

# 有限元分析在功能复位治疗骨质疏松性胸腰椎压缩骨折力学稳定性中的研究进展

王柄詠<sup>1</sup>, 张晓刚<sup>2</sup>, 秦大平<sup>1,2</sup>, 彭晓东<sup>1</sup>

1. 甘肃中医药大学, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃中医药大学附属医院, 甘肃 兰州 730000

**[摘要]** 中医功能复位理论是一个得到普遍认可的观点, 功能复位治疗骨质疏松性胸腰椎压缩骨折 (Osteoporosis vertebral compression fractures, OVCF) 的临床疗效肯定。利用计算机有限元分析 (Finite element analysis, FEA) 研究的方法对中医功能复位治疗 OVCF 进行生物力学研究, 将不断发展与完善中西医结合治疗胸腰椎疾病, 为今后进一步研究和临床运用中医理论指导治疗 OVCF 提供依据。然如何利用好 FEA 对 OVCF 的治疗进行研究, 在今后生物力学研究过程中仍需进一步探索。

**[关键词]** 有限元分析; 功能复位; 骨质疏松性胸腰椎压缩骨折 (OVCF); 生物力学; 综述

**[中图分类号]** R683 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0256-7415 (2019) 02-0029-04

DOI: 10.13457/j.cnki.jncm.2019.02.009

## Research Progress of Finite Element Analysis in Mechanical Stability by Functional Reduction for Osteoporosis Vertebral Compression Fracture

WANG Binghe, ZHANG Xiaogang, QIN Daping, PENG Xiaodong

**Abstract:** Theory of functional reduction in Chinese medicine is generally approved, and its clinical effect in treating osteoporosis vertebral compression fractures (OVCF) is confirmed. Adopting finite element analysis (FEA) to conduct biomechanical research on the theory of functional reduction for OVCF will develop and improve the integrated Chinese and western medicine therapy for thoracolumbar disease, which can provide evidence for further research and clinical practice of Chinese medicine theory for OVCF. However, how to make good of use FEA to study the treatment of OVCF still needs further exploration in biomechanical research progress.

**Keywords:** Finite element analysis; Functional reduction; Osteoporosis vertebral compression fractures (OVCF); Biomechanics; Review

骨质疏松性胸腰椎压缩骨折(Osteoporotic vertebral compression fractures, OVCF)是最常见的骨质疏松性骨折, 其中又以脊柱胸腰段发病最为常见<sup>[1]</sup>。我国人口老龄化现象日趋明显, 患者人数不断增多。该病发病以后易出现一系列并发症, 对患者产生严重的影响<sup>[2]</sup>。目前针对 OVCF 的主要治疗方法包括单纯的卧床治疗、功能锻炼、功能复位(含垫枕、练功、手法复位等)、经皮椎体后凸成形术(Percutaneous kyphoplasty, PKP)、经皮椎体成形术(Percutaneous vertebroplasty, PVP)等方法<sup>[3]</sup>。但是无论哪种方法都不能够达到完全的解剖复位, 尽管中医骨伤功能复位理论对此作出了很好的解释<sup>[4]</sup>, 但是该理论没有明确提出 OVCF 功能复位的具体标准, 现代研究也没有就该问题进一步深入探讨, 导致功能复位理论缺乏足够的科学依据指导 OVCF 的临床治疗。

生物力学实验是研究骨折复位后力学变化的 1 种方法, 传统的生物力学研究方法存在一系列问题, 如人体研究中的伦理问题, 标本收集的难度以及标本与真实人体之间的差异等。计算机有限元分析(Finite element analysis, FEA)的出现与发展可以运用计算机仿真研究的方法来做到更为接近真实状态的生物力学研究<sup>[5]</sup>。FEA 已经在骨科生物力学领域得到广泛运用<sup>[6]</sup>, 其意义在于为手法复位治疗骨折的研究提供 1 种可靠而精确的方法, 以进一步规范骨折复位手法、提高临床治疗效果。

### 1 中医功能复位理论

**1.1 中医功能复位理论简介** 由于骨折在治疗过程中很难达到解剖复位, 中医骨伤教授尚天裕等<sup>[7]</sup>在辨证论治的基础上, 贯彻动静结合, 筋骨并重, 内外兼治, 医患合作的治疗原则, 在临床运用中提出骨折复位的标准, 即功能复位<sup>[8]</sup>。针对胸腰

**[收稿日期]** 2018-08-30

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目 (81560780)

**[作者简介]** 王柄詠 (1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 中医骨伤科学。

**[通讯作者]** 张晓刚, E-mail: zxg0525@163.com。

椎压缩骨折,即不主张对胸腰椎压缩骨折用机械外力强行复位,也不同意对其畸形置之不理。1990年初,国际内固定研究学会(The Association for the Study of Internal Fixation, AO/ASIF)学者陆续提出了生物学固定(Biological osteosynthesis)的新概念,强调在骨折治疗中要重视骨的生物学特性,不破坏骨生长发育的正常生理环境,不强求骨折的解剖复位<sup>[9]</sup>。所以中医传统的功能复位理论与现代医学治疗骨折理论是一致的。非手术治疗的指导原则认为一般椎体前缘压缩到1/2以上,只要病人坚持锻炼,都可满意复位。印红兵<sup>[10]</sup>结合过伸复位和牵引法治疗38例OVCF患者,结果显示过伸复位法在恢复伤椎高度,减少后突畸形等方面效果明显。非手术治疗适用面较广,中医治疗或者是保守治疗OVCF,都能达到部分改善症状,缓解腰痛的目的。吴云强等<sup>[11]</sup>结合过伸牵引手法和垫枕疗法治疗40例OVCF患者,结果患者的临床症状明显改善,且能促进伤椎高度的恢复,保持脊柱的稳定性,是1种操作方便的非手术疗法。

1.2 手法复位联合PKP或PVP治疗OVCF PVP和PKP治疗OVCF的疗效肯定,但因为PVP手术存在较大的骨水泥渗漏风险而更多的选择PKP治疗,能够缓解疼痛、恢复脊柱稳定性和早期功能锻炼。刘贤平等<sup>[12]</sup>联合PKP和手法复位治疗40例OVCF患者,术后观察其能明显降低患者腰背部疼痛感,避免术后脊柱的后凸畸形,恢复压缩的椎体高度。吴彬彬等<sup>[13]</sup>分别对70例老年OVCF患者进行过伸体位下手法复位结合PVP和单纯PKP治疗,结果表明前者是1种易于操作,低成本的治疗选择。胡继军等<sup>[14]</sup>通过对比单纯PKP与手法复位配合PVP治疗新鲜OVCF的临床效果,认为PKP能更好的减少骨水泥渗漏,更好地恢复损伤椎体的高度,并且配合手法复位能够使椎体内容积增大,增加骨水泥的注入量。胡月明等<sup>[15]</sup>采用Meta分析的方法,得出手法复位结合PVP比单纯PKP能更好地提高椎体侧弯时的角度和恢复椎体前缘高度。李华等<sup>[16]</sup>通过体位和手法复位结合PVP治疗43例OVCF患者,发现其能有效缓解术后疼痛,恢复受压缩椎体的高度。李琳等<sup>[17]</sup>利用C型臂X线,结合手法复位和PVP治疗OVCF患者30例,结果表明采用过伸位加手法冲压复位配合手术更安全有效。秦虎等<sup>[18]</sup>结合手法复位和PKP治疗老年新鲜OVCF,能有效缓解患者伤后疼痛,降低骨水泥泄漏率,重建椎体高度,促进疾病恢复,减少并发症的发生。

## 2 FEA在脊柱生物力学中的应用

FEA使用计算机软件,应用数学方法来模拟真实世界的物理系统。是使用简单的交互式元素,即单元,用有限数量的未知数来接近一个无限未知的真实系统。是解决描述物理问题和相应确定条件的基本微分方程的数值方法。1972年Brekelmans WA等<sup>[19]</sup>第一次把有限元方法应用到医学骨科方向,分析了人体股骨内部的应力分布。1975年Liu YK<sup>[20]</sup>首先报道了腰椎的三维有限元模型。有限元分析能更好的模拟分析脊柱内部结构的力学变化,并且能真实地模拟椎骨、椎间盘,肌肉、韧带等

结构,使模型更加真实完善。

脊柱的稳定性主要由椎间盘、脊柱周围肌肉韧带维持,椎间盘和韧带保持脊柱内部的稳定性,脊柱周围肌肉则为脊柱提供外部支持作用。Adams MA等<sup>[21]</sup>在实验中模拟椎间关节屈曲阻力时测量了周围韧带的特性。Han KS等<sup>[22]</sup>将完整的棘间长短段肌肉和韧带结构纳入脊柱肌肉骨骼模型,发现软组织韧带和椎间盘的刚度对平衡所需的肌力起着关键作用。椎间盘的显微结构复杂,力学性质独特,其对于椎间关节灵活的运动至关重要。同时椎间盘也是人体内最大的无血运组织,组织更新和修复较慢,并且大部分结构缺乏神经的支配。Lafage V等<sup>[23]</sup>结合体外和FEA来评估新的棘间植入物对腰椎的生物力学影响。彭春政等<sup>[24]</sup>建立了一个完整的人体躯干骨三维有限元模型,包括韧带和肌肉,用于脊柱生物力学的分析。有限元模型在骨科生物力学研究中发挥了重要的作用,Liu Q等<sup>[25]</sup>通过模拟脊柱不同生理状态,分析不同状态下脊柱内部的应力应变分布,讨论其力学原理、损伤机制和治疗效果。Dreischarf M等<sup>[26]</sup>通过比较已发表的8个完整的腰椎静态有限元模型,对我们理解腰椎生物力学功能做出了重要贡献。Henao J等<sup>[27]</sup>用计算机模拟脊柱和脊髓患者特定生物力学模型的手术器械操纵,以评估和预测对脊髓和脊神经的潜在损伤。该比较研究表明,患者特异性混合模型成功复制了脊柱侧弯矫正练习期间神经损伤的生物力学。Schmidt H等<sup>[28]</sup>通过椎间盘的有限元模型研究椎间盘在微观和宏观水平的机械结构和生化环境,特别侧重于椎间盘功能生物力学的相关性和影响。腰椎生物力学知识对临床应用至关重要,Ibarz E等<sup>[29]</sup>通过有限元(FE)模拟了一个完整的腰椎(椎骨,椎间盘和韧带)三维FE模型,充分重现腰椎的生物力学。

由于FE研究能够解决复杂系统的材料非线性、不规则负载、几何外形和材料特性的能力,FEA方法已被公认为各种生物医学领域的重要计算工具,并广泛用于解决脊柱生物力学问题的研究。

## 3 FEA在OVCF研究中的运用

FEA作为1种生物力学研究方法,近年来被越来越多的应用于OVCF的生物力学分析。FEA通过弹性和破坏性研究进行体外实验验证后,发现FE模型比单独骨密度测量评估骨骼强度更准确,运用FEA可以对骨质疏松症患者骨折风险做出预测。Travert C等<sup>[30]</sup>使用FE模型评估材料性能和加载条件对椎体强度的相对影响,可以帮助预测OVCF。Zhao WT等<sup>[31]</sup>建立了胸腰段OVCF和相邻节段的三维FE模型,分析研究T12骨水泥增强前后不同椎体高度的生物力学效应,椎体增强可以充分降低椎体不同高度的等效应力。椎体成形术后OVCF患者常见邻近椎体骨折,杨攀等<sup>[32]</sup>通过模拟具有或不具有短节段椎弓根螺钉固定(PSF)的水泥增强剂,建立T10-L2功能脊柱连接的二维的、解剖学上详细的FE模型,结果表明短节段椎弓根螺钉固定(Pedicle screw fixation, PSF)与PKP可降低OVCF

经治疗和邻近未治疗的椎体骨折风险。Ottardi C 等<sup>[33]</sup>通过 FEA 分析比较 PVP 与 PKP 治疗骨质疏松症患者 T10 轻度和严重压缩骨折, 结果表明 PKP 降低了相邻终板上的应力和骨折风险, 结果提示 PKP 是恢复最初的椎体高度的首选。Giambini H 等<sup>[34]</sup>从定量计算机断层扫描(QCT)得出的特定于标本的 FE 模型有可能更精确地预测椎骨中的失效载荷, 是未来应用于改善老年人椎骨骨折风险预测的有效工具。Liang D 等<sup>[35]</sup>通过 FEA 来研究 3 种模式骨水泥分布之间的生物力学方差, 表明骨折区域的骨水泥分布不足和骨折区周围的骨水泥分布不对称, 是经皮椎体增强术(PVA)治疗症状性 OVCF 后疼痛未缓解和骨折复发的原因。Fei Q 等<sup>[36]</sup>在 Mimics 和 ABAQUS 软件中建立了胸腰椎三维 FE 模型(T10~L2), 分析了轴向压力(0.3, 1.0, 4.0 MPa)下环空纤维、髓核、终板和小关节的应力, 探讨 PKP 术后骨水泥渗漏入 T12~L1 椎间盘对 OVCF 邻近椎体的生物力学影响。

#### 4 结语

中医传统手法临床应用价值明显, 具有操作简单、成本低、效果明显的特点, 更容易被患者接受。过伸复位手法治疗 OVCF 在临床中屡见不鲜, 李孝林等<sup>[37]</sup>用 FEA 模拟传统过伸复位手法治疗 OVCF。张宏伟等<sup>[38]</sup>采用 FEA 指导手法治疗 29 例单段 OVCF 患者, 疗效确切。

但是传统手法复位也有其不足的地方, 每个个体复位程度有差异, 如何把先进的研究方法和传统手法的相关生物力学问题结合起来非常重要。近年来已有不少学者利用先进的计算机技术和 FEA 研究传统手法, 为手法作用机制的研究提供了广阔的前景和新的方法<sup>[39]</sup>。另外, 在研究脊柱的病理状态时, FE 主要用于了解病变定位的机制, 评价不同治疗工具的效果, 辅助和完成治疗工具的选择和改进, 按顺序为脊柱病变的康复提供理论依据。

临床以及基础研究认为, 过伸复位法治疗胸腰椎压缩性骨折的机理是在过伸时, 以受伤脊柱节段的后部结构为支点, 利用前纵韧带以及椎间盘的牵拉力使被压缩的骨质复位。然而在具体的临床应用过程中对过伸复位的时机、过伸的支点、过伸的程度、过伸复位过程中受伤脊柱节段各组织结构的受力情况等尚缺乏统一的认识, 其应用还主要靠医生的临床经验, 而缺乏客观的标准。

FEA 为临床应用与研究提供定量标准, 利用生物力学测试技术定量计算未知的肌肉或骨关节作用力, 为临床治疗提供极有价值的信息。数学模型是 1 种精确有效的方法, 且不受任何限制, 至少从理论上讲, 它能够真实模拟活体脊柱的生物力学行为, 但在应用于患者前, 必须在合适的生物和临床背景下解释数学模型结果。利用高速计算机建立模型已被临床和实验确认, 将成为预防、治疗脊柱疾病的有效工具。

#### [参考文献]

[1] 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会. 原发性骨质疏

松症诊治指南(2011年)[J]. 中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志, 2011, 4(1): 2-17.

[2] 葛继荣, 郑洪新, 万小明, 等. 中医药防治原发性骨质疏松症专家共识(2015)[J]. 中国骨质疏松杂志, 2015, 21(9): 1023-1028.

[3] 邱贵兴, 裴福兴, 胡慎明, 等. 中国骨质疏松性骨折诊疗指南(骨质疏松性骨折诊断及治疗原则)[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2015, 8(5): 371-374.

[4] 葛继荣, 郑洪新, 万小明, 等. 中医药防治原发性骨质疏松症专家共识(2015)[J]. 中国骨质疏松杂志, 2015, 21(9): 1023-1028.

[5] 蔡康健, 王丽珍, 姚杰, 等. 腰椎椎体有限元建模的最优单元尺寸和材料属性分布及建模方法[J]. 医用生物力学, 2016, 31(2): 135-141.

[6] 秦计生, 王昱, 彭雄奇, 等. 全腰椎三维有限元模型的建立及其有效性验证[J]. 医用生物力学, 2013, 28(3): 321-325.

[7] 尚天裕. 中西医结合治疗骨折[J]. 中国矫形外科杂志, 1995, 21(1): 70-71.

[8] 韦以宗. 中国骨伤科学辞典[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2001: 89.

[9] 康庆林, 张春才, 戴力扬. 生物学内固定(BO)概念、原理与方法[J]. 中国矫形外科杂志, 2003, 11(4): 127-130.

[10] 印红兵. 过伸复位加腰椎牵引法治疗胸腰椎压缩性骨折 38 例[J]. 黑龙江中医药, 2011, 40(5): 21-22.

[11] 吴云强, 周小敏, 陈劲. 过伸位腰椎牵引治疗胸腰椎压缩性骨折[J]. 中国现代医生, 2011, 49(14): 139-140.

[12] 刘贤平, 余春燕. 经皮椎体成形术联合手法复位治疗胸腰椎骨质疏松性压缩骨折的疗效观察[J]. 中医外治杂志, 2017, 26(4): 16-17.

[13] 吴彬彬. 过伸体位下手法复位联合 PVP 与单纯 PKP 治疗 OVCFs 的临床对比研究[D]. 福州: 福建中医药大学, 2017.

[14] 胡继军, 田全良, 王松, 等. PKP 与过伸复位加 PVP 治疗新鲜骨质疏松椎体压缩性骨折的比较[J]. 内蒙古中医药, 2013, 32(5): 93-93.

[15] 胡月明, 庞清江. 手法复位联合微创手术治疗骨质疏松性椎体压缩骨折疗效的 Meta 分析[J]. 中国骨伤, 2015, 28(11): 1042-1047.

[16] 李华, 王云清, 佟磊. 体位及手法复位联合 PVP 治疗骨质疏松性椎体压缩骨折的探讨[J]. 医学理论与实践, 2015(14): 1845-1847.

[17] 李琳, 李华, 王云清, 等. 体位加手法复位联合椎体成形术治疗骨质疏松性椎体压缩骨折的手术配合[J]. 全科护理, 2014(24): 2266-2267.



- [18] 秦虎, 何斌, 王云华, 等. 手法复位结合经皮椎体后凸成形术治疗老年新鲜骨质疏松性椎体压缩性骨折的研究[J]. 医学研究生学报, 2015, 28(4): 385-389.
- [19] Brekelmans WA, Poort HW, Slooff TJ. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts[J]. Acta OrthopaedicaScandinavica, 1972, 43(5): 301-317.
- [20] Liu YK, Ray G, Hirsch C. The resistance of the lumbar spine to direct shear[J]. Orthopedic Clinics of North America, 1975, 6(1): 33-49.
- [21] Adams MA, Hutton WC, Stott JR. The resistance to flexion of the lumbar intervertebral joint[J]. Spine, 1980, 5(3): 245.
- [22] Han KS, Zander T, Taylor WR, et al. An enhanced and validated generic thoraco-lumbar spine model for prediction of muscle forces[J]. Medical Engineering & Physics, 2012, 34(6): 709-716.
- [23] Lafage V, Gangnet N, S en egas J, et al. New interspinous implant evaluation using an in vitro biomechanical study combined with a finite-element analysis[J]. Spine, 2007, 32(16): 1706-1713.
- [24] 彭春政, 张胜年, 陆爱云. 人体躯干骨骼-肌肉-韧带结构三维有限元模型的建立和验证[J]. 中国运动医学杂志, 2010, 29(6): 702-705.
- [25] Liu Q, Zhang J, Sun SC, et al. Application of finite element method in spinal biomechanics[J]. China journal of orthopaedics and traumatology, 2017, 30(2): 190.
- [26] Dreischarf M, Zander T, Shirazi-Adl A, et al. Comparison of eight published static finite element models of the intact lumbar spine: Predictive power of models improves when combined together[J]. J Biomech. 2014, 47(8): 1757-1766.
- [27] Henao J, Aubin C E, Labelle H, et al. Patient-specific finite element model of the spine and spinal cord to assess the neurological impact of scoliosis correction: preliminary application on two cases with and without intraoperative neurological complications[J]. Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering, 2016, 19(8): 901-910.
- [28] Schmidt H, Galbusera F, Rohlmann A, et al. What have we learned from finite element model studies of lumbar intervertebral discs in the past four decades?[J]. J Biomech. 2013, 46(14): 2342-2355.
- [29] Ibarz E, Herrera A, M as Y, et al. Development and kinematic verification of a finite element model for the lumbar spine: application to disc degeneration[J]. BioMed Research International, 2013, (4): 705185.
- [30] Travert C, Jolivet E, Sapin-De BE, et al. Sensitivity of patient-specific vertebral finite element model from low dose imaging to material properties and loading conditions[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2011, 49(12): 1355-1361.
- [31] Zhao WT, Qin DP, Zhang XG, et al. Biomechanical effects of different vertebral heights after augmentation of osteoporotic vertebral compression fracture: a three-dimensional finite element analysis[J]. Journal of Orthopaedic Surgery & Research, 2018, 13(1): 32.
- [32] 杨攀, 章莹, 丁焕文, 等. Pedicle Screw Fixation with Kyphoplasty Decreases the Fracture Risk of the Treated and Adjacent Non-treated Vertebral Bodies: a Finite Element Analysis[J]. 华中科技大学学报(医学英德文版), 2016, 36(6): 887-894.
- [33] Ottardi C, La BL, Pietrogrande L, et al. Vertebroplasty and kyphoplasty for the treatment of thoracic fractures in osteoporotic patients: a finite element comparative analysis[J]. J Appl BiomaterFunct Mater, 2016, 14(2): e197-e204.
- [34] Giambini H, Qin X, Dragomir-Daescu D, et al. Specimen-specific vertebral fracture modeling: a feasibility study using the extended finite element method[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2016, 54(4): 583-593.
- [35] Liang D, Ye LQ, Jiang XB, et al. Biomechanical effects of cement distribution in the fractured area on osteoporotic vertebral compression fractures: a three-dimensional finite element analysis[J]. Journal of Surgical Research, 2015, 195(1): 246-256.
- [36] Fei Q, Li QJ, Li D, et al. Biomechanical effect on adjacent vertebra after percutaneous kyphoplasty with cement leakage into disc: a finite element analysis of thoracolumbar osteoporotic vertebral compression fracture [J]. Zhonghua Yi Xue Za Zhi, 2011, 91(1): 51-55.
- [37] 李孝林, 任伯绪. 过伸复位治疗胸腰椎单纯压缩性骨折的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2011, 15(17): 3127-3130.
- [38] 张宏伟, 张晓刚, 毛兰芳, 等. 有限元分析指导手法治疗单节段胸腰椎压缩骨折伴骨质疏松症 29 例[J]. 中医研究, 2015(4): 51-53.
- [39] 陈小勇, 黄旭东, 姜成龙, 等. 有限元分析在中医手法治疗胸腰段骨折中的研究进展[J]. 新中医, 2010, 42(11): 100-101.

(责任编辑: 冯天保, 钟志敏)