

全颈椎三维有限元模型的建立

Three-dimensional finite element model of the whole cervical spine

陈 强¹, 侯铁胜¹, 杨国标², 何大为¹, 石志才¹, 傅 强¹

(1. 第二军医大学长海医院骨科, 上海 200433; 2. 同济大学航空航天与力学学院, 同济大学固体力学教育部重点实验室, 上海 200092)

[摘要] **目的:**建立全颈椎(C1~T1)三维有限元模型。**方法:**根据一健康成年男性志愿者的颈椎 CT 与 CT 重建片, 采用断层 CT 扫描序列图像的自动重建方法, 建立全颈椎(C1~T1)三维有限元模型。**结果:**本研究成功的建立了全颈椎三维有限元模型, 它包括 C1~T1 共 8 个椎体, 本模型高度模拟颈椎结构与材料特性, 结构完整, 空间结构的测量准确度高, 单元划分精细, 共有节点数 166 979, 单元数 12 177。**结论:**所建立的全颈椎有限元模型可以用来进行颈椎生物力学实验。

[关键词] 颈椎; 有限元分析; 成像, 三维

[中图分类号] R 322.71

[文献标识码] B

[文章编号] 0258-879X(2006)05-0554-02

有限元方法是目前应用较广泛的一种数学计算方法, 是矩阵方法在结构力学和弹性力学等领域中的发展和应用。目前在脊柱外科, 对腰椎的有限元研究比较深入, 但由于颈椎的解剖较为复杂以及三维建模的工作量大且单元划分至恰当的密度亦困难等原因, 颈椎有限元模型的建立和应用则起步比较晚^[1,2], 本研究拟根据 CT 扫描图片建立用于生物力学分析的全颈椎三维有限元模型, 希望通过这种方法能对颈椎的生物力学研究提供帮助。

1 材料和方法

1.1 样本的获得 对一健康成年男性志愿者(男, 28 岁, 身高 175 cm, 体质量 70 kg, 无既往颈椎病史)的颈椎进行 CT (Somatom Plus-s CT) 断层成像; 在 CT 成像过程中, 要求志愿者颈椎位于扫描视野中心, 保持纵轴方向不动, 扫描范围从 C0~T1, 所得到的 180 张 CT 图片的空间分辨率为 0.261 718 75 mm×0.261 718 75 mm×1.0 mm, 各断层图像以 512×512 像素的 DICOM 格式保存图像数据。

1.2 设备 硬件: Dell Presion TM 650 工作站, 双 Xeon TM 2.8 G, CPU 内存 3 G, 显卡 NVIDIA Fx1000, 显存 256 MB。软件: 大型有限元分析软件 ANSYS7.0; 绘图软件 Auto-CADR14.0; 图像处理软件 Photoshop 7.01; 同济大学自行研发的图像提取工具 jpegTestfinal 和建模软件包。

1.3 二维数据的前处理

1.3.1 将 CT 的 DICOM 图片处理为数据 为了以后数据便于处理, 利用程序将 DICOM 图片全部转换为 BMP 格式。共得到 180 张具有 256 个灰度级的索引式的 BMP 图片。

1.3.2 二维数据的前处理 在原始的 BMP 格式的 CT 断层扫描图片中, 由于在成像过程中骨松质和韧带等某些软组织的灰度处于同一等级, 很难进行区分, 所以首先需要图像进行前处理。利用轮廓提取和阈值分割的方法提取出骨骼, 得到骨骼图像。

1.4 材料属性的设定

1.4.1 椎骨的材料属性 由于实验条件的限制等原因, 本实验把骨看作一种各向同性的弹性材料来做近似处理, 根据

CT 值设定椎骨的弹性模量。本研究中将椎骨的弹性模量分为 256 个等级, 同样也将 CT 值划分为 256 个灰度等级。这样每个灰度级对应一个弹性模量值。实际上, 我们可对椎骨的 256 个弹性模量等级采用一个合适的弹性模量值来判断椎骨属于骨松质或骨密质。通过计算可知骨盆松质骨的密度范围是: 0.4~1.2 g/cm³, 弹性模量范围: 184~4 968 MPa; 密质骨的密度范围是: 1.7~2.0 g/cm³, 弹性模量范围: 14 124~23 000 MPa。

1.4.2 韧带、椎间盘的材料属性 韧带、椎间盘的材料属性各家报道不一, 我们按参考文献^[3]进行计算, 椎间盘(包括纤维环和髓核)为 8 节点实体单元, 弹性模量为 3.4 MPa, 泊松比 0.4; 前后纵韧带、黄韧带、棘间及棘上韧带、小关节关节囊均为 2 节点索单元, 非线性材料特性。

1.5 建模方法 ANSYS 程序提供了两种建立模型的方法: (1)通过点-线-面-体创建一个模型, 然后进行网格划分, 生成节点和单元。(2)直接通过生成节点和单元来描述模型。因颈椎体积小、结构复杂, 现阶段对颈椎实体模型进行网络划分难度极大, 且准确性不高, 进行计算存在困难。因此本研究采用直接生成节点、单元的方法, 即首先将志愿者的头颈部进行 CT 断层成像; 在 CT 成像过程中, 要求标本在骨盆纵轴方向保持不动, 每隔 1 mm 扫描 1 次。所得图像直接存入 CT 机, 刻录光盘, 得到表示头颈部每层横截面的图像, 然后生成建立有限元模型所需的文件流, 将文件流输入 ANSYS 软件, 依次生成椎体后得到三维有限元模型。

2 结果

参照前述骨模型, 运行编写的程序生成建立有限元模型所需的文件流, 将文件流输入 ANSYS 软件, 依次生成 C1~T1 椎体(图 1A)。根据从 CT 图片中提取出来的韧带的图片信息, 运行后计算韧带横截面积, 找到韧带分布部位, 确定韧带在椎体模型上起止点位置的三维坐标, 将其起止点确定在

[作者简介] 陈 强, 博士, 主治医师。

E-mail: chenqianghn@126.com

椎体模型的节点上。即建立全颈椎有限元模型(图1B)。本模型高度模拟颈椎结构与材料特性,结构完整,空间结构的测量准确度高,单元划分精细,共有节点数166 979,单元数12 177,远远超过了以前所建立的模型的单元和节点数。同时韧带结构采用非线性结构计算,骨的弹性模量分为256个等级,而非简单的区分骨密质和骨松质,更加接近解剖特点和临床要求,使得模型与结构更加精确。

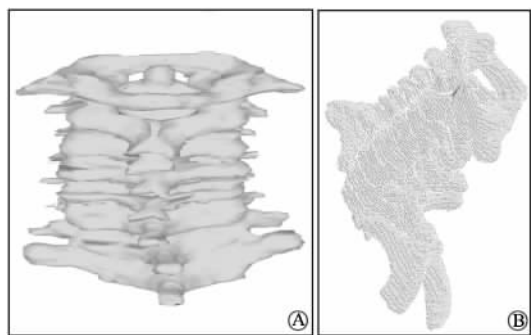


图1 全颈椎几何模型图(含T1,A)和全颈椎有限元模型(B)

3 讨论

生物力学模型是研究颈椎伤病的基础,通过对模型的观察测试,可了解伤疾病的发生机制并提出诊治策略,因此生物力学模型的应用一直在颈椎伤病研究中占据重要地位,根据构成的特点和用途分为物理学模型、体外模型、体内模型和计算机模型。随着计算机技术的发展,特别是有限元分析软件的不升级换代,近年来三维有限元方法在生物力学研究领域得到广泛的应用。有限元方法应用的范围与数年前比较,涉及脊柱、髋关节、骨盆、锁骨、膝关节、踝关节、软骨等领域,从线性分析到非线性分析,从静态分析发展到动态分析频率响应。

由于颈椎在几何形状上的不规则性和组成物质的非均匀性以及用人体做力学试验的不可能性,近年来在颈椎损伤的生物力学^[4]研究中,有限元方法由于对复杂结构分析有独特优势,其在脊柱生物力学研究中的应用日益受到重视。其原理是利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟,通过简单而又相互作用的元素(单元),用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统,模仿真实世界,创建三维环境,评估研究对象承载能力与其组织形态学之间的关系。有限元分析可利用任意形状的网络来分割区域,并根据场函数需要自如布置节点,因而对复杂结构有较好适应性。脊髓结构、形态、材料、性能以及承载等方面都比较复杂,采用有限元方法研究脊髓及其损伤的生物力学具有独特的价值。因此有限元分析是一个十分理想、对身体无任何破坏的颈椎生物力学研究分析工具。

本研究有限元模型的特点:(1)根据正常的人体的颈椎CT片进行建模。模型包含成分复杂,包括C1~T1椎体以及后部结构(椎板、椎弓根以及相应韧带),相比以前的模型更加接近真实。(2)有限元方法作为一种计算方法,其结果依赖于单元数目、类型以及分析中所做的假设。本研究的

有限元模型高度模拟颈椎结构与材料特性,结构完整,空间结构的测量准确度高,单元划分精细,共有节点数166 979,单元数12 177,远远超过了以前所建立的模型的单元和节点数。同时韧带结构采用非线性结构计算,骨的弹性模量分为256个等级,而非简单的区分骨密质和骨松质,更加接近解剖特点和临床要求,使得模型与结构更加精确。(3)建成的模型可以任意旋转观察,模型形态与颈椎的解剖形态具有满意的相似性,可任意切割,并可通过调整模型的几何材料参数以模拟不同临床与实验状态。通过对模型单元和材料属性的调整可以建立颈椎伤病模型。(4)软件是有限元技术的生命线,我们所采用的ANSYS软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件,它在该领域中,第一个通过ISO9001质量认证,能与多数CAD软件(如Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I-DEAS、AutoCAD等)接口,实现数据的共享和效换。

从结果来看,本研究运用有限元方法建立的全颈椎三维有限元模型高度模拟颈椎结构与材料的特性,具有结构完整,空间结构的测量准确度高,单元划分精细,重点突出的特点。本模型可进行任意旋转观察,模型形态与颈椎的解剖形态具有满意的相似性,可任意切割,并可通过调整模型几何及材料参数以模拟不同临床与实验状态。

虽然理论上有限元法适用于任何复杂结构,但在脊柱生物力学研究中仍有许多问题^[5]待解决:(1)有限元模型能够反映机体某一刻、某一点的力学特性,但生物体本身是有组织活性的都有一个生长、成熟和衰退的过程;(2)一些受损组织具有自我修复和塑形的能力,当前的有限元模型在生物体的适应性方面显得无能为力;(3)椎体、韧带、椎间盘等组织的力学性质极其复杂,难以得到足够和可靠的测定数据,而离体实验所得的数据可能与生理情况存在差异;(4)就目前情况而言,组织材料的各向异性、不均匀性和非线性等使自身的结构关系难以确定;(5)单元的划分、节点的选择、载荷及边界条件的规定在一定程度上是人为的,目前颈椎有限元模型尚有一定的局限性,需要与一些实验结果进行比较,进一步核实。

[参考文献]

- [1] Bozic KJ, Keyak JH, Skinner HB, et al. Three-dimensional finite element modeling of a cervical vertebra: an investigation of burst fracture mechanism[J]. J Spinal Disord, 1994,7:102-110.
- [2] 程黎明,贾连顺,黄本才,等. 下颈椎三维有限元模型的建立[J]. 第二军医大学学报,2003,24:338-340.
- [3] 陈伯华,孙鹏,Natarajan N,等. 颈椎三维有限元模型的建立及意义[J]. 中国脊柱脊髓杂志,2002,12:105-108.
- [4] Kumaresan S, Yoganandan N, Pintar FA. Finite element analysis of anterior cervical spine interbody fusion[J]. Biomed Mater Eng,1997,7:221-230.
- [5] 张平,李健,程立明. 有限单元法在脊柱生物力学应用研究进展[J]. 中国临床解剖学杂志,2003,21:640-641.

[收稿日期] 2005-10-29

[修回日期] 2006-02-27

[本文编辑] 曹静