

文章编号: 1004-7220(2023)02-0353-07

植入位点及轴向对上颌中切牙即刻种植即刻负重应力影响的三维有限元分析

杜军, 万哲

(新疆医科大学附属中医医院 口腔科, 乌鲁木齐 830054)

摘要:目的 探讨不同牙槽窝形态上颌中切牙即刻种植即刻负重时,植入位点及轴向对种植体周围骨界面应力分布的影响。方法 参照1名健康成年人口腔锥体束计算机断层(cone beam computed tomography, CBCT)影像资料,建立偏唇型、中间型、偏腭型3种牙槽窝形态的上颌中切牙即刻种植即刻负重三维有限元模型;模拟不同植入位点(根尖位点、偏腭/唇侧位点)及轴向(牙长轴、牙槽骨长轴);对已建模型以100 N力进行不同角度(0°、30°、45°、60°、90°)的应力加载;应用ANSYS软件分析种植体周围牙槽骨的应力情况。结果 成功建立12个不同牙槽窝形态上颌中切牙即刻种植即刻负重三维有限元模型。偏唇型及中间型牙槽窝形态行即刻种植即刻负重时,沿牙槽骨长轴方向偏腭位点植入种植体更易获得良好的种植体骨界面生物力学特性;偏腭型牙槽窝形态行即刻种植即刻负重时,在偏唇位点植入,不论是沿牙长轴方向还是沿牙槽骨长轴方向植入种植体,种植体周牙槽骨所受等效应力远小于根尖位点植入。结论 不同牙槽窝形态、植入位点及轴向都会对上颌中切牙即刻种植即刻负重种植体骨界面生物力学特点产生影响。临床中,应针对不同牙槽窝形态制定不同植入轴向及植入位点的手术方案。

关键词: 上颌中切牙; 即刻种植; 即刻负重; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.02.022

Effects of Implant Sites and Axial Direction on Stress of Maxillary Central Incisors with Immediate Implantation under Immediate Weight-Bearing: A Three-Dimensional Finite Element Analysis

DU Jun, WAN Zhe

(Department of Stomatology, Traditionnal Chinese Medical Hospital of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumchi 830054, China)

Abstract: Objective To investigate the influence of implant location and axial direction on stress distributions at the implant bone interface of maxillary central incisors with different alveolar fossa morphology by immediate implantation under immediate weight-bearing. **Methods** With reference to dental cone beam computed tomography (CBCT) image data from a healthy adult, the three-dimensional (3D) finite element models of maxillary central incisors with three types of alveolar fossa (buccal, mediate, and palatal type) by immediate implantation under immediate weight-bearing were established. Different implant sites (apical site, palatal/labial site) and axial directions (long axis of the tooth, long axis of the alveolar bone) were simulated. The established models were subjected to 100 N force at different angles (0°, 30°, 45°, 60°, 90°). The stresses in the alveolar bone around the implant were analyzed by the ANSYS software. **Results** Twelve 3D finite element models of maxillary central incisors with different alveolar fossa morphology by immediate implantation under immediate

收稿日期: 2022-03-12; 修回日期: 2022-04-22

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01C148)

通信作者: 万哲, 副主任医师, E-mail: WZ-1218@163.com

weight-bearing were successfully established. When alveolar fossa with buccal and mediate shape was applied with immediate implantation under immediate weight-bearing, it was easier to obtain good biomechanical properties of the implant-bone interface when implants were placed at palatal site along long axis of the alveolar bone. When alveolar fossa with palatal shape was applied with immediate implantation under immediate weight-bearing, the equivalent stresses on peri-implant alveolar bone were much smaller than those on apical site, regardless of whether the implant was placed along long axis of the tooth or the long axis of the alveolar bone.

Conclusions Different alveolar fossa morphology, implant location and axial direction will affect biomechanical characteristics of implant-bone interface of maxillary central incisors with immediate implantation under immediate weight-bearing. In clinical practice, surgical planning on different axial direction and location of implantation should be developed for alveolar fossa with different morphology.

Key words: maxillary central incisor; immediate implantation; immediate weight-bearing; finite element analysis

上颌中切牙作为口腔的关键区域,受到的美学需求相对较高,但往往容易因咀嚼侧向力较大、位置前突易受外伤、龋病、牙周病等因素而出现不同程度的牙齿损伤,进一步导致脱落率升高^[1]。针对前牙美学区的种植修复,尤其是对美学需求最高的上颌中切牙,延期种植的患者需要经历至少 6~12 个月的缺牙期,对患者美观及功能恢复造成极大的影响。即刻种植即刻负重创伤小、周期短、手术次数少,能保障一定的初期稳定性,且具有较好的美学效果^[2]。

在即刻种植即刻负重的手术过程中,植入位点及轴向是很重要的影响因素。理想的植入位点及轴向,不但能延长种植体的使用时间,还能降低多种并发症的发生率^[3-4]。但是根据牙根在牙槽骨中的位置关系,上颌中切牙被分为偏唇型、中间型和偏腭型 3 种类型^[5](见图 1)。对于 3 种完全不同的牙槽窝形态,不同植入位点及轴向对即刻种植即刻负重的骨结合效果的影响,目前鲜有报道。



图 1 上颌中切牙分类

Fig. 1 Classifications of maxillary central incisors (a) Buccal type, (b) Mediate type, (c) Palate type

本文分别研究 3 种不同形态上颌中切牙牙槽窝在植入位点及轴向发生变化情况下对种植体周围骨组织应力分布的影响,以期为临床种植方案的制定以及提高上颌中切牙即刻种植即刻负重的手术成功率提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究对象

1 名健康成年人。纳入标准:牙列整齐无缺失牙,咬合关系稳定,磨牙中性关系,覆合覆盖关系正常。排除标准:患有牙周及牙髓根尖周疾病;牙齿或颌骨发育异常;颌骨囊肿类疾病;有金属类充填物及牙冠影响锥体束计算机断层 (cone beam computed tomography, CBCT) 拍摄。

1.2 资料采集

本研究已通过新疆维吾尔自治区中医医院伦理委员会伦理审查。该例健康成年人在签署知情同意后书后进行 CBCT 拍摄, CBCT 影像学资料由 Kavo 3D exam 口腔三维体层 X 线影像系统 (Kavo 公司, 德国) 进行扫描采集, 层厚为 0.125 mm, 扫描数据以 DICOM 格式输出。

1.3 上颌中切牙即刻种植即刻负重模型建立与处理

将 DICOM 格式 CBCT 数据扫描图像导入三维影像处理软件 Mimics 17.0 (Materialise 公司, 比利时), 拾取体层图像, 以包含右上颌中切牙的部分颌骨为研究对象, 通过调整中切牙在牙槽骨中的位置, 获得偏唇型、中间型和偏腭型 3 种不同牙槽窝形态的上颌骨块 (见图 2)。



图2 不同形态牙槽窝上颌骨块模型

Fig. 2 Maxillary block models with different alveolar fossa morphology (a) Buccal type, (b) Mediate type, (c) Palate type

筛选断层图像,进行初步优化,将实体模型几何模型以 STL 格式保存并输出。通过逆向工程反求软件 Geomagic studio(3D Systems 公司,美国)导入 STL 文件,进行降噪和光顺化处理,最终获得三维实体模型以 SEP 格式文件保存。种植体 (Straumann BLT NC, 3.3 mm×12 mm)、修复基台及固位螺丝 (Straumann 原厂基台及对应的中央螺丝)、上部修复体 (威兰德臻瓷二氧化锆全瓷冠) 的几何模型均通过 NX 8.5 三维设计软件 (Siemens 公司,德国) 建立,运用布尔运算,将种植体、修复基台及固位螺丝装配成一体,之后用厚度为 70 μm 的粘接剂模型将上部修复体与之前组装好的种植体-基台联合体进行装配,最终实现种植牙三维模型的建立。把建立好的种植修复体模型分别与 3 种不同牙槽窝形态的上颌骨块进行相互关系的调整,使用装配功能,通过移动和旋转种植修复体模型,调整其在牙槽骨中的位置,分别获得根尖位点、偏腭/唇侧位点两种植入位点,以及牙长轴、牙槽骨长轴两种植入轴向,将两种植入位点和两种植入轴向两两结合,完成最终实验模型的建立。将已建立好的 12 个几何模型导入通用有限元分析软件 ANSYS Workbench 13.0 (ANSYS 公司,美国) 中,分别对各部件进行有限元网格划分,网格划分采取 4 面体 10 节点结构^[6] (见表 1)。

1.4 实验分组及编号命名

根据牙槽窝形态、植入位点和植入轴向进行分类。牙槽窝形态:偏唇型 (B 型)、中间型 (M 型)、偏腭型 (P 型);植入位点:根尖位点植入、偏腭/唇侧位点植入 (根尖位点偏腭/唇侧平移 2 mm);植入轴向:牙长轴 (牙槽窝唇、腭侧骨壁延长线汇聚形成夹角的角平分线方向)、牙槽骨长轴 (上颌骨唇、腭侧骨壁延长线汇聚形成夹角的角平分线方向) 建立如下 4 种植入位点及植入轴向的组合方式:① 牙长轴

表 1 模型单元和节点数

Tab. 1 Element and node numbers in the model

材料	单元数	节点数
骨皮质	25 723	48 070
骨松质	40 189	67 369
Bio-Oss 骨粉	178 734	289 426
种植体	73 116	150 122
修复基台	4 653	8 204
固位螺丝	2 206	4 474
聚碳酸酯水门汀粘接剂	54 138	93 516
二氧化锆全瓷冠	2 762	4 963

根尖位点植入;② 牙长轴偏腭/唇侧位点植入;③ 牙槽骨长轴根尖位点植入;④ 牙槽骨长轴偏腭/唇侧位点植入 3 种牙槽窝形态。每种牙槽窝形态模拟 4 种植入方式,共建立 12 组工况 (见表 2)。

表 2 实验分组及命名

Tab. 2 Experimental grouping and naming

牙槽窝形态	植入轴向	植入位点	命名
偏唇型 (B 型)	牙长轴	根尖位点	B1
		偏腭/唇侧位点	B2
	牙槽骨长轴	根尖位点	B3
		偏腭/唇侧位点	B4
中间型 (M 型)	牙长轴	根尖位点	M1
		偏腭/唇侧位点	M2
	牙槽骨长轴	根尖位点	M3
		偏腭/唇侧位点	M4
偏腭型 (P 型)	牙长轴	根尖位点	P1
		偏腭/唇侧位点	P2
	牙槽骨长轴	根尖位点	P3
		偏腭/唇侧位点	P4

1.5 实验假设、边界约束及材料属性参数

基于线弹性力学理论,假设各生物材料均为均质、连续、各向同性的线弹性体,种植体与骨组织及骨粉间的接触关系设为摩擦接触 (friction),摩擦因数为 0.2^[7]。其余接触关系均为固定接触 (bonded)。对颌骨模型进行近中、远中及顶面三面的固定约束,保证其在三维空间中无移动^[8]。

1.6 荷载应力的加载方式

施加荷载应力于牙冠腭侧切 1/3 与中 1/3 交界处 [见图 3(a)],加载方式为面加载,加载力为 100 N,略小于正常咬合力,加载方向为腭侧指向唇侧。由于上前牙在现实生活中在多数情况下受力均为侧向力,为模拟正常咬合力方向,本文模拟荷载应力方向与牙长轴分别呈 0°、30°、45°、60°及 90° [见图 3(b)]^[9]。

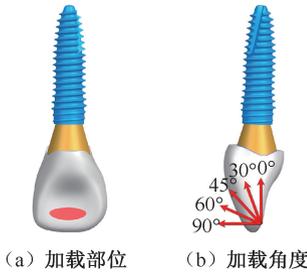


图3 应力加载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stress loading

(a) Loading position, (b) Loading angle

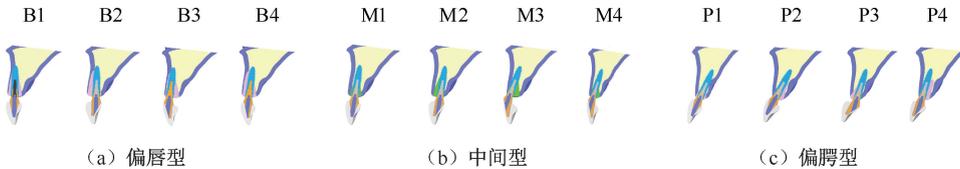


图4 上颌中切牙即刻种植即刻负重三维有限元模型

Fig. 4 Three-dimensional (3D) finite element models of maxillary central incisors with immediate implantation under immediate weight-bearing (a) Buccal type, (b) Mediate type, (c) Palatal type

2.2 模型周牙槽骨等效应力情况

对于偏唇型牙槽窝种植体,应力加载角度为 0° 时,牙槽骨最小等效应力出现在 B4 模型,为 37.85 MPa;随着应力加载角度逐渐增大,牙槽骨等效应力在 B1~B4 模型上均呈现升高趋势,其中 B3 模型最为显著。当应力加载角度为 90° 时,牙槽骨最大等效应力出现在 B3 模型,为 2 439.24 MPa[见图 5(a)]。

对于中间型牙槽窝种植体,应力加载角度为 0° 时,牙槽骨最小等效应力出现在 M1 模型,为 19.01 MPa;伴随着应力加载角度逐渐增大,牙槽骨

1.7 主要观察指标

应用有限元分析软件 ANSYS Workbench 13.0 进行计算,获得 11 组工况在施加不同角度荷载应力后种植体接触牙槽骨的等效应力峰值及其相关云图。

2 结果

2.1 模型展示

本实验成功建立 3 组(偏唇型、中间型、偏腭型)共 12 个上颌中切牙即刻种植即刻负重三维有限元模型(见图 4)。

等效应力在 M1~M4 模型上均呈现升高趋势,其中 M3 模型最为显著。当应力加载角度为 90° 时,牙槽骨最大等效应力出现在 M3 模型,为 2 007.5 MPa [见图 5(b)]。

对于偏腭型牙槽窝种植体,应力加载角度为 0° 时,牙槽骨最小等效应力出现在 P3 模型,为 64.44 MPa,P1~P4 模型相差不大;伴随着应力加载角度逐渐增大,牙槽骨等效应力在 P1~P4 模型上均呈现升高趋势,其中 P3 模型最为显著,P2、P4 模型相差不大。当应力加载角度为 90° 时,牙槽骨最大等效应力出现在 P3 模型,为 360.71 MPa。

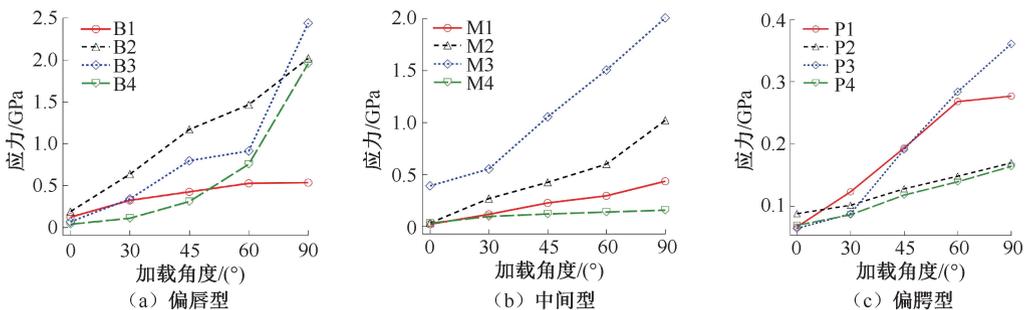


图5 不同形态牙槽窝种植体周牙槽骨等效应力

Fig. 5 Equivalent stress of alveolar bone around alveolar cavity implants with different shapes (a) Buccal type, (b) Mediate type, (c) Palate type

2.3 网格无关性分析

判断网格尺寸对结果的影响,主要的原则是网格质量好坏,以及不同单元尺寸下网格数量增加是否会让结果数据收敛。表3所示为1组不同网格单元尺寸的数据。结果表明,C组单元数和节点数比A组分别增加了57.07%和44.3%,同时C组种植

体最大应力和最大位移分别降低了11.93%和16.08%。本文认为,网格数量大幅增长并不会导致数据同比例的大幅增长,说明网格具有一定的收敛性。同时,本文在进行工况设计时,设置网格参数为恒定不变,即网格尺寸不对结果趋势造成影响。

表3 网格无关性分析

Tab.3 Grid independence analysis

工况 编号	结构单元尺寸/mm							单元数	增幅/ %	节点数	增幅/ %	$\sigma_{max}/$ MPa	降幅/ %	$D_{max}/$ μm	降幅/ %
	1	2	3	4	5	6	7								
A	2.0	2.0	0.4	1.0	0.1	0.1	0.1	472 742		249 075		1 730.4		551.3	
B	1.5	1.5	0.3	0.75	0.1	0.1	0.1	513 909	8.7	275 752	10.7	1 621.4	-6.3	512.7	-7.01
C	1.0	1.0	0.2	0.5	0.1	0.1	0.1	682 194	44.3	391 213	57.7	1 524.0	-11.9	462.7	-16.08

注:1-牙冠,2-牙槽骨,3-粘接剂,4-种植体基台螺钉,5-种植体螺纹,6-牙槽骨螺纹,7-粘接剂接触面; σ_{max} 为最大等效应力; D_{max} 为最大位移。

3 讨论

3.1 建模考量

上颌中切牙是口腔颌面部的重要美学标志点之一,对该牙进行即刻种植即刻负重手术时,在考虑到美学修复效果的同时,还需考虑植入位点及轴向对牙槽骨的应力分布影响,进而起到减少术后并发症、延长种植牙使用时间的作用^[10]。然而,研究表明,上颌中切牙牙根在牙槽骨内表现为不同的位置关系,往往牙长轴与牙槽骨长轴方向并不一致^[11]。因此,在考虑植入位点及轴向时应应对不同的牙槽窝形态有所区分。

三维有限元法将复杂的几何结构划分为若干个更小、更简单的10节点四面体结构——有限元素,再将这些有限元素进行整合、分析,从而了解复杂几何结构的应力及形变信息^[12],其具有应用范围广、简单高效灵活、直观性强等优点^[13]。并且,三维建模的精准度将直接影响最终的检测效果^[14]。

研究表明,将颌骨简化为节段性的方法更适用于单个种植体的生物力学研究^[15]。本文以上颌中切牙为实验对象,颌骨模型选自上颌中切牙基骨,为节段性模型。因需模拟即刻种植即刻负重状态下种植体及周围骨界面的应力分布及位移情况,种植体尚未与牙槽骨及骨粉形成完全骨结合,故本文设置种植体与其周围牙槽骨及骨填充物为摩擦接触,种植牙系统为固定接触,充分模拟临床中真实情况。

在临床工作中,即刻种植后行即刻负重要求种植体能获得相对充足的初期稳定性。本实验选取的研究对象为健康成年人,上颌中切牙区无牙周及根尖区的炎症,且根尖区有充足骨量,以保证植体有3~5 mm进入骨组织。同时,对种植体位移情况进行检测。结果表明,在良好的植入轴向及植入位点下,种植体位移均小于0.1 mm。根据Brunski等^[16]提出“微动理论”(micro-motion),即微动控制在0.05~0.10 mm范围内,种植体能保证一定的初期稳定性,不会影响种植体骨结合的过程;但是微动如果达到或超过0.15 mm,骨结合将受到影响,继而导致种植体周产生纤维性包绕,形成纤维性愈合。上述结果均能说明本实验的研究对象有良好的牙槽骨及全身条件,符合即刻种植即刻负重手术标准。

上颌中切牙行即刻种植即刻负重手术,种植体与牙槽窝内壁通常有间隙,称为“跳跃间隙”^[17]。根据间隙大小,可以决定是否移植骨充填材料。本文主要观察种植位点及轴向对种植体及周围骨组织的生物力学影响,为保证实验变量统一、实验结果真实,在模型中种植体表面与牙槽窝内壁之间都赋予骨充填材料(Bio-Oss骨粉)的弹性模量及泊松比,以期更贴近临床。为保证实验变量统一,本文未考虑轮廓外植骨的情况。然而在临床工作中,应注意保证唇侧2 mm骨壁厚度的要求,是否需轮廓外植骨,尚需根据临床具体情况进行调整。

上颌中切牙在咀嚼过程中主要发挥切断食物

的作用,常受到侧向力的影响。本文为模拟现实生活中上颌中切牙的受力特点,以牙尖交错颌时上颌中切牙牙冠腭侧中1/3与切1/3的交点处为荷载应力施加点,使受力方向与牙长轴呈现不同角度,角度从小到大依次为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° ,从而模拟侧向力角度为越来越大。

不同的植入位点及轴向会改变种植体在牙槽骨中的位置,然而修复牙冠的位置应参照邻牙及牙弓形态进行排列,更需考虑到覆合覆盖关系等因素的影响。本实验纳入研究的是健康志愿者,该患者覆合覆盖关系正常,咬合关系稳定。因此,为保证参照标准统一的同时更加贴近临床,本实验保留原天然牙相对于上颌骨的位置不变,通过改变修复基台的角度来连接种植体于牙冠。同时,赋予原牙冠二氧化锆材质的泊松比与弹性模量。然而,在临床工作中,患者的咬合及覆合覆盖并非完全为理想颌关系,何时统一标准为确定牙冠位置调整基台角度或使用直基台调整牙冠位置,尚需根据临床具体情况进行调整。

3.2 结果分析

针对前牙美学区的种植修复,尤其是对美学需求最高的上颌中切牙,即刻种植即刻负重已成为广大种植医生的首选种植方案,即刻负重通过临时上部结构将咀嚼压力传导至种植体,最终传递至种植体周的牙槽骨上,良好的生物力学相容性是减少种植体周牙槽骨吸收、维持种植体骨界面力学环境适应及改建的先决条件。

本文结果表明,种植体周牙槽骨受到的等效应力主要集中在骨皮质及与种植体螺纹接触的松质骨上。根据 Bayraktar 等^[18]的研究结果,皮质骨能够承受的最大应力为 104 MPa,而松质骨能够承受的最大应力为 82 MPa。这一阈值是引起微骨折的极限值。

本文发现,伴随着侧向力角度的增大,12组模型种植体周牙槽骨等效应力均呈现上升趋势,提示侧向力增加会在很大程度上增大种植体周牙槽骨吸收的风险。临床工作中,应该在即刻修复时对上部结构进行浅覆颌浅覆盖设计,并尽量避免与下颌前牙的接触,从而减少侧向力对植体初期稳定性的影响。

偏唇型牙槽窝上颌中切牙行即刻种植即刻负

重,在应力加载角度为 0° 时,沿牙槽骨长轴,无论在根尖位点还是偏腭侧位点植入种植体,种植体周牙槽骨等效应力均小于 104 MPa,但伴随着应力加载角度逐渐增大,沿牙槽骨长轴根尖位点植入种植体,种植体周牙槽骨等效应力迅速上升,提示应该按植入轴向及位点植入种植体。在侧向力增大的情况下,种植体初期稳定性将明显下降,不利于骨结合。沿牙槽骨长轴偏腭位点植入种植体,在应力加载角度由 0° 上升至 45° 过程中,种植体周牙槽骨等效应力均低于其余3种植入轴向及位点组合。沿牙槽骨长轴偏腭位点植入种植体能获得更小的种植体周牙槽骨等效应力。

中间型牙槽窝上颌中切牙行即刻种植即刻负重,在应力加载角度为 0° 时,沿牙槽骨长轴根尖位点植入种植体,种植体周牙槽骨等效应力值远大于其他3种组合,为 389.68 MPa,已超过 104 MPa,其余3种植入位点及方向组合均低于该阈值。伴随应力加载角度逐渐增大,沿牙槽骨长轴偏腭位点植入种植体能获得更小的种植体周牙槽骨等效应力。

偏腭型牙槽窝上颌中切牙行即刻种植即刻负重,在应力加载角度为 0° 时,4种组合种植体周牙槽骨等效应力均小于 104 MPa。伴随应力加载角度逐渐增大,在偏唇位点植入,不论是沿牙长轴方向还是沿牙槽骨长轴方向植入种植体,种植体周牙槽骨所受等效应力增幅远小于根尖位点植入。

4 结论

本文结果表明,在不同上颌中切牙牙槽窝形态行即刻种植即刻负重时,不同植入轴向及位点的选择,会影响种植体植入初期的应力情况,继而影响种植体骨结合程度。在偏唇型及中间型牙槽窝形态时,沿牙槽骨长轴方向偏腭位点植入种植体,种植体更易获得良好的初期牙槽骨界面生物力学特性,从而降低牙槽骨吸收等种植并发症的发生率;在偏腭型牙槽窝形态时,在偏唇位点植入,不论是沿牙长轴方向还是沿牙槽骨长轴方向植入种植体,种植体周牙槽骨所受等效应力增幅远小于根尖位点植入。但是在临床中,应该针对不同个体,综合考虑咬合力、颌骨局部解剖结构等因素,并结合影像学表现及临床检查,谨慎制定种植方案。

参考文献:

- [1] 亚尔肯·阿吉, 陈晓涛, 马楚凡. 中国新疆地区成人健康上颌前牙唇侧牙槽骨厚度的 CBCT 评价 [J]. 口腔医学研究, 2021, 37(9): 855-859.
- [2] 曾小法, 陈宁, 尹颖. 上颌中切牙微创拔牙即刻种植联合牙龈诱导的美学效果 [J]. 口腔医学研究, 2017, 33(12): 1323-1327.
- [3] 刘峰. 前牙区种植美学修复的植入位点和植入角度设计 [J]. 中华口腔医学杂志, 2020, 55(4): 285-288.
- [4] KHOURY J, GHOSN N, MOKBEL N, *et al.* Buccal bone thickness overlying maxillary anterior teeth: A clinical and radiographic prospective human study [J]. *Implant Dent*, 2016, 25(4): 525-531.
- [5] CHUNG SH, PARK YS, CHUNG SH, *et al.* Determination of implant position for immediate implant placement in maxillary central incisors using palatal soft tissue landmarks [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2014, 29(3): 627-633.
- [6] 安尼卡尔·安尼瓦尔, 艾孜买提江·赛依提, 阿迪力·麦木提敏, 等. 唇侧植骨不同种植修复体的三维有限元分析 [J]. 医用生物力学, 2020, 35(4): 304-310.
- ANNIWAER A, SAIYITI A, MAIMUTIMIN A, *et al.* Three-dimensional finite element analysis on different implant prostheses for labial bone graft [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(4): 304-310.
- [7] BRUNE A, STIESCH M. The effect of different occlusal contact situations on peri-implant bone stress-A contact finite element analysis of indirect axial loading [J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2019, 99: 367-373.
- [8] 张思佳, 曾剑玉, 李佳, 等. 三种单冠对种植体周围骨应力分布影响的光弹分析 [J]. 中华口腔医学杂志, 2018, 53(1): 30-35.
- [9] MOZAYEK RS, ALLAF M, ABUHARB MB, *et al.* Efficacy of adding a supporting implant in stress distribution of long-span fixed partial dentures: A 3D finite element analysis [J]. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects*, 2016, 10(2): 81-86.
- [10] 李阳, 孙蕾, 林臻彦, 等. 偏唇类上颌中切牙三维有限元分析 [J]. 临床口腔医学杂志, 2017, 33(3): 140-144.
- [11] XU DL, WANG Z, SUN L, *et al.* Classification of the root position of the maxillary central incisors and its clinical significance in immediate implant placement [J]. *Implant Dent*, 2016, 25(4): 520-524.
- [12] 吴越琳, 刘加荣. 三维有限元分析在口腔医学领域的研究进展 [J]. 口腔医学, 2021, 41(7): 659-663.
- [13] ARINC H. Effects of prosthetic material and framework design on stress distribution in dental implants and peripheral bone: A three-dimensional finite element analysis [J]. *Med Sci Monit*, 2018, 24: 4279-4287.
- [14] 王姝, 李琼, 金武龙. 有限元法在口腔种植领域的研究进展 [J]. 中华老年口腔医学杂志, 2018, 16(2): 125-128.
- [15] DE FARIA ALMEIDA DA, PELLIZZER EP, VERRI FR, *et al.* Influence of tapered and external hexagon connections on bone stresses around tilted dental implants: Three-dimensional finite element method with statistical analysis [J]. *J Periodontol*, 2014, 85(2): 261-269.
- [16] BRUNSKI JB. Avoid pitfalls of overloading and micromotion of intraosseous implants [J]. *Dent Implantol Update*, 1993, 4(10): 77-81.
- [17] 李少冰, 倪佳, 张雪洋, 等. 上前牙区即刻种植联合即刻修复唇侧骨壁愈后的评估 [J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(18): 2855-2859.
- [18] BAYRAKTAR HH, MORGANA EF, NIEBURB GL, *et al.* Comparison of the elastic and yield properties of human femoral trabecular and cortical bone tissue [J]. *J Biomech*, 2004, 37(1): 27-35.