

先天性寰枢椎脱位计算机模型生物力学研究进展

王坤 王兴文 菅凤增

【关键词】 脱位； 生物力学； 计算机模拟； 寰枢关节； 综述

【Key words】 Dislocations; Biomechanics; Computer simulation; Atlanto-axial joint; Review

DOI: 10.3969/j.issn.1672-6731.2012.01.020

Advance in biomechanical research of computer simulation of congenital atlanto-axial dislocation

WANG Kun, WANG Xing-wen, JIAN Feng-zeng

Department of Neurosurgery, Xuanwu Hospital, Capital Medical University, Beijing 100053, China

Corresponding author: JIAN Feng-zeng (Email: fengzengjian@hotmail.com)

寰枢椎脱位(AAD),系指先天畸形、创伤、退行性病变、肿瘤、炎症和手术等因素造成的寰椎与枢椎(第1和第2颈椎)骨关节面失去正常的对合关系而发生的关节功能障碍和(或)神经压迫性病理改变,由脱位引起的脊髓受压往往产生严重的症状,甚至危及生命。不同于外伤等引起的寰枢椎脱位,先天性寰枢椎脱位没有可参照进行生物力学研究的动物模型。随着近年来计算机模拟生物力学研究的发展,对先天性寰枢椎脱位病理状态模型的建立逐渐引起临床医师的重视,一个能够有效验证脱位的计算机模拟生物力学模型应用于临床和科学研究中,可以针对每例患者开展个体化治疗,从而达到治疗利益的最大化。

有限元法(FEM)是目前最为常用的计算机模拟生物力学模型建立方法。其定义为:一种将连续体离散化为若干个有限大小的单元体的集合,以求解连续体力学问题的数值方法。其原理为:将连续的求解域离散为一组单元的组合体,用在每个单元内假设的近似函数来分片表示求解域上待求的未知场函数,近似函数通常由未知场函数及其导数在单元各节点的数值插值函数来表达,从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。

一、模型建立的可行性和实用性

有限元分析作为数值计算中的一种离散化方法,具有实验时间短、费用少、对身体无任何破坏、

力学性能测试全面及可重复实验等优点。在以往的研究中,多将有限元分析集中应用于腰椎模型,由于寰枢椎解剖结构及脱位机制复杂,使有限元模型研究的起步较晚^[1]。21世纪初,为了研究寰椎骨折机制,Teo和Ng^[2]利用离体寰椎通过表面重建及刚性界定,以数字传感器记录这些立体几何边界的数据文件,并将其转换为通用图形数据格式IGES,然后导入有限元建模软件ANSYS,进行三维有限网络重建,较为精确地建立了寰椎的有限元模型。该模型通过模拟3种头部姿势——中立位、屈曲位和伸展位,对轴向加载负荷进行研究。Putlitz等^[3]为了弄清类风湿性关节炎进展过程中相关组织变化,首先建立了完整的上部颈椎(C₀~C₂)模型,不仅包括了骨性结构,而且包含了其所附属的韧带。模型建立后与对尸体所做实验数据进行对比,证明了其有效性。随后,Brolin和Halldin^[4]建立了更为完善的C₀~C₃三维非线性有限元模型,旨在研究其附着韧带的作用与功能。但并未涉及寰枢椎脱位模型的建立。del Palomar等^[5]建立了精确的C₀~C₇有限元模型,对颈椎椎间盘在各个运动方向的准静力荷载进行分析,经与之前的文献及实验数据进行对比,其结果高度一致。Zhang等^[6]建立的C₀~C₇有限元模型,加入了来自文献的相关参数,所得实验结果与体外实验数据比较一致,而且模拟了坠落实验和挥鞭样骨折实验,取得了较理想的结果。国内陈强等^[7]采用断层CT扫描序列图像的自动重建方法,成功地建立了全颈椎(C₁~T₁)三维有限元模型,但未进行尸体实验测试,故无数据对比。李斌等^[1]建

作者单位:100053 北京,首都医科大学宣武医院神经外科

通讯作者:菅凤增(Email:fengzengjian@hotmail.com)

立了更为真实、有效的全颈椎三维有限元模型,并在所建模型上加载模拟脊柱的前屈、后伸、左右侧屈、左右旋转 6 种情况下的生理活动,所得分析结果与生物力学实测数据一致。王鹏^[8]根据层厚为 0.625 mm 的 CT 扫描原始数据,建立了包括骨骼、韧带、关节结构的非线性、三维枕寰枢有限元模型,其模型和尸体实验结果在绝大多数载荷方式下基本一致,从而验证了模型的有效性。并在此基础上建立了寰枢椎前路减压(经口齿突切除术)和后路减压模型,同样在屈曲载荷下,与正常模型对比分析寰枢椎间运动角度、关节应力、韧带应变和前后移位等参数的改变。陈金水等^[9]在正常上部颈椎三维非线性有限元模型的基础上,结合临床实际寰枢椎脱位病例,应用有限元软件建立了横韧带断裂但不伴齿状突骨折的寰枢椎前脱位有限元模型,测量并比较了正常上部颈椎模型和寰枢椎脱位模型在屈、伸、侧屈、旋转等情况下的活动度(ROM)。其结果显示,寰枢椎脱位模型各种情况下的活动度较正常上部颈椎模型明显增大,尤其是前屈位增加了 17.8°,后伸位增加了 13.7°。表明寰枢椎脱位非线性三维有限元模型能够较好地模拟临床实际脱位病例,可用于对寰枢椎脱位患者的生物力学分析,从而指导制定寰枢椎脱位的治疗策略。

二、模型建立的常用方法

在建立病理状态模型之前,首先需要建立正常颈椎生物力学模型。

1. 建模所需材料 对成年男性志愿者的颈椎,采用薄层 CT(0.5~1 mm)扫描,扫描层厚越薄,所建模型越精密,但同时工作量越大,建模过程越复杂。各断层图像均以 512×512 像素的 DICOM 格式保存图像数据,然后将 CT 所得数据导入 MIMICS 软件和有限元分析软件 ANSYS 进行建模。对材料属性的设定,如材料的载荷-变形曲线等数值,以及韧带的起止点等通常根据以往文献中的实验数据进行设定,如 Martin 等^[10]、Yoganandan 等^[11]和 Panjabi 等^[12-13]所获得的实验参数,以及详细解剖依据。

2. 建模方法 根据陈强等^[7]的建模方法,ANSYS 程序提供了两种模型建立方法:(1)通过点-线-面-体创建模型,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。因颈椎体积较小、结构复杂,现阶段对颈椎实体模型进行网格划分难度极大,且准确性也较差,进行计算过程中存在困难,故采用直接生成节点、单元

的方法。即首先将志愿者的头颈部进行 CT 成像,在成像过程中,要求受试者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,获得代表头颈部每层横断面的图像,然后生成建立有限元模型所需要的文件流,并将文件流输入 ANSYS 软件,依次生成椎体后获得三维有限元模型。在建立正常健康成年男性寰枢椎模型后,通过一系列测试所得结果与 Goel 等^[14](0.3 Nm)和 Panjabi 等(1.0 Nm^[15-16]、1.5 Nm^[12-13,17])的尸体标本实验数据进行对比,如数值基本一致,则表明模型的有效性。在此基础上,再通过进一步设置来构建寰枢椎脱位有限元模型。

三、寰枢椎脱位模型的建立

1. 模拟类风湿性关节炎导致的寰枢椎半脱位 Puttlitz 等^[3]建立了正常模型并验证了其有效性后,巧妙地将横韧带、翼状韧带、关节囊韧带的刚度逐渐降低 50%、75% 和 100%(通过去除达到),使其尽可能模拟真实病理改变,与此同时,模型均采用屈曲位,以复制类风湿性关节炎的临床诊断。

2. 创伤性寰枢椎脱位 由于我国自发性寰枢椎脱位患者的发病机制多为先天性发育不良和意外事故损伤。故国内学者多模拟先天性发育不良和横韧带断裂引起的寰枢椎脱位。陈金水等^[9]选取单纯横韧带断裂而不伴齿状突骨折的寰枢椎前脱位患者(男性,17 岁,颈部外伤后枕颈部疼痛不适 6 个月),CT 显示寰枢椎前脱位,寰齿前间距为 7.50 mm,横韧带断裂。依据该病例的寰齿间距,在正常上部颈椎三维有限元模型上模拟寰枢椎脱位,去除齿状突后方横韧带模拟横韧带断裂。脱位后的关节囊、前纵韧带、棘间韧带的材料参数采取理想化的状态来模拟,调整前纵韧带、棘间韧带、棘上韧带及关节囊韧带的材料参数模拟韧带损伤。具体制备方法是通过更改载荷-变形曲线,以相同变形量的情况减半载荷量模拟韧带半数损伤,建立单纯横韧带断裂而不伴齿状突骨折的寰枢椎前脱位有限元模型。

3. 先天性寰枢椎脱位 目前,国内对先天性寰枢椎脱位的三维有限元模型的建立尚无报道,且未见国外相关文献报道。而我国寰枢椎脱位患者大多数属于此种类型。因此,建立先天性寰枢椎脱位生物力学模型将有利于开展个体化治疗,并可通过计算机模拟手术过程、测量不同术式产生的生物力学效果、演示不同内固定方式对人体活动造成的影响,从而帮助临床医师选择最佳手术方案,进而预

测手术治疗效果。

四、计算机模型的局限性

虽然有限元方法在模拟寰枢椎脱位研究中意义重大,但若实际应用于寰枢椎脱位的临床治疗分析,尚需解决如下问题^[9]:(1)有限元模型仅能反映某一代表的力学特性,而寰枢椎脱位的分型较多,脱位程度个体差异较大。韧带等软组织的损伤程度不同,有限元模型很难完全模拟其实际情况。(2)上述有限元模型忽略了肌肉、椎体、韧带、椎间盘等组织的复杂性,其特性并非均一,而实验时对组织内部采取均一特性假定,故与实际机体的生理情况存在一定差距。(3)有限元模型的建立和分析需要大量的数据运算,建立模型耗时较长,因而临床应用受到限制。

五、展望

计算机模拟生物力学,已经可以模拟眼科、骨科等众多临床疾病,以及多种疾病的康复治疗模型,并可对相关疾病的治疗提供科学依据并提高治疗效果,如虹膜组织力学特征的生物力学认识,可以帮助临床医师更有效地治疗原发性青光眼^[18]等。

随着计算机软件的不断升级,生物力学必将在某些相对复杂疾病的研究和治疗过程中发挥作用,如寰枢椎脱位。我们尝试通过更加完善的生物力学方法建立寰枢椎脱位模型,尽可能模拟人体真实的生理环境,模拟肌肉、皮肤等生物力学特征。由于所建立的模型均为个案,并不能广泛适用于临床患者,但在有能力开展寰枢椎脱位治疗的医院,可以通过收集病例资料建立数据库,从而形成可以涵盖各种寰枢椎脱位类型、不同性别及年龄的有限元模型资料库,使患者可以根据自身的影像学表现特点,与之前建立的资料库中的模型进行对比,匹配与之相似的模型,从而根据模型特点,指导制定手术方案,实现个体化治疗。

参 考 文 献

- [1] Li B, Zhao WZ, Chen BZ, et al. Establishment and validation of a three-dimensional finite element model of the cervical spine. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu Yu Lin Chuang Kang Fu*, 2010, 14:2299-2302.[李斌, 赵文志, 陈秉智, 等. 全颈椎有限元模型的建立与验证. *中国组织工程研究与临床康复*, 2010, 14:2299-2302.]
- [2] Teo EC, Ng HW. First cervical vertebra (atlas) fracture mechanism studies using finite element method. *J Biomech*, 2001, 34:13-21.
- [3] Puttlitz CM, Goel VK, Clark CR, et al. Biomechanical rationale for the pathology of rheumatoid arthritis in the craniovertebral junction. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2000, 25:1607-1616.
- [4] Brolin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29:376-385.
- [5] del Palomar AP, Calvo B, Doblaré M. An accurate finite element model of the cervical spine under quasi-static loading. *J Biomech*, 2008, 41:523-531.
- [6] Zhang QH, Teo EC, Ng HW. Development and validation of a C0-C7 FE complex for biomechanical study. *J Biomech Eng*, 2005, 127:729-735.
- [7] Chen Q, Hou TS, Yang GB, et al. Three-dimensional finite element model of the whole cervical spine. *Di Er Jun Yi Da Xue Xue Bao*, 2006, 27:554-555.[陈强, 侯铁胜, 杨国标, 等. 全颈椎三维有限元模型的建立. *第二军医大学学报*, 2006, 27:554-555.]
- [8] Wang P. Finite element analysis of the occipitoatlantoaxial complex. Beijing: Chinese PLA General Hospital & Postgraduate Medical School, 2008.[王鹏. 枕寰枢复合体有限元分析. 北京: 中国人民解放军总医院军医进修学院, 2008.]
- [9] Chen JS, Ni B, Chen B, et al. Establishment and analysis of a three-dimensional finite element model of atlantoaxial dislocation. *Zhongguo Ji Zhu Ji Sui Za Zhi*, 2010, 20:749-753.[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, 20:749-753.]
- [10] Martin MD, Bruner HJ, Maiman DJ, et al. Anatomic and biomechanical considerations of the craniovertebral junction. *Neurosurgery*, 2010, 66(3 Suppl):2-6.
- [11] Yoganandan N, Kumaresan S, Pintar FA. Biomechanics of the cervical spine Part 2: cervical spine soft tissue responses and biomechanical modeling. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2001, 16:1-27.
- [12] Panjabi M, Dvorak J, Crisco JJ 3rd, et al. Effects of alar ligament transection on upper cervical spine rotation. *J Orthop Res*, 1991, 9:584-593.
- [13] Panjabi M, Dvorak J, Crisco JJ 3rd, et al. Flexion, extension, and lateral bending of the upper cervical spine in response to alar ligament transections. *J Spinal Disord*, 1991, 4:157-164.
- [14] Goel VK, Clark CR, Gallaes K, et al. Moment-rotation relationships of the ligamentous occipito-atlanto-axial complex. *J Biomech*, 1988, 21:673-680.
- [15] Panjabi MM, Crisco JJ, Vasavada A, et al. Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26:2692-2700.
- [16] Panjabi MM, Nibu K, Cholewicki J. Whiplash injuries and the potential for mechanical instability. *Eur Spine J*, 1998, 7:484-492.
- [17] Panjabi M, Dvorak J, Duranceau J, et al. Three-dimensional movements of the upper cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1988, 13:726-730.
- [18] Liu ZC, Lin D, Wang YH, et al. A study of experiment method to measure mechanical property of iris tissue. *Zhongguo Yi Xue Wu Li Xue Za Zhi*, 2001, 18:234-236.[刘志成, 林丁, 王玉慧, 等. 虹膜组织力学特性研究的实验方法探索. *中国医学物理学杂志*, 2001, 18:234-236.]

(收稿日期:2012-01-12)