

腰椎侧凸螺钉内固定节段对手术矫正效果影响的有限元分析

韦 兴¹, 胡明涛², 史亚民¹, 侯树勋¹, 冯西桥²

(1 解放军总医院第一附属医院骨科 100048 北京市; 2 清华大学力学系生物力学实验室 100084 北京市)

【摘要】目的:应用有限元分析的方法,模拟腰椎侧凸矫形手术,探讨内固定螺钉位置对脊柱侧凸矫形的效果。**方法:**利用 Simpleware 软件建立 L1~L5 侧凸的三维有限元模型,侧凸角 40°。在此模型上设计 6 组(A~F 组)凹侧椎弓根螺钉置入计划,其中 A~E 组为 5 个椎体依次空缺 1 个螺钉,F 组作为对照行 5 个椎体置钉,连接矫形棒。应用 ANSYS 和 ADAMS 软件,计算矫形过程中反旋转和回弹时置入物所受载荷(最大扭矩及最大拔出力)以及脊椎的应力应变场。**结果:**6 组矫形结束后的侧凸角分别为 30°、23°、25°、22°、29°、21°。所需最大扭矩分别为 3.1N·m、3.3N·m、4.6N·m、3.4N·m、4.2N·m 和 3.3N·m。螺钉所承受最大拔出力分别为 418N、383N、437N、395N、420N 和 380N。**结论:**在保持一定固定范围条件下,间断减少非弧顶固定螺钉,在三维有限元模型上可得到较好的矫形效果。

【关键词】 脊柱侧凸;生物力学;有限元分析

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2010.11.04

中图分类号:R682.3,R318.01 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2010)-11-0895-03

The effect of instrument segments on the correction rate of lumbar scoliosis,a finite element analysis/WEI Xing,HU Mingtao,SHI Yamin,et al/Chinese Journal of Spine and Spinal Cord,2010,20(11):895-897

【Abstract】 Objective:To simulate the correction surgery of lumbar scoliosis by finite element analysis and investigate the effect of instrument segments on the correction rate of lumbar scoliosis.**Method:**A detailed three-dimensional finite element scoliotic model of L1-L5 with a Cobb angle of 40°on sagittal plane was established by using Simpleware software.Six types(group A-F)of pedicle screw instrumentations on concave side were designed on the model (of these,uniscrew placement in each vertebral body of group A-E,while biscrew placement in each vertebral body of group F).The spinal stress and strain field during with respect to anti-rotation and the rebound in the process of correction were measured by using software ANSYS and ADAMS software.**Result:**The scoliotic angle after correction was 30°,23°,25°,22°,29°and 21°respectively for group A to E.The maximum torque was 3.1N·m,3.3N·m,4.6N·m,3.4N·m,4.2N·m and 3.3N·m,the maximum pull out force was 418N,383N,437N,395N,420N and 380N.**Conclusion:**Under definite circumstances,decreasing non-arc vertebrae screws can yield good correction at least in finite element model.

【Key words】 Spine scoliosis;Biomechanics;Finite element analysis.

【Author's address】 Orthopaedic Surgery,the First Affiliated Hospital of General Hospital of PLA,Beijing,100048,China

脊柱侧凸的矫形是当今临床脊柱外科的难题和热点之一,椎弓根螺钉技术的应用,使得脊柱侧凸的治疗效果得以明显提高。但在矫形过程中是否需要连续置钉或如何选择间隔置入螺钉组合,也成为学者们关注的问题之一。笔者拟通过有限元计算和刚体动力学结合的方法,模拟矫形手术中的反旋转与回弹,得到矫形过程中螺钉与脊椎

的生物力学特性,探讨间隔内固定螺钉位置对矫形效果的影响。

1 资料与方法

1.1 建立腰椎侧凸的三维有限元模型

资料源自腰椎侧凸志愿者,男性,39岁,身高172cm,体重73kg,已排除其他疾患。X线测量为右侧凸,Cobb角为40°,前凸为5°,侧凸范围为L1~L5,L3为顶椎。自L1~L5用GE Lightspeed 32排螺旋CT扫描获得体层图像,扫描条件(140kV,

第一作者简介:男(1970-),副主任医师,博士,研究方向:脊柱肿瘤

电话:(010)66848373 E-mail:wxing304@sina.com

200mA, 层厚 1mm, 304 医院放射科提供), Dicom 格式保存图像。

将 Dicom 格式读入建模软件 Simpleware, 建立腰椎椎体的 STL 三角网格模型, 导入逆向工程软件 Geomagic, 修补及优化后生成实体模型, 应用有限元软件 Abaqus, 对实体模型加入皮质骨、松质骨、椎间盘、小关节等材料的弹性模量、泊松比等参数(表 1), 最终建立腰椎侧凸的三维有限元模型。

1.2 有限元模型的加载分析

首先生成腰椎及内固定复合的有限元模型。利用 ANSYS 软件提供的布尔运算功能(Boolean Operations), 对螺钉和腰椎有限元模型进行搭接(Overlap)及粘接(Glue)运算。固定螺钉及连接(矫形)棒为医用钛合金材质(北京 XX 公司提供), 螺钉(螺纹)长度为 45mm, 直径为 6.0mm, 连接棒长度为 180mm, 直径为 5.5mm。参考临床实际操作, 利用凹侧螺钉及连接杆旋转矫形, 凸侧辅助固定的特点^[4], 本研究中仅将凹侧螺钉及连接杆与腰椎复合, 具体复合螺钉的椎体节段情况见下文。螺钉和脊椎的界面采用理想粘接条件, 得到的有限元模型单元 87275 个, 节点 134575 个(图 1)。

在 ADAMS 软件中对该模型施加矫形手术过程中需要的载荷, 进行动力学仿真, 输出 ANSYS 软件所需的载荷文件, 获得腰椎和内固定器械系统的运动过程及其相应的载荷信息, 包括力、力矩、加速度与速度等, 在 ANSYS 软件中进一步计算, 得到矫形全过程中内固定物所受载荷以及脊椎的应力应变场。

本研究主要模拟脊柱器械复合体在手术过程中的反旋转和回弹两个关键的步骤, 并计算最大扭矩及最大拔出力:(1)反旋转, 以 1°/s 的角速度施加在矫形杆上, 作用 90s, 使矫形杆转动 90°, 把冠状面的侧凸畸形转化为矢状面的生理前凸。转动过程中螺钉尾部可沿杆轴向自由移动和绕杆自由转动, 因此螺钉和矫形杆接触部位与圆柱关节近似。采用 90s 的时间, 用准静态步骤来模拟反旋转, 使得旋转载荷施加速度缓慢, 有利于减少椎体承受瞬间冲击。(2)回弹, 用固定关节将螺钉尾部锁死, 卸去角速度载荷, 用 10s 的时间模拟脊柱器械复合体的自由回弹过程。

本研究拟观察 3 个指标, 即矫形后剩余侧凸角、完成矫形所需最大扭矩、矫形期间螺钉所承受最大拔出力, 分别反映矫形效果、手术操作难度以

及手术安全与可靠性(如果矫形期间螺钉所承受最大拔出力超过螺钉最大抗拔出力, 则可能出现螺钉拔出, 影响手术安全及可靠性)。

1.3 内固定螺钉位置分组

根据置入椎弓根螺钉的腰椎节段(凹侧)位置的不同, 分为 6 个组(A、B、C、D、E、F 组, 表 2), 其中“+”表示在此腰椎上置入螺钉, “-”表示没有置入螺钉。6 个组的意义分别是: A 和 E 表示减少了固定节段, C 表示弧顶椎体不置钉, B 和 D 表示间断减少非弧顶的螺钉, F 组为五个椎体连续置钉。

2 结果

6 组(A-F)模型均经历置入螺钉和连接(矫形)杆、反旋转连接(矫形)杆、螺钉锁紧整体回弹这三个矫形步骤。矫形结束后的侧凸角分别为 30°、23°、25°、22°、29°、21°。完成矫形最大扭矩分别为 3.1N·m、3.3N·m、4.6N·m、3.4N·m、4.2N·m 和 3.3N·m。矫形期间螺钉所承受最大拔出力分别为 418N、383N、437N、395N、420N 和 380N。

3 讨论

3.1 对本研究结果的分析

从矫形后剩余侧凸角的数据来看, 减少固定节段范围(A 组和 E 组)矫形效果较差, 因此在矫形手术中保持一定的固定范围是有意义的。而减少弧顶椎体的螺钉(C 组), 将会使矫形时所需的最大扭矩增加, 换言之, 弧顶置钉后可以减少扭矩, 这可能是由于作用力臂缩短的关系。最大扭矩的减少则意味着临床矫形操作相对容易。临床手

表 1 有限元计算所采用的材料参数^[1]

材料	弹性模量 E(MPa)	泊松比 ν
密质骨	5000	0.3
松质骨	500	0.2
后部骨性结构	3500	0.25
椎间盘	3.15	0.45
钛合金	210000	0.3

表 2 内固定螺钉位置分组

组别	L1	L2	L3	L4	L5
A	-	+	+	+	+
B	+	-	+	+	+
C	+	+	-	+	+
D	+	+	+	-	+
E	+	+	+	+	-
F	+	+	+	+	+

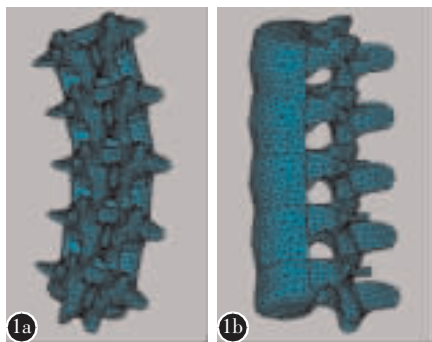


图 1 腰椎 L1~L5 的三维有限元网格模型 (a 冠状面 b 矢状面)

术中螺钉在反旋转及回弹阶段的最大拔出力,与矫形手术的效果及安全相关,本研究发现 B 组和 D 组减少了非弧顶的 L2 或者 L4 脊椎上的螺钉,其最大拔出力与对照组(F 组)接近,均较其他组小,因此此种组合的矫形效果及安全性相对具有优势。腰椎侧凸三维有限元模型的研究条件下,保持一定固定范围,间隔置钉而减少非弧顶螺钉,脊柱侧凸矫形仍然可以得到较好的效果。

3.2 关于脊柱侧凸矫形的螺钉位置

在确定脊柱矫形手术中螺钉位置(数量)时,用最少的固定螺钉来获取最佳的矫形效果已为共识。我们可以从两个途径达到这一目的,一是减少固定融合的范围,二是在规定范围内间隔置钉。融合范围的选择与脊柱侧凸的分类关系密切。King 分型于 1983 年提出,根据胸椎侧凸累及的脊椎范围和远端代偿性侧凸的功能结构状态,将胸椎侧凸分为 5 种类型,对不同类型确定了融合范围的选择原则。2001 年 Lenke 等^[2]提出了新的分型,包括三个组成部分:侧凸类型、腰弯修正型与矢状面胸弯修正型。但由于临床疾患的复杂性,对于如何选择融合节段的争论一直没有停止。

史亚民等^[3]较早提出了在固定节段内间隔置钉的观点,认为有计划的间隔置钉,不影响矫形效果,而且还可能降低并发症的发生率,但临床还是缺少大宗规范的对照研究。

3.3 本研究的局限性

本研究的局限性至少来自两个方面:一是有限元分析自身的局限性,二是本研究设计及实施中的不足。医学有限元分析是通过工程数学计算的方法来模拟临床医学中的力学状况,近年来发展迅速。最早在 20 世纪 70 年代国外便有学者涉及到脊柱侧凸的有限元分析,此后不断有学者应

用有限元分析与脊柱侧凸相关的肌肉平衡、运动控制、生长畸形过程等方面的研究^[4]。近年来又有关于有限元验证病理机制的假设以及模拟内固定装置等的报道^[4,5],尽管如此,有限元在脊柱侧凸方面的应用仍不能令人满意,这是由于脊柱侧凸自身的病理基础复杂,涉及的组织结构繁多,增加了有限元计算、建模的难度,反过来也影响了结果的准确性^[6]。国内开展该项研究只是在 2000 年以后,建立的脊柱侧凸三维有限元模型相对单一^[7]。

另一方面,本研究与临床实际存在差距。首先,在选择侧凸病例时,回避了临床更常见的胸椎侧凸,这是因为胸椎侧凸矫形时,胸廓对力学的影响十分复杂,计算难度大。即使在腰椎侧凸的计算中,本研究也是假定两侧肌肉是平衡的,而忽略了椎旁肌肉对内固定的影响等。其次,仅计算了矫形过程中占主导作用的凹侧内固定物,而实际手术中对侧还需加固定物,以维持矫形效果。

总之,本研究是借助有限元的手段,探讨临床中所遇到的问题:置入螺钉分布的位置对矫形效果产生的影响。鉴于上述的结果的局限性,只是尝试分析三维有限元模拟置钉位置对腰椎侧凸内固定手术的指导作用,其数据及结论仅供参考。

4 参考文献

1. Stokes IA, Gardnermorse M. Three-dimensional simulation of Harrington distraction instrumentation for surgical correction of scoliosis[J]. Spine, 1993, 18(16):2457-2464.
2. Lenke LG, Beta RR, Harms J, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis[J]. J Bone Joint Surg Am, 2001, 82(6):1169-1181.
3. 史亚民,侯树勋,李利,等.胸椎椎弓根螺钉固定矫治青少年脊柱侧凸[J].中国脊柱脊髓杂志,2000,10(4):200-202.
4. Tempieton A, Liebschner M. A hierarchical approach to finite element modeling of the human spine [J]. Crit Rev Eukaryot Gene Expr, 2004, 14(4):317-332.
5. Aubin C E. Scoliosis study using finite element models[J]. Stud Health Technol Inform, 2002, 91(2):309-313.
6. Lafage V, Dubousset J, Lavaste F, et al. 3D finite element simulation of Cotrel-Dubousset correction [J]. Computer Aided Surgery, 2004, 9(1):17-25.
7. 汪学松,吴志宏,王以朋,等.三维有限元法构建青少年特发性脊柱侧凸模型 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12(44):8610-8614.

(收稿日期:2010-05-25 修回日期:2010-08-17)

(英文编审 蒋欣/刘思麒)

(本文编辑 刘彦)