

有限元分析法在颈椎病研究中的应用进展

汪芳俊¹, 范炳华², 魏威¹

(1. 浙江省中西医结合医院, 浙江 杭州 310003;

2. 浙江中医药大学, 浙江 杭州 310053)

摘要 有限元分析法作为一种新的生物力学研究方法, 已广泛地应用于人体脊柱的研究中, 它不仅能逼真地模拟椎体、椎间盘、脊髓、韧带甚至肌肉, 还能分析模型内部各种组织的应力和张力。近些年来, 随着计算机辅助技术的发展, 颈椎有限元模型不断完善, 有限元分析法在研究颈椎病病理机制及治疗颈椎病中的应用和研究也逐步深入。本文就有限元分析法在颈椎病研究中的应用进展进行了综述。

关键词 颈椎病 有限元分析 生物力学 综述

有限元分析法是数值计算中的一种离散化方法, 是矩阵方法在结构力学和弹性力学领域的应用。基本原理是将一个由无数个质点组成的自由连续体划分为有限个小单元体所组成的集合体^[1]。目前这种方法在人体颈椎病的研究中得到了广泛的应用, 它所构建的三维脊柱模型能将椎体、椎间盘和周围的韧带、肌肉等软组织结构结合在一起, 并通过软件分析模型内部各种组织所受的应力和张力, 以研究颈椎病的发病机制和非药物治疗机理。现就有限元分析法在颈椎病研究中的应用进展综述如下。

1 颈椎三维有限元模型的建立

有限元分析法把要分析的连续体——脊柱, 包括椎体、椎间盘和小关节以及周围软组织分割成小单元的组合物, 然后对每个小单元进行分析, 得出脊柱内部应力与形变情况。有限元分析法的关键在于离散化过程中, 单元分得越细, 节点越多, 计算结果就越精确^[2], 模拟出来的图像就越逼真。20 世纪 70 年代初期有限元分析法被引入脊柱外科的生物力学研究中。最早的颈椎单一椎体的有限元模型出现于 1994 年, 由 Bozic 等^[3]依据 CT 扫描建立的 C₄ 椎体三维有限元模型。Yoganandan 等^[4]建立了包含椎体松质骨、椎体皮质骨、椎间盘和主要韧带的 C₄ ~ C₆ 三维有限元模型。Goel 等^[5]在 Yoganandan 等所建模型的基础上又增添了钩突、钩椎关节、纤维环、髓核、终板、滑膜关节, 并增加了纤维环的层次和纤维走向, 建立了逼真的 C₅ ~ C₆ 三维有限元模型。陈伯华等^[6]采用计算机辅助设计数据处理技术, 建立了包括 C₄ ~ C₇ 椎体、C₄₋₅ 椎间盘、C₅₋₆ 椎间盘、C₆₋₇ 椎间盘、后部结构(椎

板、椎弓根、横突、椎动脉孔、棘突、关节突)、前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带和关节囊的 C₄ ~ C₇ 三维有限元模型, 并使模型在外力作用下进行屈曲、背伸、侧屈以及旋转实验。Wang 等^[7]从可视化人体计划已标记的男性冷冻切片图像上提取上颈椎运动节段椎骨的三维轮廓, 并按各部分骨质密度的不同分 10 个部分进行建模, 建立了目前最精细的颈椎骨模型。Brolin 等^[8]建立了 C₁ ~ C₃ 三维有限元模型, 并进行静态下颈椎前屈后伸、左右侧弯、轴位旋转以及拉伸试验, 还进行了颈椎相关韧带特性的研究。Wheeldon 等^[9]建立了正常人下段颈椎的三维有限元模型, 并对椎间盘前、后和两侧的不同区域的材料特性进行研究。Hedenstierna 等^[10]利用三维有限元肌肉模型确定了静止的颈部肌肉在受到多向冲击力时所产生的肌肉负荷, 并发现颈部肌肉在对抗不同方向冲击力时产生的运动方向不同, 冲击产生的加速度会增加肌肉的力量、张力和能量。有学者应用 Mimics 和 Freeform 软件对 CT 数据进行分析计算, 建立了含有韧带的上、下段颈椎模型并进行了验证^[11-12]。Zhang 等^[1]研究发现, 正常颈椎模型在牵拉状态下旋转幅度最大, 其次是屈曲和轴向运动时, 侧曲时最小, 上段颈椎比下段颈椎更灵活; 在旋转负荷下 C₁、C₂ 的运动幅度占整个颈椎运动范围的 50% 以上。

2 有限元分析法在颈椎病病理机制研究中的应用

椎间盘是连接上下 2 节椎体的胶原性组织, 主要功能是承受载荷, 缓冲应力, 维持关节突关节间一定的距离和高度以及维持椎间孔的大小。目前认为椎

间盘水分减少、高度降低是椎间盘退变的最初变化,是颈椎病发生与发展的主要因素。有限元分析法可模拟椎间盘的病理变化来研究颈椎退变的病理机制。Kumaresan 等^[13]建立了 C₅~₆椎间盘三维有限元模型,该模型将椎间盘病变按照退行性变的程度分为轻、中、重 3 度:轻度主要表现为髓核的脱水;中度是在轻度变化的基础上加上纤维环自然分解,退变椎间盘髓核及纤维环基质的弹性模量均设定为正常椎间盘的 2 倍,纤维环体积较正常纤维环体积减小了 25%;重度退变在中度退变的基础上,椎间盘高度较正常椎间盘降低了 25%。这说明颈椎对于长期压力负荷造成的应变,可能导致骨赘形成。Lopez - Espina 等^[14]利用有限元方法分析了 C₃~C₇ 颈椎节段融合对邻近组织产生的生物力学影响,结果显示椎体融合后椎间盘所受压力可明显增大,双节段融合后的椎间盘比单节段融合椎间盘所受压力更大,认为持续的受压可能导致进一步的椎间盘退化和骨赘产生。Teo 等^[15]为研究下颈椎的小关节、韧带和椎间盘在下颈椎稳定性中的作用,建立了包括椎体、小关节、椎间盘和相应韧带的三维有限元模型;结果发现,颈椎对负荷的反应呈非线性,负荷增加时刚度增大;认为颈椎小关节、韧带和椎间盘对维持颈椎稳定非常重要。Schmidt 等^[16]通过研究 C₄~₅、C₅~₆椎间盘三维有限元模型发现,椎间盘变性后脊柱运动范围和椎间盘表面压应力都较正常增大,表明椎间盘退变会引起颈椎不稳定,反过来颈椎不稳定又会加重椎间盘的退变。Ng 等^[17]通过研究椎间盘三维有限元模型发现,随着椎间盘的进行性退变,颈椎旋转的范围会随之减少,同时还伴随着骨皮质和骨小梁应力的增加。张军等^[18]采用数字散斑相关方法对人体 C₇ 及其下位椎间盘进行了动态测试,同时采用 CT 图像完成了 C₇ 的三维重建;结果表明,在同等外载条件下,退变型颈椎的轴向位移和应变水平分别较正常颈椎增加了 42% 和 134%,最大应力水平较正常下降了 24%,说明颈椎的退变性将极大地削弱颈椎的抗变形和承载能力。Hussain 等^[19]利用三维有限元分析法研究了 C₅~₆退变椎间盘邻近组织的运动变化,结果发现下段颈椎的运动改变较大而且受 C₅~₆椎间盘退变程度的影响。张明才等^[20]创建了颈椎“椎骨错缝”节段(C₄~C₆)的三维有限元模型,证实 C₅椎体发生明显的三维空间位置异常,呈现后仰式错缝。该研究提出的颈椎“椎骨错

缝”的建模思路与方法为后期手法矫正“椎骨错缝”的机制分析奠定了基础。

对上段颈椎异常的研究主要集中在寰枢关节。陈金水等^[21]在正常上颈椎有限元模型的基础上结合临床寰枢椎脱位病例,建立横韧带断裂但不伴有齿状突骨折的寰枢椎前脱位有限元模型,并进行有限元分析,测量并比较正常上颈椎模型和寰枢椎脱位模型在屈、伸、侧屈、旋转等各个工作状况下的活动度;结果表明,该模型在屈、伸、侧屈、旋转等各个工作状况下的活动度较正常上颈椎模型明显增大,而且能较好地模拟临床实际脱位病例,可用于临床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。Zhang 等^[22]建立了头颈部的有限元模型并进行了加速碰撞试验,结果发现加速撞击的瞬间或短时间之后都会对颈部韧带产生严重损伤,这对研究车祸导致颈部软组织损伤有重要意义。张建国等^[23]通过人体颈部的螺旋 CT 扫描图像,利用三维重建和网格划分技术,得到六面体有限元模型,并对模型进行后碰撞验证分析,得出颈椎在挥鞭运动过程中的变化规律,以及 C₇~T₁ 的最大过伸角度为 20°和椎间盘所受最大应力值为 16 MPa。该模型的建立,可作为今后颈椎生物力学损伤研究以及其他相关领域研究的理论依据。

3 有限元分析法在治疗颈椎病中的应用

3.1 牵引治疗 牵引疗法是治疗颈椎病的有效方法之一,但目前对牵引的角度、力度、时间等尚无明确的定论。有限元分析法能帮助我们模拟出不同状态的颈椎所需牵引力度和角度,从而使颈椎达到较为理想的生理曲度。李雪迎等^[24]通过建立颈椎(C₁~T₁)三维有限元模型,对颈椎在不同力量、不同角度条件下的牵引过程进行力学分析,得出各种条件下颈椎上的位移情况、应力分布情况及各椎间隙的变形情况,并进行比较分析。结果发现,在不同牵引力的作用下,颈椎均出现一定的位移,诸椎间隙后缘均有一定增宽,前缘则大多有所缩窄,最大应力位置均出现在颈椎椎体后缘;当牵引角度不变时,随牵引力的增大,颈椎的位移及各点的应力均增大,椎间隙的形变亦更明显;当牵引力不变,随牵引角度的增大,颈椎的位移增大,颈椎上最大应力的位置下移,各椎间隙的形变增大。李勇等^[25]通过建立精确的颈椎(C₄~C₆)三维有限元模型,在前屈 10°、后伸 10°位对颈椎施加力学牵

引载荷,得出颈椎体、椎间盘的位移和应力分布情况,并进行比较分析。结果发现,前屈 10°牵引时椎体和椎间盘受力主要集中在神经根出口处,C₄、C₅ 椎体后缘椎间盘位移明显;后伸 10°牵引时,椎体受力和椎间盘受力主要集中在钩椎关节处,C₄、C₅ 椎体前缘椎间盘位移明显。由此可见,前屈 10°牵引有利于治疗神经根型颈椎病,后伸 10°牵引有利于缓解椎动脉型颈椎病的症状。林斌等^[26]建立了完整的颈椎三维有限元模型,并对前屈 0°~30°、后伸 0°~30°共 11 种不同牵引体位下的椎间关节应力分布及其运动情况进行分析。结果发现,正常颈椎椎间关节所受应力主要为垂直轴上的压应力,力值从上至下逐渐增大;在牵引作用下,前屈位可将其转变为拉压力,后伸位仍为压应力,两者都随角度的加大而逐渐加大。

3.2 手法治疗 手法治疗是颈椎病治疗的重要手段,但手法治疗往往带有一定的盲目性。为进一步研究手法治疗颈椎病的作用机制,郎继孝等^[27]通过力学工程软件三维显示,发现颈椎在斜扳状态下钩椎关节、小关节的应力集中于中下段,在 C₄~C₆ 水平的钩椎关节剪应力较大。邬黎平等^[28]在颈椎 CT 片基础上逐步重建 C₃~C₆ 三维有限元模型,并将颈椎拔伸旋转手法分解后的各项力学参数代入模型进行计算分析,结果显示在拔伸过程中应力主要在 C₃、C₄ 关节突关节;拇指向左推 C₄ 棘突过程中,C₄ 棘突的左下部、根部、棘突左侧根部与椎弓根结合处先后出现应力集中,颈椎向右旋转 40°的过程中,C₃~C₆ 双侧关节突关节,C₄~C₆ 的椎弓、棘突根部、两者结合处及椎体侧方等都先后出现应力集中,右侧 C₃、C₄ 关节突关节应力最大;颈椎快速返回中立位,模型应力集中的区域及大小均快速减少。

4 展 望

颈椎病是脊柱外科常见疾病之一,其发病因素与脊柱生物力学因素密切相关。在目前的生物力学研究方法中,动物实验、物理实验和体外实验都无法达到预期效果,而有限元分析法作为一种新兴方法,有优于其他实验方法之处,从理论上讲可以弥补了动物实验、物理实验和体外实验的不足,因此该方法在颈椎生物力学研究方面已得到广泛应用。但是,目前所建立的颈椎有限元模型模拟的只是颈椎组织中刚性的结构部分,而对颈椎软组织的研究主要集中在韧带方面;对颈部肌肉的研究因其力学性质复杂和患者个

体差异,难以得到可靠的数据而无法建立颈椎肌肉的有限元模型。随着有限元分析法的发展和计算机技术的日益成熟,期待能够重建更为逼真的、带有更多软组织的颈椎有限元模型,以模拟颈部活动时软组织的运动和受力变化过程,为制定非药物治疗治疗颈椎病的方案提供有价值的信息。

5 参考文献

- [1] Zhang QH, Teo EC, Ng HW, et al. Finite element analysis of moment - rotation relationships for human cervical spine [J]. J Biomech, 2006, 39(1): 189 - 193.
- [2] Panagiotopoulou O. Finite element analysis (FEA): applying an engineering method to functional morphology in anthropology and human biology [J]. Ann Hum Biol, 2009, 36(5): 609 - 623.
- [3] 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(2): 102 - 110.
- [4] Yoganandan N, Kumaresan SC, Voo L, et al. Finite element modeling of the C₄ - C₆ cervical spine unit [J]. Med Eng Phys, 1996, 18(7): 569 - 574.
- [5] Goel VK, Clausen JD. Prediction of load sharing among spinal components of a C₅ - C₆ motion segment using the finite element approach [J]. Spine, 1998, 23(6): 684 - 691.
- [6] 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(2): 105 - 108.
- [7] Wang H, Hu B, Bai J. Computational analysis of two atlanto-axial fixation methods [C] // 5th IFAC SymModel Cont Bimed Sys. England: Pergamon Pr, 2003: 175 - 178.
- [8] Brodin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics [J]. Spine, 2004, 29(4): 376 - 385.
- [9] Wheeldon JA, Stemper BD, Yoganandan N, et al. Validation of a finite element model of the young normal lower cervical spine [J]. Ann Biomed Eng, 2008, 36(9): 1458 - 1469.
- [10] Hedenstierna S, Halldin P, Siegmund GP. Neck muscle load distribution in lateral frontal and rear - end impacts [J]. Spine, 2009, 34(24): 2626 - 2633.
- [11] 任中武, 倪斌, 张美超, 等. 上颈椎三维非线性有限元模型的建立及其有效性验证 [J]. 脊柱外科杂志, 2007, 5(3): 159 - 162.
- [12] 苏再发, 贾连顺, 张美超, 等. 利用 Mimics 和 Freeform 建立下颈椎三维非线性有限元模型 [J]. 脊柱外科杂志, 2009, 7(4): 221 - 225.

4 讨 论

采用第 2 趾胫侧趾腹皮瓣移植修复手指软组织缺损,是近年来较为常用的显微外科手术。第 2 趾胫侧趾腹皮肤的颜色、质地与手指相近,移植后外形及功能与其他手指均无明显差异,且对足趾的外观及功能影响较小,患者较容易接受。术前进行心理护理有助于减轻患者压力,消除其紧张情绪。良好的供区术前准备,有利于手术顺利进行。术后常规护理能降低感染率,促进患者早期康复。受区皮瓣护理是护理重点,稍有差错便会直接影响皮瓣移植的成功率^[4]。正常皮瓣颜色红润或与供区皮肤颜色一致,但受光照、消毒剂等因素影响易于发生改变,因此不能作为皮瓣血运的绝对指标。术后皮瓣的温度一般较低,常在 3 h 内恢复,是相对可靠的观察指标。新移植的皮瓣,初期都有不同程度的肿胀,若肿胀不明显,皮瓣干瘪、皮纹加深,多为动脉血液供应不足或栓塞;若皮瓣肿胀明显,皮纹消失,多为静脉回流受阻或栓塞;而动静脉同时栓塞时,皮瓣肿胀程

度不发生改变。外科手术后经常遇到不同程度的血管痉挛,属于机体生理保护性反应,应与皮瓣病变相区分^[5]。

总之,科学规范的护理措施,及重点皮瓣护理,能有效提高手术成功率,促进患者手指功能恢复。

5 参考文献

- [1] 孙国峰,李杭,朱弢,等. 趾底动脉为血供的组织瓣移植修复手指组织缺损[J]. 中华手外科杂志,2004,20(1): 37-39.
- [2] 王晓峰,李基民,薛建波,等. 第二足趾胫侧皮瓣治疗手指软组织缺损的临床分析[J]. 中华手外科杂志,2010,26(5):283-284.
- [3] 陈淑琴. 断指再植术后血管危象多因素分析及预防[J]. 中华护理杂志,2009,44(12):1075-1077.
- [4] 周海微,李学渊. 游离腓动脉肌皮穿支皮瓣修复手足皮肤缺损的围手术期护理[J]. 中医正骨,2011,23(6):77.
- [5] 苏玉芳. 断指再植术后血管危象的原因分析及护理干预[J]. 中外医学研究,2011,9(19):85-86.
(2011-11-04 收稿 2012-01-30 修回)
- (上接第 73 页)
- [13] Kumaresan S, Yoganandan N, Pintar FA, et al. Contribution of disc degeneration to osteophyte formation in the cervical spine: a biomechanical investigation [J]. J Orthop Res, 2001,19(5):977-984.
- [14] Lopez - Espina CG, Amirouche F, Havalad V. Multilevel cervical fusion and its effect on disc degeneration and osteophyte formation[J]. Spine,2006,31(9):972-978.
- [15] Teo EC, Ng HW. Evaluation of the role of ligaments, facets and disc nucleus in lower cervical spine under compression and sagittal moments using finite element method[J]. Med Eng Phys,2001,23(3):155-164.
- [16] Schmidt H, Kettler A, Rohlmann A, et al. The risk of disc prolapses with complex loading in different degrees of disc degeneration - a finite element analysis[J]. Clin Biomech, 2007,22(9):988-998.
- [17] Ng HW, Teo EC, Zhang Q. Influence of cervical disc degeneration after posterior surgical techniques in combined flexion - extension—a nonlinear analytical study[J]. J Biomech Eng,2005,127(1):186-192.
- [18] 张军,金观昌,宋建新. 人体颈椎 C7 退变性的有限元分析与实验研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(11):1509-1512.
- [19] Hussain M, Natarajan RN, An HS, et al. Motion changes in adjacent segments due to moderate and severe degeneration in C₅ - C₆ disc[J]. Spine,2010,35(9):939-947.
- [20] 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.
- [21] 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[J]. 中国脊柱脊髓杂志,2010,20(9):749-753.
- [22] Zhang QH, Tan SH, Teo EC. Finite element analysis of head - neck kinematics under simulated rear impact at different accelerations[J]. Proc Inst Mech Eng H,2008,222(5):781-790.
- [23] 张建国,周蕊,薛强. 基于挥鞭样损伤研究的颈部有限元模型的建立及验证[J]. 中国生物医学工程学报,2008,27(3):389-392.
- [24] 李雪迎,王春明,殷秀珍,等. 颈椎牵引过程的三维有限元分析[J]. 中华理疗杂志,1999,22(6):350-353.
- [25] 李勇,张泽胜,王伶俐,等. 不同牵引角度治疗颈椎病的三维有限元分析研究[J]. 新中医,2008,40(9):63-64.
- [26] 林斌,殷浩,汤兴华,等. 牵引对颈椎椎间关节作用的有限元分析[J]. 中医正骨,2001,13(6):13-14.
- [27] 郎继孝,陈新民,陈德喜,等. 颈椎斜扳手法的三维空间有限元研究[J]. 中国中医骨伤科杂志,2005,13(2):40-41.
- [28] 邬黎平,陈曦,樊继宏,等. 颈椎拔伸旋转手法内在应力的实时监测[J]. 中国临床解剖学杂志,2010,28(5):578-581.
(2011-06-11 收稿 2011-09-22 修回)