文章编号:1000-5404(2010)11-1213-03

论著

轴向应力作用下的舟骨有限元分析

钦 斌[1],黄永火[1],欧阳羽[1],吕发金[1],黄 伟[2],王仁崇[2],甘 强[2] (400016 重庆,重庆医科大学附属第一医院:放射科[1],骨科[2])

[摘要] **目的** 快速、准确建立舟骨有限元模型,分析其轴向应力下的力学分布。**方法** 采用美国GE LightSpeed VCT(64排螺旋CT)对健康志愿者1例(男性,24岁,无腕部疾病史)扫描获取CT扫描图像,将12具尸体标本与Instron Model 1011型力学试验机相连接,扫描压敏图像,得到腕关节的受力面积和应力分布,通过CT扫描图像数据对腕部进行三维有限元建模,计算并分析舟骨受轴向压力作用下正常腕部载荷传递及接触应力的分布。将此实验数据及以往文献数据与有限元模型的数据进行对比以验证有限元模型的精确性。**结果** 本模型构架了包括桡骨以及近端掌骨的腕部整体三维有限元模型,共有节点73 588个,单元39 7344个;桡舟关节面受力面积约为153.35 mm^2,应力大小约为54.28 MPa,最大应力约为2.72 MPa,桡舟关节面受力面积约为90.00 mm^2,受力大小约为45.72 MPa,最大应力约为3.45 MPa,舟骨载荷传递及关节接触应力分布情况与实验数据相接近。**结论** 所建模型结构完整,空间结构准确,轴向压力作用下加载模拟形象、逼真,客观反映舟骨三维解剖形态结构和生物力学特点,本模型可以较好地模拟舟骨以及腕关节载荷传递与接触应力的分布情况。

[关键词] 舟骨;有限元分析;生物力学
[中图法分类号] R318.01; R322.71; R323.71 **[文献标志码]** A

Finite element analysis in scaphoid bone under action of axial stress

Qin Bin[1], Huang Yonghuo[1], Ouyang Yu[1], LU Fajin[1], Huang Wei[2], Wang Renchong[2], Gan Qiang[2] ([1]Department of Radiology, [2]Department of Orthopedics, First Affiliated Hospital, Chongqing Medical University, Chongqing, 400016, China)

[Abstract] **Objective** To construct the model of finite elements in scaphoid bone and analyze its mechanic distribution under the action of axial stress. **Methods** CT images of a male volunteer at the age of 24 with no history of thoracic disease were obtained using GE LightSpeed VCT. Area under stress and distribution of stress in wrist joint were observed on pressure-sensitive images obtained by connecting 12 autopsy samples to the Instron 1011 mechanic text device. A 3-D model of finite elements in scaphoid bone was established using the CT imaging data. Normal load transfer in scaphoid bone and distribution of contact stress in wrist joint under the action of axial stress were calculated and analyzed. Experimental data were compared with those available from documented reports and from the model of finite elements in scaphoid bone to confirm the accuracy of the model established in this study. **Results** The 3-D model of finite elements in scaphoid bone, including 73 588 nodal points and 397 344 modules in proximal metacarpal and wrist bone, was established. The surface area of radial and scaphoid joint under stress was about 153.35 mm^2 and 90.00 mm^2 with a minimal stress of about 54.28 MPa and 45.72 MPa, and a maximal stress of about 2.72 MPa and 3.45 MPa, respectively. The load transfer in scaphoid bone and the distribution of contact stress in radial and scaphoid joint were similar to the experimental data. **Conclusion** The model we established in this study is characterized by the 3-D morphologic structure and biomechanics, and can thus simulate the scaphoid and wrist joint load transfer and the distribution of contact stress.

[Key words] scaphoid; finite element analysis; biomechanics

Corresponding author: Huang Yonghuo; E-mail: hyhuo@126.com

在腕部损伤中,舟骨骨折是仅次于桡骨远端骨折的常见骨折。尽管目前内固定器械有很大的进步、手术方法有了很大的改进,但仍有大约10%左右的出现骨不连,需要再次手术,影响腕部功能[1]。因此,腕舟骨折、骨不连和舟骨坏死的治疗,一直是骨外科的难题之一。

舟骨是最大的近排腕骨、似船形。由于它与近、远

[通信作者] 黄永火,E-mail:hyhuo@126.com

排腕骨均形成关节,一旦因为骨折或疾病破坏了舟骨的这种正常结构和功能,则会发生腕关节退变,最后导致整个腕关节的功能受到影响[2]。故研究正常情况下的舟骨力学特点,对于生物力学及临床均有着重要的意义。随着计算机技术的发展,通过虚拟在体生物力学成为了可能。近年来有限元分析已逐渐成为研究生物力学的利器[3],而因为腕关节及腕骨有着复杂的结构和功能,其研究主要集中于实验方面[4],但亦有部分国内外学者就尺桡骨[5,6]、近排腕骨的骨折及损伤[7],以及腕管[8,9]进行了有限元的受力分析。本研究亦就舟骨及其与邻近腕骨及桡骨的有限元分析方面进行了尝试。

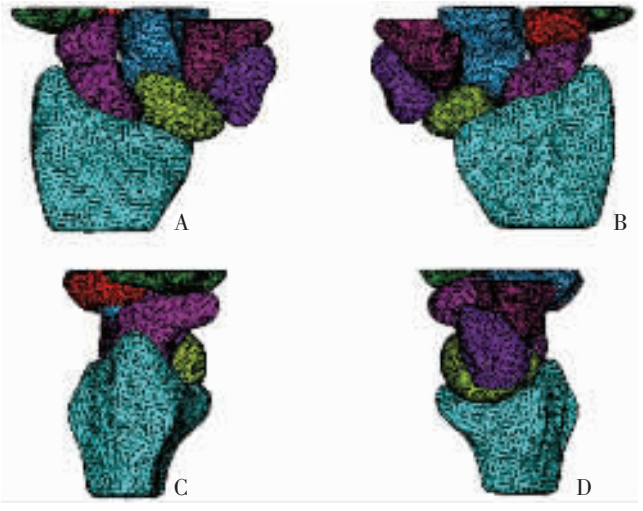
1　材料与方法

1.1　舟骨三维有限元模型的建立

1.1.1　CT图像采集及三维实体模型的建立　本研究采用美国GE LightSpeed VCT(64排螺旋CT)对健康志愿者1例(男性,24岁,无腕部疾病史)扫描。将CT扫描得到的图像导入到MIMIC 10.0,在二维图像中进行组织的分割,分别得到各骨的实体模型。再将腕骨及桡骨远端进行图像的融合,建立腕部的三维模型,并导入到ANSYS软件中,对模型进行网格化,得到舟骨及其邻近腕骨的整体的有限元模型,总节点数73 588,总单元数397 344。

1.1.2　骨组织的材料属性　人体腕关节结构复杂、组织众多,除骨骼外,还有韧带、软骨、肌肉、肌腱等。本研究讨论的为静态载荷下的腕舟骨的受力情况(主要为舟、月骨与桡骨接触面的接触应力分布情况),同时从减少计算量的角度,参考部分学者的方法[4,11,12],模型中仅考虑了骨骼材料。

本研究的模型中假设舟骨及其邻近腕骨为各向同性均一的线弹性材料。参考文献[13－15]数据,本研究将骨骼单元的弹性模量统一设置为10 000 MPa,泊松比为0.3(图1)。



A:掌面观;B:背面观;C:桡侧面观;D:尺侧面观

图1　舟骨有限元模型各面观察

1.1.3　载荷及边界条件　本模型对于大多角骨、小多角骨、头状骨及钩骨的轴面施加垂直于界面的总共为100 N的压力[16]。模型中桡骨的近端在x、y、z 3个方向上完全约束,即保持桡骨近端无位移,其他关节面设定接触对。

1.2　实验验证

正常情况下,将12具尸体标本从掌侧切开腕关节关节囊,保留腕关节背侧关节囊和软组织,以维持腕关节的稳定性,将制作好的标本与Instron Model 1011型力学试验机相连接,测量标本置于中立位,以100 N的力垂直缓慢加压,加压持续2 min,取出压敏片后将A片与C片分开保存,并做好相应的标记。用扫描仪将压敏片的图像读入计算机,用Imag-Pro Plus医学图像分析处理软件测量压敏片的着色面积,每一着色区测量结果3次,取平均值,得到腕关节的受力面积和应力分布[9]。将此实验数据及以往文献[10]数据与有限元模型的数据进行对比以验证有限元模型的精确性(图2)。

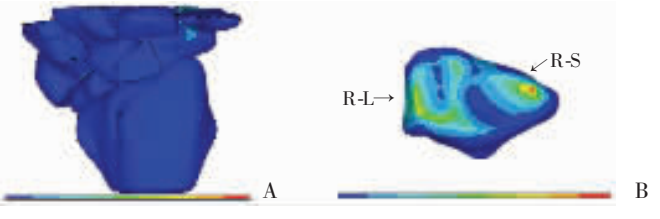


图2　尸体标本加压示意图

2　结果

2.1　有限元模型结果

本研究计算了桡舟关节面及桡月关节面的受力情况,其von Mises stress云图见图3所示,接触应力分布偏向于掌侧,桡舟关节面承受了大部分的应力,其中R-L表示桡月关节面,R-S表示桡舟关节面。



A:受力云图正面观;B:受力云图上面观

图3　正常情况下模型受力云图

正常情况100 N轴向压力下桡骨面应力见表1。有限元模型示舟骨窝受力面积及应力较大,而桡骨窝受力范围及大小较小,应力有50%～56%由桡舟关节传递,29%～35%由桡月关节传递。

表1　正常情况下桡骨面应力分析数据

受力关节面	受力面积(mm^2)	面积百分比	应力(MPa)	应力百分比	最大应力(MPa)
桡舟关节面	153.35	63.02%	54.28	54.28%	2.72
桡月关节面	90.00	36.98%	45.72	45.72%	3.45

2.2 分布图对比

通过观察有限元模型的桡骨应力分布云图，发现接触应力分布偏向于掌侧，桡舟关节面承受了大部分的应力，桡月关节面承担应力较小，此与尸体实验应力图相似（图4）。



A：有限元模型桡骨应力分布图；B：尸体实验模型桡骨应力分布图

图4 有限元模型与尸体实验模型桡骨应力分布比较

2.3 实验数据对比

本研究与文献实验数据比对提示，其最大接触应力、舟骨窝与月骨窝最大应力之比、桡舟接触面积百分比、通过舟骨传导的载荷百分比、通过月骨传导的载荷百分比均较相似。

表2 正常情况下桡骨面应力与力学实验数据比较

研究方法	桡腕关节最大接触应力(N)	舟骨窝与月骨窝最大应力之比	桡舟接触面积百分比(%)	通过舟骨传导的载荷百分比(%)	通过月骨传导的载荷百分比(%)
有限元模型应力	3.45	1.20	63.02	54.28	45.72
尸体力学实验[19]	4.37	1.17	61.44	63.00	37.00
相关文献力学实验数据[9,10]	5.60	1.70	20.60	56.00	44.00

3 讨论

舟骨腕关节作为作为连接手与尺桡骨远端的关节，在正常生理结构及腕部活动中具有重要的地位，故其力学研究亦有着重要的作用。随着计算机技术的进步，数字化模型的可重复、资源占用少的优越性越发的明显，而腕关节因其具有较为复杂的结构，故其生物力学研究多见于尸体研究，但此研究领域正在逐步兴起。

本研究建立了舟骨的有限元模型并模拟了轴向载荷100 N下桡骨面的受力情况，通过与实验相比较[10,17]，并观察应力分布图及数据对比发现，此研究应力分布及其数据与实验及国内外文献相似。故本研究所建的舟骨的三维有限元模型不仅具有解剖相似性，同时还能较为准确的得到轴向压力载荷作用下腕部载荷传递以及应力分布的情况。本模型能够较好的模拟桡舟关节面及桡月关节面的受力情况，为舟骨的生物力学研究提供了一个新的研究平台。但本模型仅仅模拟了骨材料，与实体有所差距，在今后的研究中，如何更快、更准确的建立有限元模型，加以实验的准确验证，并研究如何将其应用于临床实际操作中，将是一个值得继续深入的研究领域。

参考文献：

[1] Smith B S, Cooney W P. Revision of failed bone grafting for nonunion of the scaphoid. Treatment options and results[J]. Clin Orthop Relat Res, 1996, (327): 98 - 109.

[2] Swanson A B, de-Groot-Swanson G., DeHeer D H, *et al*. Carpal bone titanium implant arthroplasty. 10 years' experience[J]. Clin Orthop Relat Res, 1997, (342): 46 - 58.

[3] 陈光兴，杨柳，李恺，等. 基于中国可视人体数据集构建髋关节应力分析三维有限元模型[J]. 第三军医大学学报, 2009, 31(12): 1193 - 1197.

[4] Anderson D D, Deshpande B R, Daniel T E, *et al*. A three-dimensional finite element model of the radiocarpal joint: distal radius fracture step-off and stress transfer[J]. Iowa Orthop J, 2005, 25: 108 - 117.

[5] Varga P, Baumbach S, Pahr D, *et al*. Validation of an anatomy specific finite element model of Colles' fracture[J]. J Biomech, 2009, 42(11): 1726 - 1731.

[6] Ural A. Prediction of Colles´fracture load in human radius using cohesive finite element modeling[J]. J Biomech, 2009, 42(1): 22 - 28.

[7] Fischli S, Sellens R W, Beek M, *et al*. Simulation of extension, radial and ulnar deviation of the wrist with a rigid body spring model[J]. J Biomech, 2009, 42(9): 1363 - 1366.

[8] Guo X, Fan Y, Li Z M. Effects of dividing the transverse carpal ligament on the mechanical behavior of the carpal bones under axial compressive load: a finite element study[J]. Med Eng Phys, 2009, 31(2): 188 - 194.

[9] 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.

[10] Schuind F, Cooney W P, Linscheid R L, *et al*. Force and pressure transmission through the normal wrist. A theoretical two-dimensional study in the posteroanterior plane[J]. J Biomech, 1995, 28(5): 587 - 601.

[11] Dacho A K, Baumeister S, Germann G., *et al*. Comparison of proximal row carpectomy and midcarpal arthrodesis for the treatment of scaphoid nonunion advanced collapse (SNAC-wrist) and scapholunate advanced collapse (SLAC-wrist) in stage II[J]. J Plast Reconstr Aesthet Surg, 2008, 61(10): 1210 - 1218.

[12] Carrigan S D, Whiteside R A, Pichora D R, *et al*. Development of a three-dimensional finite element model for carpal load transmission in a static neutral posture[J]. Ann Biomed Eng, 2003, 31(6): 718 - 725.

[13] Anderson D D, Daniel T E. A contact-coupled finite element analysis of the radiocarpal joint[J]. Semin Arthroplasty, 1995, 6(1): 30 - 36.

[14] Ledoux P, Lamblin D, Targowski R. Modifications to the mechanical behavior of the wrist after fracture of the scaphoid. Modeling by finite element analysis[J]. Acta Orthop Belg, 2001, 67(3): 236 - 241.

[15] Ledoux P, Lamblin D, Wuilbaut A, *et al*. A finite-element analysis of Kienbock's disease[J]. J Hand Surg Eur Vol, 2008, 33(3): 286 - 291.

[16] Hara T, Horii E, An K N, *et al*. Force distribution across wrist joint: application of pressure-sensitive conductive rubber[J]. J Hand Surg [Am], 1992, 17(2): 339 - 347.

[17] 王仁崇，黄伟，甘强，等. 腕舟骨芯假体的受力分析研究[J]. 重庆医学, 2008, 37(19): 2138 - 2141.

（**收稿**：2010-01-01；**修回**：2010-03-01）

（编辑 张 维）