临床研究 文章编号:0253-3626(2009)02-0232-03

Forsus 推上颌第一磨牙向远中瞬时移动趋势的力学仿真分析

高 翔[1],宋锦璘[1],李丽华[1],邓 锋[1],樊瑜波[2]
(1.重庆医科大学附属口腔医院正畸科,重庆 400015;2.北京航空航天大学生物工程系,北京 100191)

【摘 要】目的:构建具有一定粘弹塑性的 Forsus 推上颌第一磨牙向远中三维有限元模型,仿真模拟 Forsus 推上颌第一磨牙远中瞬时移动趋势,探讨 Forsus 远中移动上颌第一磨牙有利的加载方式,为临床应用提供一定的参考依据。方法:选择恒牙早期安氏Ⅱ类错殆畸形男性患者 1 名,螺旋 CT 扫描头颅后,经 Mimics8.0、Abaqus6.5 构建 Forsus 推上颌第一磨牙向远中的三维有限元模型,模拟单纯加载 Forsus 远中力、加载 Forsus 远中力+抗倾斜力矩、复合加载 Forsus 远中力+抗倾斜力矩+抗旋转力矩三种不同载荷作用下上颌第一磨牙的瞬时移动过程(加载合力大小 300 g,作用点位于冠颊面中心,加载时间为 1 s),经 Abaqus6.5 分析上颌第一磨牙远中移动的有利加载方式。结果:Forsus 推上颌第一磨牙向远中时,不同的加载方式所产生的牙周膜应力分布不同。单纯加载 Forsus 远中力时,上颌第一磨牙发生较严重倾斜移动;加载 Forsus 远中力+抗倾斜力矩(Mt/F = 9)时,上颌第一磨牙发生较严重扭转;复合加载 Forsus 远中力+抗倾斜力矩(Mt/F = 9)+抗旋转力矩(Mr/F = 5)时,上颌第一磨牙牙周膜韧带远中面承受的应力最小,第一磨牙近似远中平动。结论:Forsus 导下颌向前时,在上颌第一磨牙处辅以一定的抗倾斜力矩和抗旋转力矩,可获得较有利的磨牙远中平动效果。

【关键词】Forsus;推磨牙向远中;三维有限元模型;力学仿真分析
【中国图书分类法分类号】R783.5 【文献标识码】A 【收稿日期】2008-06-26

The mechanical simulation analysis of instantaneous distal moving trend of the maxillary first molar in forsus

CAO Xiang, et al
(*Department of Orthodontics, College of Stomatology, Chongqing Medical University*)

【Abstract】*Objective*: To simulate the instantaneous distal moving trend of the maxillary first molar based on the three-dimensional finite element model(3-FEM) of Forsus distalizing the maxillary first molar with some visco-elastic-plastic characters and explore the favorable loading mode of molar distal movement in Forsus in order to provide biomechanical basis for clinical practice. *Methods*: A male patient with Class Ⅱ malocclusion was selected. The 3-FEM of Forsus distalizing the maxillary first molar was built through spiral CT scanning, Mimics8.0, and Abaqus6.5 software. This study simulated instantaneous distal moving process of the maxillary first molar under three different loading modes (loading force was 300 g, point of force was on the center of the crown's buccal surface, loading time was 1s), which included a distalizing force, a distalizing force + counterrotation moment, a distalizing force + countertipping moment + counterrotation moment. *Results*: When Forsus distalized the maxillary first molar, different loading modes lead to different PDL stress distributions. When the model was added by a distalizing force, the maxillary first molar would be relatively seriously inclined; when added by a distalizing force +counterrotation moment (Mt/F =9), the maxillary first molar would be relatively seriously rotated and when added by a distalizing force + countertipping moment(Mt/F =9) + counterrotation moment(Mr/F = 5), the distal surface of the PDL would bear the lightest stress, and the first molar would achieve approximate translation movement.*Conclusion*: When mandible is guided forward by Forsus, the maxillary first molar would achieve better molar translation effect if added certain countertipping and counterrotation moment

【Key words】Forsus; Distal movement of the maxillary first molar; Three-dimensional finite element model; Mechanical simulation analysis

对于轻度前牙拥挤的安氏Ⅱ类错殆畸形患者可以通过磨牙远中移动解除拥挤和改善磨牙关系,从而获得较好的疗效。作为一种固定功能性矫治器,Heinig[1]认为 Forsus 能有效改变上下牙列及颌骨关系,兼具一定的推上颌第一磨牙向远中效果。但是,Forsus 矫治中可能引起上颌第一磨牙倾斜、旋转等负效应[2],如何有效控制 Forsus 治疗过程中磨牙远中移动是 Forsus 临床应用难点之一,尚未见相关报道。据 Kinzinger GS 等研究发现[3],上颌第一磨牙倾斜、旋转等负效应与磨牙移动的初始瞬时趋势具有

作者介绍:高 翔(1983-),男,硕士,研究方向:口腔生物力学研究。
通讯作者:宋锦璘,男,主任医师,E-mail:soongjl@163.com。
基金项目:重庆市教育委员会科学技术研究项目资助(kj060316)。

十分密切的关系。因此，对不同加载方式下 Forsus 推第一磨牙向远中瞬时移动趋势进行生物力学研究极为必要。

本研究通过构建计及粘弹塑性的 Forsus 推上颌第一磨牙向远中的三维有限元模型，仿真模拟 Forsus 推上颌第一磨牙的远中瞬时移动趋势，探讨 Forsus 远中移动上颌第一磨牙有利的加载方式，为临床应用 Forsus 推磨牙向远中提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

在患者完全知情同意的前提下，选择 1 名恒牙初期安氏Ⅱ类错𬌗下颌后缩畸形病人作为研究对象，12 岁，全身发育正常，处于生长发育高峰期（手腕骨示 MP3 期），前牙轻度拥挤，Ⅲ度深覆牙合、深覆盖，需远中移动上颌第一磨牙以获得良好疗效。

1.2 CT 扫描和三维有限元模型的构建

CT 扫描前患者用 MBT 矫治体系行固定正畸治疗，上下牙列排齐整平，符合 Forsus 安装要求。以 0.625 mm 为层厚，眼耳平面（FH）为参照平面进行断层扫描，自颅顶至下颌体下缘得到 384 张断层扫描图像并传入 GE Awd4.2 图像后处理工作站，利用 Mimics8.0、Abaqus6.5 软件，经网格划分后建立“Forsus－牙列－颌骨－颞下颌关节”三维有限元模型。该模型采用 Abaqus6.5 的自由网格划分，包含四面体线性单元、三角形壳单元共 785519 个单元，238194 个节点。利用模型模块化、可拆卸的特点，从上述模型中分解出 Forsus 推上颌第一磨牙向远中的三维有限元模型，参见图 1。

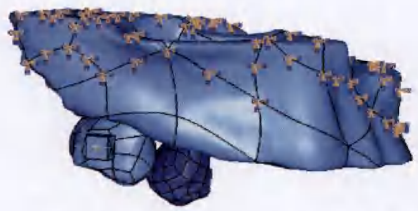


图 1 推第一磨牙向远中的三维有限元模型

表 1 模型的材料参数

材料模型	弹性模量 E(MPa)	泊松比 v	密度(g/cm³)
皮质骨	13 700	0.3	1.67
松质骨	1370	0.3	1.15
牙釉质	84 100	0.33	2.50
牙本质	18 600	0.31	2.28
牙周膜	68.9	0.45	1.05
托槽	2.06×10^5	0.3	
不锈钢弓丝	1.76×10^5	0.3	

表 2 颌骨模型粘弹塑性参数列表

材料模型	A	n	f	H(Pa)	σ_y(Pa)
皮质骨	1×10^{-8}	1	0.25	1.29×10^7	6×10^6
松质骨	5×10^{-9}	1	0.25	1.29×10^6	6×10^5

1.3 材料参数和假设条件

参考以往樊瑜波、刘占芳、邓锋等[4-9]相关口腔生物力学研究，本研究所涉及的生物材料（皮质骨、松质骨、牙周膜等）均视为均质、各向同性的线弹性材料，材料参数如表 1、2。牙周膜厚度假定为均匀的 0.25 mm。

1.4 边界约束

拟采用动力瞬态分析，除考虑磨牙远中移动的基本方式，还考虑惯性的影响，即上 1 个时间点的惯性力会影响到下一个时间点的状态。

1.5 载荷条件

加载部位：上颌第一磨牙牙冠的颊面中心。

加载力大小：推磨牙向远中的力一般每侧采用 300~500 g 牵引力[10,11]。由于不同的患者，Forsus 在上颌第一磨牙处的加载角度均不同，为简化计算，本研究假定 Forsus 作用于磨牙处的加载力平行于牙合平面的分力大小（F）均为 0.3 kg 进行动态模拟，忽略垂直向分力的作用。

加载时间：选择 1 s 的加载时间，一方面减少计算量，另一方面近似模拟初始的应力变化趋势。

加载方式：本研究主要考察以下三种工况下上颌第一磨牙的瞬时远中移动趋势：（1）工况 1：单纯远中力（F=0.3 kg）；（2）工况 2：单纯远中力（F=0.3 kg）＋抗倾斜力矩（Mt）；（3）工况 3：复合荷载（单纯远中力（F=0.3 kg）+ 抗倾斜力矩（Mt）+ 抗旋转力矩（Mr））。

1.6 计算分析

在奔腾 4-3.00 GHz 处理器、2G 内存、120G 硬盘的个人电脑上，通过 Abaqus6.5 计算 Forsus 推上颌第一磨牙向远中的最佳荷载方式。

2 结 果

本研究通过应力分布云图的变化来模拟研究不同工况加载下磨牙的瞬态移动趋势，结果如下。

工况 1：在第一磨牙颊侧单纯加载远中力时，牙周膜三个牙根远中面出现压应力，在牙周膜远颊根的远中颈部及腭侧根舌侧颈部出现压力集中区，第一磨牙不仅有远中移动趋势，还有远中倾斜及腭向旋转趋势。

工况 2：当加载远中力合并 Mt =2.7 kg·mm，Mt/F = 9 的抗倾斜力矩时，上颌第一磨牙仅发生扭转移动的趋势。

工况 3（图 2）：Forsus 矫形力力矢量通过牙冠颊侧表面的中心，复合加载远中力，Mt =2.7 kg·mm，Mt/F = 9 的抗倾斜力矩，Mr =1.5 kg·mm，Mr/F = 5 的抗旋转力矩时，磨牙牙周膜韧带远中面承受的应力最小，磨牙将产生平移，没有发生明

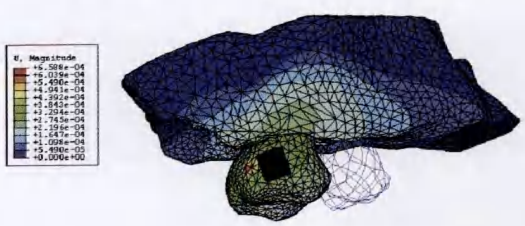


图 2 工况 3 位移图

显的倾斜和扭转。

3 讨 论

Forsus 在导下颌向前的同时对上颌第一磨牙可提供较持续的远中向正畸力,支抗要求易于实现,患者依从性要求低,有利于牙槽骨改建和牙齿移动。在构建几何、力学相似性较高的三维有限元模型后,对不同加载工况下的 Forsus 推上颌第一磨牙远中瞬时移动趋势进行仿真分析,可为 Forsus 临床应用提供一定的生物力学依据。

3.1 建立了计及粘弹塑性的 Forsus 推上颌第一磨牙向远中的三维有限元模型

建立准确、逼真的有限元模型是数值应力分析的前提。三维有限元模型构建不仅需要模拟材料的几何相似性,力学相似性的模拟也十分重要,对材料力学参数赋值的改良可提高模型的力学相似性[12]。在牙移动的力学模型中,各种条件下的弹性变形始终存在粘弹性变形,骨组织的粘性始终贯穿其弹性到非弹性的各种变形,塑性变形与应变时间有关,其"应力—应变"关系不再保持单值关系,这与骨兼具弹性、塑性、粘弹性、粘塑性等性质有关[5]。2007 年,刘占芳[5]和邓锋[6]在构建上颌骨微植体支抗模型中首次计及颌骨粘弹塑性的考虑,进行了微植体加载后的时效特性数值模拟。此外,Yettramm AL 等[13]比较各向同性体和各向异性体牙周膜模型后,发现不同模型之间牙齿瞬间转动中心位置变化未见明显影响,即本研究将牙周膜定义为各向同性、简约的线弹性材料并不会影响研究结论。

因此,本研究首次构建了具有一定粘弹塑性的 Forsus 推上颌第一磨牙向远中的三维有限元模型,将上颌骨设为各向同性的粘弹塑性材料,增强了模型的几何相似性和力学相似性,为较精确的仿真分析提供了良好的条件。这与以往的研究模型不同[14,15]。

3.2 M/F 值对 Forsus 推磨牙向远中移动的临床意义

由于力偶矩=力×力线至阻抗中心的垂直距离,因此,力偶矩与力的比率将导致转动中心的改变,从而决定牙的移动方式,即 M/F 决定牙的移动方式[16]。根据以往 Jeon,李志华等[17,18]研究结论,当远中移动上颌第一磨牙的同时辅以 Mt/F=9~10,Mr/F=5~6 的对抗力矩,可以实现牙齿的近似整体移动。

本研究通过瞬时动态模拟,Forsus 在导下颌向前时,其施加在上颌第一磨牙处的反作用力首先使磨牙远中颊根牙颈部区产生高应力集中区。如施加适宜 M/F 值的对抗力矩,平均分布的低应力会逐渐出现在压力侧,当上颌第一磨牙处辅以 Mt/F = 9 的抗倾斜力矩和 Mr/F = 5 的抗旋转力矩时,第一磨牙牙周膜韧带远中面承受的应力最小,可获得第一磨牙近似远中平动趋势,这与 Jeon,李志华等的研究结论基本一致。由于在 Forsus 临床应用中,Forsus 与𬌗平面的加载角度(θ<90°)根据临床情况有所变化,因此,在施加对抗力矩时须考虑加载角度的影响, 例如: 假设 Forsus 矫形力大小为 0.4 kg,加载角度 θ=30°,那么在磨牙处施加的抗倾斜力矩的大小应为 0.4×cos30°×9 kg·mm,抗旋转力矩大小应为 0.4×cos30°×5 kg·mm,在主弓丝上可以通过适当增加前倾曲和外展弯表达相应的抗倾斜力矩和抗旋转力矩,以利上颌第一磨牙的整体后移。此外,由于 Forsus 矫形力垂直向分力的作用,磨牙在整体远中移动的同时存在压低运动趋势,这种压低作用究竟有多大,有待进一步的研究。

4 结 论

Forsus 前导下颌时,其作用于上颌第一磨牙处的远中向力可能产生磨牙倾斜、旋转等负效应,在第一磨牙处适当增加一定的前倾曲和外展弯可避免磨牙倾斜、旋转等负效应,以有效控制上颌第一磨牙的远中移动。

参 考 文 献

[1] Heinig N, Göz G. Clinical application and effects of the forsus spring, A study of a new herbst hybrid[J]. J Orofac Orthop, 2001, 62(6):436-450.

[2] Karacay S, Akin E. Forsus nitinol flat spring and jasper jumper corrections of class Ⅱ division 1 malocclusions[J]. Angle Orthod, 2006, 76(4):666-672.

[3] Kinzinger G S, Diedrich P R. Biomechanics of a distal jet appliance[J]. Angle Orthod, 2008, 78(4):676-681.

[4] 樊瑜波,张晓峰,唐高妍.生理载荷作用下上颌中切牙牙周膜应力分布的三维有限元研究[J]. 生物医学工程学杂志, 1999, 16(1):23-26.

[5] 刘占芳,李 琦.上颌骨微植体支抗过程的 - 时效特性数值模拟[J]. 中国民康医学, 2007, 19(5):327-329.

[6] 邓 锋,张 磊,张 翼,等."微植体 - 上颌骨"三维有限元模型的建立[J]. 华西口腔医学杂志, 2007, 25(2):192-193.

[7] 宋锦璘,赵志河,胡林华,等.不同牙合重建时 Herbst 矫治器对口颌肌肉和相关韧带约束反力的影响研究[J]. 华西口腔医学杂志, 2001, 19(1):43-45.

[8] Chang K H, Magdum S, Khera S C. An advanced approach for computer modeling and prototyping of the human tooth[J]. Ann Biomed Eng, 2003, 31(5):621-631.

[9] Toparli M. Stress analysis in a post-restored tooth utilizing the finite element method [J]. J Oral Rehabil, 2003, 30(5):470-476.

[10] Firouz M, Zernik J, Nanda R. Dental and orthopedic effects of high-pull headgear in treatment of Class II, division 1 malocclusion[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1992, 102(3):197-205.

[11] 段银钟.正畸临床推磨牙远移技术[M]. 第 1 版. 西安:世界图书出版公司, 2005.29—30.

[12] 田 心,毕 平.生物力学基础[M]. 第 1 版. 北京:科学出版社, 2007.45—56.

[13] Yettram A L, Wright K W, Houston W J. Center of rotation of a maxillary central incisor under orthodontic loading[J]. Br J Orthod, 1977, 4(1):23-27.

[14] Tanaka E, del Pozo R, Tanaka, et al. Three-dimensional finite element analysis of human temporomandibular joint with and without disc displacement during jaw opening[J]. Med Eng Phys, 2004, 26(6):503-511.

[15] Chang K H, Magdum S, Khera S C. An advanced approach for computer modeling and prototyping of the human tooth[J]. Ann Biomed Eng, 2003, 31(5):621-631.

[16] Proffit W R, 著.傅民魁译.当代口腔正畸学[M].第 1 版.北京:人民军医出版社, 2007.332—335.

[17] Jeon P D, Turley P K, Moon H B. Analysis of stress in the periodontium of the maxillary first molar with a three-dimensional finite element model[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1999, 115(3):267-274.

[18] 李志华,陈扬熙,刘 剑,等.上颌第一磨牙远中移动时牙周应力分布的三维有限元分析[J]. 华西口腔医学杂志, 2003, 21(4):267-269.

(责任编辑:冉明会)