

前路经寰枢关节螺钉内固定生物力学性能的有限元分析

刘志超^{1,2}, 蔡贤华¹, 黄卫兵¹, 张美超³, 余 洋^{1,2}

(1 广州军区武汉总医院骨科 430070 武汉市; 2 南方医科大学研究生学院 510515 广州市

3 南方医科大学广东省生物力学重点实验室 510515 广州市)

【摘要】目的:通过有限元分析的方法评估前路经寰枢关节螺钉内固定的生物力学性能。**方法:**选择一名 21 岁健康男性志愿者, 采用螺旋 CT 对枕骨底到 C3 椎体进行层厚 1mm 的薄层扫描, 利用 MIMICS 13.0 软件、Freeform Plus 软件及 ANSYS 9.0 软件, 建立正常上颈椎有限元模型。去除模型中横韧带的所有单元模拟寰枢关节不稳, 以枢椎前弓下缘与枢椎椎体侧缘交界点上方 4mm 处为进钉点, 经寰枢关节分别向两寰椎侧块外上角中部置钉, 最终建立前路经寰枢关节螺钉内固定治疗寰枢关节不稳的有限元模型。给予模型分别施加前屈、后伸、侧屈、旋转四种生理载荷, 观察不同载荷下螺钉的三维运动范围与应力变化, 分析前路经寰枢关节螺钉内固定的生物力学性能。**结果:**前路经寰枢关节螺钉内固定在不同载荷下三维运动范围均较小, 但前屈、后伸状态下三维运动范围(0.72° , 1.08°)明显大于侧屈、旋转状态(0.39° , 0.32°)。不同状态下应力集中区域均为螺钉经寰枢关节部位, 最大应力值为 $10.58 \times 10^7 \text{Pa}$, 出现在后伸状态。**结论:**前路经寰枢关节螺钉内固定具有可靠的生物力学性能, 在侧屈、旋转状态下的力学性能优于前屈后伸状态, 螺钉经寰枢关节部位易产生应力集中, 为可能的断钉部位, 临床应用时应采取有效预防措施。

【关键词】上颈椎; 内固定; 生物力学; 有限元分析

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2010.11.01

中图分类号: R687.3, R318.01 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2010)-11-0881-04

Biomechanical evaluation of anterior transarticular screws on C1-2, a three-dimensional finite element analysis/LIU Zhichao, CAI Xianhua, HUANG Weibing, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2010, 20(11): 881-884

【Abstract】 Objective: To evaluate the biomechanical features of anterior transarticular screws placement by finite element method. **Method:** A healthy male volunteer aged 21 years old underwent CT scan at C0-C3 (slice width=1mm). Three-dimensional finite element model of upper cervical spine was established by MIMICS 13.0, Freeform Plus and ANSYS 9.0. C1-2 instability was simulated by removing transverse ligament, and transarticular screws were placed based on standard surgical protocol. Specimen was subjected to flexion-extension, lateral bending and axial rotation load. The ROM of screws and load transfer under different direction were evaluated biomechanically. **Result:** Although the ROM after screw placement was small in all direction, the ROM in flexion-extension (0.72° , 1.08°) was obviously bigger than that of lateral bending and axial rotation (0.39° , 0.32°). Stress was found concentrating around the transarticular area under all directions and had the maximum value of $10.58 \times 10^7 \text{Pa}$ under extension movement. **Conclusion:** Anterior transarticular screws show excellent biomechanical effect, especially under lateral bending and axial rotation. The transarticular area which the screws pass through is apt to develop load bearing, which predispose the instrument at failure.

【Key words】 Upper cervical vertebrae; Internal fixation; Biomechanics; Finite element method

【Author's address】 Department of Orthopedics, Wuhan General Hospital of Guangzhou Command, Wuhan, 430070, China

基金项目: 全军医学科学研究“十一五”计划攻关课题(08G031)

第一作者简介: 男(1985-), 硕士研究生在读, 研究方向: 脊柱外科及关节外科

电话: (027)68878520 E-mail: gkysliuzc@163.com

通讯作者: 蔡贤华 E-mail: wgcaixh@163.com

寰枢椎不稳患者的脊髓、椎动脉、神经根易受到压迫或动态刺激, 使患者处于高度危险状态, 严重者可达四肢瘫痪, 甚至危及生命, 往往需要手术治疗。前路经寰枢关节螺钉内固定是一种可靠的

寰枢椎固定方法,尤其适用于某些难以施行后路内固定手术的病例^[1]。关于前路经寰枢关节螺钉生物力学性能的研究较少,本研究旨在通过三维有限元的方法对此种内固定进行生物力学分析,为临床应用提供实验数据。

1 材料与方法

1.1 正常上颈椎有限元模型的建立及验证

选择一名 21 岁健康男性自愿者,身高 171cm,体重 61kg,行上颈椎张口位及颈椎侧位 X 线片检查排除颈椎先天性畸形及病变。通过螺旋 CT 对枕骨底~C3 椎体进行薄层扫描(1mm),扫描的数据以 Dicom 格式存入计算机,借助 Mimics 13.0 软件(比利时 Materialise 公司)重建枕骨底~C2 椎体的骨性结构。几何模型导入 Freeform Plus 软件(美国 SensAbole 公司)进行打磨、填孔、去噪处理,形成接近正常的几何实体模型。

几何实体模型导入 Ansys 10.0 软件(美国 Ansys 公司)进行网格划分,建立骨性结构的有限元模型(图 1)。根据韧带的起止点及横截面积加载韧带。骨性结构采用八节点的四面体单元模拟,横韧带及 C0-C1 的关节囊韧带同样采用八节点的四面体单元模拟,翼状韧带、齿状突尖韧带、项韧带、覆膜、前纵韧带、后纵韧带、寰枕前膜、寰枕后膜、棘间韧带、棘上韧带结构采用两节点缆式单元模拟^[2],模型的材料参数见表 1。本模型共由 55371 个单元、86050 个节点组成,在枕骨髁部施加 40N 的垂直向下压力模拟头颅重力,分别施加 1.5N·m 的力矩使模型产生前屈、后伸、侧屈及旋转活动,计算寰枢椎的活动度并与 Panjabi 等^[3,4]体外实验的结果进行对比验证,示各方向活动度两者间均无显著性差异(表 2)。

1.2 前路经寰枢关节螺钉内固定治疗寰枢椎不稳有限元模型的建立与生物力学性能分析

去除正常上颈椎有限元模型中横韧带的所有单元,模拟寰枢关节不稳,按照正常上颈椎有限元模型的验证方法施加载荷进行计算,结果如表 2 所示,此状态下模型的三维活动度较正常模型明显增大,与丁祖泉等^[5]模拟横韧带损伤导致寰枢关节不稳的活动度变化趋势类似。利用 Freeform Plus 软件绘制前路经寰枢关节螺钉内固定的几何模型,以枢椎前弓下缘与枢椎椎体侧缘交界点上方 4mm 处为进钉点,经寰枢关节分别向两寰椎侧

块外上角中部置钉,对内固定后几何模型进行网格划分(图 2)。

在建立的前路经寰枢关节螺钉内固定模型枕骨髁部施加 40N 的垂直向下压力模拟头颅重力,施加 1.5N·m 力矩使模型产生前屈、后伸、侧屈及旋转活动,分别在 Ansys 10.0 软件的后处理器中求解模型。设置 C2 椎体下缘所有节点各方向的位移均为 0,忽略螺钉与骨质之间的微动。

螺钉的受力情况以应力云图显示;定量计算则提取各个状态下螺钉的范式应力曲线及三维运动范围。

2 结果

在前屈、后伸、侧屈及旋转状态下,前路经寰枢关节螺钉的三维运动范围均较小,分别为 0.72°、1.08°、0.39°及 0.32°,屈伸状态三维运动范围明显大于侧屈、旋转状态。螺钉经寰枢关节部位应力分布相对较集中,最大值分别为 5.44×10⁷Pa、10.58×10⁷Pa、1.29×10⁷Pa 及 3.64×10⁷Pa,后伸时所受应力最大;螺钉其余区域应力分布较均匀(图 3~6)。

表 1 有限元模型中相关结构的材料参数

解剖结构	弹性模量(MPa)	泊松比
皮质骨	12000	0.29
松质骨	450	0.29
纤维环	3.4	0.4
髓核	1.0	0.49
前纵韧带	30.0	0.3
后纵韧带	20.0	0.3
棘间、黄韧带(C1-C2)	10.0	0.3
关节囊韧带(C1-C2)	10.0	0.3
关节囊韧带(C0-C1)	1.0	0.3
翼状韧带	5.0	0.3
横韧带	20.0	0.3
齿状突尖韧带	20.0	0.3
项韧带	20.0	0.3

3 讨论

对寰枢椎不稳进行外科干预的目的主要为了获得即刻的稳定性,促进寰枢关节的骨性融合,因此对各种寰枢椎固定方式进行生物力学性能评估就显得尤为重要。有限元分析方法利用电子计算机模拟各种组织结构及其病理变化,可以分析尸体实验方法不能或很难研究的内部应力应变,具

表 2 有限元模型 C0-C1、C1-C2 节段三维运动范围与 Panjabi 等体外实验的比较

项目	Panjabi 等 ^[4,5]		正常有限元模型		横韧带损伤有限元模型	
	C0-C1	C1-C2	C0-C1	C1-C2	C0-C1	C1-C2
力矩(Nm)	1.5		1.5		1.5	
前屈(°)	3.5±0.6	11.5±2.0	3.1	11.7	3.3	23.6
后伸(°)	21.9±1.9	10.9±1.1	20.5	9.5	21.2	12.7
侧屈(°)	7.9±0.6	38.3±1.7	7.6	38.7	9.1	49.1
旋转(°)	5.6±0.7	4.0±0.8	5.1	4.1	5.8	6.2

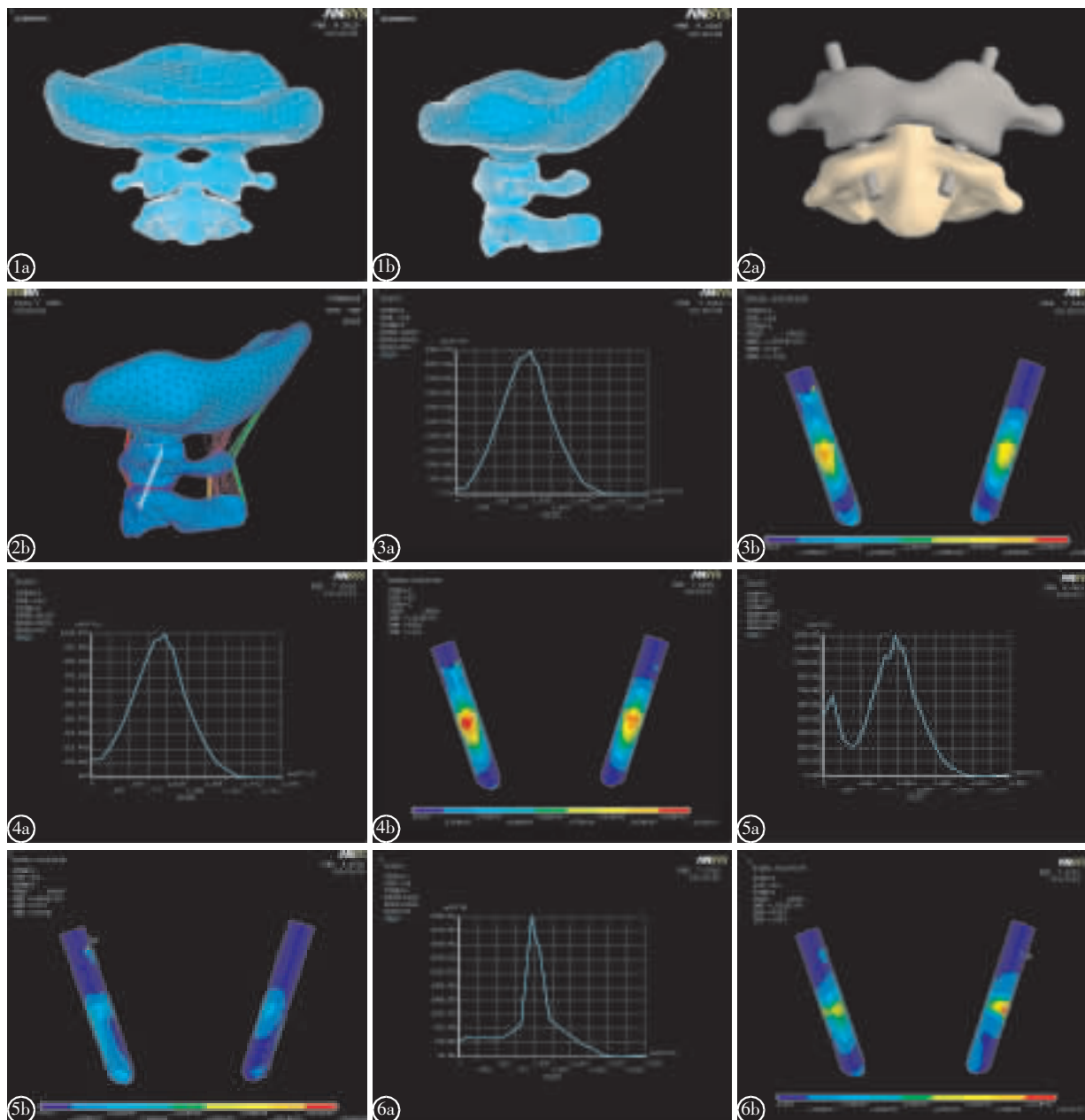


图 1 枕寰枢复合体骨性结构有限元模型 a 前面观 b 侧面观 图 2 前路经寰枢关节螺钉内固定的置钉角度 a 前面观 b 侧面观 图 3 前屈状态下螺钉应力曲线(a)及应力云图(b)(横坐标为单元距螺钉近端钉尾的距离,纵坐标为应力值;蓝色表示应力最小,红色表示应力最大,下同) 图 4 后伸状态下螺钉应力曲线(a)及应力云图(b) 图 5 侧屈状态下螺钉应力曲线(a)及应力云图(b) 图 6 旋转状态下螺钉应力曲线(a)及应力云图(b)

有准确及可重复的特点,目前被广泛用于生物力学分析^[6]。通过与 Panjabi 等^[3,4]尸体实验三维活动度数据及丁祖泉等^[5]模拟横韧带损伤导致寰枢关节不稳的活动度数据的验证比较,我们认为本实验所建立的三维有限元模型能有效地模拟上颈椎的结构与运动状态,在此模型上进行前路经寰枢关节螺钉内固定的力学性能研究具有可行性。

本研究对前路经寰枢关节螺钉内固定后三维活动度的分析结果显示,内固定在前屈、后伸、侧屈、旋转状态下三维活动度均较小,有着良好的稳定性,但其前屈、后伸状态下螺钉的三维活动度较侧屈、旋转状态明显增加。国内外关于前路经寰枢关节螺钉内固定后三维活动度的尸体标本研究也有类似的结论。Kim 等^[7]的研究表明,后路寰枢椎侧块钉板系统、后路经寰枢关节螺钉、前路经寰枢关节螺钉三者固定后的三维活动度差异没有统计学意义,但在前屈、后伸活动中,前路经寰枢关节螺钉内固定三维活动度较后路寰枢椎侧块钉板系统明显增大。Sen 等^[8]的生物力学实验表明,屈伸状态下前路经寰枢关节螺钉固定三维运动范围较后路经寰枢关节螺钉联合钢丝固定组增加,差异有统计学意义。

另外,本研究通过有限元模型本实验分析了前路经寰枢螺钉的内部应力变化。螺钉应力集中区域主要位于螺钉经寰枢关节处,其最大值出现在后伸状态,为 105.8MPa,远远低于钛合金的屈服强度 894~1034MPa^[9],提示前路经寰枢关节螺钉断钉可能性较低,目前临床上关于该手术断钉报道也较少^[10-12]。但前路经寰枢关节螺钉内固定的相关并发症仍需警惕,为了尽量减少断钉可能性,我们建议应用该固定后在寰枢关节面植骨。由于显露问题,此处植入颗粒状松质骨异常困难,Goel^[13]在其使用后路经寰枢椎侧块经寰枢关节钛板螺钉行寰枢椎椎固定的病例中自行设计了一种置于寰枢关节面的钛合金融合器,以便于更有效地实现寰枢椎的融合。

由于有限元分析方法的局限,本模型定义骨质与螺钉之间为紧密接触,忽略了骨-螺钉界面微动及钉周骨质的吸收对力学稳定性的影响,随着软件技术及建模水平的进步,此不足有待进一

步完善。

综上所述,前路经寰枢关节内固定具有可靠的生物力学性能,但螺钉在侧屈、旋转状态下的力学性能优于前屈、后伸状态,应力疲劳易发生于螺钉通过寰枢关节区域,值得临床注意。

4 参考文献

1. 王超,党耕町,刘忠军.前路经枢椎体寰椎侧块螺钉固定术[J].中华骨科杂志,1999,19(8):7-9.
2. Zhang QH, Teo EC, Ng HW, et al. Finite element analysis of moment-rotation relationships for human cervical spine[J]. J Biomech, 2006, 39(1):189-193.
3. Panjabi M, Dvorak J, Duranceau J, et al. Three-dimensional movements of the upper cervical spine [J]. Spine (Phila Pa 1976), 1988, 13(7):726-730.
4. Panjabi M. Cervical spine models for biomechanical research[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1998, 23(24):2684-2700.
5. 丁祖泉,袁文,贾连顺.寰椎横韧带断裂对枕颈部稳定性的影响[J].第二军医大学学报,1996,14(1):61-63.
6. Brodin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2004, 29(4):376-385.
7. Kim SM, Lim TJ, Paterno J, et al. Biomechanical comparison of anterior and posterior stabilization methods in atlantoaxial instability[J]. J Neurosurg, 2004, 100(3 Suppl Spine):277-283.
8. Sen MK, Steffen T, Beckman L, et al. Atlantoaxial fusion using anterior transarticular screw fixation of C1-C2: technical innovation and biomechanical study. [J]. Eur Spine J, 2005, 14(5):512-518.
9. 邹德威,杨惠林,金大地,等.脊柱功能重建外科学-高级理论和技巧[M].北京:人民军医出版社,2008.65-66.
10. Li WL, Chi YL, Xu HZ, et al. Percutaneous anterior transarticular screw fixation for atlantoaxial instability: a case series [J]. J Bone Joint Surg Br, 2010, 92(4):545-549.
11. Koller H, Kammermeier V, Ulbricht D, et al. Anterior retropharyngeal fixation C1-2 for stabilization of atlantoaxial instabilities: study of feasibility, technical description and preliminary results[J]. Eur Spine J, 2006, 15(9):1326-1338.
12. Reindl R, Sen M, Aebi M. Anterior instrumentation for traumatic C1-C2 instability [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2003, 28(17):E329-E333.
13. Goel A. Double insurance atlantoaxial fixation[J]. Surg Neurol, 2007, 67(2):135-139.

(收稿日期:2010-06-09 修回日期:2010-08-16)

(英文编审 蒋欣/刘思麒)

(本文编辑 彭向峰)