損 2/3) となっている。

2) 主応力による比較 (図 8, 9)

歯牙では各々の欠損の場合について頬側の歯槽骨上縁に相当する部位で引っ張り応力が、舌側の歯槽骨上縁相当部で圧縮応力が生じている。また、3 次元モデルでは F に最大圧縮応力が、I に最大引っ張り応力が生じている。これは FI 間に主応力の変向点があることを示唆し

図 7 頬側荷重時の相当応力比較・頬舌
(上：3 次元，下：2 次元)

ている。2 次元モデルでは 2/3 骨欠損の場合を除いて、この現象ははっきりせず、この図ではグラフのショルダーという形で表れるに過ぎない。

3. 舌側荷重時

相当応力のグラフは頬側荷重時のものとほぼ同じ形を示した。主応力のグラフは頬側荷重時のグラフを歯軸を中心に対称移動させたものと同じである。前述のごとく、頬側と舌側の歯槽骨部の要素の形態は異なるのだが、側方荷重時にはその影響はほとんどみられなかった。

IV. 考 察

1. 前回の 3 次元モデルとの比較について

1) 歯根膜の有無

歯根膜のない前回のモデルでは歯頸部に最も高い応力値を示したが、歯根膜を有する今回のモデルでは、垂直荷重下においてはむしろ根尖部付近に高い応力が生じている。これは歯根膜の存在によって前回のモデルよりも

図8 頬側荷重時の主応力・2次元/頬舌
(上:最大主応力, 下:最小主応力)

図9 頬側荷重時の主応力・3次元/頬舌
(上:最大主応力, 下:最小主応力)

歯牙が沈下しやすくなり、その結果として根尖部に応力が集中することとなったためと思われる。これに対し、歯根膜モデルが考慮されていない前回の解析では、応力線の密度に変化の生じる歯頸部付近に応力が集中するという結果を生じたのであろう。また、今回の解析において、このとき発生する相当応力のグラフ(図3)を参照すると、歯牙では歯頸部に比べて根尖部で相対的にかなり高い応力が発生しているのに対し、歯根膜のグラフでは歯頸部も根尖部も発生する相当応力にあまり差はない。これは歯根膜が、その一部に加わった強い力を全体に分散させて、周囲歯槽骨に伝えているためと思われる。歯根膜のこのような性質により、歯牙から歯槽骨への応力の伝播が緩和されていることが、歯牙と歯槽骨のグラフを比較することによって推察される。これを主応力のグラフ(図5, 6)でみると、歯根膜には強い圧縮応力が生じているが、歯槽骨では圧縮応力が相対的に小さくなり、歯根膜の緩圧効果をはっきりと表れている。

図10 垂直荷重時の2次元頬舌モデル
の歯牙周囲歯槽骨の主応力
(上:最大主応力 下:最小主応力)

図 11 舌側荷重時の主応力 (2次元頬舌モデル・骨欠損なし)

図 12 舌側荷重時の主応力 (2次元頬舌モデル・骨欠損 1/3)

2. 3次元モデルと2次元モデルの比較について

今回は、メッシュの荒さ、荷重条件、材料定数などのファクターができるだけ同等になるように設定した。2次元モデルと3次元モデルの断面に生ずる応力を比較検討するのが1つの目的であった。モデル化する対象、すなわち生体が比較的複雑な3次元構造をとることから、3次元モデルのほうが2次元モデルよりも抽象化の程度

が少なく済むと考えられる。しかしながら、3次元的な応力分布は把握するのが難しく、2次元モデルほど明確な結果の把握は、一般的には困難である。さらに、3次元モデルによる解析は、2次元モデルによる解析よりはるかに多くの労力と時間を必要とする。このように一長一短がある以上、解析の内容に応じて、3次元モデルと2次元モデルを使い分けるのが好ましいと考えられ

図 13 舌側荷重時の主応力（2次元頬舌モデル・骨欠損 2/3）

る。その場合、力学的挙動を総合的に把握するためには3次元モデルと2次元モデルの解析結果を比較することが必要不可欠になるであろう。以上の観点から行った今回の解析の比較では、全般的に応力の集中する部位で3次元モデルのほうが2次元モデルよりも大きな応力値を示し、応力の集中が起っていない部位では両者の間にはさほど差は認められなかった。この傾向は第1報で用いた歯根膜を有しない単純な3次元モデルの比較においてもみることができる。この理由として、3次元モデルでは応力集中も3次的に起こるので、2次元モデルでは考慮されない応力の波及が加味されることが考えられる。このことは特に応力集中部で、よりそれが著明となるという現象と矛盾しない。今回の解析に用いた3次元モデルと2次元モデルの間に生じた違いを示すもう1つの要因が示した例として、垂直荷重下の歯槽骨に生じる応力は2次元モデルにおいてより強く頬舌的な差を生じたという結果があげられる。2次元モデルのこの部の主応力をプロットすると（図10）、圧縮主応力では頬舌的に対称形を示すが、引っ張り主応力では舌側が大きく、頬側が小さくなり頬舌的な応力値の差はこの部に生じる引っ張り応力の差であることが分かる。一方、3次元モ

デルにおいて頬舌的な応力の差がほとんどないことを考えると、2次元モデルのほうが個々の要素の影響をより強く受けるのではないかと推測される。すなわち、ある要素の変化が隣接する要素に伝えられるとき、3次元モデルではそれが3次的に拡散するのに対し、2次元モデルではそれが2次的にしか拡散しないため、両者を同一平面内で比較した場合、2次元モデルのほうがより遠くの要素まで影響が及ぶのではないかと考えられる。

3. 歯牙周囲歯槽骨の欠損の度合いと荷重方向の違いによる応力分布の変化について

1) 垂直荷重時

歯牙や歯槽骨に比べ“柔らかい”歯根膜の存在により、垂直荷重を受けた歯牙は沈下しやすくなり、根尖部に応力集中を引き起こしたものと考えられる。歯根膜の相当応力は相対的に高いとはいえないが、主応力では根尖部に強い圧縮応力が認められる。また、周囲歯槽骨のほぼ全域に生じた最大主応力が引っ張り応力を示すのは、歯牙の圧下によってこの部分の要素が下方に引っ張られているためと考えられる。

2) 側方荷重時 (舌側)

応力分布の状態をより明らかにするために、2 次元モデルの主応力をその方向とともに図形化したものを示す (図 11~13)。歯根膜および歯槽骨についてみると、骨欠損が進むほど歯頸部付近の主応力の方向が、荷重方向に対して角度を持ってくる。これは、骨欠損が進むほど歯牙を回転させるような力の要素が大きくなっていくことを示唆していると思われる。

V. 結 論

下顎小白歯と同部の下顎骨を 3 次元モデル化し、3 つの荷重ケースと 3 つの歯牙周囲歯槽骨欠損状態の計 9 ケースについて、3 次元有限要素解析を行い、これと 3 次元モデルの歯牙の中心を通る近遠心断および頬舌断の断面と同じ形態の 2 次元モデル計 18 ケースとを比較した結果、および前回の解析に用いた歯根膜を含まない 3 次元モデルと今回使用した歯根膜を含む 3 次元モデルを比較した結果、以下の結論が得られた。

1. 前回の 3 次元モデルと今回の 3 次元モデルとの比較

1) 前回用いた歯根膜をモデル化していないものでは、歯頸部付近に応力集中が生じたが、今回のモデルではむしろ根尖部に応力の集中がみられた。

2) 今回使用した歯根膜をモデル化したものでは、歯根膜の作用による周囲歯槽骨への緩圧効果が表れた。

2. 3 次元モデルと 2 次元モデルの比較

1) 3 次元モデルと 2 次元モデルによる解析結果には違いが生じた。今回の解析でその違いが最も明らかに表れたのは、応力の集中する部位で、3 次元モデルのほうが 2 次元モデルよりも明らかに高い応力値を示した。また、この傾向は応力の集中が増大するほど著明になっ

た。

2) 垂直荷重時の頬舌断における主応力値を比較した結果、3 次元モデルと 2 次元モデルを同一平面内で比較した場合、ある要素に生じた変化は、2 次元モデルのほうがより遠くの要素にまで影響が及ぶ傾向がみられた。

3. 骨欠損の状態と荷重方向の変化による違い

1) 垂直荷重時には主として根尖部付近に応力集中がみられ、側方荷重時には、歯頸部では荷重側には引っ張り応力が反対側には圧縮応力がみられ、根尖部では逆に荷重側に圧縮応力が反対側に引っ張り応力がみられた。

2) 1) の知見は骨欠損が増大するにつれてより著明となった。

この稿を終るに当たり、施設の使用を快くお許し頂き、加えて有限要素解析全般にわたり惜しみないご指導とご助言を賜った応用力学研究所応用弾性学門の高雄善裕教授、並びに同研究室の皆様へ深甚なる感謝の念を捧げます。

文 献

- 1) 沖本公繪, 宮武幸輔, 日永田裕子ほか: 臼歯部ブリッジの力学的検討—歯槽骨の吸収を伴う支台歯の場合 (第 1 報)—, 補綴誌, 32: 1067~1081, 1988.
- 2) 上條雅彦: 口腔解剖学 第 1 巻, 166~173, アナトーム社, 東京, 1965.
- 3) Wheeler, R.C.: A Textbook of Dental Anatomy and Physiology, 4th ed. 207~227, W.B. Saunders, Phila., 1965.
- 4) 川崎貴生, 山田 亨, 星井 守ほか: 有限要素法を利用した遊離端欠損症例における応力解析 第 1 報 維持装置の連結機構の違いによる応力分布, 補綴誌, 31: 287~295, 1987.