

基础研究

间接暴力所致肱骨骨折机制的三维有限元模拟

何 仿, 李苏皖, 林 昊, 张文忠, 吴玉宝

(安徽省马鞍山市中心医院骨一科, 243000)

摘 要: [目的] 利用工程力学分析软件 CatiaV5, 模拟在不同的肩关节功能位置上、间接冲击暴力所致肱骨骨折的受伤力学机制和力学环境, 为认识和治疗肱骨骨折提供生物力学依据。[方法] 采用高分辨率的人体肩关节断层解剖图作为三维重建的数据源, 选取自锁骨顶端至肱骨远端关节面、共 380 层的断层图像, 层厚 1 mm, 按照点、线、面的建模方式, 先建立人体肩关节的三维几何模型, 再予网格化, 建立人体肩关节的三维有限元模型, 利用该模型, 模拟在 12 个不同的肩关节功能位置上 (外展 30°、45°、60°、90°、同时合并内旋、中立、外旋)、肱骨受到分级加载的轴向冲击载荷时的骨折位置以及瞬时的应力、应变状况。[结果] 根据肱骨在不同的功能位置上载荷-应变关系曲线, 载荷从 0~250 N 时, 呈线性变化, 后为非线性期, 卸载后, 残余骨变形; 随着载荷的增加, 肱骨干的应变随之增加。当肩关节的外展位置由 90° 逐渐变为 30° 时, 肱骨干上内外侧应变逐渐增加, 内外旋 45° 时应变比中立位时增加显著; 同时, 肱骨干内外侧的应力不同, 内侧应力大, 外侧应力小, 内外旋时, 肱骨干的应力增加更快、更大。[结论] 在肩关节不同的功能位置上, 三维有限元分析逼真地模拟出各自不同的肱骨应力、应变状态值及骨完整性受到破坏的三维图像、骨折线的大体走向; 肱骨骨折的三维有限元模拟和分析是研究与骨折相关的力学原理的非常有价值的方法。

关键词: 间接暴力; 肱骨骨折; 三维有限元; 模拟

中图分类号: R683. 41

文献标志码: A

文章编号: 1005-8478 (2008) 08-0613-04

Three dimensional finite element simulation of humerus fracture caused by indirect force // HE Fang, LI Su-wan, LIN Hao, et al. Department of Orthopaedics, the Central Hospital of Ma'an'shan City, Anhui 243000, China

Abstract: [Objective] To simulate the biomechanics mechanism and environment of humeral fracture caused by indirect impact force for the purpose of biomechanics understanding and treatment of such fracture. [Method] Based on the data source, which was high-resolution anatomic slice images from approximal clavicle to distal humerus, 1 mm thickness and totally 380 layers, the geometric model of total shoulder joint was established according to the order: point, line, area, and further meshed to set up the three dimension finite element model of shoulder, fracture sites and instantaneous stress and strain of humerus were simulated and analyzed under the condition which longitudinal impact force was loaded on the humerus based on the 12 functional positions of shoulder (abduction 30°, 45°, 60°, 90°, and simultaneous neutrality, internal rotation 45°, external rotation 45°). [Result] According to the humeral shaft load-strain curve in different functional positions of shoulder, linear relation was found when load changed from 0 N to 250 N, after which non-linear come out, and even load was removed, bone was deformed eternally. With the rise in load amount, the increase in stress was detected. When abduction degree changed from 90° to 30°, the strain of humerus, both the lateral and the medial increased gradually, and increase in internal rotation 45° and external rotation 45° was more significant than that in neutrality. Meanwhile, stress difference could be seen between the lateral and the medial, and medial was larger than the lateral. Increase in stress in rotation positions was quicker and more than that in other functional positions. [Conclusion] Based on 4 abduction degrees (30°, 45°, 60°, 90°) and 3 rotation degrees (neutrality, internal rotation 45°, external rotation 45°), the three dimensional finite element shoulder could simulate precisely stress, strain, general trend of fracture line, three dimension images of bone failure. Three dimension finite element simulation and analysis of shoulder is a valuable mechanical method for research on biomechanics theory related to humerus fracture.

Key words: indirect impact force; humerus fracture; three dimensional finite element; simulation

作者简介: 何 仿 (1970-), 男, 安徽舒城人, 副主任医师, 医学博士, 研究方向: 骨科生物力学, (电话) 0555-2891908, (电子信箱) he-fang8@126.com

临床上, 肱骨骨折的发生率并不少见。目前, 对于肱骨骨折确切的损伤机制尚缺乏较深刻的了解, 较透彻的阐明肱骨骨折的机制方面的知识对于肱骨骨折的预防和治疗将会产

生重要的指导意义。本研究就是利用人体肩关节的三维有限元模型,模拟不同的轴向冲击载荷下,肱骨的形变情况,并显示其动态过程,探讨肱骨骨折的受伤应力机制。

1 材料与方法

1.1 肩关节结构的几何实体重建

采用高分辨率的人体肩关节断层解剖图作为三维重建的数据源,按照点-线-面-体的方式建立肩关节的几何实体形状,可以分别显示皮质骨、松质骨、软骨及髓腔结构,在Catia V5运行平台上可以任意角度转动,观察模型的解剖结构和方向(图1)。

1.2 肩关节三维有限元模型的构建

肩关节的三维实体建模完成后,根据材料特性的不同,定义软骨、皮质骨、松质骨材料力学参数(表1)。选用10节点的四面体单元,该四面体具有6个方向的自由度,在Catia V5运行平台上,定义肩关节的各项参数和指标,选择中上等精度的自动网格划分模式,对肩关节进行自动网格化,生成3 977个节点(nodes)、20 919个四面体单元(elements)(图2)。

表1 肩关节的材料力学参数(Joseph. A等2002年)

	肱骨皮质骨	肱骨松质骨	肩胛骨皮质骨	肩胛骨松质骨	软骨
杨氏模量(Mpa)	1.34×10^4	0.2×10^4	0.9×10^4	0.2×10^4	0.3×10^4
泊松比	0.3	0.26	0.3	0.2	0.1

1.3 肩关节不同功能位置上肱骨骨折的三维有限元模拟

启动Catia V5的结构模块。根据盂肱关节面的接触关系,及肱骨头的旋转中心的确立,固定肩胛骨相对不动,将肱骨分别从0°位外展到30°、45°、60°、90°每个位置上;分别设定3种旋转状态:中立位、外旋45°、内旋45°,从而将肩关节的动态功能过程分割成12个不同的功能位置。在每一个位置下,根据盂肱关节面接触区域的位置和范围,设定肱骨的边界约束,限制其所有方向的自由度。

自肱骨远端分别加载以0.1 s梯度增加的300 N轴向冲击载荷,载荷持续时间为1 s,同时自肱骨大结节加载50 N水平恒定载荷,启动Catia V5的求解模块,计算机进入冲击受力分析模块程序。运算结束后,得到动态显示的加载-形变过程,分析其应力分布和骨折移位状况。根据图像的模拟结果,我们可以判断不同的功能位置上的骨断裂的位置和移位方向,根据节点的断裂度判断骨折线的大致走向。

2 结果

计算机运算结束后,得到12个功能位置上、暴力载荷下的肱骨应力、形变趋势,并且动态展示出来。本文以45°外展位为例(图3~5);此外,通过鼠标取值,可以记录肱骨上的平均应变值(图6),从而进一步绘制载荷-应变曲线(图7),了解肱骨随载荷变化的生物力学规律。

3 讨论

3.1 本研究中骨折模拟的力学合理性

造成骨折的原因有内因和外因两个方面,前者是指骨结构本身的特性,例如材料性质和结构性质,后者是指骨骼受外力的方向、大小、变化速度以及肢体的空间位置等^[1]。对于肱骨骨折而言,常见于摔倒时,上肢撑地,冲击载荷在较短的时间内通过间接传递作用于骨骼,造成骨折^[2];同时,由于人体上臂具有灵活的运动范围,故摔倒时,肱骨可以有多个不同的功能位置,而这种位置直接影响骨骼的受力矢量,因此,本研究在前期肩关节三维有限元模型和肩关节试验力学分析结果的基础上,模拟不同功能位置上的肱骨骨折状态,是符合肩关节生物力学原理的^[3]。

3.2 三维有限元分析法模拟肱骨骨折的优势所在

肱骨发生骨折时,由于其瞬时性的特点,往往很难重复其具体过程,无法对其进行实时分析。试验研究的条件下进行骨折力学分析时,当载荷超过骨的极限强度时,骨小梁断裂,骨结构的完整性破坏。目前的力学记录仪器尚不能记录峰值强度以后的骨应力和骨应变,特别是骨的内部力学状况,所以,用试验的方法研究骨折的力学机制存在着明显的不足,它不能提供骨折完整过程的信息,故本研究尝试用先进的计算机技术,凭借工程力学的软件,按照生物力学的原理,去研究肱骨骨折的损伤机制,是对试验力学有力的补充和完善。运用三维的视觉环境,高度

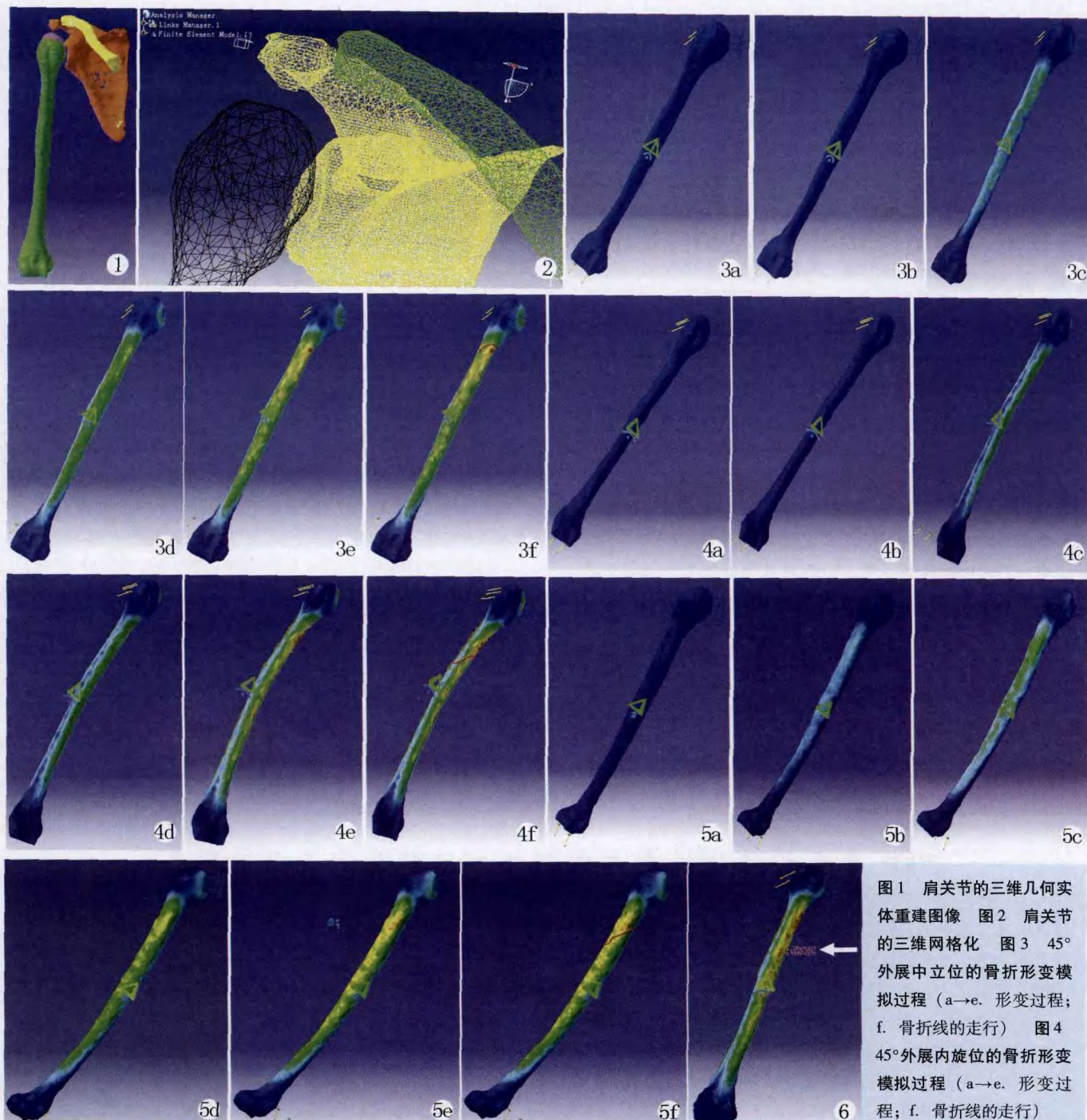
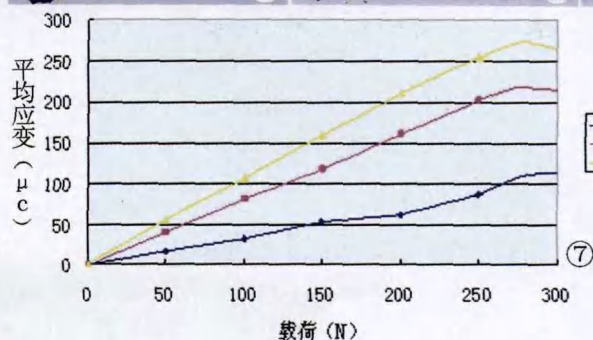


图1 肩关节的三维几何实体重建图像 图2 肩关节的三维网格化 图3 45°外展中立位的骨折形变模拟过程(a→e. 形变过程; f. 骨折线的走行) 图4 45°外展内旋位的骨折形变模拟过程(a→e. 形变过程; f. 骨折线的走行)

图5 45°外展外旋位的骨折形变模拟过程(a→e. 形变过程; f. 骨折线的走行) 图6 箭头所指为鼠标取值 图7 外展45°位置上中立位、外旋45°、内旋45°时肱骨干上载荷-应变关系曲线



质疏松时),在30°外展位置上易发生由肱骨外科颈和肱骨上段后上向前下的骨折移位^[5];而在90°外展加载时,骨折线接近横行走向,因此可以推测在健康人群中,肩关节30°~90°范围摔倒时,骨折线由斜形逐渐变成横行,且肱骨外科颈和肱骨上段时更易于骨折和移位^[6,7]。

此外,不同的肩关节旋转位置对肱骨骨折也产生一定的影响。从图像中可以发现当内旋和外旋时,肱骨上的应力分布发生转移。内旋时,高应力区移向肱骨的前外侧,外旋时,高应力区移向肱骨的内侧,并伴随骨折线出现部位的转移。根据动态模拟图像中,可以清晰显示骨折的动态现况,且可以反复回放,任意提取任何一个需要的信息。

3.4 肩关节有限元模拟分析的应用前景

本研究中所建立的肩关节三维有限元是一个良好的生物力学研究工具,利用它,不仅可以对关节的骨性结构进行力学分析,同时通过建立三维连接单元,还可以重建肩关节的任一软组织结构;通过这些软组织的试验力学测试,获得相关的材料参数,同样可以将软组织的有限元模型建立起来,继而进行力学分析。本论文仅仅对肱骨骨折实施了有限元的模拟,使用同样的方法,可以对其他肩关节的其他结构的损伤机理进行模拟,如锁骨骨折、脱位、肩胛骨骨折、盂肱关节的脱位、慢性肩关节不稳、肩峰撞击症等。

总之,随着计算机技术的不断发展,以及力学分析软件

的不断完善,三维有限元分析法一定会在骨关节生物力学研究领域发挥越来越大的作用。

参考文献:

- [1] Joseph A, Buckwalter Thomas A,等.骨科基础科学:骨关节肌肉系统生物学与生物力学[M].第2版,北京:人民卫生出版社,2002,17-19.
- [2] Simpson AM. Fractures of the humerus[J]. Clin Tech Small Anim Pract, 2004,3:120-127.
- [3] Chiu J, Robinovitch SN. Prediction of upper extremity impact forces during falls on the outstretched hand[J]. J Biomech, 1998,12:1169-1176.
- [4] Buchler P, Rakotomanana L, Farron A. Virtual power based algorithm for decoupling large motions from infinitesimal strains: application to shoulder joint biomechanics[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2002,6:387-396.
- [5] 黄海晶,金鸿宾,王志彬,等.肱骨近端骨折的解剖特点与治疗[J].中国矫形外科杂志,2007,6:435-437.
- [6] Debski RE, Weiss JA, Newman WJ, et al. Stress and strain in the anterior band of the inferior glenohumeral ligament during a simulated clinical examination[J]. J Shoulder Elbow Surg, 2005,1:24-31.
- [7] 杜奇涛,王景彦,文明.肱骨内锁髓内钉治疗肱骨干骨折[J].中国矫形外科杂志,2006,6:465-466.

(收稿:2007-07-25 修回:2007-11-06)



2008年骨科损伤控制与微创技术继续教育学习班通知

由上海市第一人民医院骨科举办的“2008骨科损伤控制与微创技术学习班”将于2008年6月13~15日在上海举办,届时将邀请国内著名骨科专家曾炳芳、王秋根、罗从风、王蕾等作专题报告。

学习班授课内容:骨科损伤控制;MIPPO技术在创伤骨科中的应用;骨盆骨折的微创治疗;多发伤分期治疗的意义和策略;人工关节微创置换;脊柱伤病的微创治疗和骨科手术室专业化管理的新概念等。

学习班以具有五年以上骨科临床基础的医师为主要对象,鼓励学员携带疑难病例资料交流。

对本次学习班培训合格者颁发国家级继续教育I类学分10分。会务费800元(含资料费);食宿费用自理。

学习班报到和截止日期:2008年6月13日全天。联系地址:上海市第一人民医院松江新院(新松江路650号)邮编:201600

联系人:马金忠 电话:021-63240090-7561或7566 13386259521