

颈椎病有限元分析的研究进展

王晓伟, 王晓丹, 梁元政, 井夫杰

(山东中医药大学针灸推拿学院, 山东 济南 250011)

摘要 有限元分析是以计算机技术为基础的力学分析方法, 在颈椎病发病和治疗机制研究方面具有其他研究方法无法替代的优势。本文从颈椎病有限元模型的建立和常见颈椎病治疗方法的有限元分析两个方面, 对颈椎病有限元分析的研究进展进行了综述, 以期对颈椎病的临床和科研提供借鉴。

关键词 颈椎病; 有限元; 综述

颈椎病是以颈椎退行性改变为基础的疾病, 不合理的工作、生活方式使得该病的患病率不断上升^[1]。有限元分析是以计算机技术为基础的力学分析方法, 不仅可以模拟颈椎骨性结构, 也能有效体现颈椎周围韧带、肌肉、血管等组织^[2]。有限元分析可以弥补基于动物模型和尸体标本的颈椎病研究的诸多缺陷, 帮助研究人员更好地了解生理和病理条件下颈椎的生物力学特征。本文参考相关文献, 对颈椎病有限元分析的研究进展进行了综述, 现总结报告如下。

1 颈椎病有限元模型的建立

目前对于正常颈椎有限元模型已有较为全面的数据, 从部分颈椎节段到全颈椎的有限元模型都有相关研究^[3-4]。此外, 除了单纯的颈椎骨性结构有限元模型, 加入韧带、肌肉组织的颈椎有限元模型也已被建立^[5]。颈椎病的有限元模型可以基于颈椎病患者的数据直接建立。张明才等^[6]构建的颈椎“骨错缝”有限元模型和谭蓓等^[7]构建的脊髓型颈椎病有限元模型就属于此类。另外, 也可通过改变正常颈椎有限元模型中相关结构的生物力学参数获得相应的颈椎病有限元模型。如翁沛等^[8]以健康志愿者的数据构建颈椎有限元模型后, 将两侧关节突关节重新“融合”并“分割”为对称、中度、重度 3 个不同角度的模型, 模拟颈椎关节突关节矢状角不对称的病理状态; 沈知彼等^[9]以颈椎曲度变直和颈椎反弓患者的矢状位 CT 为参照, 通过在正常颈椎有限元模型中调整椎体在矢状面的前后距离得到对应的颈椎病有限元模型。此外, 也有研究者基于颈椎标本建立颈椎有限元模型。Wang 等^[10]对上颈椎标本进行 CT 扫描后建立了上

颈椎有限元模型, 并通过对标本韧带进行疲劳处理获得了上颈椎不稳有限元模型。

2 常见颈椎病治疗方法的有限元分析

2.1 手法治疗颈椎病的有限元分析 手法具有筋骨并调的特点, 是临床治疗颈椎病的常用方法。近年来有关手法治疗颈椎病的有限元分析, 主要集中在手法治疗的作用机制方面。相关的研究主要通过观察颈椎骨性结构、椎间盘、脊髓的应力和位移改变来研究手法治疗颈椎病的作用机制。

2.1.1 手法对颈椎骨性结构的影响 叶林强等^[11-12]的有限元分析发现, 旋转类手法可以使颈椎骨性结构发生位移, 扩大旋转对侧的椎间孔容积, 解除颈椎病患者的颈椎骨性结构的异常应力状态, 使两侧应力恢复平衡。Chang 等^[13]的研究显示, 实施颈椎旋转手法时颈椎关节突关节的滑动趋势与旋转方向有关, 旋转侧下关节突均向后下方滑动、旋转对侧下关节突均向前上方滑动。叶林强等^[11]的研究表明, 在不同体位实施颈椎旋转手法时, 旋转对侧下关节突的前上位移值在前屈位、中立位、后伸位依次减小。这很好地解释了临床中扳法等手法在前屈位操作时疗效更佳的原因。邓真等^[14]针对颈椎旋扳手法的有限元分析发现, 手法治疗后颈椎关节突关节间的高应力状态被解除, 两侧关节突关节的应力趋于平衡; 目标棘突及上下相邻棘突的瞬时应力增加明显, 但这种应力改变并未跨越椎体。这提示定位旋转扳法较非定位旋转扳法整复更加精准, 对非目标椎体的影响更小。

此外, 有限元分析也被用于验证手法治疗颈椎病的安全性。曹盛楠等^[15]针对三维平衡正脊手法的研究显示, 使用该手法治疗时颈椎的应力主要分布在下

段颈椎的后部结构,而且最大应力远小于可导致椎体骨折的最小应力。这提示三维平衡正脊手法的安全性较高,不会引起颈椎骨折。

2.1.2 手法对颈椎间盘的影响 椎间盘退变是颈椎病发生的重要因素。Chang 等^[13,16]的有限元分析显示,实施颈椎旋转手法时病变椎体上下两个节段椎间盘纤维环和髓核应力最大;椎间盘应力集中在纤维环,受力纤维环对侧和旋转侧均出现位移与形变; C_{4-5} 、 C_{5-6} 椎间盘髓核内压力和纤维环应力的变化基本相同。黄学成等^[17]的研究显示,应用旋转手法治疗神经根型颈椎病时,手法实施过程中应力集中在旋转对侧纤维环后部。这提示向健侧旋颈时向患侧侧屈更有利于保护患侧椎间盘。Wu 等^[18]针对颈椎有限元模型 C_4 棘突实施拔伸右旋手法,拔伸过程中髓核应力和位移先减小后增大;在颈椎旋转操作过程中,最高应力和最大位移均发生在 C_{3-4} 髓核右上边缘;旋转后快速返回中立位过程中,因旋转产生的髓核应力变化减小、髓核位移距离变小。黄学成等^[19]的研究发现,在颈椎中立位和后伸位实施旋转手法时,椎间盘和髓核的位移均小于前屈位。这可能是临床中颈椎前屈位推拿发生椎间盘损伤和髓核突出的风险高于中立位与后伸位的原因。因此,临床中使用旋转类手法时应评估椎间盘状态,选择合理的旋转方向与体位,防止发生医源性损伤。

2.1.3 手法对颈椎脊髓的影响 目前有关手法操作对颈椎脊髓影响的有限元分析研究相对较少。Xue 等^[20]研究发现,实施颈椎旋转手法后最大应力发生在 C_1 或 C_2 段;在后伸位和中立位实施颈椎旋转手法时,脊髓应力高于前屈位;在后伸位实施颈椎旋转手法时,最大应力位于脊髓灰质。

2.2 牵引治疗颈椎病的有限元分析 牵引疗法也是临床常用的颈椎病非手术疗法。有限元分析可以为牵引疗法的改进提供生物力学证据。Wang 等^[21]比较了有颈部支撑和无颈部支撑下仰卧位牵引时相关组织的平均应力、拉伸力及屈曲时椎间盘后侧纤维环的应力等指标,结果显示有颈部支撑牵引时颈椎前凸角减小较少,无颈部支撑牵引下 C_{4-5} 与 C_{5-6} 后侧纤维环最大应力均高于有颈部支撑牵引。这表明有颈部支撑的牵引治疗更安全。此外,有限元分析也可作为牵引设备的改良提供理论支撑。刘治华等^[22]的研究发现,旋转牵引过程中椎间盘内最大应力的变化与间

歇式牵引类似;变角度牵引可使颈椎椎间隙和椎间孔增大,有利于椎间盘回纳。这为应用旋转牵引器材治疗颈椎病提供了理论支持。张新酪等^[23]还利用有限元分析验证了其设计的牵引机器人的最佳牵引力、牵引角度与牵引体位。

2.3 手术治疗颈椎病的有限元分析 有限元分析可以为颈椎手术方案的改良提供生物力学证据。刘伟聪等^[24]通过有限元分析探讨了不同高度椎间盘假体对人工椎间盘置换术治疗椎间盘源性颈椎病的效果,结果显示在维持合适椎间高度的前提下,高度相对较低的假体与终板接触面的平均应力更小,可降低术后异位骨化及邻近节段退行性变的发生率。王鹏等^[25]运用有限元分析探讨了颈椎单开门椎板成形微型钛板固定的稳定性,结果显示 C_3 椎板切除可有效减少单开门椎板成形微钛板固定后中下段椎间盘的代偿性应力增加,避免颈椎前凸丢失。

有限元分析也有助于临床医师确定最佳的颈椎病手术方案。Stoner 等^[26]利用有限元分析探讨了常见的前路和后路减压手术治疗多节段脊髓型颈椎病的效果,结果显示手术干预可导致相邻节段应变增加,这种现象在颈椎前路减压融合术后最为明显。Ren 等^[27]利用有限元分析对比了颈椎前路减压融合术和经皮后路内镜下颈椎间盘切除术治疗神经根型颈椎病的效果,结果显示采用经皮后路内镜下颈椎间盘切除术对颈椎生物力学性能和稳定性损伤更小。

3 小 结

有限元分析在颈椎病发病和治疗机制研究方面具有其他研究方法无法替代的优势,但也存在一些局限性。第一,有限元法是基于数学分析方法的计算机力学模拟技术,分析结果难免存在一定偏差;第二,现有颈椎有限元模型仍未涵盖所有颈椎结构,骨性结构加软组织的有限元研究模式仍处于发展阶段;第三,目前国内缺乏颈椎相关组织的材料参数,相关数据和研究结果多来源于国外文献^[28]。今后应针对这些问题开展相应的基础和临床研究,进一步提高颈椎病有限元研究的价值。

参考文献

- [1] LV Y, TIAN W, CHEN D, et al. The prevalence and associated factors of symptomatic cervical spondylosis in Chinese adults: a community-based cross-sectional study [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2018, 19(1): 325.

- [2] 陈铎,秦大平,张晓刚,等.有限元分析法在脊柱生物力学中的研究进展[J].中国疼痛医学杂志,2020,26(3):208-211.
- [3] 张明才,吕思哲,詹红生,等.颈椎“椎骨错缝”三维有限元模型创建方法的研究[J].中国骨伤,2010,23(5):366-369.
- [4] 曹盛楠,师彬,孙国栋.神经根型颈椎病 C₃~C₇ 三维有限元模型的建立与意义[J].山东医药,2018,58(32):5-8.
- [5] 陈群响,倪斌,郭群峰,等.带肌肉组织全颈椎三维有限元模型的建立及分析[J].中国脊柱脊髓杂志,2019,29(4):348-355.
- [6] 张明才,吕思哲,程英武,等.基于有限元模型研究椎骨错缝对颈椎病患者关节应力的影响[J].中国骨伤,2011,24(2):128-131.
- [7] 谭蓓,李娜,冯智超,等.脊髓型颈椎病患者三维有限元模型的构建与生物力学分析[J].中南大学学报(医学版),2019,44(5):507-514.
- [8] 翁沛,叶林强,姚珍松,等.颈椎关节突关节矢状角不对称对颈椎间盘纤维环应力影响的三维有限元研究[J].中国脊柱脊髓杂志,2022,32(2):149-159.
- [9] 沈知彼,王辉昊,王宽,等.颈椎定位旋转扳法对不同曲度颈椎内部结构应力的影响[J].中医正骨,2018,30(3):8-12.
- [10] WANG X D, FENG M S, HU Y C. Establishment and finite element analysis of a three-dimensional dynamic model of upper cervical spine instability [J]. Orthop Surg, 2019, 11(3):500-509.
- [11] 叶林强,陈超,刘源辉,等.体位对颈椎旋转手法整复神经根型颈椎病关节突关节骨错缝的有限元分析[J].中国组织工程研究,2023,27(29):4607-4611.
- [12] 黄学成,叶林强,梁德,等.三维有限元模型分析旋转手法中旋转方向对颈椎间盘位移和椎间孔容积的影响[J].中国组织工程研究,2018,22(3):404-408.
- [13] CHANG L, WANG H, GUO Y, et al. Experimental and numerical analysis of biomechanical effects in cervical spine positioning rotation manipulation [J]. Int J Numer Method Biomed Eng, 2022, 38(12):e3651.
- [14] 邓真,詹红生,李国中,等.颈椎旋扳法对“骨错缝”颈椎应力作用的有限元分析[J].中国中医骨伤科杂志,2021,29(10):37-42.
- [15] 曹盛楠,王丹丹,王从安,等.三维平衡正脊手法治疗神经根型颈椎病的有限元分析[J].中国骨伤,2020,33(9):867-872.
- [16] 刘建辉,朱建忠,潘福勤,等.颈椎间盘有限元模型分析旋转手法髓核受力与体位的关系[J].内蒙古医科大学学报,2020,42(2):173-175.
- [17] 黄学成,叶林强,江晓兵,等.旋转手法中侧屈方向对颈椎间盘位移、内在应力的影响及意义[J].山东医药,2018,58(16):5-8.
- [18] WU L P, HUANG Y Q, MANAS D, et al. Real-time monitoring of stresses and displacements in cervical nuclei pulposi during cervical spine manipulation: a finite element model analysis [J]. J Manipulative Physiol Ther, 2014, 37(8):561-568.
- [19] 黄学成,叶林强,江晓兵,等.不同体位下颈椎旋转手法对颈椎间盘位移和内在应力的影响[J].中国康复理论与实践,2017,23(12):1470-1475.
- [20] XUE F, CHEN Z, YANG H, et al. Effects of cervical rotatory manipulation on the cervical spinal cord: a finite element study [J]. J Orthop Surg Res, 2021, 16(1):737.
- [21] WANG K, WANG H, DENG Z, et al. Cervical traction therapy with and without neck support: a finite element analysis [J]. Musculoskelet Sci Pract, 2017, 28:1-9.
- [22] 刘治华,汤清,陶德岗,等.全颈椎三维有限元模型的建立及旋转牵引疗法研究[J].生物医学工程研究,2018,37(3):362-366.
- [23] 张新酩,刘治华,张新民,等.全颈椎模型建立及不同牵引方位下的牵引力与牵引角度特征[J].中国组织工程研究,2021,25(30):4805-4811.
- [24] 刘伟聪,周盛源,陈博,等. DiscoverTM 假体高度对颈椎人工椎间盘置换术置换节段生物力学影响的三维有限元分析[J].脊柱外科杂志,2022,20(3):187-192.
- [25] 王鹏,汤猛,周立,等.颈椎单开门成形微钛板固定稳定性的有限元分析[J].中国矫形外科杂志,2021,29(22):2072-2077.
- [26] STONER K E, ABODE-IYAMAH K O, FREDERICKS D C, et al. A comprehensive finite element model of surgical treatment for cervical myelopathy [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2020, 74:79-86.
- [27] REN J, LI R, ZHU K, et al. Biomechanical comparison of percutaneous posterior endoscopic cervical discectomy and anterior cervical decompression and fusion on the treatment of cervical spondylotic radiculopathy [J]. J Orthop Surg Res, 2019, 14(1):71.
- [28] BROLIN K, HALLDIN P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2004, 29(4):376-385.

(收稿日期:2023-02-07 本文编辑:李晓乐)