

尺骨茎突骨折有限元模型的建立与力学分析

岳肖华¹ 李晏乐¹ 程灏¹ 刘广伟² 孙研¹ 成永忠¹ 宋跃¹ 关继超¹ 李永耀^{1△}

[摘要] 目的:模拟尺骨茎突骨折的机制,构建包括主要骨骼和韧带的尺骨茎突骨折的有限元模型,为尺骨茎突骨折的基础及临床研究提供可靠的工具。方法:基于正常人体腕关节的CT影像及各组织解剖特点、材料参数,建立筋骨结构完整的腕关节三维有限元模型;然后根据尺骨茎突骨折的相关特点,进行截骨造模,建立筋骨结构完整的尺骨茎突骨折有限元模型,计算和分析下尺桡关节的应力分布、相对位移变化及尺骨茎突骨折端位移变化情况。结果:建立了387 763个节点,1 094 717个单元的骨骼、软骨、韧带、骨间膜等结构完整的尺骨茎突骨折有限元模型,不同工况下计算得出的下尺桡关节的应力分布、相对位移变化及尺骨茎突骨折端位移变化情况与临床实际符合。结论:建立的腕关节三维有限元模型可用于尺骨茎突骨折的力学机理分析,计算出的下尺桡关节的应力分布、相对位移变化及尺骨茎突骨折端位移变化情况符合临床中尺骨茎突骨折分型的描述,可用于尺骨茎突骨折力学变化的可视化分析及临疗效评估研究。

[关键词] 尺骨茎突骨折;三维有限元模型;有限元分析

[中图分类号] R-33 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2018)10-0006-04

Establishment and Mechanical Analysis of the Finite Element Model of the Ulnar Styloid Process Fracture

YUE Xiaohua¹ LI Yanle¹ CHENG Hao¹ LIU Guangwei² SUN Yan¹
CHENG Yongzhong¹ SONG Yue¹ GUAN Jichao¹ LI Yongyao^{1△}

¹Wangjing Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China;

²Beijing Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine, Beijing 100700, China.

Abstract Objective: To simulate the mechanism of ulnar styloid process fracture and construct the finite element model of ulnar styloid process fracture including the main bones and ligaments, provide a reliable tool for the basic and clinical research of ulnar styloid process fracture. **Methods:** Based on the CT images of the normal human wrist and the anatomical characteristics and material parameters of each tissue, a three-dimensional finite element model of the wrist with complete tendon and bone structure was established. The stress distribution, relative displacement and fracture displacement of the ulnar styloid process were observed. **Results:** A complete finite element model of ulnar styloid process fracture with 387 763 nodes and 1 094 717 elements was established. The stress distribution and relative displacement of the lower ulnar-radial joint and the displacement of the end of the ulnar styloid process fracture calculated under different working conditions were consistent with the clinical practice. **Conclusion:** The three-dimensional finite element model of wrist joint can be used to analyze the mechanical mechanism of ulnar styloid process fractures. The stress distribution, relative displacement and displacement of the lower ulnar-radial joint calculated accord with the clinical description of ulnar styloid process fractures.

It can be used to visualize the mechanical changes of ulnar styloid process fractures for analyzing and evaluating of clinical efficacy.

Keywords: fracture of the ulnar styloid process; three-dimensional finite element model; finite element analysis

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金

资助项目(ZZ11-084)

国家自然科学基金面上项目(81273785)

¹ 中国中医科学院望京医院(北京,100102)

² 中医正骨技术北京市重点实验室

△通信作者 E-mail:lyyzn1008@163.com

尺骨茎突骨折是一种比较常见的腕部损伤,常伴发于桡骨远端骨折。骨折后腕关节尺侧易形成肥大性变化,临床中出现尺骨茎突撞击综合征,且远期容易出现下尺桡关节不稳定,进而导致腕部长期疼痛^[1,2]。目前针对尺骨茎突骨折的治疗方式存在较多争议。有限元分析为尺骨茎突骨折状态下的生物力学变化提供了十分有用的工具,它使研究者能够直观了解尺骨茎突骨折后腕部周围的应力变化以及各种治疗方式对腕部周围的生物力学影响。本研究通过构建尺骨茎突骨折的腕部三维有限元模型,用以研究不同治疗方式对尺骨茎突骨折腕部的生物力学环境的影响,为尺骨茎突骨折的生物力学研究提供新的方法。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

中年女性健康志愿者,年龄 36 岁,身高 166 cm,体质量 62 kg,腕部无其他畸形及病变。签署知情同意书,伦理委员会批号 WJEC-KT-2017-019-P001。

1.2 图像数据的获取与存取

采用 SOMATOM Definition Edge 64 排 128 层螺旋 CT 机,对志愿者前臂自第三掌指关节水平至尺骨鹰嘴水平,进行全程扫描,扫描条件 120 kV,280 mA,层厚 0.5 mm,层距 0.5 mm,扫描长度 304.5 mm,共计 609 层,图像以 DICOM 格式输出并保存。

1.3 尺骨茎突骨折有限元模型建立

1.3.1 数据的采集和几何模型的构建 将 DICOM 格式的 CT 断层医学影像导入 Mimics10.0 软件中,分别重建出手部骨骼部分、尺骨、桡骨、骨间膜,并把手部多块骨骼(包括掌骨、大多角骨、小多角骨、头状骨、钩骨、舟状骨、月状骨、三角骨等)融合,输出 STL 文件。将此 STL 格式文件导入 Geomagic Studio 软件中进一步光滑修改处理,将重建出的骨骼模型导入 Solidworks2016 中,逆向处理,生成骨骼的实体模型并装配,以 IGES 格式存储和输出。

1.3.2 三维有限元模型的生成 将几何模型导入

Hypermesh 软件进行网格划分,获得筋骨结构完整的腕关节三维有限元模型,并以 INP 格式导出保存。通过建立 TIE 在骨间膜与尺骨、桡骨之间建立连接;采用非线性弹簧单元模拟韧带。本课题的主要目的是建立筋骨结构完整的腕关节有限元模型,所以建模重点在腕部,因此在桡腕关节及下尺桡关节的关节面位置分别建一层软骨,接触面之间建立接触属性,并参考文献[3]添加腕关节周围的相关韧带。材料相关属性参照文献[4,5]确定(见表 1)。

表 1 腕部各组织的材料属性表

材料	弹性模量 (MPa)	泊松比
皮质骨	10 000	0.30
松质骨	1 700	0.30
关节软骨	10	0.45
纤维软骨	20	0.45
韧带	300	0.48
骨间膜	950	0.45
软组织	10	0.49

1.4 模型载荷的加载及边界约束

将几何模型导入 Hypermesh 软件进行网格划分,获得筋骨结构完整的腕关节三维有限元模型,并以 INP 格式导出保存。参考文献[6]根据尺骨茎突骨折线的位置,通过“赋软”的形式建立尺骨茎突骨折的有限元模型(图 1 和 2),骨折线的厚度设置为 1 mm,弹性模量为 5 MPa,泊松比为 0.48。在尺骨近端添加全约束固定,尺骨、桡骨两侧添加控制点 RP1,RP2 及 RP3,控制点与骨骼部分建立耦合关系(图 3)。参考文献[7-9]在 RP1 和 RP2 添加 66.7 N 拉伸力载荷,模拟韧带牵拉导致尺骨茎突骨折的情况;在 RP3 添加 100 N 的轴向压力载荷,模拟腕关节中立位时肌肉收缩产生轴向压力的情况;在 RP3 添加 22 N·m 扭矩载荷,模拟腕关节旋前、旋后时腕部各部位的受力情况。观察不同载荷条件下尺桡关节的应力分布、相对位移变化及尺骨茎突骨折端位移变化情况。

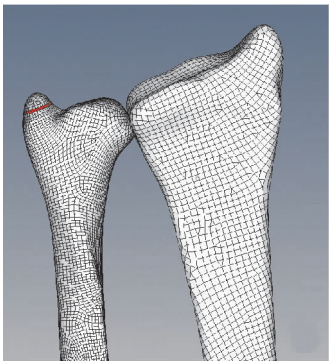


图 1 尺骨茎突Ⅰ型骨折有限元模型

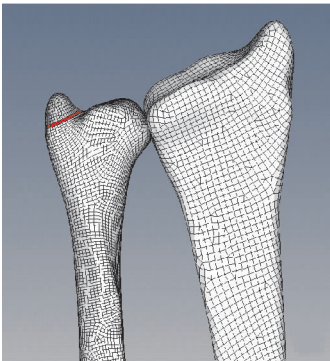


图 2 尺骨茎突Ⅱ型骨折模型

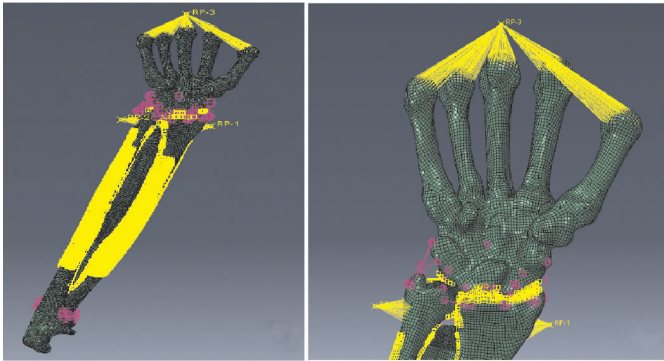


图 3 RP 位置的选择及耦合关系的建立

2 结果

2.1 有限元模型

建立了尺骨茎突骨折右腕关节骨骼及韧带六面体网格模型,模型包括骨骼、软骨、韧带、骨间膜等结构。共有 387 763 个节点,1 094 717 个单元。

2.2 有限元模型与尸体标本测试压力数值比较

从尺骨茎突骨折腕部有限元模型桡骨应力云图可见舟骨窝部位是应力集中较高的部位,与文献^[7]尸体标本测量获得的桡腕关节的受力面积及应力分布情况大体一致(图 4-5)。将有限元模型模拟腕关节中立位时肌肉收缩产生轴向压力(10.7 MPa)与相关文献^[10]以同样方法轴向施加 100 N 载荷时获得的桡腕关节面

接触应力(10 MPa)进行对比,发现两者桡腕关节面接触应力值非常接近。

2.3 旋转工况下桡骨远端尺侧面应力分布云图变化

尺骨茎突骨折腕部三维有限元模型中桡骨远端尺侧面所受应力是由尺骨远端方向经骨间膜等结构传导形成,在旋转工况下,通过观察云图中峰值及峰值区域的转移情况就可以间接判断尺骨远端在模型中相对位置的变化。在腕关节旋转过程中,尺骨远端相对于桡骨乙状切迹会产生一定的位移,这也可以在有限元模型中观察到(见图 6),当稳定 DRUJ 的结构发生破坏时位移会进一步加大,严重时就可以导致 DRUJ 脱位的发生。

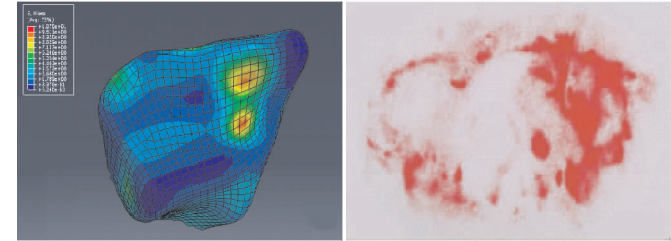


图 4 尺骨茎突骨折有限元模型

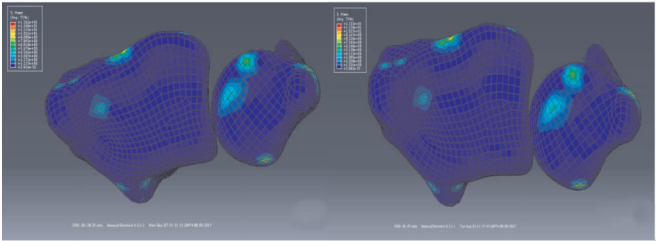


图 5 尸体实验桡骨应力分布图

桡骨应力分布图

旋前工况下:旋前时,尺骨相对桡骨向背侧移动,通过骨间膜传导应力桡骨受力区偏向背侧(图 7)。旋后工

况下:旋后时,尺骨相对桡骨向掌侧移动,通过骨间膜传导应力桡骨受力区偏掌侧(图 8)。

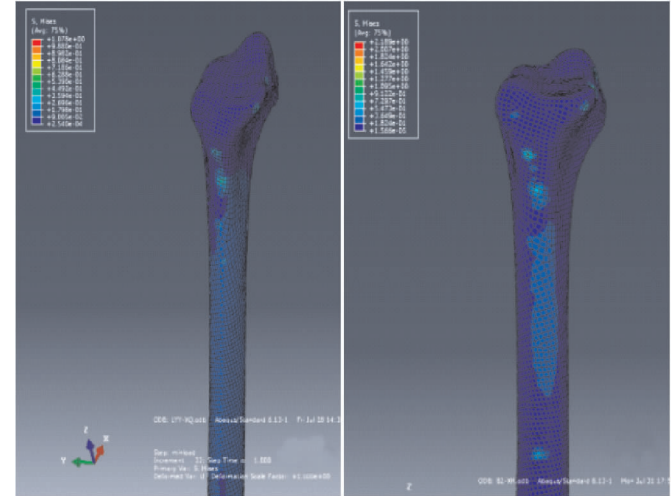


图 7 旋前工况下桡骨远端尺侧面应力分布云图

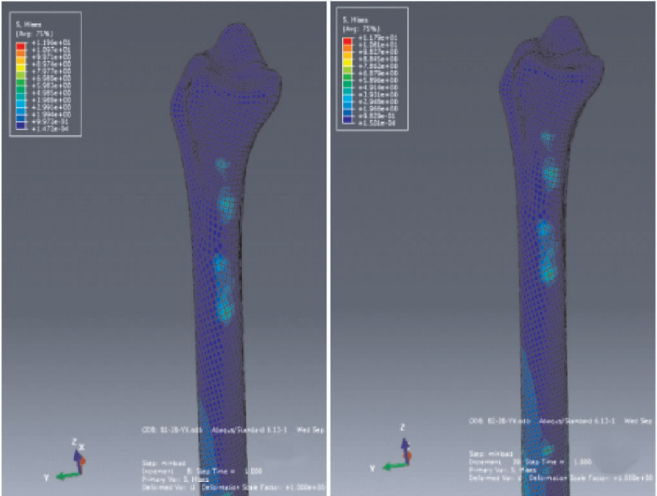


图 8 旋后工况下桡骨远端尺侧面应力分布云图

2.4 DRUJ 在旋转工况下相对位移变化

提取模型中立位时 DRUJ 内部尺、桡骨关节软骨部分,选取尺骨头几何中心在桡骨乙状切迹上的投影点为原始标志点。通过软件测量各模型在不同工况下标志点的位移变化值,具体数值见表 2。本研究显示在两种旋转工况下 I 型骨折模型 DRUJ 发生相对位移比 II 型骨折模型小,表明前者 DRUJ 更稳定,研究结果与临床实际相符合。

表 2 DRUJ 在旋转工况下相对位移(单位:mm)

工况	正常	I 型骨折	II 型骨折
旋前	2.06	2.24	3.53
旋后	3.65	4.09	5.12

3 讨论

尺骨茎突骨折是否需要手术治疗,国内外研究者对此尚有争议。根据尺骨茎突骨折的损伤机制可以发现,此部位的骨折容易导致三角纤维软骨复合体(Triangular Fibrocartilage Complex, TFCC)损伤及下尺桡关节的不稳定^[11]。TFCC 在维持下尺桡关节稳定性方面具有关键作用,如果受到损伤,会导致下尺桡关节稳定性缺失等较为严重的后果^[12,13]。曾卡斌等^[14]研究发现尺骨茎突骨折与否对桡骨远端骨折术后的解剖学参数无明显影响,但由于 TFCC 损伤及下尺桡关节不稳定,后期容易造成患者尺侧部腕关节疼痛及创伤性关节炎。

文献中报道约有 50%~70% 的桡骨远端骨折伴有尺骨茎突骨折,1967 年 Frykman 提出桡骨远端 Frykman 分型,其中 FrykmanⅧ型骨折特点是骨折波及桡腕关节和下尺桡关节,同时合并尺骨茎突骨折,该型骨折的发生比例有逐年增多的趋势。由于尺骨茎突骨折骨块较小、固定困难,而且是否需要手术干预目前也存在争议,临床医生选择切开复位内固定治疗 FrykmanⅧ型骨折时多仅行桡骨远端骨折切开复位内固定,尺骨茎突骨折不予固定,术后依然按照 AO 指导原则鼓励患者早期行功能锻炼,这样一来尺侧柱的损伤在恢复过程中既没有得到保护,在做功能锻炼时也有可能造成损伤程度加重。相关文献也报道,有无尺侧结构损伤的同型桡骨远端骨折在仅行桡骨远端骨折内固定术后腕关节功能有明显差异,前者腕关节功能较差,且出现尺侧柱并发症概率较大。笔者通过临床观察发现手法复位夹板固定治疗桡骨远端 FrykmanⅧ型非关节内粉碎骨折的效果比较满意,与该型骨折仅行桡骨远端内固定手术相比,愈后腕关节功能恢复更好,尺侧柱出现并发症的比例更小。笔者通过建立尺骨茎突骨折的有限元模型,验证 DRUJ 和腕部尺侧结构的相对稳定性的关系,利用有限元分析方法从生物力学角度给临床治疗予以指导。

有限元分析法的主要特点是通过计算机建立相应关节的仿真模型,在设定的特殊工况下进行模拟分析,能得到客观实体实验难以得到的研究结果。有限元分析为研究尺骨茎突骨折后腕部的生物力学变化提供了十分有用的工具,它使全面了解尺骨茎突骨折后 TFCC、下尺桡关节及腕部周围韧带在不同状态下的应力分布,以及各种治疗措施对腕部的生物力学影响成为可能。本研究构建了筋骨结构完整的尺骨茎突骨折腕部三维有限元模型,为模拟尺骨茎突骨折后 TFCC、下尺桡关节等结构不同状态下的生物力学特点分析提供了可视化数字平台,也为尺骨茎突骨折各种治疗方法的设计和疗效评价提供了直观的模拟工具。

本研究基本资料来源于健康志愿者的 CT 影像数据,基础模型建立后通过与文献中尸体实验数据对比验证了模型的有效性,相关边界条件及载荷工况的设定参考了文献[15,16]中报道的通用方法,本研究中还不能模拟锻炼时肌肉收缩对力学环境的影响。相信随着科学的发展,当有限元研究能够对肌肉系统的主动性进行模拟时,人体有限元模型将会无限接近真实人体的构造,对肌肉系统的主动模拟也将成为可能。

参考文献

[1] Ruch DS, Lumsden BC, Papadonikolakis A. Distal radius fractures: a comparison of tension band wiring versus ulnar outrigger external fixation for the management of dis-

tal radioulnar instability[J]. J Hand Surg Am, 2005, 30(5):969-977.

[2] Souer JS, Ring D, Matschke S, et al. Effect of an unrepaired fracture of the ulnar styloid base on outcome after plate-and-screw fixation of a distal radial fracture[J]. J Bone Joint Surg Am, 2009, 91(4):830-838.

[3] 徐永清, 钟世镇, 徐达传, 等. 腕关节韧带的解剖学研究[J]. 创伤外科杂志, 2006, 8(1):52-54.

[4] 郭欣, 樊瑜波, 李宗明. 掌骨受轴向压力作用下的腕部生物力学分析[J]. 航天医学与医学工程, 2008, 21(1):45-49.

[5] Anderson DD, Daniel TD. A contact-coupled finite element analysis of the radiocarpal joint[J]. Seminars in Arthroplasty, 1995, 6(1):30-36.

[6] Cheng HY, Lin CL, Lin YH, et al. Biomechanical evaluation of the modified Double-Plating fixation for the distal radius fracture[J]. Clin Biomechanics (Bristol, Avon), 2007, 22(5):510-517.

[7] Tencer A F, Viegas S F, Cantrell J, et al. Pressure distribution in the wrist joint[J]. Journal of Orthopaedic Research, 1998, 6(4):509-517.

[8] Schuind F, An KN, Berglund L, et al. The distal radioulnar ligaments: a biomechanical study[J]. J Hand Surg Am, 1991, 16(6):1106-1114.

[9] Short WH, Werner FW, Fortino MD, et al. The stabilizing mechanism of the distal radioulnar joint during pronation and supination[J]. J Hand Surg Am, 1995, 20(6):930-936.

[10] 钦斌, 黄永火, 欧阳羽, 等. 轴向应力作用下的舟骨有限元分析[J]. 第三军医大学学报, 2010, 15(11):1213-1215.

[11] Zoetsch S, Kraus T, Weinberg AM, et al. Fracture of the ulnar styloid process negatively influences the outcome of paediatric fractures of the distal radius[J]. Acta Orthop Belg, 2013, 79(1):48-53.

[12] Woo SJ, Jegal M, Park MJ. Arthroscopic-assisted repair of triangular fibrocartilage complex foveal avulsion in distal radioulnar joint injury[J]. Indian J Orthop, 2016, 50(3):263-268.

[13] Moritomo H. The distal interosseous membrane: current concepts in wrist anatomy and biomechanics[J]. J Hand Surg Am, 2012, 37(7):1501-1507.

[14] 曾卡斌, 潘俊晖, 吴天旺. 尺骨茎突骨折类型对桡骨远端骨折治疗效果的影响[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2018, 33(1):88-89.

[15] 魏成建, 陶宝琛, 张满臣, 等. 动力气囊压垫纠正桡骨远端 AO C3.1 型骨折残余侧方移位的三维有限元分析[J]. 医用生物力学, 2018, 33(1):13-17.

[16] 刘雄, 吴卫东, 荀福兴, 等. 不同长度锁钉固定桡骨远端不稳定骨折的生物力学比较[J]. 医用生物力学, 2014, 29(2):161-166.