

## · 临床研究 ·

# 脊柱颈胸结合部(C<sub>6</sub>-T<sub>1</sub>)三维有限元模型的建立及有限元分析

马迅, 郭建鹏, 梁凯恒, 宋文慧

(山西医科大学第二医院骨科, 山西 太原 030001)

**【摘要】** 目的: 采取三维有限元的方法, 建立脊柱颈胸结合部有限元模型, 给予纯力矩载荷测试模型各 FSU 的正常运动范围, 验证模型的有效性并对其应力分布模式进行探讨。方法: 利用螺旋 CT 连续扫描获得正常成年人颈胸部原始 DICOM 数据图像, 采用 Mimics 软件进行数据处理后导入 ANSYS 软件, 得到颈胸结合部模型骨性结构的三维实体。添加椎间盘和主要韧带结构, 椎间盘采用壳-核单元, 分别代表纤维环与髓核; 韧带采用 2 节点缆索单元构造, 韧带的起止点及横截面积根据参考文献确定。C<sub>6-7</sub> 以及 C<sub>7</sub>-T<sub>1</sub> 关节突关节均定义为有摩擦系数的非线性接触关节。模型中 T<sub>1</sub> 下表面在所有方向上完全固定, 在模型 C<sub>6</sub> 施加 2.0 Nm 纯力矩, 对模型进行屈曲、背伸、侧屈及轴向旋转试验, 试验结果与体外生物力学试验进行对比验证。结果: 所建的颈胸模型包括 169 317 个节点和 106 242 个单元, 并且与体外生物力学试验结果基本吻合, 能够通过验证, 有限元受力云图可以看出, 模型在外力作用下运行状况良好。结论: 该试验为临床医生对脊柱颈胸交界区的三维有限元模型的建立提供了一种便捷而精确的方法, 为计算机分析及研究该模型局部结构在各种受力情况下的生物力学表现创造了条件。

**【关键词】** 颈椎; 胸椎; 有限元分析; 生物力学

DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-0034. 2010. 01. 002

## Establishment and analysis of a three-dimensional finite element model of human cervicothoracic junction (C<sub>6</sub>-T<sub>1</sub>)

MA Xun, GUO Jian-peng, LIANG Kai-heng, SONG Wen-hui. Department of Orthopaedics, the Second Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi, China

**ABSTRACT** Objective: To establish the cervicothoracic spine finite element model with three-dimensional finite element method, verify the effectiveness of this model and explore the stress distribution. Methods: DICOM image data of one normal healthy young male volunteer were obtained by spiral CT scan and processed with Mimics software. Datas were imported to ANSYS software to become a 3D entity. Disc structure and the main ligament were added. Disc structure was added using the shell-nuclear unit, representing the annulus fibrosus and nucleus pulposus. Ligament structure was established with 2-node cable element, the beginning and ending points of the ligament and the cross-sectional area were determined in accordance with references. C<sub>6,7</sub> and C<sub>7</sub>T<sub>1</sub> facet joints were defined as the nonliner contact joints with friction coefficient. The lower surface of T<sub>1</sub> in all the directions was completely fixed in this model. In the model 2.0 Nm pure torque were imposed on C<sub>6</sub>, and the extension, flexion, axial rotation and lateral bending experiment were conducted. The experimental results were compared with the in vitro biomechanical tests. Results: The cervicothoracic spine finite element model included 169 317 nodes and 106 242 units, and consistent with the in vitro biomechanical tests. The three-dimensional finite element model was in good running under external force. Conclusion: It is a convenient and precise method for physicians to establish the finite element model of the cervicothoracic junction. This method facilitates the computer study on the biomechanical behavior of the local structures of the model under various pressure conditions.

**Key words** Cervical vertebrae; Thoracic vertebrae; Finite element analysis; Biomechanics

Zhongguo Gushang/China J Orthop & Trauma, 2010, 23(1): 5-8 www.zggszz.com

随着计算机技术的发展, 计算机模拟生物力学试验模型, 如有限元模型为我们提供了一个较为理想的研究生物力学方法, 相对于其他的试验方法而言, 有限元模型可在持续性研究中重复及改变任何试验对象的基本参数。因此, 对临床研究来讲, 有限

元模型可以说是对人体体外生物力学试验研究很有价值的补充<sup>[1-2]</sup>。脊柱颈胸椎结合部是从比较柔韧、具有灵活运动功能的颈椎向相对固定、运动度较小的胸椎过渡的区域, 同时为生理曲度从前凸转向后凸之移行处, 通常是指从 C<sub>7</sub> 到 T<sub>3</sub> 的解剖范围<sup>[3]</sup>。临

床上因为此处的解剖结构复杂、影像学显影不清等诸多因素,此处的外伤常常被漏诊或延迟诊断。治疗脊柱颈胸段的创伤、退变及肿瘤等疾病,无论是手术入路还是针对椎体切除后进行的内固定,都具有极大的挑战性。本课题应用薄层 CT 数据进行颈胸交界区及其相关结构的计算机三维重建,力求建立颈胸结合部的可视化模型及相关的有限元模型,以期为该区病变的影像诊断及手术的设计和手术方式的选择提供形态学的依据,为生物力学的研究提供有益的补充。此外,本模型的建立也可以应用于临床内固定器械的设计以及手术术式的分析,为以后将有限元方法推广到临床疾病的治疗奠定了基础。

**1 资料和方法**

**1.1 资料** 选取 1 名 25 岁正常健康男性志愿者,既往无颈胸部外伤、手术或其他疾病史。体格检查颈椎活动正常,试验前摄 X 线片排除骨性异常与脊柱畸形,采用 GE 螺旋 CT 机对健康志愿者颈胸部行螺旋扫描及断层。要求体检者取仰卧位,尽量保持扫描断面与身体长轴垂直。扫描范围:从 C<sub>3</sub> 椎体中部到 T<sub>2</sub> 椎体下部的连续断层图像。重建后层厚 0.625 mm,得到 275 幅大小为 515×515 像素的断层图像,该部位的断层层厚<1 mm,因为层厚越薄由其建立的三维图像越精细,为以后行颈胸部有限元分析提供更为准确的原始数据。

**1.2 方法**

**1.2.1 几何模型的建立** 将 DICOM 格式的 CT 数据导入到三维重建软件 Mimics 中。使用图像定位功能规定方向,定位后软件自动形成各层面骨组织窗轮廓曲线。选择建模所需区域的骨质后,调整对比度,自动去除不相连于此灰度值范围内的区域,界定目标阈值范围。删除 C<sub>6</sub> 以上、T<sub>1</sub> 以下的图片后使用编辑工具对每层图像进行编辑处理,包括 Threshold (选择界定阈值范围内的区域)、Draw (选择界定阈值范围外的区域,如松质骨中的孔隙)、Erase (删除不需要的区域);使用区域生长工具进行编辑区域的延伸,同时将图片编辑过程中可能产生的离散杂点去掉。按照此法依次使用不同的颜色标记分割出 C<sub>6</sub>-T<sub>1</sub> 椎体和部分肋骨的图片,此过程共编辑需要参与后续建模的图片 216 张。使用 Mimics 自带的 Magics 9.9 网格划分工具,对重建的三维图像进行表面网格化,然后将 Mimics 中生成的颈胸结合部表面骨骼几何模型三维面网格文件存储为 ANSYS 可识别的后缀为“.lis”的文件,准备下一步处理。

**1.2.2 三维有限元模型的建立** 依次将模型的节

点文件和单元文件导入 ANSYS 软件中,依据解剖学著作<sup>[4-6]</sup>以及参考 CT 结果,准确在 ANSYS 中给骨性模型添加椎间盘、韧带。运行 ANSYS 程序的实体生成功能(Volume Meshing 基于表面网格生成实体)自动划分生成基于有限元网格实体模型,并采用自动网格划分生成节点和单元,给模型赋材料属性,建立完整的脊柱颈胸结合部的有限元模型(见图 1)。椎间盘采用壳-核单元,分别代表纤维环与髓核。韧带采用 2 节点缆索单元构造,韧带的起止点及横截面积根据参考文献<sup>[7]</sup>确定。本模型包括韧带有:前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带。

**1.2.3 加载计算准备工作**

**1.2.3.1 建立接触对** 本研究将相邻关节面间的运动关系定义为非线性接触。选定模型中关节表面单元的节点建立一个组件,相邻关节组件间建立接触对单元。本研究共建立 4 个接触对(对称性接触),分别代表 C<sub>6-7</sub> 以及 C<sub>7-T1</sub> 椎体关节突关节之间的接触。

**1.2.3.2 约束边界及加载设置条件** 约束边界:模型中 T<sub>1</sub> 椎体下表面和下关节突所有节点各方向位移均为 0 mm,模型的上半部分不受任何约束。假设条件:本试验所涉及的生物材料的材料力学特性均假定为均质、连续和各向同性。受力时模型各单元有足够的稳定性,不计材料受力变形。在模型的上表面施加 2.0 Nm 的力矩,使模型产生前屈、后伸、侧屈及旋转运动。

**1.2.4 三维有限元模型的验证** 模型各脊柱基本功能单位(FSU)的运动与体外生物学试验范围(ROM)对比,在相同的载荷下角位移接近,即为有效。

**2 结果**

**2.1 重建模型显示正常** 在选取的正常健康青年男性 CT 扫描中,颈胸部各结构显示良好,根据其解剖结构的特点模拟其椎体、钩椎关节、关节突关节、横突孔以及部分肋骨等结构,在 Mimics 自带的 Magics 9.9 网格划分工具进行光滑处理后,立体重构了脊柱颈胸交界部所有的骨性结构,重建结构均能单独显示、任意搭配显示或总体显示,既便于单一形态结构的观察,又便于显示某一结构在整体中的位置关系。所有结构均可在三维空间位置上绕任意轴旋转任意角度,或者以不同的速度连续旋转,便于从不同的显示面对整个结构的形态、空间位置及毗邻关系进行观测。并且,所有结构在任意方向上的径线和角度,均可适时测量,便于进行重建结构的定量研究。

**2.2 重建模型的有效性验证** 各功能单位的角位

移均分布在与体外生物力学试验结果平均值的一个范围内,见表 1。模型验证得到的结果与体外试验基本一致,模型可用于进一步的试验研究。

表 1 重建模型的有效性验证

**Tab.1 Validation of the finite element model**

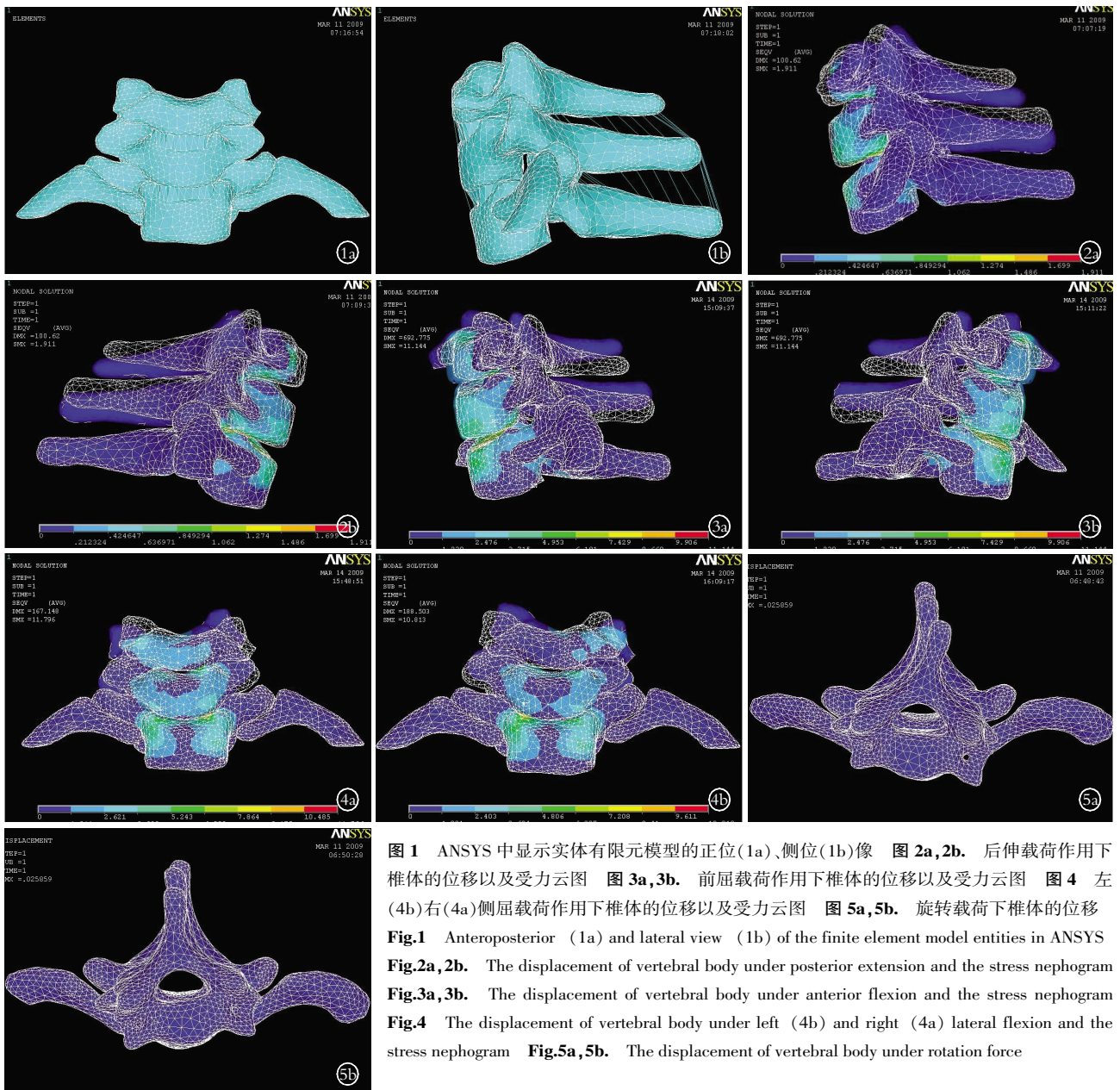
加载方式	体外生物力学试验		试验模型	
	C <sub>6-7</sub>	C <sub>7-T<sub>1</sub></sub>	C <sub>6-7</sub>	C <sub>7-T<sub>1</sub></sub>
屈-伸(°)	16(1~29)	9(4~17)	24	15
旋转(°)	9(6~15)	8(5~13)	11	10
侧屈(°)	7(0~17)	4(0~17)	15	13

**2.3 有限元模型在加载外力作用下工作运行状况良好** 在模拟后伸载荷作用下的模型应力分布图可以看出:椎体的后缘应力比较集中(见图 2)。在模拟

前屈载荷作用下的模型应力分布图可以看出:应力在椎体上比较集中且由前向后逐渐降低,其中应力最大处位于椎体前缘(见图 3)。在左右侧屈载荷作用下的模型应力分布图显示:C<sub>7</sub>、T<sub>1</sub>椎体左右缘应力比较集中(见图 4)。在旋转载荷作用下的有限元模型(见图 5)。图 2-5 白色网格代表中立位,蓝色实体均代表移动后的位置。

**3 讨论**

近些年,随着计算机技术的发展,有限单元法应用于人体生物力学研究显示了极大的优越性,也取得了长足的进步与发展。有限元分析一方面可以降低试验成本,节省时间,消除标本间个体差异;另一方面还能够随意控制试验条件,它可以根据需要产生



**图 1** ANSYS 中显示实体有限元模型的正位(1a)、侧位(1b)像 图 2a,2b. 后伸载荷作用下椎体的位移以及受力云图 图 3a,3b. 前屈载荷作用下椎体的位移以及受力云图 图 4 左(4b)右(4a)侧屈载荷作用下椎体的位移以及受力云图 图 5a,5b. 旋转载荷下椎体的位移

**Fig.1** Anteroposterior (1a) and lateral view (1b) of the finite element model entities in ANSYS Fig.2a,2b. The displacement of vertebral body under posterior extension and the stress nephogram Fig.3a,3b. The displacement of vertebral body under anterior flexion and the stress nephogram Fig.4 The displacement of vertebral body under left (4b) and right (4a) lateral flexion and the stress nephogram Fig.5a,5b. The displacement of vertebral body under rotation force

无数个各种各样的标本, 同一个标本在虚拟计算中可进行无数次加载或组合而不会被损坏, 标本也可以进行修正以模拟任何病理状态。不但可以测得外部的受力情况, 而且还可以通过参数研究(改变某种或某些结构的材料属性) 定量分析试验对象内部的应力变化<sup>[8-9]</sup>。

本模型的骨骼几何特征是通过专业软件 Mimics 软件直接从薄层(层厚 0.625 mm) CT 扫描数据(DICOM 格式)读取并进行测量与定位, 几何结构与形状较好地模拟了颈胸结合部节段, 在 Mimics 中对图像处理后将数据直接转化为有限元软件 ANSYS 可读取的格式。这种基于薄层 CT 和 DICOM 格式数据直接进行几何建模能精确反应骨骼的解剖轮廓。此外, 通过 Mimics 建立的几何模型还保存有骨骼内部的密度信息, 从而为根据不同的密度赋予不同的材料属性提供便利。

导入先进的 ANSYS 有限元分析软件对模型进行进一步的处理, 使得模型更为精确。根据综合各家解剖描述和图片所反映的几何特征和结构特点, 合理选择单元类型, 简化了模型的数量, 使之更为简单、有效。

有限元模型的合理与否主要通过模型验证确定, 只有通过验证证明合理才能将模型运用于进一步研究, 如果验证不合理, 那么该模型所得出一切试验分析结果将是不准确甚至错误的<sup>[1-2]</sup>。本试验根据体外生物力学的试验结果对模型进行了对比和调整, 增加了模型的有效性。

本模型包括 C<sub>6</sub>-T<sub>1</sub> 椎体, C<sub>6-7</sub>、C<sub>7</sub>-T<sub>1</sub> 两个椎间盘以及后部结构椎板、椎弓根、棘突等, 同时还包括前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘上韧带、棘间韧带等。

在模拟外加力的作用下, 对模型进行屈曲、后伸、侧屈以及旋转试验, 模型的试验结果与体外的试验结果基本一致, 更加接近解剖特点, 更加符合临床要求。

有限元模型为我们提供了一种新的解决问题的思路, 减少了我们对动物和尸体试验的依赖, 是临床研究不可缺少的工具。毫无疑问, 有限元分析对脊柱生物力学研究产生了重要的影响, 并且这种影响还会继续扩大。

参考文献

- [1] Yoganadan N, Kumaresan S, Voo L, et al. Finite element applications in human cervical spine modeling (Review). Spine, 1996, 21 (15): 1824-1834.
- [2] Panjabi MM. Cervical spine models for biomechanical research. Spine, 1998; 23 (24): 2684-2700.
- [3] Knöller SM, Brethner L. Surgical treatment of the spine at the cervicothoracic junction, an illustrated review of a modified sternotomy approach with the description of tricks and pitfalls. Arch Orthop Trauma Surg, 2002, 122(6): 365-368.
- [4] Agur AMR, Lee MJ. Grant's atlas of anatomy. 10th edit. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 1999. 235-300.
- [5] Soames RW. Skeletal system. In: Williams PL. Gray's anatomy. 38th edit. New York: Churchill Livingstone, 1995. 425-736.
- [6] Staubesand J. Sobotta atlas of human anatomy: Head, neck, upper limbs, skin. 11th English edit. Munich: Urban Schwarzenberg, 1990. 142-189.
- [7] Goel VK, Clausen JD. Prediction of load sharing among spinal components of a C<sub>5</sub>-C<sub>6</sub> motion segment using the finite element approach. Spine, 1998, 23(6): 684-691.
- [8] 贾连顺, 袁文, 王岩, 等. 现代脊柱外科学. 北京: 人民军医出版社, 2007. 55.
- [9] 任中武, 张美超, 倪斌, 等. 上颈椎三维非线性有限元模型的建立及其有效性分析. 脊柱外科杂志, 2007, 6: 159-162.

(收稿日期: 2009-08-11 本文编辑: 连智华)

广告目次

1. 盘龙七片(陕西盘龙制药集团有限公司) …… (封 2)	4. 祛风止痛胶囊(咸阳步长制药有限公司) …… (对封 2)
2. 好及施、曲安奈德(广东省医药进出口公司珠海公司) …… (封 3)	5. 施沛特(山东福瑞达医药集团公司) …… (对中文目次 1)
3. 青鹏膏剂(西藏奇正藏药股份有限公司) …… (封底)	6. 颈复康颗粒、腰痛宁胶囊(承德颈复康药业集团有限公司) …… (对正文首页)