DOI:10.16016/j.2097-0927.202304082

不同内固定方式预防下颌角囊性病变病理性骨折的三维有限元分析

郑 萍,吕 俊,黄君杰,徐 帅,张 纲 400037 重庆,陆军军医大学(第三军医大学)第二附属医院口腔科

[摘要] **目的** 建立下颌角囊性病变病理性骨折的三维有限元模型,对比分析 8 种钛板内固定方式治疗后下颌骨的生物力学变化,探讨钛板固定方式预防大型下颌骨囊肿病理性骨折的可靠性。**方法** 选取 1 名 30 岁正常成年男性下颌骨建立单侧下颌角区域的囊性病变模型,模拟咬合力加载造成病理性骨折,获取最大临界囊性病变尺寸大小,比较相同力学条件下不同钛板固定方式的下颌骨生物力学特点及变化情况。**结果** 当下颌角囊性病变尺寸超过 24 mm×30 mm×30 mm 时存在病理性骨折的风险;上缘采用 1 mm 厚钛板加双侧 3 孔钛钉固定,下缘采用 2 mm 厚钛板加双侧 4 孔钛钉固定,下颌角囊性病变区域应力最低,未超过下颌骨最大屈服强度,未发生病理性骨折。**结论** 下颌角大型囊性病变口外手术刮除后采用钛板固定术区上下缘可以降低病理性骨折发生。

[关键词] 颌骨囊性病变;病理性骨折;坚强内固定;有限元分析
[中图法分类号] R319; R687.32; R782.4 [文献标志码] A

Finite element analysis on different types of rigid internal fixation for preventing postoperative fractures in cystic lesions of the mandibular angle

ZHENG Ping, LYU Jun, HUANG Junjie, XU Shuai, ZHANG Gang Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Second Affiliated Hospital, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400037, China

[**Abstract**] Objective To build a model of postoperative pathological fracture of the mandibular angular cystic lesions through 3D finite element analysis (FEA), to compare and analyze the biomechanical changes of the mandible after treatment with 8 types of titanium plates, and explore the reliability of titanium plate fixation in preventing pathological fracture of large mandibular cysts. Methods A 30-year-old healthy male was volunteered and the scans of cone beam computed tomography of his mandible were collected to establish a unilateral cystic lesion model of the mandibular angle region to mimic the pathological fracture caused by occlusal force loading. On the basis of the maximum critical cystic lesion size, the biomechanical characteristics and changes in the mandible with 8 different types of titanium plate fixation under the same mechanical conditions were compared. Results The risk of pathological fracture existed when the cystic lesion size in the mandibular angle exceeds 24 mm×30 mm×30 mm. The stress in the lesion area was the lowest when the upper edge was fixed with 1 mm thick titanium plate and bilateral 3 screws, and the lower edge was fixed with 2 mm thick titanium plate and bilateral 4 screws. At the same time the maximum yield strength of the mandible was not exceeded and no pathological fracture of the mandible occurred. Conclusion The incidence of pathological fracture can be reduced by using titanium plate fixation on the upper and lower margins of the mandibular angle after extraoral surgical curettage for large cystic lesions.

[**Key words**] cystic lesion of the jaw; pathological fracture; rigid internal fixation; finite element analysis

Supported by the Project of Military Medical High-Tech Cultivation Program of Army Medical University (CX2019JS108) and the Project of Clinical Major Innovation Characteristic Technology of Second Affiliated Hospital of Army Medical University (2018JSLC0022). Corresponding author: ZHANG Gang, E-mail: xqyykqk@163.com

[基金项目] 陆军军医大学军事医学高新技术培育项目(CX2019JS108);陆军军医大学第二附属医院临床重大创新特色技术项目(2018JSLC0022)
[通信作者] 张 纲,E-mail:xqyykqk@163.com

2097-0927/Copyright © 2023, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

下颌骨病理性骨折是指发生在颌骨局部隐匿性占位病变导致颌骨强度削弱而引发的骨折[1-3],其主要原因包括:囊性及肿瘤性病变等破坏骨质、颌骨部分切除后强度降低、咀嚼或创伤造成以及医源性因素等。有研究报道约81.8%的下颌骨病理性骨折与放射性透射性病变有关[4-5]。下颌骨较大型囊肿(直径大于3 cm)存在颌骨骨折的风险,常选择口外入路切除[6-7]。有作者通过有限元分析发现骨折部位与应力集中区域密切相关,一项关于下颌第三磨牙区囊肿摘除后的有限元分析也预测了囊肿摘除术后病理性骨折的可能性[8-10]。另有研究分析对于大型颌骨囊肿通过一期开窗减压加二期根治术可降低病理性骨折的风险,但治疗周期长、患者依从性要求高,疗效受年龄和生长潜力影响大[11-13]。对下颌骨在刮治病变后的不同加固方式及效果的研究还少见报道。

本研究通过模拟下颌角区囊性病变术后可能发生病理性骨折,获取临界囊性病变尺寸范围,并通过有限元分析方法(finite element analysis,FEA)阐明不同坚强内固定方式时下颌骨的生物力学变化,探索刮治术后不同内固定方式对于降低病理性骨折风险的效果,为临床手术方案的选择提供客观理论依据。

1 资料与方法

1.1 数字仿真有限元模型的建立

1.1.1 数据来源 选择1名30岁牙列完整,无龋病和牙周病,咬合关系正常,无任何颞下颌关节紊乱疾病的健康成年男性志愿者作为模型(已取得患者同意并签署知情同意书)。志愿者取息止颌位,头部固定,扫描线与眶耳平面平行,通过口腔锥形束CT[14](Cone Beam Computed Tomography,CBCT,KaVo3DeXam,美国)扫描其颌面部影像数据(CT分辨率为640×640像素,层厚0.25 mm),得到连续影像528张,将所得图像保存为标准DICOM数据类型。

1.1.2 实验模型的建立

1.1.2.1 建立下颌骨实体的几何模型 将所得DICOM影像数据导入Mimics21.0,通过阈值分割法,设置灰度值范围,分别得到下颌骨皮质骨、松质骨及牙齿模型,导出为STL格式文件。通过Geomagic Studio2015拟合得到三维实体几何模型,并导出为IGES格式文件,直接用于有限元网格剖分。将三维实体模型导入HyperMesh2019,为了获得足够的精度,将单元尺寸设置为1 mm,在牙齿和骨组织区域连接处选取一层共结点的壳单元,作为牙周膜模型,最终得到正常结构的下颌骨有限元模型。

1.1.2.2 建立下颌角囊性病变术后的有限元模型 根据Kelly分类法[15],在左侧下颌角区域设置椭圆形囊性病变模型,颊舌侧皮质骨穿透,建立下颌骨术后结构的有限元模型,并进行动力学模拟设置。采用LS-DYNA进行动力学仿真计算,采用LS-PrePost进行结果处理。

1.1.3 设置参数及边界条件

1.1.3.1 材料及参数设置 皮质骨和松质骨设为带失效的线性弹塑性材料模型,当应力达到其屈服强度之后,材料会发生塑性应变,随着塑性应变增加到指定的最大塑性应变值,材料即失效,从而发生骨折。牙齿、牙周膜等结构在咬合力作用下不会发生失效,因此设为线性弹性材料模型进行模拟。钛板、螺钉设为弹塑性材料模型进行模拟。设置颌骨、牙齿、内固定系统的属性(表1)[16-18],假设皮质骨、松质骨连续、均质、各项同性,牙齿、牙周膜各性质相同[19]。最终确定皮质骨螺钉8种坚强内固定方法的预防治疗方案及三维有限元模型(表2、图1)。

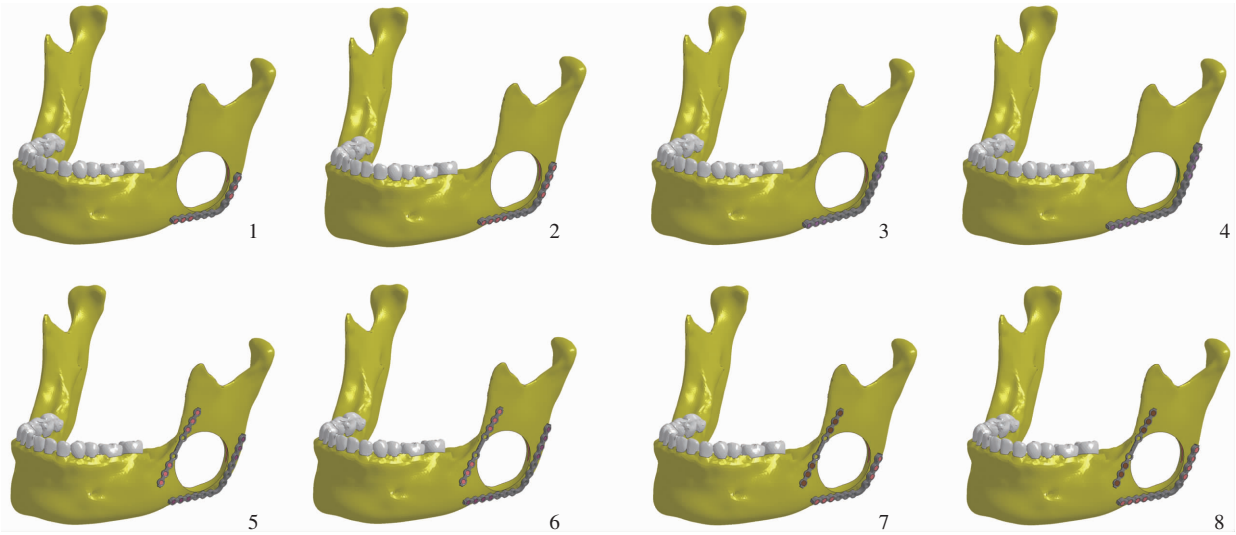
1.1.3.2 位移边界条件 本研究模型仅考虑了下颌骨区域,选择两侧髁突端部的所有结点,并约束其全部自由度,以模拟颅骨对下颌骨的约束(图2A)。对于下颌骨与咬肌、翼内肌、翼外肌相连接的位置,在其各自的中心点建立弹簧单元,以此模拟肌肉对下颌骨的约束,共6个弹簧单元(图2B)。

表1 不同组织或材料的参数属性

组织	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	失效应变	切变模量/MPa
皮质骨	13 700	0.30	50	0.44%	-
松质骨	1 370	0.30	1.8	1.50%	-
牙齿	18 600	0.31	-	-	-
牙周膜	68	0.45	-	-	-
钛板/钛钉	110 300	0.31	1 007	-	1 593

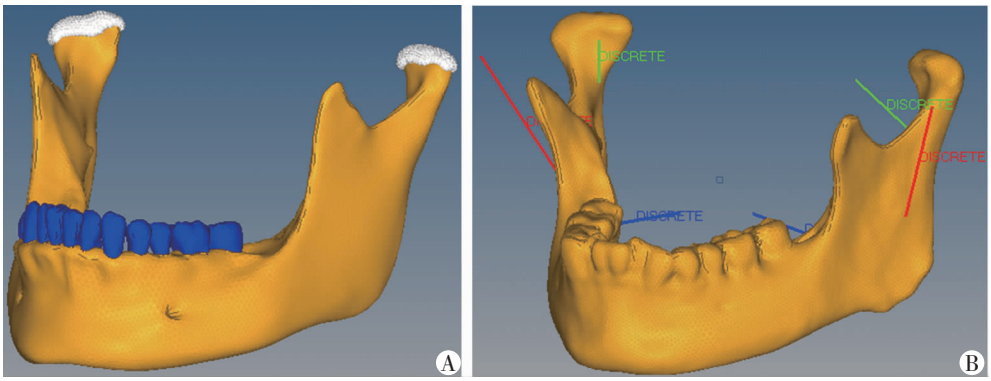
表 2 囊肿术后模型的 8 种不同内固定方法

方案	钛板位置	钛板型号	钛板厚度	螺钉数量	螺钉尺寸
1	下缘	04.503.732	2.0 mm	3×2	M2
2	下缘	04.503.732	2.0 mm	4×2	M2
3	下缘	04.503.739	2.5 mm	3×2	M2.4
4	下缘	04.503.739	2.5 mm	4×2	M2.4
5	下缘	04.503.785	1.5 mm	3×2	M2
	上缘	04.503.704	1.0 mm	3×2	M2
6	下缘	04.503.785	1.5 mm	4×2	M2
	上缘	04.503.704	1.0 mm	3×2	M2
7	下缘	04.503.732	2.0 mm	3×2	M2
	上缘	04.503.704	1.0 mm	3×2	M2
8	下缘	04.503.732	2.0 mm	4×2	M2
	上缘	04.503.704	1.0 mm	3×2	M2



1~8 对应表 2 中方案 1~8

图 1 8 种固定方式的三维有限元模型



A:颅骨对下颌骨的约束;B:咬肌、翼内肌、翼外肌对下颌骨的约束

图 2 颅骨、肌肉对下颌骨位移边界的约束条件

1.1.3.3　载荷情况　　在左右两侧下颌第一磨牙、第二磨牙颊尖及舌尖上施加动态咬合力 200 N,咬合力的大小及方向随时间变化。每个咬合周期约为 0.875 s,可分为 5 个阶段[20-21]。在若干个连续的咬合周期中,阶段Ⅰ和阶段Ⅴ是连续的无载荷阶段,因此在设置两个咬合周期时,从有载荷的阶段Ⅱ开始,同时将无载荷的持续时间缩短,从而得到如图 3 所示的加载时间曲线。

整个求解过程的时间为 0.4 s,包含 2 个咬合周期的阶段Ⅱ~Ⅳ,同时将两者之间的无载荷时间缩短到 0.06 s。

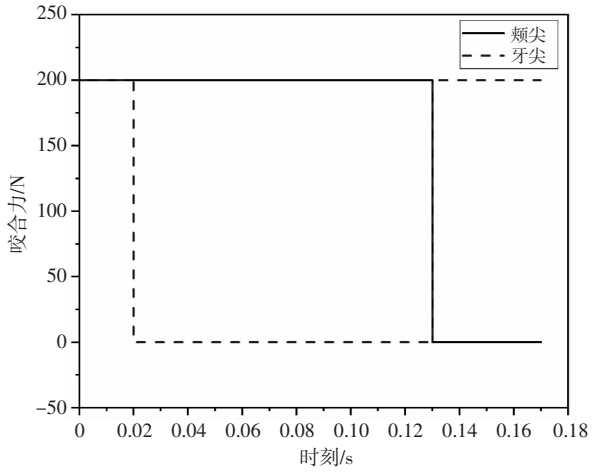


图 3　不同牙尖的咬合力动态载荷

2　结果

2.1　建立正常下颌骨及下颌角囊性病变有限元模型

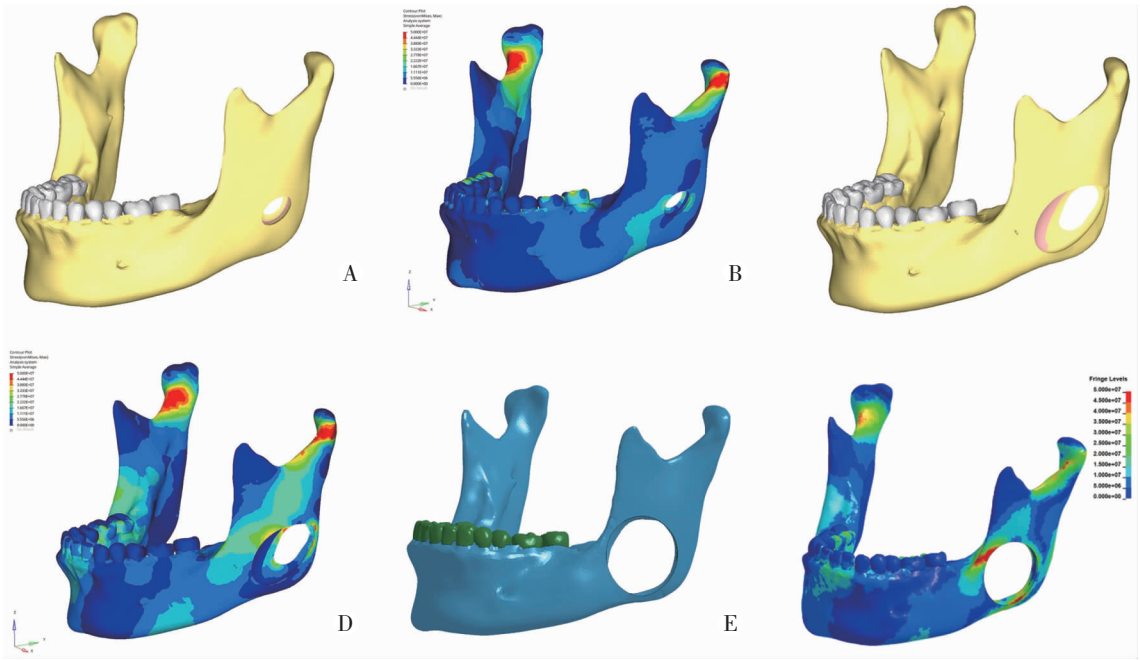
成功建立了正常下颌骨模型及下颌角囊性病变术后的三维有限元模型,是一组仅在节点处连接、传力并受节点约束的单元组合体。共有单元数量 358 872。

2.2　确定下颌角囊性病变病理性骨折的临界范围

分别设置不同大小囊肿尺寸 8 mm×5 mm×5 mm、18 mm×5 mm×10 mm、24 mm×30 mm×30 mm 和 24 mm×31 mm×31 mm(图 4),随着咬合力持续作用下,成功获取导致下颌骨囊性病变区域出现病理性骨折的临界尺寸介于 24 mm×30 mm×30 mm 和 24 mm×31 mm×31 mm 之间,其应力集中区域在双侧髁突颈部及囊肿上下缘,其中囊肿区域的应力明显高于髁突颈部区域(图 5)。本研究选择 24 mm×30 mm×30 mm 作为后续模拟尺寸大小。

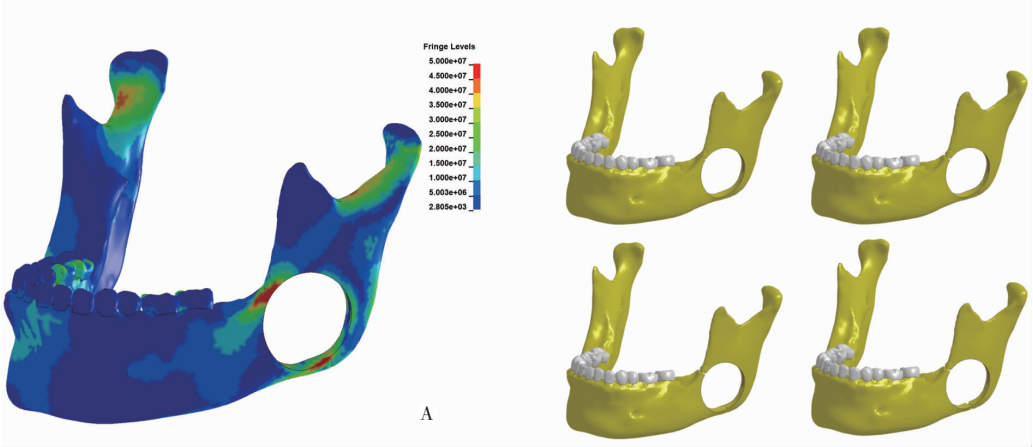
2.3　不同内固定系统的应力分布

默认应力等级分为 10 级,从深蓝色至正红色逐渐增加,颜色变化表示应力变化。当采用上缘利用 1 mm 厚度钛板加双侧 3 孔钛钉,下缘采用 2 mm 厚度钛板加双侧 4 孔钛钉固定时,病变区域上下缘骨质未发生骨折,且下颌骨承受的应力水平更低,钛板螺钉的应力分布未超过最大屈服应力(表 3、图 6)。



A:8 mm×5 mm×5 mm 下颌骨囊肿模型;B:8 mm×5 mm×5 mm 应力云图;C:18 mm×5 mm×10 mm 下颌骨囊肿模型;D:18 mm×5 mm×10 mm 应力云图;E:24 mm×30 mm×30 mm 下颌骨囊肿模型;F:24 mm×30 mm×30 mm 应力云图

图 4　囊性病变不同尺寸的下颌骨模型及应力分布



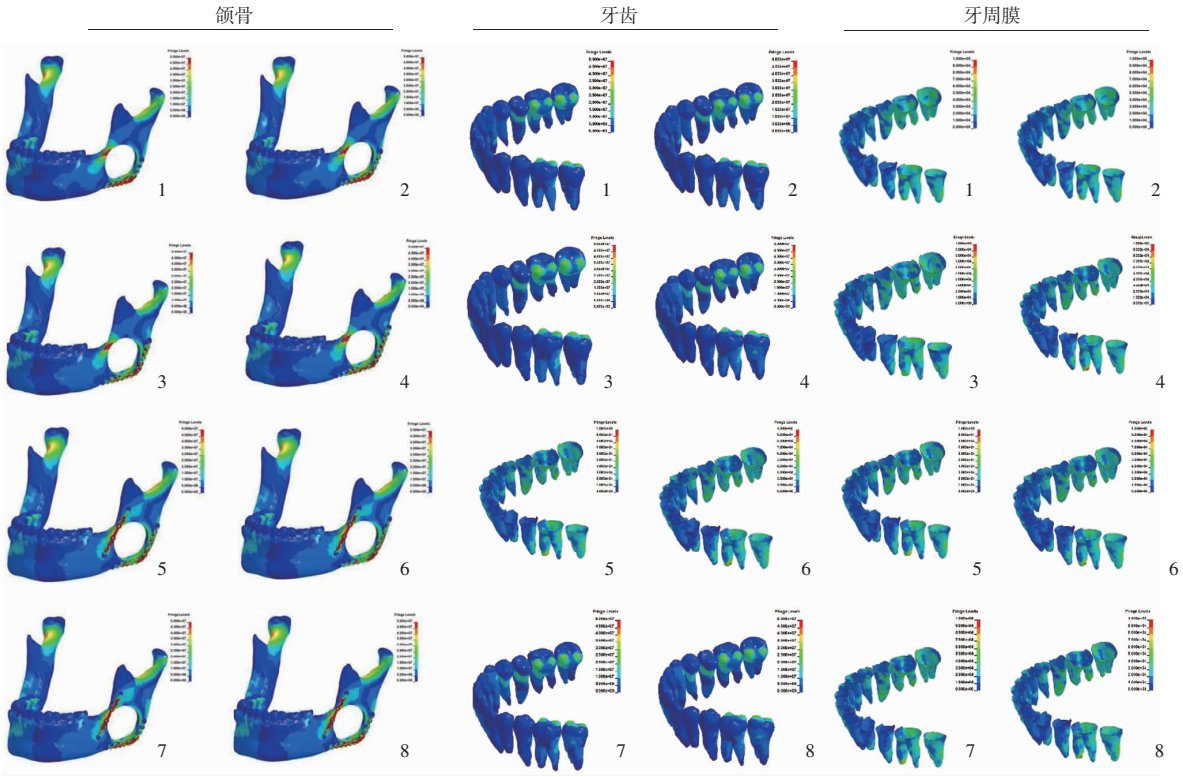
A:24 mm×31 mm×31 mm 下颌骨应力分布云图; B:下颌骨囊肿术后骨折位置变化示意图

图 5 囊性病变尺寸为 24 mm×31 mm×31 mm 时下颌骨的应力分布及骨折情况

表 3 不同内固定系统的最大应力数值(MPa)

方案	骨上缘	骨下缘	上缘钛板	上缘钛钉	下缘钛板	下缘钛钉
1	–	52.46	–	–	332.1	110.7
2	–	52.18	–	–	342.3	102.3
3	–	52.08	–	–	346.3	104.3
4	–	51.88	–	–	348.3	102.3
5	48.66	49.35	696.6	148.4	320.8	105.1
6	48.89	49.96	701.3	147.9	323.3	104.7
7	48.89	48.46	702.9	169	327.3	101.4
8	48.13	47.89	688.5	171	353.5	100.9

方案 1~4 上缘未置钛板,因此无应力提取



1~8:方案 1~8

图 6 8 种内固定方式的颌骨、牙齿及牙周膜应力云分布图

3 讨论

有限元分析法(FEA)于1973年被THRESHER等[22]首次应用于口腔医学,经过多年不断的研究与更新,已经发展为一种科学、直观、可靠的生物力学研究手段。研究表明FEA在预测骨折发生发展上具有广泛的发展前景[23-24]。有限元建模主要包括基于CT图像、MicroCT图像、CBCT图像的建模方法[25-26],已经广泛应用于颌骨畸形的正颌手术、颌面骨创伤、颅颌面骨肿瘤缺损、正畸治疗、牙种植治疗等。ZHANG等[27]通过CT图像建立下颌第一磨牙三维有限元模型发现牙齿和牙周受力模式明显不同。HUEMPFNE-HIERL等[28]证实了三维有限元模型可用于模拟人颅骨的外伤情况。

本研究采用CBCT获取原始数据,层厚可精确到0.125 mm,具有辐射量低(仅为CT的1%)及高空间分辨率等优势。通过皮质骨、松质骨及牙齿的单独建模,成功建立个性化的下颌骨、牙列、牙周膜等有限元模型,恢复了完整的下颌骨及牙列,为后续建立下颌骨囊性病变模型,更加真实地反映下颌骨的咬合分布情况提供理论基础。

大型囊性病变的治疗方法包括引流术,开窗术及刮治术[29]。MUHAMMAD等[30]认为冲洗和引流不能防止下颌骨大型囊肿发生病理性骨折的风险。本研究通过建立下颌角大型囊性病变刮治术后病理性骨折的临界模型,模拟咬合运动周期持续加载200 N载荷,分析8种不同钛板固定下颌骨囊性病变时钛板螺钉的应力分布情况。结果表明在模拟咀嚼运动过程中,钛板固定能够在一定程度上承担对应位置骨质的应力,使其应力水平降低,减少病理性骨折的发生率。AYALI等[31]通过5种不同小型钛板固定下颌角骨折的有限元分析表明小型双钛板坚强内固定是一种较好的方式;MURAKAMI等[32]建立了简化的下颌骨模型,发现下颌第三磨牙区颌骨囊性病变手术后局部颌骨强度降低明显,在骨缺损区的内固定材料承担了更多的应力,下颌骨应力分布情况显著改善。这些国外学者研究结果均与我课题组研究结果相似。

本研究成功验证了单纯行下颌骨下缘固定不能分散上缘应力,上缘依旧存在病理性骨折的风险。在上下缘均固定的情况下,下颌骨未发现病理性骨折,并且上缘1 mm厚钛板加双侧3孔螺钉,下缘2 mm厚钛板加双侧4孔螺钉固定时下颌骨上下缘所受应力水平最低且无骨折风险,上缘测得应力值54.13 MP和下缘50.89 MP均低于其他组别。CHAMPY等[33]学者研究表明下颌骨上缘为张力带分布区域,将螺钉集中固定于此处符合生物力学效果。本研究不足之处在于采用的囊性病变模型是单一的标准椭圆形,实际临床病例中囊性病变引起的缺损类型多种多样,本研究采用的囊性病变模型不能代表临床诊疗中的全部病例类型。后续将针对不同部位、不同囊性病变类型以及不同人群进行研究探讨。

综上所述,大型囊性病变刮除术后因骨质大量缺损导致下颌角区强度明显降低,采用术区上缘1 mm厚钛板加双侧3孔螺钉,下缘2 mm厚钛板加双侧4孔螺钉固定能够有效降低病理性骨折的发生率,甚至避免该严重并发症。该方案能够为临床医师手术方案的制定提供一定的参考依据,同时为精准化医疗方案的制定提供基础,减少病理性骨折并发症,降低患者再就诊机率等。同时本研究会继续将FEA预测与临床病例进行更多的实践验证,有助于为患者制定最佳手术方案,防止病理性骨折的发生。

参考文献:

[1] 邱蔚六. 口腔颌面外科学[M]. 6版. 北京: 人民卫生出版社, 2008.
QIU W L. Oral and maxillofacial surgery[M]. 6th Ed. Beijing: People's Health Publishing House, 2008.

[2] XIAO X, DAI J W, LI Z, *et al*. Pathological fracture of the mandible caused by radicular cyst: a case report and literature review[J]. Medicine (Baltimore), 2018, 97(50): e13529. DOI: 10.1097/MD.0000000000013529.

[3] KOUHSOLTAN M, MESGARZADEH A H, MORADZADEH KHIAVI M. Mandibular fracture associated with a dentigerous cyst: report of a case and literature review[J]. J Dent Res Dent Clin Dent Prospects, 2015, 9(3): 193-198. DOI: 10.15171/joddd.2015.035.

[4] GRAU-MANCLUS V, GARGALLO-ALBIOL J, ALMENDR-OSMARQUÉS N, *et al*. Mandibular fractures related to the surgical extraction of impacted lower third molars: a report of 11 cases[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2011, 69(5): 1286-1290. DOI: 10.1016/j.joms.2010.05.059.

[5] GERHARDS F, KUFFNER H D, WAGNER W. Pathological fractures of the mandible. A review of the etiology and treatment[J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 1998, 27(3): 186-190. DOI: 10.1016/s0901-5027(98)80007-6.

[6] 张志愿. 口腔颌面外科学[M]. 7版. 北京: 人民卫生出版

社,2012:307-309.
ZHANG Z Y. Oral and maxillofacial surgery[M]. 7th Ed. Beijing:People's Health Publishing House,2012:307-309.

[7] GENDVILIENE I, LEGRAND P, NICOLIELO L F P, *et al*. Conservative management of large mandibular dentigerous cysts with a novel approach for follow up: two case reports [J]. Stomatologija, 2017, 19(1): 24-32.

[8] 虎小毅, 李立峰, 史婧怡, 等. 不同程度骨吸收的下颌骨囊性病变治疗方式的选择及相关生物力学分析[J]. 现代口腔医学杂志,2019,33(4):193-196. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3733.2018.05.014.
HU X Y, LI L F, SHI J Y, *et al*. Strategy for the treatment of cystic lesions of mandible with different degrees of bone resorption: analysis based on biomechanics [J]. J Mod Stomatol,2019,33(4):193-196. DOI:10.3969/j.issn.1001-3733.2018.05.014.

[9] OH J S, YOU J S, KIM S G. Clinical and histomorphometric evaluation of decompression followed by enucleation in the treatment of odontogenic keratocyst[J]. J Dent Sci, 2018, 13(4): 329-333. DOI: 10.1016/j.jds.2018.06.001.

[10] SZUCS A, BUJTÁR P, SÁNDOR G K, *et al*. Finite element analysis of the human mandible to assess the effect of removing an impacted third molar[J]. J Can Dent Assoc, 2010, 76: a72.

[11] 丁云波, 姚小武, 陈仕生, 等. 下颌骨大型囊性病变开窗术后骨腔改变及其影响因素[J]. 口腔颌面外科杂志, 2020, 30(2): 85-89. DOI: 10.3969/j.issn.1005-4979.2020.02.005.
DING Y B, YAO X W, CHEN S S, *et al*. Influencing factors on changes of bone cavity in large cystic lesions of the mandible after marsupialization[J]. China J Oral Maxillofac Surg,2020, 30(2): 85-89. DOI: 10.3969/j.issn.1005-4979.2020.02.005.

[12] ABOULHOSN M, NOUJEIM Z, NADER N, *et al*. Decompression and enucleation of a mandibular radicular cyst, followed by bone regeneration and implant-supported dental restoration [J]. Case Rep Dent, 2019, 2019: 9584235. DOI: 10.1155/2019/9584235.

[13] RIACHI F, KHAIRALLAH C M, GHOSN N, *et al*. Cyst volume changes measured with a 3D reconstruction after decompression of a mandibular dentigerous cyst with an impacted third molar[J]. Clin Pract, 2019, 9(1): 1132. DOI: 10.4081/cp.2019.1132.

[14] 王爽, 孙江, 于雁云. 基于 CBCT 图像的颌骨及牙列有限元建模方法研究[J]. 实用口腔医学杂志, 2019, 35(1): 55-59. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3733.2019.01.012.
WANG S, SUN J, YU Y Y. Study on finite element modeling approach of mandible with full dentition based on CBCT images[J]. J Pract Stomatol, 2019, 35(1): 55-59. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3733.2019.01.012.

[15] 庞亚倩, 张凯, 刘亮, 等. 下颌骨囊性病变的三维有限元模型生物力学分析[J]. 南方医科大学学报, 2020, 40(6): 911-915. DOI: 10.12122/j.issn.1673-4254.2020.06.21.
PANG Y Q, ZHANG K, LIU L, *et al*. Biomechanical study of cystic lesions of the mandible based on a three-dimensional finite element model[J]. J South Med Univ, 2020,40(6):911-915. DOI:10.12122/j.issn.1673-4254.2020.06.21.

[16] 李茜茜,康婷,陈燕语,等.上颌中切牙斜形折裂修复设计的有限元分析[J]. 口腔医学研究,2020,36(3):259-263. DOI:10.13701/j.cnki.kqyxyj.2020.03.017.
LI X X,KANG T,CHEN Y Y, *et al*. Finite element analysis of different repairing designs for maxillary central incisor with oblique defect[J]. J Oral Sci Res,2020, 36(3):259-263. DOI:10.13701/j.cnki.kqyxyj.2020.03.017.

[17] COYAC B R, SALVI G, LEAHY B, *et al*. A novel system exploits bone debris for implant osseointegration [J]. J Periodontol,2021,92(5):716-726. DOI:10.1002/JPER.20-0099.

[18] SOLBERG K, HEINEMANN F, PELLIKAAN P, *et al*. Finite element analysis of different loading conditions for implant-supported overdentures supported by conventional or mini implants [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2017,20(7):770-782. DOI: 10.1080/10255842.2017.1302432.

[19] 李元,宋亮,张建国,等.三维有限元分析种植体支持平面型及弹性衬垫型磁性覆盖义齿在正常骨及骨质疏松状态下的应力[J].中国组织工程研究,2022,26(16): 2540-2544. DOI:10.13701/j.cnki.kqyxyj.2017.03.018.
LI Y,SONG L,ZHANG J G,*et al*. Three-dimensional finite element analysis of stress distributions in osteoporosis and normal mandibular dental implant-supported overdentures with flat-type and cushion-type magnetic attachments[J]. Chin J Tissue Eng Res,2022,26(16):2540-2544. DOI:10.13701/j.cnki.kqyxyj.2017.03.018.

[20] 王谜,刘定坤,邹俊东,等.有限元法模拟下颌磨牙咀嚼载荷的研究进展[J]. 口腔医学,2020,40(7):673-676. DOI: 10.13591/j.cnki.kqyx.2020.07.020.
WANG M, LIU D K, ZOU J D, *et al*. Advances in the masticatory load of mandibular molars simulation by finite

element method[J]. Stomatology,2020, 40(7): 673-676. DOI:10.13591/j.cnki.kqyx.2020.07.020.

[21] 邹英楠,王屹博,丁超,等.动态载荷下牙半切与种植体联合修复的三维有限元分析[J].中国组织工程研究,2019,23(2)178-183. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.1504.
ZOU Y N,WANG Y B, DING C, *et al*. Three-dimensional finite element analysis of dental implant combined with residual tooth after hemisection under dynamic loads[J]. Chin J Tissue Eng Res,2019,23(2):178-183. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.1504.

[22] THRESHER R W, SAITO G E. The stress analysis of human teeth[J]. J Biomech,1973,6(5):443-449. DOI: 10.1016/0021-9290(73)90003-1.

[23] WESTBURY L D, SHERE C, EDWARDS M H, *et al*. Cluster analysis of finite element analysis and bone microarchitectural parameters identifies phenotypes with high fracture risk[J]. Calcif Tissue Int, 2019, 105(3): 252-262. DOI: 10.1007/s00223-019-00564-7.

[24] HOEFERT S, TAIER R. Mechanical stress in plates for bridging reconstruction mandibular defects and purposes of double plate reinforcement[J]. J Cranio Maxillofac Surg, 2018,46(5):785-794. DOI: 10.1016/j.jcms.2018.01.016.

[25] TIAN A, ZHONG Z, LI Y M, *et al*. Biomechanical role of trabecular microstructure on peri-implant strain based on micro-CT finite element modeling of aging mice[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2021, 36(4): 715-722. DOI: 10.11607/jomi.8611.

[26] 卢苇. 基于医学影像的下颌骨模型构建及应用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
LU W. Research on the construction and application of mandibular model based on medical images[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.

[27] ZHANG H, CUI J W, LU X L, *et al*. Finite element analysis on tooth and periodontal stress under simulated occlusal loads[J]. J Oral Rehabil, 2017, 44(7): 526-536. DOI: 10.1111/joor.12512.

[28] HUEMPFNER-HIERL H, SCHALLER A, HEMPRICH A, *et al*. Biomechanical investigation of naso-orbitoethmoid trauma by finite element analysis[J]. Br J Oral Maxillofac Surg,2014,52(9):850-853. DOI:10.1016/j.bjoms.2014.07.255.

[29] SUEI Y, TAGUCHI A, TANIMOTO K. Simple bone cyst of the jaws: evaluation of treatment outcome by review of 132 cases[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2007, 65(5): 918-923. DOI: 10.1016/j.joms.2006.06.297.

[30] MUHAMMAD J K, AKHTAR S, ABU AL NASSAR H, *et al*. Regeneration of a compromized masticatory unit in a large mandibular defect caused by a huge solitary bone cyst: a case report and review of the regenerative literature[J]. J Maxillofac Oral Surg, 2016, 15(Suppl 2): 295-305. DOI: 10.1007/s12663-015-0828-8.

[31] AYALI A, ERKMEN E. Three-dimensional finite element analysis of different plating techniques for unfavorable mandibular angle fractures[J]. J Craniofac Surg, 2018, 29(3): 603-607. DOI: 10.1097/SCS.0000000000004327.

[32] MURAKAMI K, YAMAMOTO K, TSUYUKI M, *et al*. Theoretical efficacy of preventive measures for pathologic fracture after surgical removal of mandibular lesions based on a three-dimensional finite element analysis[J]. J Oral Maxillofac Surg,2014,72(4):833.e1-833.18. DOI: 10.1016/j.joms.2013.12.019.

[33] CHAMPY M, WILK A. Stable, dynamic, elastic miniplate osteosynthesis in cranio-maxillofacial surgery: evolution of concepts,biomechanical study and applications[J]. China J Oral Maxillofac Surg, 2014, 12(2): 152-166. DOI: 10.1016/s1010-5182(96)80140-5.

(**收稿**:2023-04-19;**修回**:2023-06-04)

(编辑 张 维)