

寰枕融合伴寰枢椎脱位的三维非线性有限元模型的建立和分析*

徐崇喜¹, 唐彬², 曾夕航¹, 黄思庆¹, 马骏鹏^{1△}

1. 四川大学华西医院 神经外科(成都 610041); 2. 四川大学物理学院(成都 610065)

【摘要】目的 使用有限元技术建立正常寰枕枢椎三维非线性有限元模型及寰枕融合伴寰枢椎脱位三维非线性有限元模型,为上颈椎临床研究提供生物力学方法。**方法** 对1例27岁男性志愿者CT数据进行有限元分析,建立正常寰枕枢椎三维非线性有限元模型(正常模型)。对1例35岁寰枕融合伴寰枢椎脱位男性患者CT数据进行有限元分析,使用计算机模拟其在高载荷下单纯韧带断裂的理想状态,建立寰枕融合伴寰枢椎脱位的三维非线性有限元模型(寰枕融合伴寰枢椎脱位模型)。两种模型均在枕骨上表面施加竖直向上的1.5 N·m的扭矩,通过对两种模型在应力下前屈、后伸、侧弯、旋转活动度(ROM)数据做对比分析,以及在1.5 N·m扭矩下的应力与变形分析,验证两种三维非线性有限元模型的有效性。**结果** 研究建立的正常模型在1.5 N·m扭矩载荷下各单元前屈、后伸、旋转运动的最大运动范围与人体力学实验测量结果接近,显示出良好的仿真性,模型应力与变形结果符合力学基本原理,模型的扭矩-角位移表现出明显的非线性特征。寰枕融合伴寰枢椎脱位模型在1.5 N·m扭矩下其寰枕关节活动度与本次正常模型相比,寰枕关节活动度降低,而C1~C2关节活动度在4种情况(屈曲、后伸、侧弯、旋转)加载载荷后,除了旋转运动外,其余活动度均较正常模型有大幅度增加,符合患者临床实际表现。**结论** 通过有限元技术成功建立了寰枕融合伴寰枢椎脱位模型及正常寰枕枢椎三维非线性有限元模型。模型仿真性良好,运动学特征可靠,可以作为一种可靠工具模拟临床疾病。

【关键词】 寰枕融合 寰枢椎脱位 寰枕畸形 有限元模型

Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Modeling and Analysis of Concomitant Atlanto-Occipital Fusion and Atlantoaxial Joint Dislocation XU Chong-xi¹, TANG Bin², ZENG Xi-hang¹, HUANG Si-qing¹, MA Jun-peng^{1△}.

1. Department of Neurosurgery, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China

△ Corresponding author, E-mail: majunpenglj@163.com

【Abstract】Objective To establish, with finite element technology, a three-dimensional nonlinear finite element model of the normal occipital bone, atlas and axis and a three-dimensional nonlinear finite element model of concomitant atlanto-occipital fusion and atlantoaxial dislocation, providing a biomechanical method for clinical research on the upper cervical spine. **Methods** Finite element analysis was conducted with the CT data of a 27-year-old male volunteer, and a three-dimensional nonlinear finite element model, i.e., the normal model, of the normal occipital bone, atlas and axis was established accordingly. Finite element analysis was conducted with the CT data of a 35-year-old male patient with concomitant atlanto-occipital fusion and atlantoaxial dislocation. Then, the ideal state of a simple ligament rupture under high load was generated by computer simulation, and a three-dimensional nonlinear finite element model of concomitant atlanto-occipital fusion and atlantoaxial dislocation was established, i.e., the atlanto-occipital fusion with atlantoaxial dislocation model. For both models, a vertical upward torque of 1.5 N·m was applied on the upper surface of the occipital bone. Through comparative analysis of the two models under stress, the data of the range of motion (ROM) for flexion, extension, lateral bending, and rotation were examined. In addition, stress and deformation analysis with 1.5 N·m torque load was conducted to validate the effectiveness of the two three-dimensional nonlinear finite element models established in the study. **Results** When the normal model established in the study was under 1.5 N·m torque load, it exhibited a maximum ROM for each unit of flexion, extension, and the ROM approximated the experimental measurement results of human mechanics, confirming the validity of the simulation. The stress and deformation results of the model were consistent with the basic principles of mechanics. The moment-angular displacement of the model showed obvious nonlinear characteristics. Compared with the normal model, the atlanto-occipital fusion with atlantoaxial dislocation model showed reduced ROM of the atlanto-occipital joint under a torque of 1.5 N·m, while the ROM of the C1-C2 joint for the four conditions of flexion, posterior extension, lateral bending, and rotation under load, with the exception of rotating motion, was greatly increased compared with that of the normal model, which was in line with the actual clinical performance of the patient. **Conclusion** The atlanto-occipital fusion with atlantoaxial dislocation model and the three-dimensional nonlinear finite element model of the normal occipital bone, atlas and axis were successfully

* 四川省科技厅重点研发项目(No. 2020YFS0223)资助

△ 通信作者, E-mail: majunpenglj@163.com

established by finite element technology. The models had valid simulation and reliable kinematic characteristics, and could be used as a reliable tool to simulate clinical diseases.

【Key words】 Atlanto-occipital fusion Atlantoaxial dislocation Atlanto-occipital deformity Finite element model

寰枕、寰枢椎位置结构复杂,是常见的上颈椎损伤部位,损伤后常常造成患者渐进性脊髓损伤,出现严重并发症甚至死亡,需及时诊断治疗。但其相较于其他部位更为复杂的解剖结构,以及其“危险部位”的性质,均增加了手术治疗的难度与风险^[1-2]。如何有效地进行个体化治疗,提高内固定的成功率和降低远期并发症的发生率,一直是神经外科亟待解决的难题。目前,越来越多的学者通过有限元法构建了多种从颅底至颈3椎体(C3)等上颈椎的三维有限元模型^[3-4],模型构建方法及效果趋于成熟,为进一步研究其特殊结构的生物力学并以此指导临床实际提供了良好基础。

临床上先天性寰枕融合患者常伴有寰枢椎脱位^[5]。目前已有学者建立了寰枕融合模型^[6]以及寰枢关节脱位模型^[7],但寰枕融合伴寰枢椎脱位的模型国内外尚缺乏深入性的研究。本研究通过建立寰枕融合伴寰枢椎脱位的模型,以及与正常寰-枕-枢椎的三维非线性有限元模型的比较分析,为进一步研究其发病机制及选择最佳手术方案提供生物力学依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象和数据获取

正常结构模型数据来源:以1例27岁男性志愿者CT数据为对象建模,既往体健,检查排除颈椎疾病。寰枕融合伴寰枢椎脱位的模型数据来源:以我院1例35岁寰枕融合伴寰枢椎脱位男性患者为对象建立模型。本研究获四川大学华西医院生物医学伦理委员会批准(2021年审1392号)。

采用Siemens somatom Plus4螺旋机CT薄层扫描枕颅底到C3椎体,扫描条件:140 kV,200 mA,重建1 mm厚层,1 mm间距。计算机上对原始数据进行处理,重建水平面断层图、冠状面断层图、矢状面断层图以及获得三维重建图。并以国际标准Dicom格式储存。

1.2 方法

1.2.1 建立正常结构三维非线性有限元模型 三维几何模型:使用Mimics软件,首先对矢状面、冠状面和水平面蒙版进行裁剪,对枕骨、寰椎和枢椎蒙版内部部分空洞进行填充操作,对枕寰关节和寰枢关节蒙版连接部分进行擦除处理形成三维点云模型。使用Geomagic warp软件对破损或缺失面元进行修复,并对枕寰枢复合面体进行

光滑操作,形成几何实体模型(NURB曲面模型)。根据正常解剖位置添加上颈椎颅颈交接区各韧带形成完整的正常人几何实体三维模型。

使用有限元分析软件(ABAQUS)进行分析,骨性材料采用二次四面体单元(ABAQUS: C3D10),韧带采用link180单元(ABAQUS: T3D2),韧带结构模拟为只承受张力而不承受压力。分别在枕骨底部右侧边以及枕骨前侧边选取一个变形量监测点,从图1中可以发现,当网格数在20万~80万之间时,两个监测点的变形量增长趋缓,在网格数量为76.05万时几乎重合,因此后续使用该数量网格进行有限元分析。在Mimics软件中对C0~C3皮质骨(CT值360~3071 HU)的体积进行测量,发现其体积约为骨结构整体体积的一半,采用加权平均法定义枕寰枢复合骨性材料的杨氏弹性模量为7 750 Mpa。参考刘海波^[8]和ZHANG等^[9]的研究结果设置数据,各项材料参数如表1所示,边界条件及载荷见1.2.3。将以上数据输入模型,完成建模。

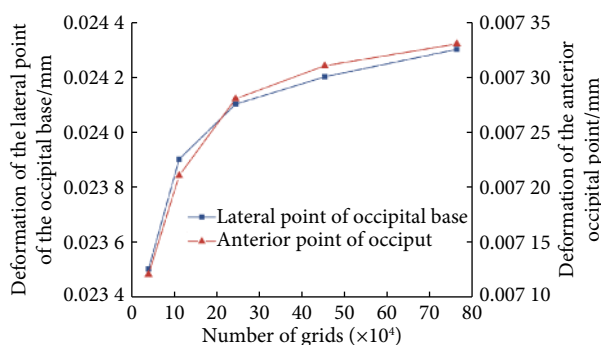


图1 有限元网格敏感性分析结果

Fig 1 Results of finite element mesh sensitivity analysis

1.2.2 建立寰枕融合伴寰枢椎脱位的模型 计算机模拟模型在高度载荷下单纯韧带断裂的理想状态,构建寰枕融合伴寰枢椎脱位的有限元模型。建模方法:首先同样使用Mimics软件以及Geomagic warp软件通过患者CT数据获得几何实体三维模型。初步模型建立后,参考前人制作寰枕融合有限元模型的方法^[6,10],在计算机上将整个寰枕关节定义为一个整体,添加单元格后,根据Kumaresan的理论^[11]运用库伦定律设计各接触面摩擦系数,并使寰枕关节表面保持粘连状态而无相对滑动。以此确保模型寰枕关节面在力矩下不发生位移的寰枕融合状态,并将其属性定义为皮质骨,其参数如表1所示。参考陈金水等^[7]

表 1 骨质与韧带材料参数
Table 1 Bone and ligament material parameters

Tissue	Poisson's ratio	Young' modulus
Cortical bone	0.2	15 000
Cancellous bone	0.2	500
Anterior atlantooccipitalis membrane	0.3	10
Posterior atlantooccipital membrane	0.3	1.5
Atlanto-axial membrane	0.3	10
Ligamentum flavum	0.3	1.5
Apical odontoid ligament	0.3	10
Alar ligament	0.3	5
Supraspinous ligment	0.3	1.5
Interspinous ligament	0.3	1.5
Transverse ligament	0.3	1.5

的寰枢椎脱位模型制作方法,在寰枕融合模型基础上去除所有C0~C1之间的韧带以及C2后方的横韧带,其余材料系数如前所述,边界条件及载荷见1.2.3,以此模拟寰枕融合伴寰枢椎前脱位的理想模型。

1.2.3 有限元模型加载计算和验证 边界条件: C3椎体以下各方向自由度为0,即完全固定。载荷: 寰枕与寰枢关节接触面定义为铰接触,枕骨上表面节点施加竖直向上的1.5 N·m的扭矩,并分为4种情况(前屈、后伸、侧弯、旋转)进行加载计算,从而模拟人体头颅活动时的生物力学响应。观察并分析模型在载荷前后和不同运动方向的Von-Mises应力(有效应力,通过计算 x 、 y 、 z 方向上的主应力值得到)分布,结果使用彩图展示。通过测量得出本次研究各FSU(脊柱功能单位)的角位移的结果,计算数据以活动度(ROM)表示。分析两种模型在前屈、后伸、侧弯、旋转4种情况载荷前后和不同运动方向的Von-Mises应力分布。测量得各FSU的角位移的结果,将寰枕融合伴寰枢椎脱位模型计算结果与正常模型以及寰枕融合模型、寰枢椎脱位模型的生物力学结果对比,在模型的非线

性特征、逼真性(即是否符合人体真实的运动规律)、可靠性(通过比较同类模型相同扭矩下在前屈、后伸、旋转等运动下的关节运动范围)等方面验证模型的有效性。

2 结果

2.1 成功建立正常模型以及寰枕融合伴寰枢椎脱位三维有限元模型

两种模型在加载扭矩初始阶段,模型角位移变化随扭矩的增大而增加,但当模型的总体刚度达到最大值后,扭矩-角位移曲线呈直线向上,表现了明显的非线性特征。1.5 N·m 扭矩下模型前屈、后伸、旋转运动的最大运动范围与临床实际测量结果接近,表现出良好的逼真性。研究建立的正常模型中,二次四面体单元10 000个,link180单元1 500个。而寰枕融合伴寰枢椎脱位模型中,模型二次四面体单元10 200个,link180单元1 300个。正常模型如图2A所示,其在Von-Mises应力及位移分布如图2B所示。寰枕融合伴寰枢椎脱位的三维非线性有限元模型如图3A,其应力及位移分布如图3B所示。

2.2 应力与变形结果

两种模型均在枕骨上表面施加竖直向上的1.5 N·m的力矩,其中正常模型的应力主要集中在颅骨薄壁处以及枢椎椎体前下侧(图4)。变形分布云图示在颅骨旋转的情况下,寰枕后膜主要承受着旋转带来的力学影响。图5示,寰椎侧块外侧与枢椎棘突距离旋转轴位置较远,固旋转条件下变形量较大。寰枕融合伴寰枢椎脱位模型的应力与变形如图6所示,寰枕关节作为一个整体,其应力范围在寰枕融合体中分布较为均匀,应力相对集中部位在其关节面绑定约束的位置附近,枢椎椎体下侧虽有韧带连接,但寰枢关节在后伸运动中的应力明显降低。两种模型应力与变形结果均符合力学基本原理。

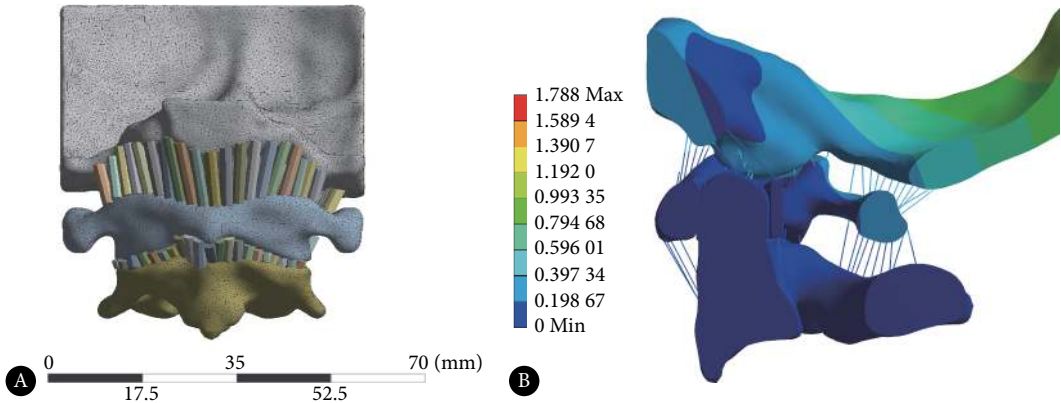


图 2 正常三维非线性有限元模型(枕寰枢段, A)和正常模型1.5 N·m扭矩下后伸位(B)

Fig 2 A three-dimensional nonlinear finite element model of a health volunteer (occipital atlantoaxial segment, A) and a model of normal person in the back stretch position under a torque of 1.5 N·m (B)

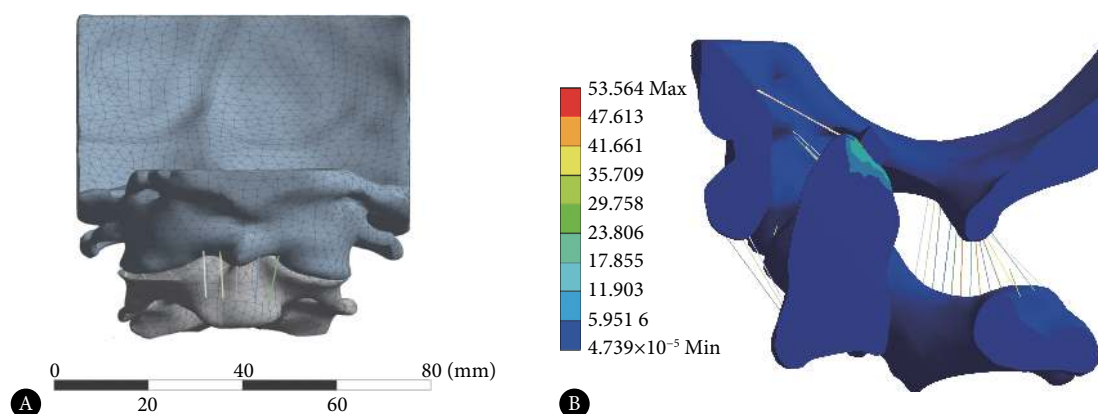


图 3 寰枕融合伴寰枢椎脱位模型 (A) 和寰枕融合伴寰枢椎脱位模型加载 1.5 N·m 扭矩后后伸位 (B)

Fig 3 A model of Atlanto-occipital fusion with atlantoaxial dislocation (A) and a model of Atlanto-occipital fusion with atlantoaxial dislocation in the posterior extension position under a torque of 1.5 N·m (B)

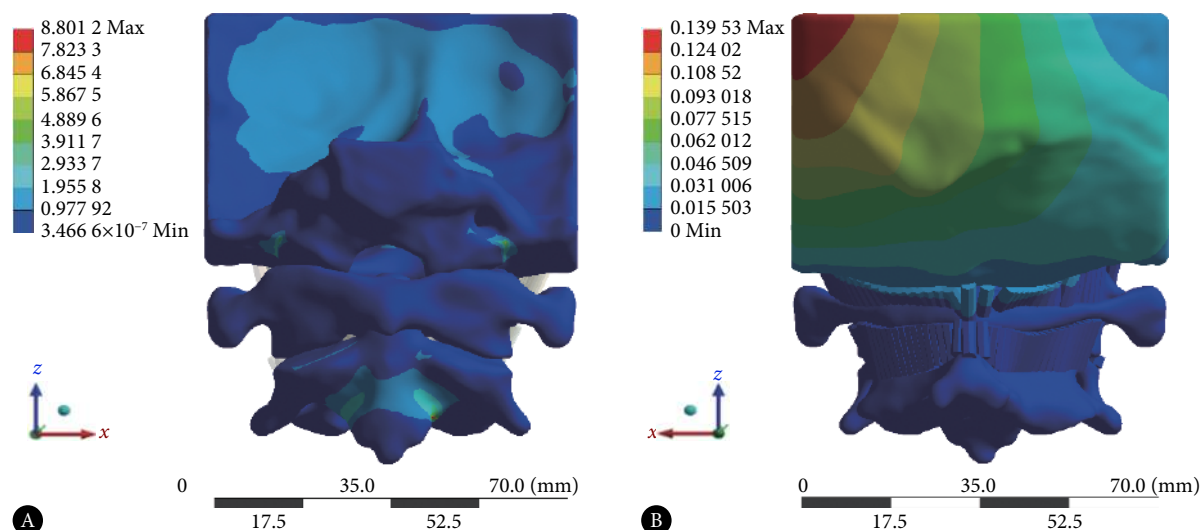


图 4 正常颅骨水平旋转条件下应力 (A) 与变形 (B) 图

Fig 4 Diagram of stress (A) and deformation (B) under normal horizontal rotation of the skull

2.3 ROM 计算及验证结果

正常模型在 1.5 N·m 扭矩下各 FSU 正常运动范围如表 2 所示。寰枕融合伴寰枢椎脱位的三维非线性有限元模型在相同扭矩下的运动范围以及与正常模型比较结果如表 3 所示。寰枕融合伴寰枢椎脱位模型较正常模型相比,寰枕关节活动度降低,而 C1~C2 关节活动度在 4 种情况(屈曲、后伸、侧弯、旋转)加载载荷后,除了旋转运动外,其余活动度均较正常模型有大幅度增加,符合患者临床实际表现,以上结果均显示此次模型仿真度良好。

3 讨论

由于上颈椎的结构复杂性,以及各种常规模型的局限性,该部位在生物力学方面研究相对较为缓慢。现有的动物模型、尸体模型以及物理模型在其制作、仿真以及指导临床等各方面均存在不足,极大限制了颅颈交界

区生物力学研究的进一步深入,导致利用常规生物力学研究的方法难以彻底解决上述复杂问题。

近年来许多研究者构建的颈椎有限元模型^[12-14],特别是寰枕枢椎三维有限元模型都表现出了良好仿真性,有效地模拟了上颈椎这一解剖复杂、特殊的结构。这对于指导后续寰枕交接区的临床研究,奠定了良好的理论基础。KOPPERDAHL 等^[15]和 RHO 等^[16]的研究理论已经证实骨密度、弹性模量以及 CT 值之前存在密切函数关系,即:弹性模量 $E(\text{Mpa}) = -97.1 + 2.130 \times \text{骨密度}$,而通过公式骨密度 $= 1.122 \times \text{CT 值} + 47$,又可以从 CT 值得出骨密度的值(式中骨密度均以 mg/cm^3 为单位)。所以理论条件下,通过 CT 值可以较为准确地计算出弹性模量。本次研究,我们参考了以上研究者的理论,使用 Mimics 软件,通过 CT 薄层扫描结果定义枕寰枢复合骨性材料的杨氏弹性模量,以便更加准确模拟人体真实情况。为了避免出现

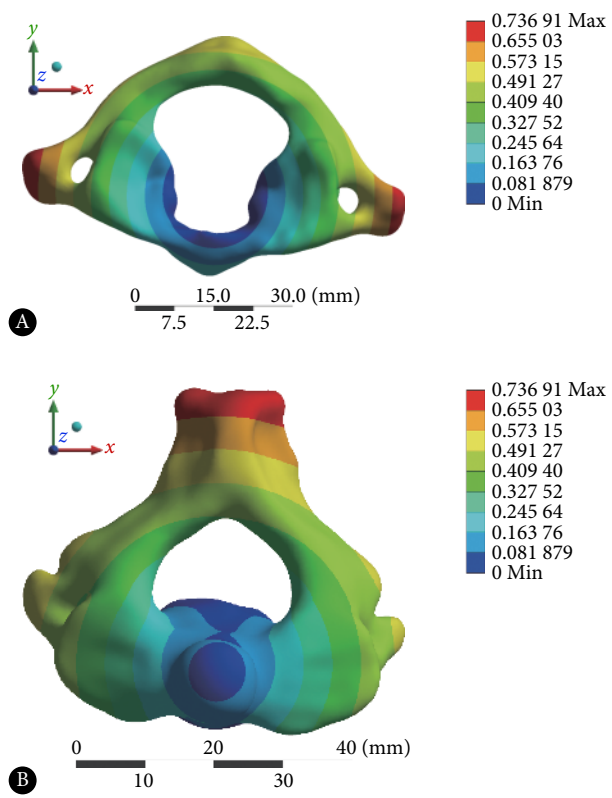


图 5 正常寰椎变形分布云图 (A) 和正常枢椎变形分布云图 (B)
Fig 5 Distribution atlas of normal deformation (A) and distribution atlas of normal axial deformation (B)

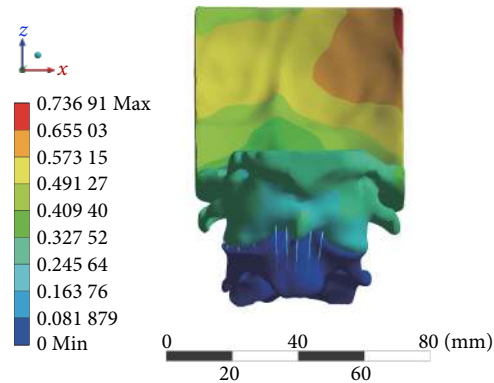


图 6 寰枕融合伴寰枢椎脱位模型应力变形图
Fig 6 Stress and deformation diagram of the model of atlanto-occipital fusion with atlantoaxial joint dislocation

“穿透错误”, 韧带应避免使用弹簧单元^[3]。此次研究参考了刘海波^[8]和ZHANG等^[9]的研究结果, 定义韧带的泊松比和弹性模量。文中骨性材料采用二次四面体单元, 四面体单元属于非结构化网格, 相较于结构化网格, 其更适用于多曲面复杂几何模型的网格划分; 韧带材料使用仅受拉力作用的link180单元, 以此真实模拟韧带松弛时不受力的现象。

由PANJABI等^[17]于1988年提出的以加载纯扭矩载荷

表 2 本次正常人模型各FSU正常运动范围ROM
Table 2 The normal range of motion (ROM) of each functional spine unit in the normal model

Segment	Flexion/°	Extension/°	Lateral bending/°	Rotation/°
C0-C1	10.5	16.1	4.2	7.2
C1-C2	12.2	11.3	4.8	38.2

表 3 1.5 N.m下两种模型活动度对比
Table 3 Comparison of ROM under 1.5 Nm torque in the two models

Condition	Segment	Normal model/°	Model of atlanto-occipital fusion with atlantoaxial dislocation/°
Flexion	C0-C1	10.5	0.21
	C1-C2	12.2	30.1
Extension	C0-C1	16.1	0.23
	C1-C2	11.3	26
Ateral bending	C0-C1	4.2	0.10
	C1-C2	4.8	12
Rotation	C0-C1	7.2	0.08
	C1-C2	38.2	30

的方式测试脊柱运动范围的方法, 是目前最为经典的评价脊柱稳定性的方法。目前已有大量研究^[7, 9-10, 17-18]证明了1.5 N·m纯扭矩载荷下, 有限元模型能够模拟正常人上颈椎的活动范围。本次实验也选择了1.5 N·m纯扭矩, 既能模拟正常人上颈段脊柱最大生理活动范围, 又在人体可承受的生理载荷之内, 不会对本造成破坏。正常人三维有限元模型的4种情况角位移结果与过往报道^[7, 9, 17-19]相同扭矩下的活动度比较, 结果基本一致, 其中C0 ~ C1屈曲活动度与过往报道相差最大为42.3%, 后伸活动度相差最大为27%, 侧弯活动度相差最大为28.5%, C1 ~ C2活动度对比, 屈曲位置相差最大为28.2%, 后伸相差最大为27%, 旋转相差最大为18.6%, 侧弯为23.7%。然而通过计算机模型模拟得到的数据与离体或在体研究的数据难以完全一致, 因所选用的材料属性来源不同以及实验所选用的标本不同, 均会导致解剖几何形状和生物材料特性的不一致。虽然此次正常人模型C0 ~ C1旋转活动度与夏虹等^[9]的研究数据相比, 存在较大差异, 但与PANJABI等^[17]的研究结果相比则基本符合, 因此我们认为模型是可靠的, 可以用来进行生物力学方面的研究。寰枕融合伴寰枢椎脱位模型在1.5 N·m扭矩下其寰枕关节活动度与正常模型相比, C0/C1活动度基本消失; 寰枢关节活动度对比, 屈曲位增加了59%, 后伸位增加56.5%, 侧弯增加60%, 旋转活动度减少27.3%, 可见稳定性极差, 符合患者临床实际表现。且与前人模型^[7, 10]相比较分析显示其兼具寰枕融合模型与寰枢椎脱位模型的特点, 显示此次模型仿真度良好。

研究所依据的图形数据通过CT薄层扫描的方法获得,并以国际标准Dicom格式储存。导入Mimics软件上完成操作后,以STL(三角形面元)格式导入至Geomagic warp软件中对破损或缺失面元进行修复,完成后以实体单元STP格式导出至ANSYS Workbench软件完成有限元分析。所有过程完全数字化操作,比传统的经过外部测量然后重新建模的方法所得到的模型精度有较大提高,同时避免了胶片扫描等传统方法对模型精度的误差,所得到的几何实体模型数据具有较高精确性。此次研究中正常枕寰枢模型与寰枕融合伴寰枢椎脱位模型加载载荷后的Von-Mises应力计算结果皆具有临床意义。以上结果均表明本次有限元模型的运动学特征可靠性,证明其可以作为一种可靠工具模拟临床疾病。

本次研究设计中,未对钩椎关节进行相关设定,虽然目前有关上颈椎有限元研究建模型中大多都忽略了钩椎关节的影响^[20],且其所得数据与离体生物力学研究结果有着较好的一致性,但在有限元模型中增加钩椎关节相关材料属性设定是否会对实验结果产生影响,仍然存在争议。其次,关于上颈椎有限元研究中,肌肉等软组织的参数设定非常复杂,目前大多有限元研究均忽略其对上颈椎力学的影响,或对其参数设定采取均一特性假定^[7]。本次研究中也未对肌肉等组织进行三维有限元重建,这可能造成模型数据与生理实际情况有一定差距。但随着有限元技术的发展与完善,相信以上问题均能得到解决。最终能够模拟出最真实的生理或病理状态下上颈椎的运动情况,通过该应用技术在临床上的运用,能够筛查高危病患,达到早期预防早期治疗的目的。也能够为颅底凹陷、寰枕融合且合并寰枢椎脱位的患者进行个体化治疗提供依据。并且能够通过软件上模拟各种手术方式,从而模拟不同内固定方式对上颈椎稳定性及活动的影响,帮助临床医师选择最佳手术方案,进而达到最佳的手术治疗效果。

* * *

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] 周定标, 张远征, 余新光, 等. 自发性寰枢椎脱位(附155例报告). *中华神经外科杂志*, 2000, 16(5): 270-273.
- [2] 余新光, 尹一恒, 周定标, 等. 颅颈交界畸形寰枢侧方关节与寰枢稳定性的关系. *中华神经外科杂志*, 2011, 27(10): 1029-1033.
- [3] 段光明. 枕寰枢关节非线性有限元模型构建及有效性验证. *中华神经外科疾病研究杂志*, 2014, 13(1): 73-74.
- [4] 郭群峰, 陈方经, 倪斌, 等. 带有颅底的全颈椎三维有限元模型的建立及分析. *中国脊柱脊髓杂志*, 2014, 24(6): 550-554.
- [5] 陈赞, 吴浩, 王兴文, 等. 寰椎侧块螺钉治疗寰枕融合合并寰枢椎脱位的临床报告. *脊柱外科杂志*, 2011, 9(3): 162-164.
- [6] 邓达人, 孟春玲, 陈宏健, 等. 基于流体力学网格技术建立寰枕融合的全颈椎有限元模型//第十三届中国CAE工程分析技术年论文集. 成都: 中国力学学会产学研工作委员会、中国机械工程学会机械工业自动化分会, 等, 2017: 63-65.
- [7] 陈金水, 倪斌, 陈博, 等. 寰枢椎脱位三维非线性有限元模型的建立和分析. *中国脊柱脊髓杂志*, 2010, 20(9): 749-753.
- [8] 刘海波. 上颈椎(C0-C3)有限元模型的建立及损伤内固定的分析. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [9] ZHANG Y K, LI C, LI L, *et al.* Design a novel integrated screw for minimally invasive atlantoaxial anterior transarticular screw fixation: a finite element analysis. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1): 11[2021-06-21]. <https://doi.org/10.1186/s13018-020-01764-w>.
- [10] 尹一恒, 余新光, 王鹏, 等. 寰枕融合下的颅颈交界区有限元生物力学分析. *中华外科杂志*, 2015, 53(3): 211-214.
- [11] KUMARESAN S, YOGANANDAN N, PINTAR F A, *et al.* Finite element modeling approaches of human cervical spine facet joint capsule. *J Biomechanics*, 1998, 31(4): 371-376.
- [12] BREKELMANS W A, POORT H W, SLOOFF T J. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts. *Acta Orthop Scand*, 1972, 43(5): 301-317.
- [13] SAITO T, YAMAMURO T, SHIKATA J, *et al.* Analysis and prevention of spinal column deformity following cervical laminectomy. I Pathogenetic Analysis of postlaminectomy deformities. *Spine*, 1991, 16(5): 494-502.
- [14] YOGANANDAN N, KUMARESAN S, VOO L, *et al.* Finite element applications in human cervical spine modeling. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1996, 21: 1824-1834.
- [15] KOPPERDAHL D L, MORGAN E F, KEAVENY T M, *et al.* Quantitative computed tomography estimates of the mechanical properties of human vertebral trabecular bone. *J Orthop Res*, 2002, 20(4): 801-805.
- [16] RHO J Y, HOBATHO M C, ASHMAN R B. Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone. *Med Eng Phys*, 1995, 17(5): 347-355.
- [17] PANJABI M, DVORAK J, CRISCO J J, *et al.* Flexion, extension, and lateral bending of the upper cervical spine in response to anterior ligament transections. *J Spinal Disord*, 1991, 4(2): 157-167.
- [18] BROUIN K, HALLDIN P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics. *Spine*, 2004, 29(4): 376-385.
- [19] 夏虹, 赵卫东, 黄文华, 等. 寰椎不同类型骨折对上颈椎稳定性影响的生物力学研究. *中国临床解剖学杂志*, 2003, 21(5).
- [20] KALLEMEYN N, GANDHIET A, KODE S, *et al.* Validation of a C2-C7 cervical spine finite element model using specimen-specific flexibility data. *Med Eng Phys*, 2010, 32(5): 482-489.

(2021-07-05收稿, 2021-12-07修回)

编辑 吕 熙