

牙根尖区应力分布的三维有限元计算*

北京医科大学口腔医学院 周书敏

中国科学院力学研究所 何明元 张廷宏 杨成寿 阙常珍

【提要】 本文应用三维有限元分析了牙周膜的应力分布，重点讨论了根尖区应力分析结果及其对临床解释病因及对诊断的意义。本文将右下第一恒磨牙有限元模型划分为210个单元及1612个节点（用20节点等参元），分析了11种典型受力状况，得出以下结论：（1）在殆面上通过牙周膜几何中心的各种外力在根尖区产生的应力分布均匀，且应力值较小，无拉应力产生；（2）在计算的11种典型载荷中有三种载荷应力分布危害性最大。

咬合异常或创伤殆对牙周病发生、发展的作用已日益受到广泛的重视。过大的殆力或过大的矫治力可使根尖周血管受压迫、挫伤，甚至断裂，引起牙髓血液循环障碍，导致牙髓坏死与牙髓钙化等病。因此，在治疗口腔疾患时，应了解各支持组织对外力的耐受性及外力使牙周支持组织发生的内应力变化规律。

近年来，国内外不少学者应用多种方法计算或测定牙齿受外力时，牙周支持组织的内应力分布状态，有限元法是应用最广泛的一种计算方法，但多数研究都把牙齿简化成平面问题或轴对称问题^(1~4,7,8)，牙齿的三维分析较少见，用三维光弹法^(5,9)是一种途径，但非常复杂，近年来开始用三维有限元分析牙体的应力状态⁽⁶⁾，但计算模型比较粗糙。

本研究应用一个新的计算模型，发展了牙周膜应力分析的三维有限元分析方法（此方法将有专题报告），成功地分析了各种载荷下牙周膜的应力分布。本文重点分析牙齿在11种典型受力状态下，根尖区的应力分布计算结果，并讨论这些结果的临床意义。

计算模型及计算结果

一、计算模型：

将下颌第一磨牙做成放大5倍的模型，把牙齿和牙槽骨视为刚体，牙周膜视为0.2毫米

等厚的各向同性弹性材料。在对牙周膜进行离散化时，共划分为210个单元，1612个节点，有限单元为20节点的等参元。在根尖有直径为0.083毫米的根尖孔见图1。

计算11种典型载荷，加载均为1公斤：

- I. 在殆面中央加与牙长轴（Z轴）一致的力；
- II. 在殆面中央加与长轴呈30°角的力；
- III. 在近中牙尖顶加与长轴方向一致的力；
- IV. 在远中牙尖顶加与长轴方向一致的力；
- V. 在远中牙尖顶加通过牙体几何中心的力；
- VI. 在远中牙尖顶加与长轴方向呈90°角的力；
- VII. 在殆面颊沟殆缘加与长轴方向一致的力；
- VIII. 在殆面舌沟殆缘加与长轴方向一致的力；
- IX. 在殆面颊沟殆缘加通过牙体几何中心的力；
- X. 在殆面颊沟殆缘加与长轴呈90°角的颊-舌向水平力；

* 中国自然科学基金资助课题。

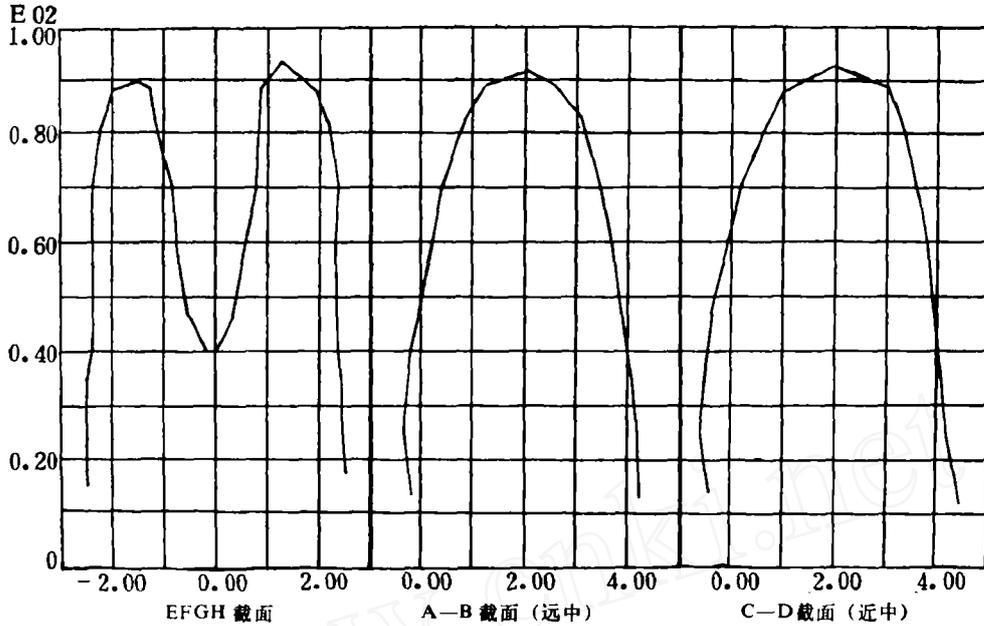


图1 下第一磨牙牙周膜内层边界截面网格划分图

XI. 在殆面中央、在 XZ 平面中加与长轴呈 30° 角的力。

二、计算结果

本文主要讨论根尖区的应力分布。坐标轴 XYZ 的选取为：原点位于牙周膜的几何中心（与牙体几何中心一致）。Z 轴为长轴方向，向根尖方向为正；Y 轴为近-远中平面中与长轴呈 90° 的水平方向；X 轴为颊-舌平面的水平方向，由舌向颊为正。

计算结果：表中给出了 11 种载荷作用下根尖区牙周膜上作用的主应力值的最大值。图 2~4 给出了绝对值最大的主应力沿根尖孔边界的分布规律。

计算结果表明：

1. 在通过牙周膜几何中心的殆力作用下，根尖附近的应力分布比较均匀，应力都为压应力。由图 2 可知，三种载荷情况下的应力值较接近 (I, V, IX)、近中根尖区最大压应力在 -4.7 公斤/厘米² 到 -1.2 公斤/厘米² 之间；远中根尖区压应力最高可达 -5.1 公斤/厘米² (见表 1)。

2. 当殆面上的作用力偏斜时，使根尖区

表 牙根尖区牙周膜主应力最大值

载 荷	近中牙根尖区主应力最大值(公斤/厘米 ²)		远中牙根尖区主应力最大值(公斤/厘米 ²)	
	内层压应力	内层拉应力	内层压应力	内层拉应力
I	-4.313		-5.094	
II	-5.286		-3.178	0.8290
III	-5.526		-3.901	0.4938
IV	-3.838		-6.536	
V	-4.058		-4.873	
VI	-4.743	1.591	-1.031	5.881
VII	-5.766		-6.962	1.296
VIII	-6.531		-5.612	1.065
IX	-4.626		-4.313	
X	-5.016	4.291	-4.695	4.158
XI	-5.988		-5.156	

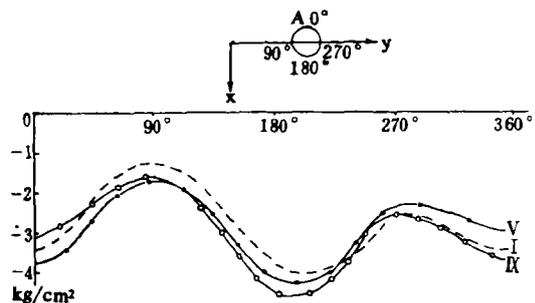


图 2 在通过牙周膜几何中心的载荷作用下近中根尖区的最大主应力分布

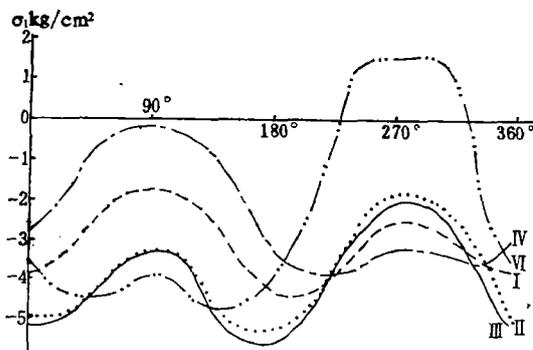


图 3 在 YZ 平面内各种载荷作用下近中根尖区最大主应力分布

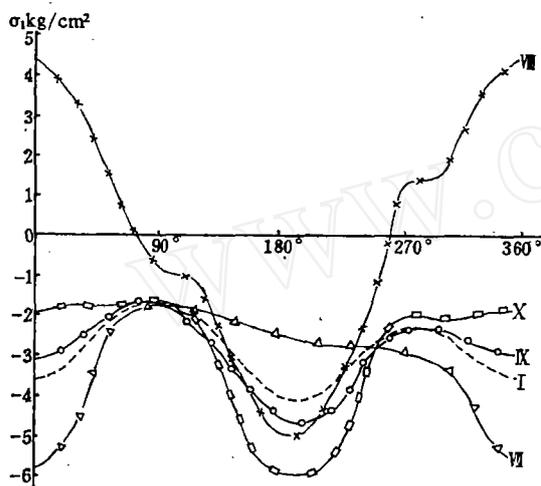


图 4 在 XZ 平面内各种载荷作用下近中根尖区最大主应力分布

的最大压应力值增加，应力分布也较载荷 I 作用下的应力分布不均匀。图 3 表明，在近-远中平面内，向近中方向偏斜 30° (载荷 II)，使近中根尖孔在 0°~180° (即近中半侧) 区域内的压应力增加 (1.5~2) 公斤/厘米²，同时在远中根尖孔附近产生拉应力 (见表)。

3. 当作用在殆面上的垂直力作用于近中牙尖顶或远中牙尖顶时，根尖压应力也增加，并产生拉应力。近中牙尖顶受力 (载荷 III) 时，远中根尖区可产生最大可达 0.49 公斤/厘米² 的拉应力。图 3 中载荷 II 与 III 的应力分布很接近。

4. 近-远中向水平力使应力分布很不均匀，除产生较大的压应力外，同时产生较大的拉应力。近-远中向水平力 (载荷 IV)，使近中根

尖区压应力最大值为 -4.7 公斤/厘米²，而拉应力最大值为 1.6 公斤/厘米²。远中根尖拉应力大于压应力，最大压应力为 -1.0 公斤/厘米²，而最大拉应力为 5.9 公斤/厘米²。图 3 给出载荷 VI 作用下近中根尖孔附近的应力分布。

5. 在近-远中平面 (YZ 平面) 作用的各种殆力中，以水平力产生的应力分布最不均匀，水平力也产生很大的拉应力。图 3 给出了在 YZ 平面的 5 种作用载荷 I、II、III、IV、VI 作用下，在近中根尖孔产生的应力分布比较，可以清楚地看出，水平力是使应力分布最不均匀的一种载荷。

6. 当作用在殆面上的垂直力移至颊沟或舌沟的殆缘时 (载荷 VII 和 VIII)，根尖区应力分布很不均匀，最大压应力可达 -7.0 公斤/厘米²，是 11 种载荷情况中压应力最大的数值。图 4 给出了载荷 VII 作用下近中根尖区的应力分布。

7. 颊舌方向的水平力使根尖区的应力分布很不均匀，最大压应力和最大拉应力都较大，最大压应力值为 -5.1 公斤/厘米²，最大拉应力值可高达 4.3 公斤/厘米²，图 4 给出了 XZ 平面中各种载荷作用下，根尖区应力分布比较，可以看出，颊-舌水平力是使应力分布很不均匀并且产生很大拉应力的一种情况。

8. 计算结果表明，水平方向的作用力和 XZ 平面作用在颊、舌沟殆缘的力都是危害比较严重的载荷。其中，拉应力值最大的是近-远中水平力情况，压应力值最大的是在颊沟和舌沟殆缘处加轴向力 (载荷 VII, VIII)，压应力和拉应力同时达到最大值的是颊-舌向水平力 (载荷 X)。

计算结果的临床意义

1. 在殆面上通过牙周膜几何中心的载荷 (I、V、IX)，应力分布较均匀，应力值较小，三者应力值较接近，都是压应力，无拉应力产生。牙周膜对压应力有较强的耐受性，这类载荷无损于牙周组织。

2. 在殆面中央加与长轴呈一定角度的外力时,其根尖区压应力值随倾斜角度的增加而增加。当外倾角为 30° 时,可使应力增加 $1.5\sim 2$ 公斤/厘米 2 ,若为 90° 的水平力时,除使压应力增加外,并可产生较大的拉应力,应力分布很不均匀。因此,牙尖斜度愈大,水平分力愈大,对根尖区产生的应力值也愈大,对根尖周围组织健康存在潜在的威胁。在临床常见因磨损不均匀,产生锐利的边缘嵴或陡嵴的牙尖,在这种尖、嵴发生咬合接触时,便可产生过大的应力,对牙体、牙周组织均有较大的危害性。故应注意调殆磨改牙齿尖、嵴形态或不利的咬合接触关系,以消除不良的应力。

3. 在牙齿殆面近中或远中边缘嵴,或颊、舌侧殆缘受力时,虽所受之力是与牙长轴方向平行,但由于作用力偏离牙体几何中心,使牙齿产生倾斜和扭转,在相应的根尖部位可产生较大的压应力和拉应力,应力分布很不均匀,对根尖周围组织有较大的危害性。由于重度磨损使殆面变平坦,殆台过宽,此时牙尖斜度虽然不大,但在过大的殆台边缘受力时,即便是轴向力,仍可产生较大的应力,并可出现拉应力,对牙周组织及根尖组织均不利。故应对重度磨损的殆面形态进行调磨改形,减窄殆台颊-舌径及加大外展隙,使受力点尽量接近殆面中央或使殆力通过牙体几何中心,以减小应力,并使应力分布均匀。

4. 在正中殆接触,或非正中殆干扰时,均可在早接触或殆干扰部位相应的根尖区产生较大的应力分布。其中,以侧方殆非工作侧牙尖早接触,上舌尖与下颊尖产生颊-舌向水平外力时产生的应力最不均匀,危害性最大。若外力为1公斤时,在近中和远中根尖区均可产生较大的压应力(-5.0 公斤/厘米 2)和拉应力(4.3 公斤/厘米 2),而正常殆时,根尖区无拉应力出现。故颊-舌向外力对根尖周围组织健康非常有害。

5. 无论从牙周病的病因和牙体、牙髓病的病因角度分析,都应重视创伤性殆所产生的不正常的应力所带来的危害性,在临床诊断和治

疗上应引起足够的重视,并采取相应的治疗措施,提高医疗质量。

6. 在正畸治疗中,过大的矫治力对牙周组织能产生不正常的应力,可造成牙周组织及牙髓组织受损,也应引起足够的重视。

结 论

1. 在殆面上通过和接近牙体几何中心的三种力的作用下,牙根尖区的应力分布比较均匀,均为压应力,无拉应力产生。这类载荷符合牙周膜的生理特点,有利于牙周组织健康。

2. 在本文计算的11种典型载荷中,危害比较严重的三种载荷情况是:(1)近-远中向水平力(拉应力值最大);(2)在颊、舌沟部位殆缘上作用的垂直力(压应力值最大);(3)颊-舌水平力(应力分布最不均匀,压应力和拉应力均较大)。

3. 对于颊-舌向平面(XZ平面)内的作用力,二维有限元计算不能处理,对于近-远中向平面(YZ)内的作用力,二维有限元计算对于根尖区的应力分布也不能给出精确的结果。因此,为了得到比较准确的牙根尖区的应力分布,必须用三维有限元计算。

4. 牙根尖区的三维应力分析结果,对于创伤性殆与牙周病和牙体、牙髓病的关系;以及正畸治疗与牙周病、牙髓病的关系方面,可以从应力分析的角度提出理论依据,对临床诊断与治疗均有适用意义及参考价值。

参 考 文 献

1. Yettram AL, et al. Finite Element Stress Analysis of Crowns of Normal and Restored teeth. J Dent Res 1976; 55:1004.
2. Selna LG, et al. Finite Element Analysis of Dental Structures-Axisymmetric and Plane Stress Idealizations. J Biomed Res 1975; 9:231.
3. Atmaram GH, Mohammed H. Estimation of Physiologic Stresses with a Natural Tooth Considering Fibrous PDL Structure. J Dent Res 1981; 60:873.
4. Farah JW, Craig RG. Finite-Element stress Analysis of Restored Axisymmetric First Molar. J Dent Res 1974; 53:859.
5. Farah JW, Craig RG. Stress Analysis of Thress

- Marginal configurations of Full. Posterior Crowns by Three-dimensional Photoelasticity. J Dent Res 1974; 53:1219.
6. Rubin C, et al. Analysis of the Human Tooth Using a Three-dimensional Finite Element Model. J Dent Res 1983; 62:82.
7. 周书敏, 吴仲谋. 应用有限单元法对下颌磨牙不同高度的牙周支持组织的应力分析. 北京医学院学报 1984;16:293.
8. 周书敏. 关于牙齿瞬时转动中心位置的理论分析及其临床意义的探讨. 北京医学院学报 1982; 14 (2):221.
9. 周书敏 等. 牙周支持组织三维光弹性应力分析. 1987年第五届全国实验力学会议论文集. 第一册. (1987年第六期中华口腔科杂志待发表).

THE STRESS ANALYSIS OF PERIOAPICAL REGION OF THE HUMAN TOOTH BY THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD

School of Stomatology

Zhou Shu-min, et al

Three-dimensional finite element analysis is used to determine the physiological stress values in the periodontal ligament (PDL). Compared with the elastic modulus E of PDL, the E of dentin and bone are much larger. For the estimation of the stresses in PDL, the tooth and the supporting bone can be considered to be rigid. The finite element model of PDL of the mandibular right first molar consists of 210 elements (20-node isoparametric element) and 1612 nodes.

Eleven load cases were selected in the study, which included the longitudinal occlusive load, buccal-lingual lateral load, mesial-distal lateral load and other load cases that attempted to simulate the actual occlusive loads.

The results obtained from this study lead to the following conclusions:

1. For the loads which go through the physiological center of the tooth, the stresses around the apical foramina are compressive and relatively small. There are no tensile stresses.
2. Among eleven load cases studied in this work, the following three load cases are most severe:
 - a. The maximum tensile stress was found under mesial-distal lateral load;
 - b. The maximum compressive stress was found under longitudinal occlusive load on the buccal groove or lingual groove;
 - c. The highest stress concentration was found under buccal-lingual lateral load.

The clinical significance of the results of stress analysis has also been discussed in the paper.