

肱骨远端三维有限元模型的建立及生物力学分析**

王亚斌, 周小建, 任亚军, 张云庆

Three-dimensional finite element model of the distal humerus and the related biomechanics analysis

Wang Ya-bin, Zhou Xiao-jian, Ren Ya-jun, Zhang Yun-qing

Department of
Orthopaedics,
Jiangyin Hospital
Affiliated to
Southeast University,
Jiangyin 214400,
Jiangsu Province,
China

Wang Ya-bin★,
Master, Attending
physician,
Department of
Orthopaedics,
Jiangyin Hospital
Affiliated to
Southeast University,
Jiangyin 214400,
Jiangsu Province,
China
wybsy0103@sina.
com

Supported by: Social
Development Plan of
Wuxi City, No.
CSZ00969*

Received: 2011-02-26
Accepted: 2011-04-22

东南大学医学院
附属江阴医院骨
科, 江苏省江阴市
214400

王亚斌★, 男,
1973年生, 江苏
省泰兴市人, 汉
族, 2008年苏州
大学毕业, 硕士,
主治医师, 主要从
事关节外科及创
伤骨科的研究。
wybsy0103@
sina.com

中图分类号: R318
文献标识码: A
文章编号: 1673-8225
(2011)22-04002-04

收稿日期: 2011-02-26
修回日期: 2011-04-22
(20110226007/G·W)

Abstract

BACKGROUND: Finite element analysis in biomechanics research of bone and joint has been widely used, but the finite element analysis of the distal humerus is less, and the model is rough, the method is cumbersome.

OBJECTIVE: To establish a three-dimensional finite element model of the distal humerus, and to simulate under different loading the stress distribution and strain characteristics.

METHODS: The raw data were obtained from a normal adult male. His elbow was scanned by spiral CT scans without any interval. Then the CT images were inputted into the Mimics, and produced a meshed three-dimensional surface image of the distal humerus. The three-dimensional model was inputted into the ANSYS 10.0, to create the finite element model following meshing and material property assignment. The model was constrained boundary conditions and applied axial load. Through constraining the boundary conditions and applied axial load, the stress distribution and strain results on the finite element model of the distal humerus were obtained.

RESULTS AND CONCLUSION: The finite element model of the distal humerus was established with total unit number of 6 292, total node number of 10 232. When axial load was applied, the stress of the distal humerus emphasized at the medial and lateral column regions. The results indicate that the finite element model has high accuracy, and the clinical features are consistent with those of the distal humerus, so the model can properly simulate the biomechanical properties of the distal humerus.

Wang YB, Zhou XJ, Ren YJ, Zhang YQ. Three-dimensional finite element model of the distal humerus and the related biomechanics analysis. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2011;15(22): 4002-4005. [http://www.crter.cn http://en.zgckf.com]

摘要

背景: 采用有限元分析法进行骨与关节的生物力学分析得到了广泛应用, 但是关于肱骨远端的有限元分析较少, 且所建模型粗糙, 方法繁琐。

目的: 建立肱骨远端的三维有限元模型, 并模拟不同受力状态下的应力分布及应变特征。

方法: 通过对正常成年男性肘关节的多排螺旋 CT 扫描, 获得连续断层图片, 导入 Mimics 医学建模软件生成实体模型后, 应用大型通用有限元分析软件 ANSYS 10.0, 进行网格划分、材料属性赋值生成有限元模型。约束边界条件, 模拟肱骨远端轴向受力, 得出肱骨远端有限元模型上的应力分布与应变结果。

结果与结论: 建立的肱骨远端有限元模型总单元数为 6 292, 总节点数为 10 232。肱骨远端在轴向载荷状态下的应力集中主要位于内、外侧柱区域。提示建立的有限元模型精确度高, 符合肱骨远端的临床特点, 较好地模拟了肱骨远端的生物力学特性。

关键词: 人体模型; 肱骨远端; 三维模型; 有限元分析; 生物力学

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2011.22.004

王亚斌, 周小建, 任亚军, 张云庆. 肱骨远端三维有限元模型的建立及生物力学分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(22):4002-4005. [http://www.crter.org http://cn.zgckf.com]

模拟仿真提供生物力学依据。

0 引言

肱骨远端骨折因其复杂的解剖结构、严重的骨折粉碎程度, 仍然是创伤骨科治疗的难点之一^[1-13]。进一步了解肱骨远端的生物力学特点, 将有助于对肱骨远端骨折个性的认识, 从而更好的选择内固定方法。近年来随着数字医学的发展, 有限元分析方法在骨科领域得到了广泛使用^[14-17]。本文应用医学建模软件 Mimics 和大型通用有限元分析软件 ANSYS 建立肱骨远端的三维有限元模型, 并模拟不同受力状态下的应力分布及应变特征, 为肱骨远端骨折的

1 对象和方法

设计: 单一样本观察。

时间及地点: 于 2009-01/2010-12 在东南大学医学院附属江阴医院完成。

对象: 选取 1 名 35 岁汉族健康男性志愿者, 身高 176 cm, 体质量 75.5 kg, 先行 X 射线检查, 排除肘关节疾患存在。该志愿者同意接受 CT 检查并将检查资料供本研究使用。

仪器: 64 螺旋 CT (GE, 美国), Mimics 10.01 (materialise, 比利时), ANSYS 10.0 (ANSYS

Inc.美国)。

方法:

重建体数据: 采用GE 64排螺旋CT(美国通用电气医疗公司)对肘关节进行连续水平扫描, 扫描层厚1 mm, 共得到350层。扫描数据按顺序以DICOM 3.0文件格式直接处理及保存在CT工作站中。每个断面图像DICOM文件格式数据大小为523 kb。将CT扫描所得的图像数据以DICOM 3.0格式导入交互式医学图像控制系统Mimics (materialise's interactive medical image control system, MIMICS)软件, 将二维数据重建为体数据。

肱骨远端的三维立体几何模型的建立: DICOM 3.0格式文件导入Mimics 10.01软件后能自动识别序列。利用阈值分割和区域增长的方法分开骨组织和软组织, 提取出骨骼图像, 见图1。

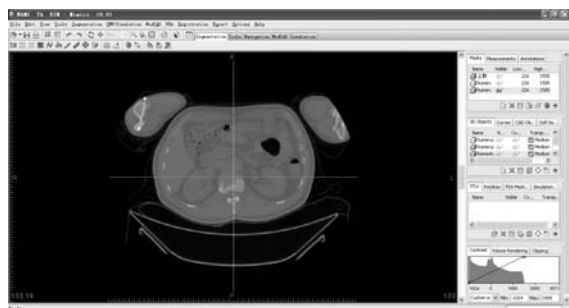


Figure 1 Threshold division of CT image of the distal humerus
图1 对肱骨远端 CT 图像进行阈值分割

通过Wrap, Smooth等处理, 最终计算生成肱骨远端的三维立体几何模型, 见图2。

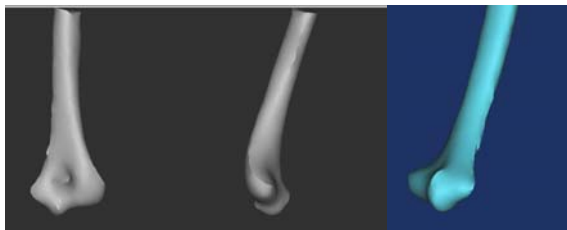


Figure 2 Three-dimensional geometric model of the distal humerus
图2 肱骨远端的三维立体几何模型

肱骨远端三维有限元模型的建立: 将已生成的三维模型通过Mimics中FEA模块的网格优化器进行网格优化, 利用优化的面网格生成体网格。共生成密质骨单元数为2 372, 松质骨单元数为3 920, 总单元数为6 292; 密质骨节点数为5 489, 松质骨节点数为7 778, 总节点数为10 232。点击materials按钮后, 对体网格赋材质。根据以往文献对肱骨远端的皮质骨、松质骨分别定义材料属性: ①密质骨: 弹性模量13 400 MPa, 泊松比0.3。②松质骨: 弹性模量2 000 MPa, 泊松比0.26^[18]。将该模型最后以ANSYS的格式输出并导入ANSYS中生成三

维有限元模型, 见图3。

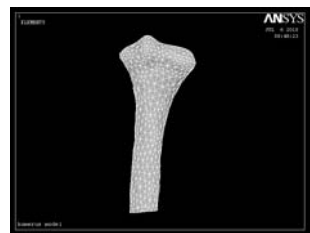


Figure 3 Three-dimensional finite element model of the distal humerus
图3 肱骨远端三维有限元模型

设定边界条件和载荷: 设定边界条件为肱骨近端固定。根据肱骨远端的解剖结构特点, 参照 Schuster 等^[19]的方法将施加于肱骨远端的轴向压力的 60%分配在肱骨滑车处(相当于肘尺关节), 40%分配在肱骨小头处(相当于肘桡关节), 见图4。在肱骨远端关节面上逐步施加100, 300, 500, 1 000 N 轴向压力, 观察不同载荷情况下模型的应力应变情况。

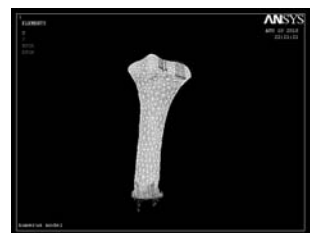


Figure 4 Axial load applied to the distal humerus
图4 对肱骨远端施加轴向载荷

主要观察指标: ①模型的总节点数和单元数。②模型与真实骨骼外形匹配的程度。③有限元分析的结果与文献中生物力学实验结果的吻合度。

2 结果

对模型分别施加100, 300, 500, 1 000 N的不同轴向载荷, 观察模型的受力情况, 结果见图5~10及表1。采用Von Mises应力作为主要的力学分析指标, 通过其应力云图观察力的分布情况。

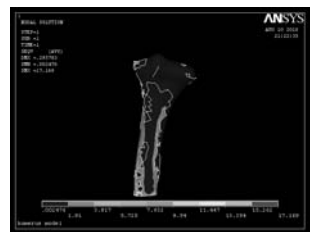


Figure 5 100 N axial load, the stress contour
图5 施加 100 N 轴向载荷时的应力云图

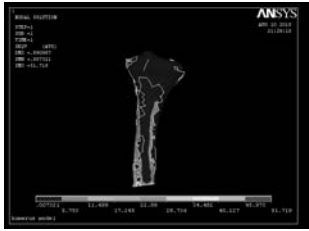


Figure 6 300 N axial load, the stress contour
图 6 施加 300 N 轴向载荷时的应力云图

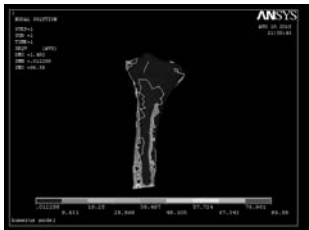


Figure 7 500 N axial load, the stress contour
图 7 施加 500 N 轴向载荷时的应力云图

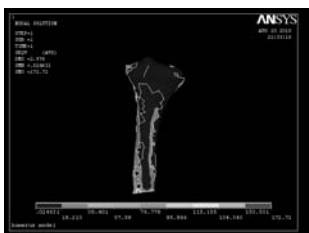


Figure 8 1 000 N axial load, the stress contour
图 8 施加 1 000 N 轴向载荷时的应力云图



Figure 9 1 000 N axial load, the strain contour
图 9 施加 1 000 N 轴向载荷时的应变云图

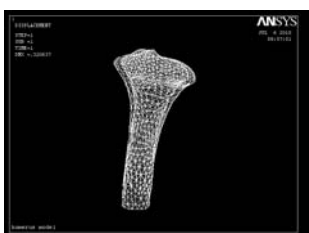


Figure 10 100 N axial load, deformation after load
图 10 施加 100 N 轴向载荷加载后的变形

表 1 不同轴向载荷下的位移、等效应力及应变
Table 1 Displacement, equivalent stress and strain at different axial loading conditions

Item	Loading (N)	
	100	300
Displacement (mm)	0-0.296	0-0.891
Equivalent stress (MPa)	0.002-17.169	0.007-51.719
Strain	0.873×10^{-6} -0.002	0.270×10^{-5} -0.005

Item	Loading (N)	
	500	1 000
Displacement (mm)	0-1.492	0-2.976
Equivalent stress (MPa)	0.012-86.580	0.246-172.720
Strain	0.873×10^{-6} -0.002	0.270×10^{-5} -0.005

如Von Mises应力云图所示,从模型整体来看,不同轴向载荷下肱骨远端内外侧柱应力最大,且随着轴向压力的增加而相应增大。而从有限元分析的应变数据及分布云图可以看出外侧柱有着更大的应变。

3 讨论

由于肱骨远端的解剖结构复杂,直接生成法构建的模型与真实骨骼外形匹配欠佳,故利用CT断层扫描获得直接的影像数据进行有限元建模是最精准、快捷的方法^[20-23]。Mimics在建模过程可基于CT阈值对骨骼赋材料方法,使物质材料特性分布更加科学。本文通过多排螺旋CT扫描获得连续断层图片,将数据文件导入Mimics医学建模软件生成实体模型后,再导入大型通用有限元分析软件ANSYS 10.0,建立肱骨远端的有限元模型,并进行计算和分析。结果显示,本模型真实的模拟了肱骨远端的复杂解剖结构,同时准确地模拟了肱骨远端在外界轴向载荷作用下的应力应变情况,为进一步研究肱骨远端的生物力学行为提供了一种有效的方法。研究结果显示,在轴向压力作用下,模型产生形变和应力。对模型分别施加100, 300, 500, 1 000 N的不同轴向载荷,可见肱骨远端产生的应力也相应增加。为了更好的模拟正常的肘关节受力情况,本文将施加于肱骨远端的轴向压力的60%分配在肱骨滑车处,40%分配在肱骨小头处。有限元计算结果表明, Von Mises应力云图显示出不同载荷作用下肱骨远端最大应力的位置发生在内外侧柱,且应力随着轴向压力的增加而相应增大。本文建立的有限元模型,与张磊等^[24]进行的生物力学实验有相似性。在同样的加载方式下,所得应力应变情况与以上生物力学实验结果相近,也一定程度上验证了模型建立以及负荷加载的合理性与有效性。

本文中Von Mises应力云图显示出不同载荷作用下肱骨远端最大应力的位置发生在肱骨内外侧柱,这与临床上内外侧柱的稳定决定肱骨远端骨折的稳定是一致

的,提示肱骨远端的内固定装置仍需首先考虑内外侧柱的稳定。而从有限元分析的应变数据及分布云图可以看出内侧柱有着更大的应变,这似乎意味着强度更高的重建钢板可能比1/3管型钢板更合适对内侧柱的固定。

随着数字医学的兴起,计算机技术的发展,有限元分析的研究方法在骨科领域得到广泛使用^[25-27]。有限元模型的建立可以使骨科生物力学的研究摆脱标本量少的困扰,并且可以通过对实验条件的控制来年解决很多在体实验无法检测的指标。有限元模型还可以对内植物的有效性进行评价,并对内植物进行有效的改进^[26, 28]。由于多排高速螺旋CT的普及,临床上对于关节内骨折已常规采用平扫+三维重建,这就为临床进行基于有限元模型进行个性化的骨折固定方案奠定基础。

尽管有限元法分析源于真实的人体数据,能够精准模拟出骨骼的解剖,同时通过不断增加划分节点与单元的数量以及更准确地赋予单元材料属性,使模拟结果与真实情况进一步逼近,但由于无法完全模拟骨骼生理状态下的复杂受力环境及骨骼材料的各向异性,且去除了肌肉、韧带等附着软组织,故与真实情况仍存在一定误差,今后仍需要对骨骼的材料力学特性及骨骼生理受力特点进一步研究。有限元法分析不能代替实物标本的生物力学测试,两者需相互补充、借鉴。

4 参考文献

- [1] Robinson CM, Hill RM, Jacobs N, et al. Adult distal humeral metaphyseal fractures: epidemiology and results of treatment. *J Orthop Trauma*. 2003;17:38-47.
- [2] Palvanen M, Kannus P, Niemelä S, et al. Secular trends in distal humeral fractures of elderly women: nationwide statistics in Finland between 1970 and 2007. *Bone*. 2010;46:1355-1358.
- [3] Aslam N, Willett K. Functional outcome following internal fixation of intraarticular fractures of the distal humerus (AO type C). *Acta Orthop Belg*. 2004;70: 118-122.
- [4] Allende CA, Allende BT, Allende BL, et al. Intercondylar distal humerus fractures-surgical treatment and results. *Chir Main*. 2004; 23:85-95.
- [5] Stoffel K, Cunneen S, Morgan R, et al. Comparative stability of perpendicular versus parallel double-locking plating systems in osteoporotic comminuted distal humerus fractures. *J Orthop Res*. 2008;26(6):778-784.
- [6] Pollock JW, Faber KJ, Athwal GS. Distal humerus fractures. *Orthop Clin North Am*. 2008;39(2):187-200.
- [7] Athwal GS, Hoxie SC, Rispoli DM, et al. Precontoured parallel plate fixation of AO/OTA type C distal humerus fractures. *J Orthop Trauma*. 2009;23:575-580.
- [8] Theivendran K, Duggan PJ, Deshmukh SC. Surgical treatment of complex distal humeral fractures: functional outcome after internal fixation using precontoured anatomic plates. *J Shoulder Elbow Surg*. 2010;19:524-532.
- [9] Rebuzzi E, Vascellari A, Schiavetti S. The use of parallel pre-contoured plates in the treatment of A and C fractures of the distal humerus. *Musculoskelet Surg*. 2010;94:9-16.
- [10] Atalar AC, Demirhan M, Saldüz A, et al. [Functional results of the parallel-plate technique for complex distal humerus fractures]. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2009;43:21-27. Turkish.
- [11] Luegmair M, Timofiev E, Chirpaz-Cerbat JM. Surgical treatment of AO type C distal humeral fractures: internal fixation with a Y-shaped reconstruction (Lambda) plate. *J Shoulder Elbow Surg*. 2008;17:113-120.
- [12] Sanchez-Sotelo J, Torchia ME, O'Driscoll SW. Complex distal humeral fractures: internal fixation with a principle-based parallel-plate technique. *J Bone Joint Surg Am*. 2007;89:961-969.
- [13] Shin SJ, Sohn HS, Do NH. A clinical comparison of two different double plating methods for intraarticular distal humerus fractures. *J Shoulder Elbow Surg*. 2010; 19:2-9.
- [14] Boyle C, Kim IY. Comparison of different hip prosthesis shapes considering micro-level bone remodeling and stress-shielding criteria using three-dimensional design space topology optimization. *J Biomech*. 2011. [Epub ahead of print]
- [15] Trabelsi N, Yosibash Z, Wutte C, et al. Patient-specific finite element analysis of the human femur-A double-blinded biomechanical validation. *J Biomech*. 2011. [Epub ahead of print]
- [16] Elkins JM, Stroud NJ, Rudert MJ, et al. The capsule's contribution to total hip construct stability - A finite element analysis. *J Orthop Res*. 2011. [Epub ahead of print]
- [17] Ma XL, Fu X, Ma JX, et al. Shengwu Yixue Gongchengxue Zazhi. 2011;28(1):71-75.
马信龙, 付鑫, 马剑雄, 等. 人股骨近端空间结构重建新方法及有限元模型的建立[J]. 生物医学工程学杂志, 2011, 28(1):71-75.
- [18] Burkwalters JA. Beijing: People's Medical Publishing House. 2001: 231.
Burkwalters JA. 骨科基础科学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001: 231.
- [19] Schuster I, Korner J, Arzdorf M, et al. Mechanical comparison in cadaver specimens of three different 90-degree double-plate osteosyntheses for simulated C2-type distal humerus fractures with varying bone densities. *J Orthop Trauma*. 2008;22(2): 113-120.
- [20] Liu SM, Zhou EC, Zhang Z, et al. Shandong Yiyao. 2009;49(27): 22-24.
刘士明, 周恩昌, 张铮, 等. 肘关节三维有限元模型的建立及意义[J]. 山东医药, 2009, 49(27):22-24.
- [21] Wirtz DC, Schiffers N, Pandorf T, et al. Critical evaluation of known bone material properties to realize anisotropic FE-simulation of the proximal femur. *Biomech*. 2000;33(10):1325-1330.
- [22] Li XL. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2009;13(39):7619-7622.
李孝林. 基于CT图像应用Mimics软件快速构建人体胸腰段骨骼有限元模型[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(39):7619-7622.
- [23] Fu D, Jin AM. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2007;11(9):1620-1623.
傅栋, 靳安民. 应用CT断层图像快速构建人体骨骼有限元几何模型的方法[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, 11(9):1620-1623.
- [24] Zhang L, Yuan L, Dai JX, et al. Jiefangjun Yixue Zazhi. 2005;30(4): 339-341.
张磊, 原林, 戴景兴, 等. 肱骨髁间骨折3种内固定的生物力学比较[J]. 解放军医学杂志, 2005, 30(4):339-341.
- [25] Pei GX. Zhonghua Chuangshang Guke Zazhi. 2008;10(2): 101-102.
裴国献. 数字骨科学的概念于临床初步应用[J]. 中华创伤骨科杂志, 2008, 10(2): 101-102.
- [26] Bono CM, Khandha A. Residual sagittal motion after lumbar fusion: a finite element analysis with implications on radiographic flexion-extension criteria. *Spine*. 2007;32(2):417-422.
- [27] Ozan F, Yildiz H, Bora OA, et al. The effect of head trauma on fracture healing: biomechanical testing and finite element analysis. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2010;44(4):313-321.
- [28] Huang CH, Liao JJ, Huang CH, et al. Stress analysis of the anterior tibial post in posterior stabilized knee prostheses. *J Orthop Res*. 2007;25(4):442-449.

来自本文课题的更多信息一

基金资助: 无锡市社会发展项目(CSZ00969)。

作者贡献: 实验设计主要由第一作者完成, 实验实施、评估所有作者共同完成。均经过正规培训, 未采用盲法评估。

利益冲突: 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

伦理批准: 志愿者同意接受 CT 检查并将检查资料供试验使用, 得到医院伦理道德委员会批准。

本文的创新点: 分别以“肱骨远端 AND 有限元”, “肱骨髁间骨折 AND 有限元”检索维普中文科技期刊数据库和万方数据库未见对肱骨远端进行有限元研究的报道。文章通过多排螺旋 CT 扫描获得连续断层图片, 将数据文件导入 Mimics 医学建模软件生成实体模型后, 再导入大型通用有限元分析软件 ANSYS 10.0, 建立肱骨远端的有限元模型, 并进行计算和分析。经验证符合三维有限元模型的要求, 与实体组织有很好的几何相似性及力学相似性, 适合作进一步的生物力学分析。该方法进行有限元建模精准、快捷。