

种植固定修复上颌后牙三单位连续缺失的有限元分析

武旭¹, 蓝鹏², 马渊³, 白雪⁴, 申铁兵², 李琼²

(1. 内蒙古医科大学口腔医学院, 内蒙古 呼和浩特 010059; 2. 内蒙古医科大学附属医院口腔科;
3. 内蒙古医科大学数字医学中心; 4. 内蒙古医科大学医学实验中心)

摘要: **目的:**本研究拟采用三维有限元法分析上颌后牙区连续三单位种植固定义齿中种植体数目、长短、直径、位置等多因素对种植体颈部骨皮质最大应力的影响, 研究其应力变化规律, 以指导临床选择合适的种植修复方案。 **方法:**应用Abaqus6.14建立上颌骨缺牙的骨块简易模型及Straumann软组织水平标准颈种植体, 分别建立不同直径(4.1mm、4.8mm)、不同长度(8mm、10mm、12mm)、不同位置(567、5X7、56X、X67)的种植体固定桥修复模型。根据纳尔逊定律, 将接近最大咀嚼牙合力300N按6:10:9的比例进行垂直加载, 计算其应力分布、骨皮质的最大von Mises力(max von mises, MVMS)。 **结果:**(1)每组内三单位种植体修复的种植体颈部周围MVMS分布较其他组较小, 关系为G1<G2<G3<G4;(2)两单位种植体固定桥修复模型中, 组内比较MVMS分布关系为G4>G3>G2组, 组间比较骨皮质最大应力分布关系由小到大依次为4112-G2<4110-G2<4110-G3<4112-G3<4108-G3, 4812-G2<4808-G2<4810-G2<4812-G3<4810-G3;(3)在种植体为不同直径相同长度时, 直径为4.8mm组的MVMS分布较每组相对应的直径为4.1mm组更小。 **结论:**(1)上颌后牙连续三单位缺失时三颗种植体修复所产生的MVMS最小;(2)上颌后牙连续三单位缺失时可选用两颗种植体支持的种植连桥修复方案(5X7)替代三颗种植体支持的种植连桥修复方案, 可减少手术创伤及降低病人医疗费用;(3)按照MVMS分布关系的统计提示在两端种植体型号同步变化时骨皮质最大应力分布并不是单纯是随着长度及直径的增加而较小。

关键词:有限元; 种植固定修复; 骨皮质的最大 von Mises 力

中图分类号: R783.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-512X(2021)01-0018-05

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF IMPLANT FIXATION FOR THREE UNIT CONTINUOUS LOSS OF MAXILLARY POSTERIOR TEETH

WU Xu, LAN Peng, MA Yuan, et al.

(School of Stomatology, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010059 China)

Abstract: Objective: This study intends to analyze the influence of the number, length, diameter and location of implants on the maximum stress of implant neck bone cortex in maxillary posterior region with three unit implant fixed denture by three-dimensional finite element method, and to study the stress variation law, so as to guide the clinical selection of appropriate implant restoration scheme. **Methods:** Abaqus6.14 was used to establish a simple model of maxillary edentulous bone block and strau-man soft tissue horizontal standard neck implant. The fixed bridge models with different diameters (4.1 mm, 4.8 mm), different lengths (8 mm, 10 mm, 12 mm) and different positions (567, 5x7, 56x, X67) were established respectively. According to Nelson's law, 300 n, which is close to the maximum masticatory force, was loaded vertically at the ratio of 6:10:9. The stress distribution and the maximum von Mises force (MVMS) of bone cortex were calculated. **Results:** (1)The distribution of MVMS around the implant

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-12-26

基金项目: 内蒙古自治区卫生计生科研计划项目(201701059); 内蒙古自然科学基金项目(2018MS08100); 内蒙古医科大学青年创新基金项目(YKD2017QNCX017); 内蒙古医科大学第一临床医学院2020年大学生“启蒙计划”项目(FYQMJH2020045)

作者简介: 武旭(1992-), 女, 内蒙古医科大学口腔医学院2018级在读硕士研究生。

通讯作者: 李琼, 副主任医师, 硕士研究生导师, E-mail: 1329607312qq.com 内蒙古医科大学附属医院口腔科, 010050

neck of three unit implants in each group was smaller than that in other groups, and the relationship was $G1 < G2 < G3 < G4$; (2) In the two unit implant fixed bridge repair model, the distribution of MVMs within the group was $G4 > G3 > G2$, and the maximum stress distribution of bone cortex was $4112-g2 < 4110-g2 < 4110-g3 < 4112-g3 < 4108-g3$. The results showed that the distribution of MVMs in the 4.8mm diameter group was smaller than that in the 4.1mm diameter group. **Conclusion:** (1) The MVMs of three implants is the smallest when three units of maxillary posterior teeth are lost continuously; (2) When three units of maxillary posterior teeth are missing continuously, the two implant supported implant bridge (5x7) can be used to replace the three implant supported implant bridge repair scheme, which can reduce the surgical trauma and reduce the patient's medical expenses; (3) According to the statistical analysis of MVMs distribution, it can reduce the surgical trauma and the patient's medical expenses. At the same time, the maximum stress distribution of bone cortex is not only smaller with the increase of length and diameter.

Key words: finite element; implant fixation; maximum von Mises force of bone cortex

有限元分析^[1,2](finite element analysis, FEA)出现于上个世纪50年代的航空工业,基本思想是把研究对象分解成为由有限个单元组成的整体,通过对每个单元进行受力分析研究,从而推测出整体的受力、形变和应力分布的力学特征。固体结构有限元分析的力学基础是弹性力学,而方程求解的原理是采用加权残值法或泛函极值原理,实现的方法是数值离散技术,最后的技术载体是基于计算机硬件平台的有限元分析软件。自1973年Thresher首先将有限元法应用于口腔医学,其已经成为口腔生物力学研究领域一种有效的分析工具。

目前,由于牙周炎、龋坏等造成牙列缺损及缺失的情况越来越多见^[3],如何进行牙列缺损及缺失修复是临床常见的问题,而种植现阶段作为牙列缺损及缺失的首选修复方案,依旧面临许多设计问题。国内外很多学者都曾利用三维有限元^[4]的方法解决了口腔种植领域中的一些临床问题,比如胡妍^[5]等比较了四单位种植体固定桥不同设计方案的应力分布(即456X、45X7、4X67、X567, X为桥体),模拟了口腔咀嚼过程。分析结果表明,将第一磨牙设计为桥体的方案(45X7)为最佳,其应力分布情况良好,这种设计为临床治疗提供了理论依据。另外有研究^[6]比较了不同种植体间距的后牙区三单位固定桥的应力分布特征,在下颌后牙区植入两颗种植体,种植体间距分别设计为5mm、10mm、20mm,施加垂直向、近远中向和颊舌向的载荷,比较其骨界面的应力分布特征。这些研究都为临床治疗方案的选择提供了参考,并且逐渐证明利用三维有限元的分析方法对口腔领域的问题进行设计研究分析愈发具有参考价值。但由于上颌后牙区解剖的特殊性^[7,8],关于上颌后牙区缺损的种植修复设计尚无统一观点。主要原因有上颌后牙区解剖结构复杂,与上颌窦邻近,牙齿缺失后骨量吸收程度不等,缺陷近远中距离、牙合龈距离不同,以及患者的具体

要求不同等,更主要的原因是缺少大样本长期的临床观察研究。对于种植支持的三单位固定义齿,常见的植体数目有两颗或三颗,但有关上颌第二前磨牙、第一磨牙、第二磨牙这种三单位缺失的种植固定义齿的种植方案和种植修复后的应力分布有待于进一步研究,本研究现对上颌后牙区骨量相对充足时做相关研究,对不同位置 and 不同数目种植体支撑的修复桥进行受力分析,以期临床操作提供参考。

1 材料和方法

1.1 设备及软件

个人PC计算机:CPU Intel(R) E5-1650 50GHz,内存432G;有限元分析软件:Abaqus 6.14-1 (DS SIMULIA,法国)。

1.2 上颌后牙区种植修复模型的建立及分组

建立简化的上颌骨牙槽骨模型,种植体的形态和尺寸参考Straumman软组织水平标准颈种植体,分别建立直径为4.1mm、4.8mm,长度为8mm、10mm、12mm的模型,种植体上部牙冠的形态和尺寸参考天然牙齿解剖外形^[9],为研究方便简化了修复基台中央螺丝,将种植体和修复基台复合体作为一个整体直接绘制,按照种植体不同植入位置进行分组,三颗种植体连桥修复组为G1(group1, G1)、近远中分别一颗种植体连桥修复为G2(group2, G2)、靠近远中两颗种植体单端桥修复为G3(group3, G3)、靠近近中两颗种植体单端桥修复为G4(group4, G4)(见图1、2)。

1.3 材料的参数选择、实验假设和边界条件

各模型中界面两种材料在负荷时的相对位移为0。骨块底面给予刚性约束。各材料均假设为连续、均质、各向同性的线弹性材料。材料的参数均来自于文献^[10,11](见表1)。

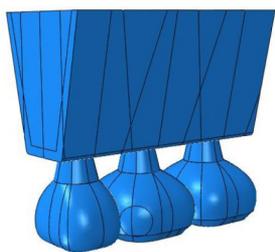


图1 三颗种植体连桥修复模型

Fig.1 Three implant bridge repair model

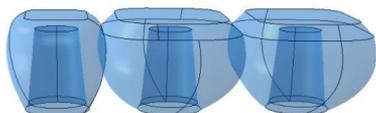


图2 上颌第二前磨牙至第二磨牙牙冠简化模型

Fig.2 Simplified model of maxillary second premolar to second molar crown

表1 有限元模型力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of finite element model

材料	弹性模量 GPa	泊松比
骨皮质	13.7	0.3
骨松质	1.37	0.3
纯钛	110	0.35
全瓷	70	0.19

1.4 布种与网格划分及力的加载

将牙冠模型、种植体模型和下颌骨局部研究模型装配组合后,按照间距1整体布种及划分网格,单元类型为C3D10M,单元形状为四面体,近似全局尺寸1,最大偏离因子0.1,最小尺寸比例0.1,划分结果(见图3)。由于日常咀嚼食物所需殆力约为3~30kg^[12],为了增加结果显著性,取最大值即30kg≈300N作为垂直载荷值,加载方向沿种植体长轴垂直于牙冠顶面,根据纳尔逊定律^[13,14]即第二前磨牙:第一磨牙:第二磨牙的牙合力比值为6:10:9,采用表面均匀载荷的方式加载。

2 结果

根据力加载后的云图可以看出,骨皮质的 Von Mises^[15~17]分布于种植体颈部周围颊舌侧皮质骨内,在三颗种植体支持的G1组及两颗种植体支持的G3、G4组内MVMS分布于中间种植体颈部周围腭侧骨皮质内^[2,18],而在两颗种植体支持的G2组内,MVMS分布于远中种植体颈部周围腭侧骨皮质内;种植体的MVMS在G1、G3、G4组内均分布于中间种植体颈部腭侧位置,而在G2组则分布于近中种植

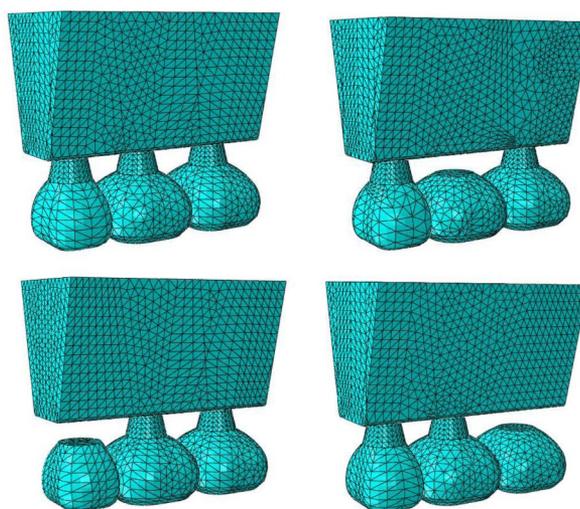


图3 两颗种植体与三颗种植体支持固定义齿模型网格划分图
Fig.3 Mesh generation of two and three implant supported fixed dentures

体颈部腭侧位置。骨松质MVMS出现在G1、G3、G4组中间种植体根端腭侧正中处对应的骨松质,G2组远中种植体根端腭侧正中处对应的骨松质。另外根据结果云图统计显示在各个组内三单位种植体修复的种植体颈部周围骨皮质MVMS分布较其他组较小,关系为G1<G2<G3<G4;两单位种植体固定桥修复模型中,组内比较MVMS分布关系为G4>G3>G2,组间比较骨皮质最大应力分布关系由小到大依次为4112-G2<4110-G2<4110-G3<4112-G3<4108-G3,4812-G2<4808-G2<4810-G2<4812-G3<4810-G3;在不同直径相同长度时,直径为4.8mm组的MVMS分布较相对应的直径为4.1mm组更小(见表2,图4~6)。

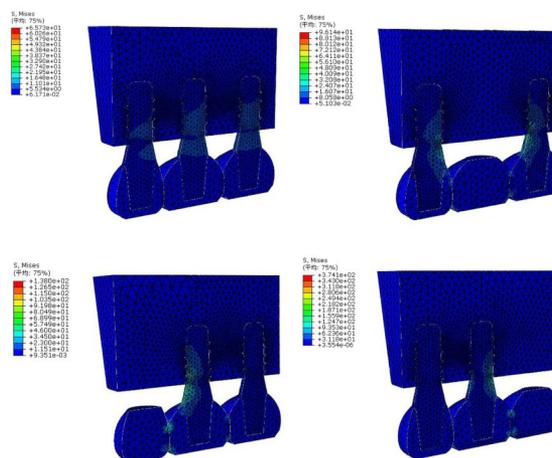


图4 各组模型在垂直载荷300N时应力分布云图
Fig.4 Stress distribution nephogram of each group of models under vertical load of 300N

表2 各组模型在垂直载荷300N时各部位材料的MVMS值(MPa)
Tab.2 MVMS values of materials in each part of models under vertical load of 300N(MPa)

种植体型号 /部位	组别							
	G1		G2		G3		G4	
	骨皮质	骨松质	骨皮质	骨松质	骨皮质	骨松质	骨皮质	骨松质
4108	17.89	3.487	36.07	5.803	41.22	7.316	78.01	6.807
4110	14.53	2.79	23.68	4.803	34.96	6.875	58.86	6.607
4112	18.17	2.84	21.68	3.881	35.39	5.038	73.39	5.576
4808	19.76	3.213	21.68	5.438	32.87	5.311	60.85	5.671
4810	16.48	2.509	25.04	4.102	28.07	6.306	46.6	10.48
4812	13.45	2.715	19.47	4.496	25.56	4.312	35.44	5.337

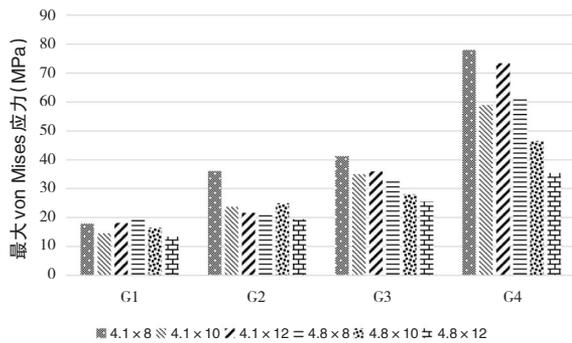


图5 种植体位置相同时各组的骨皮质的MVMS值
Fig.5 MVMS of the bone cortex in the same group of implant placement

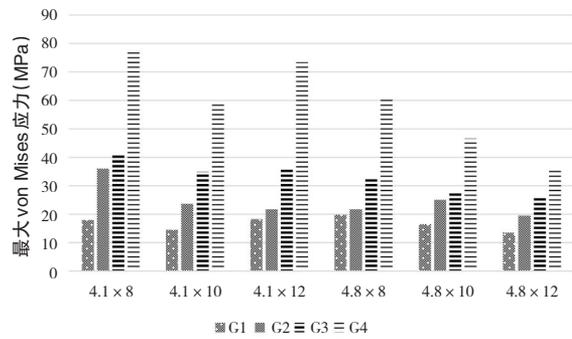


图6 种植体型号相同时不同设计方案的骨皮质的MVMS值
Fig.6 MVMS values of cortical bone in different designs with the same implant size

3 结论

本研究通过建立模型与进行模拟口腔咀嚼受力加载得出上颌后牙连续三单位缺失时选用三颗种植体修复所产生的的MVMS最小;两单位种植体修复三单位缺失时根据剩余骨高度的不同选用不

同位置的修复方式时,在直径为4.1mm时4112-G2组周围MVMS分布为最小,4108-G3的MVMS分布最大;而在直径为4.8mm时4812-G2组周围MVMS分布最小,4808-G3组的MVMS分布最大。有研究表明^[9],在种植体固定桥修复缺失牙方案中,当一侧种植体型号不变,骨皮质的 von Mises 应力随着另一侧种植体的长度增加而减小,随着直径增加而减小,本研究得出在两端种植体型号同时改变时,von Mises 应力并不是单调的线性变化关系,另外得出了在临床选择双端种植体型号时的力学分布最优解。

在本研究中,组内进行比较时随着种植体位置的变化,骨皮质的MVMS的关系为G1<G2<G3<G4,即三单位种植体连桥修复的MVMS最小,而将第二磨牙作为单端桥的修复方式的骨皮质MVMS最大,这与以往研究的结果一致。组间进行比较时,种植体直径不同时,除G1组外,各组骨皮质的MVMS随着直径的增加而减小,而G1组骨皮质的MVMS随直径变化的关系不明显。种植体直径不变长度在变化时,即双端种植体的长度在同时变化时,骨皮质的MVMS并不是单调的线性增减关系,可以看出在所有分组中4812-G1组为最优解即骨皮质的MVMS为13.45MPa,在两颗种植体支持的三单位连桥中4812-G2组骨皮质的MVMS最小值19.47MPa,其次为4808-G2组的骨皮质的MVMS为21.68MPa,而4812-G3组的骨皮质的MVMS为25.56MPa小于4808-G2组的36.07MPa,提示并不是两颗种植体位于双端修复时的骨皮质的MVMS一定优于单端桥修复方案。另外根据既往学者的研究,人类骨皮质抗压强度和抗拉强度分别为140MPa、108MPa^[20,21],考虑到固定义齿受力时,经种植体传到到骨皮质时主要受到的是压力,确定本研究中的骨皮质屈服强

度为 140MPa; 而骨松质的屈服强度为 22~28MPa; 钛金属钛金属屈服强度 344~425MPa, 根据研究结果可知本研究中的两颗种植体(5X7)支持的种植桥修复方案未超过弹性变量极限, 且其 MVMS 最接近三单位种植体连桥修复方法的 MVMS, 可以推断上颌后牙连续三单位缺失时可选用两颗种植体支持的种植连桥修复方案(5X7)替代三颗种植体支持的种植连桥修复方案, 可减少手术创伤及降低患者医疗费用; 另外按照 MVMS 分布关系的统计提示在两端种植体型号同步变化时骨皮质最大应力分布并不是单纯是随着长度及直径的增加而较小, 可设置相对应的变量及分组进行进一步研究。

参考文献

- [1] 何雨桐, 马春丽, 乔庚, 等. 下颌中切牙种植单端固定桥桥体接触面对种植体及其周围组织应力影响的三维有限元分析[J]. 中华口腔医学杂志, 2019(07):463-468
- [2] 于海洋. 口腔生物力学. 北京: 人民卫生出版社, 2012:232-234, 277-278, 322
- [3] 郑学彬, 龙淑会, 李富杰, 等. 老年慢性牙周炎合并冠心病患者龈沟液及血清中 IL-1 β 、TNF- α 、IL-18 及 IFN- γ 的表达与临床意义[J]. 中国老年学杂志, 2020; 40(11):2360-2363
- [4] 姚春燕, 张伟, 李矿伟, 等. 基于有限元分区式多孔种植体设计研究[J]. 口腔医学研究, 2017; 33(9):913-915
- [5] 胡妍, 王冬梅, 王成焘, 等. 四单位种植固定桥不同设计方案的生物力学研究[J]. 上海交通大学学报, 2009; 43(07):1057-1061
- [6] 丁旭, 丁毅, 章加宇, 等. 下颌后牙种植固定桥不同桥体长度和连接体面积时受载的三维有限元分析[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2012; 13(03):142-145
- [7] 武旭, 蓝鹏. 关于上颌窦解剖结构对种植影响的研究进展[J]. 中国口腔种植学杂志, 2019; 24(03):148-150
- [8] 蓝鹏, 云素珍, 李云华. 单纯上颌窦内提升术同期植入不同种植体的初期稳定性临床研究[J]. 内蒙古医科大学学报, 2018; 40(01):1-5+10
- [9] 王惠芸. 我国人牙的测量和统计. 中华口腔医学杂志. 1959; 7(3):149-155
- [10] Lee JS, Cho IH, Kim YS, et al. Bone-implant interface with simulated insertion stress around an immediately loaded dental implant in the anterior maxilla: a three-dimensional finite element analysis[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2012; 27(2):295-302
- [11] 陈俊良, 刘旭琳, 张满月, 等. 短种植体修复牙槽骨严重吸收的下颌第二磨牙的三维有限元分析[J]. 口腔医学研究, 2019; 35(03):246-250
- [12] 皮昕. 口腔解剖生理学. 北京: 人民卫生出版社. 2000:209
- [13] 徐君武. 口腔修复学. 北京: 人民卫生出版社. 2000:121-2
- [14] 罗强, 丁茜, 张磊, 等. 后牙种植冠桥修复后局部咬合变化的定量分析[J]. 北京大学学报(医学版), 2019; 51(06):1119-1123
- [15] Bayraktar, M. Effect of crown to implant ratio and implant dimensions on periimplant stress of splinted implant-supported crowns: a finite element analysis. Implant Dent, 2013; 22(4): 406-13
- [16] Koka, P. The effect of implant design on the stress distribution in a three-unit implant-supported distal cantilever fixed partial denture: a three-dimensional finite-element analysis. Indian J Dent Res, 2012; 23(2): 129-34
- [17] Bacchi, A. Effect of framework material and vertical misfit on stress distribution in implant-supported partial prosthesis under load application: 3-D finite element analysis. Acta Odontol Scand, 2013; 71(5): 1243-9
- [18] Tian K, Chen J, Han L, et al. Angled abutments result in increased or decreased stress on surrounding bone of single-unit dental implants: A finite element analysis. Med Eng Phys, 2012; 34(10):1526-1531
- [19] 林奕, 陶献发, 王屹博, 等. 不同种植体平台位置磨牙联冠修复的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2018; 22(26):4123-4127
- [20] 宿玉成. 口腔种植学. 人民卫生出版社, 2014:472
- [21] Harun H. Bayraktar, Elise F. Morgan, Glen L. Niebur, et al. Comparison of the elastic and yield properties of human femoral trabecular and cortical bone tissue. Journal of Biomechanics. 2004; 37: 27-35