

应用有限元分析骨质疏松性髋部骨折的研究进展

王益莲 李春雯 郑婷婷 姚静超 林敏舫 史晓林

中图分类号: R683.4; R318 文献标识码: A 文章编号: 1006-7108(2011)03-0264-04

摘要: 有限元分析方法是随着电子计算机的发展而迅速发展起来的一种现代计算方法,早期的有限元主要关注于某个专业领域,比如应力或疲劳。新兴的有限元方法使多物理场的模拟成为可能。骨质疏松是一种全身性的骨代谢疾病,其发病率呈逐年上升趋势,严重威胁着老年人的身体健康。骨质疏松性髋部骨折给患者带来了巨大痛苦。本文通过回顾近年来相关研究,分析有限元方法在骨质疏松性髋部骨折的研究进展。

关键词: 有限元; 骨质疏松; 髋部骨折

Research progress of finite element analysis in osteoporotic hip fracture WANG Yilian, LI Chunwen, ZHENG Tingting, et al. Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 310053, China

Corresponding author: SHI Xiaolin, Email: xlshi-2002@163.com

Abstract: Finite element method is one of modern calculating methods developed with a rapid development of electronic computer. Finite element concerns more in certain specialized area, such as stress or fatigue, in early time. The latest finite element method makes it possible to simulate the multi-physics emerging. Osteoporosis is a systemic metabolic bone disease with an increasing incidence year by year. It seriously threatens the health of the elderly people. Osteoporotic hip fracture has brought great suffering to the patients. This paper reviews recent research and progress in studying osteoporotic hip fracture using finite element method.

Key words: Finite-element method; Osteoporosis; Hip fracture

有限元方法的基本原理^[1]是将一个由无限个质点组成并且有无限个自由度的连续体近似为有限个单元所组成的集合体,这样就使结构、运动复杂的研究对象的力学参数计算成为可能。有限元方法涉及了骨骼系统的应力分析、内外固定系统的研究,以及人工各种假体的设计与优化。近年有限元技术在人工关节及其关节软骨、脊柱、小儿脊柱、创伤骨科方面有了更进一步的研究,在计算结果的可靠性方面已经跃上了新台阶,建模更加逼真,计算结果更加可靠,结论更加可信。随着电子信息技术的迅速发展,目前已编制出许多通用的和专用程序,知名的有限元分析软件有 SAP、NASTRAN、ANSYS 等,为有限元的研究奠定了基础^[2]。

1 骨质疏松性骨折

骨质疏松性骨折绝大部分发生于老年病人,其研究对象主要是老年群体,包括更年期的中老年人。以及某些疾病所导致的病理性骨质疏松骨折的病人,可以表现为骨微架构退化,骨量减少,骨强度下降,脆性增加。骨小梁变细变稀,乃至断裂,微骨折的发生,引起周身骨骼的疼痛。因骨质疏松所致的骨折,多见于前臂、胸腰段、髋部等^[3]。选择适宜的治疗方法,提高老年患者生活质量,取决于明确的诊断。对此,有限元方法更能直观,形象化反映损伤程度。

Walsh 等^[4]通过双能 X 线吸收仪 (DXA) 测量骨密度 (BMD) 和计算机断层扫描 (CT) 建立有限元模型,检测神经性厌食症妇女桡骨远端骨破坏载荷、刚度、骨小梁结构,对比正常体重妇女的骨密度和骨小梁,发现其破坏载荷和刚度均有不同程度下降。

作者单位: 310053 杭州,浙江中医药大学

通讯作者: 史晓林, Email: xlshi-2002@163.com

Stein 等^[5]研究异常的微架构和骨强度在绝经后妇女桡骨和胫骨的变化, DXA 测量的 T 分数在胸腰椎、髋关节和上 1/3 桡骨骨折时是相似的,但在下桡骨骨折偏低 ($P < 0.01$)。其中桡骨 (41 ~ 44%) 胫骨 (15 ~ 20%)。进一步提示桡骨骨强度下降,增加了骨折的风险。

杨展宗等^[6]建立 OA 及 OP 患者股骨颈骨小梁的有限元模型,探讨各指标参数及材料性质对骨小梁强度的影响。结果骨小梁的数量越多、密度越高,达到屈服应变的比例就越低。骨小梁的间隔越大,则达到屈服应变的比例就越高。而骨小梁的表面积比及厚度与结构强度无关。

2 髋部的生物力学分析

涉及髋部的骨骼包括:髌骨-髌臼,股骨头,股骨颈及股骨粗隆部分。同其他骨骼结构一样,股骨近端的结构适用于其所承担的应力,并符合以最少的材料获得最大承力结构的特点,这一特性在股骨颈体现的尤为突出。股骨颈内部基本由松质骨构成,其特有的小梁系统共同承担股骨近端的张压应力,临床上常用的 Sign 指数^[7]通过上述骨小梁的不同变化对骨质疏松作出初步诊断。在骨质疏松症中,女性的股骨颈骨密度低于 0.49 g/cm^2 ,男性低于 0.58 g/cm^2 ,受轻微的外力就易发生骨折^[8]。

大多数髋部骨折是由于跌倒引起的,髋部骨折是骨质疏松造成的最严重的并发症,致死率较高,在骨质疏松髋部骨折进行手术治疗后,不足 1/3 的人能够恢复到骨折以前的功能状态,引起骨骼肌肉完整性的丧失,并增加再骨折的风险。而且额外需要进行功能锻炼等。由于股骨头血供的特殊性,骨折部位的血供减少,还会发生股骨头缺血性坏死。赵万鹏等^[9]通过三维重建技术对坏死股骨头的 MR 影像进行重构,获得坏死股骨头的三维几何模型。股骨头从坏死组织百分数 40% 开始就在正常载荷 (300N) 下有发生塌陷的危险,小于 40% 则在较大载荷下有发生塌陷的危险。

建立股骨上段三维有限元模型的基础上,确定边界条件,加载负荷,用三维有限元分析软件计算并图示股骨上段应力分布,验证该部位应力与结构的对应关系^[10],从而证实三维有限元分析方法是一种简便实用的生物力学研究方法,可作为实验生物力学研究的验证和补充方法。

在人体髋关节软骨领域, Li 等^[11]用 Axial Rotation 技术定量测量髌臼和股骨头厚度和体积,软

骨内、外轮廓,得到界面采用半自动三维分割的方法和组合,形成三维表面。使软骨厚度和体积的人体髋关节的 MRI 量化,开创了全新的研究层面。

3 有限元方法与髋部手术的选择

传统保守疗法需长期卧床,持续牵引,增加压疮及全身并发症的可能。凡患者健康允许,手术指征明确,能耐受麻醉和手术者,大部分髋部骨折均可考虑采用手术治疗,术后定期复查,早期开展功能锻炼。

3.1 外固定

外固定具有创伤小,出血少,固定可靠的优点,骨折固定的稳定性如何,取决于外固定器与骨构成空间复合系统的力学情况^[12]。马洪顺等^[13]模拟作用于股骨头不同方向的压力进行三维有限元分析。得出了股骨颈、股骨干、外固定钢针等各节点的主应力 σ_1 、 σ_3 和位移值。还以应变电测技术与原理对模拟股骨颈骨折外固定器固定后进行应变电测量,测量了股骨干、外固定器钢针等各测点的应变、得出了各测点的应力值。初步验证外固定器的设计符合生物力学原理,具有较好的强度、刚度和稳定性。

3.2 内固定

常用的内固定器械包括 Gamma 钉,动力髋螺钉 (dynamic hip screw, DHS), 股骨近端髓内钉 (proximal femoral nail, PFN) 等。Eberle 等^[14]提出髋部骨折的稳定性决定了髓内钉生物力学的疲劳度。在两个不同的负荷的情况下模拟机械试验和有限元分析:证实低载荷情况下,不稳定骨折会导致髓内钉失败 (28%), 疲劳断裂在螺钉孔附近,这也是对韧性材料最高应力集中的位置。

许瑞杰等^[15]在单钉固定的情况下对 Pauwel's 角为 50° 的经颈型骨折模型施加载荷,通过不同固定角度时的力学特征综合评价固定效果。单钉固定时当固定角度为 50° 时,可取得最佳的力学效果;如采用多钉固定,两钉横放效果最差,两钉竖放抗扭性较差,两钉斜放和三钉固定时力学环境好。从临床实用角度综合分析,单钉固定力学效果较好,且操作简单。

3.3 植入物的生物力学特性

种植体松动是全关节失败的最重要并发症,这可能与水泥强度,水泥假体界面,水泥骨界面,手术技术有关。Pérez 等^[16]主要探讨骨水泥界面对水

器械设计的有用工具。Scheerlinck 等^[17]应用有限元分析水泥固化过程中收缩产生的少量微孔对稳定性的影响,交替扭转和横向荷载,有30%的种植体表面产生疲劳裂纹,降低稳定性。

Ralf 等^[18]对骨水泥全髋关节置换术后患者在平地行走和爬楼梯时肌肉-骨骼模型的有限元分析认为,股骨前倾角和偏心角的改变将增加骨的局部张力和骨水泥压力,从而增加应力遮挡,因此增加假体周围骨吸收。Gross 等^[19]设计了不同形状的股骨干中空假体,与相应尺寸及弹性模量的实心假体进行比较,用有限元模式分析界面压力和应力遮挡。结果发现:使用股骨干中空圆柱形假体比实心股骨干假体明显减少假体-骨界面压力和应力遮挡,有利于减少骨吸收。

对于髌臼假体松动所致的髌臼翻修尤其是伴有髌臼骨缺损的翻修。马文辉等^[20]将一种临床上用于髌臼骨缺损的新型三翼髌臼翻修假体的设计进行有限元分析及力学评价,建立三翼翻修假体及缺损髌臼的有限元分析,发现三翼结构有助于减少假体的松动。Moazen 等^[21]在体外实验模型用有限元模拟股骨假体周围骨折内固定,对数据分析。可用于检查股骨假体周围骨折,从而找到最佳的特定类型的骨折固定方法。

此外,利用计算机辅助设计软件与三维有限元分析软件的参数双向传递功能,建立包含直径和长度连续变化的种植体骨块三维有限元模型,建成后三维有限元模型与实体组织具有良好的几何相似性,为组织器官的假体修复提供了一种新的方式^[22]。

4 展望

容积定量模式可以限定骨皮质和骨小梁体积,骨密度,对患者全骨强度的进行准确估计,从而有助于有限元建模^[23]。Efstathopoulos 等^[24]对股骨植入远端髓内钉分段进一步分析固定骨远端的载荷,以提高手术成功率。低骨模量、增加压力可能会导致髌关节表面骨压缩,有诱发股骨颈骨折的可能性^[25],而加载方向向下的应力最容易导致近端股骨骨折^[26]。对此,Pal 等^[27]提出,为了减少股骨颈骨折的潜在危险,患者应尽量避免在早期手术后的高负荷活动。有限元模型生成,确定具体载荷和边界条件,解决方案可以自动完成。借助生成的模型,用于创建具有高品质的统计模型网格,在求解网格调整的情况下直接分析数据的范围^[28]。运用有限元

建立从臀部到脚的多体模型^[29]尚可以模拟常见的人受伤的风险,预测肌肉力量,膝盖、大腿、臀部受伤的激活作用^[30]。

综合国内外有关骨质疏松性髌部骨折的三维重建,有限元模型的多方面报道,以及国内外相关实验工作的了解,有限元模型研究静态较多,而动态虚拟现实交互有限元分析的报道较少。该项技术通过计算机图形构成的三维空间,或是将现实数据化,通过计算机构成一种虚拟环境,是人工智能化的高度体现。可以在多领域应用,具有广阔的研究前景。

【参 考 文 献】

- [1] Lee WH, Kim TS, Cho MH, et al. Methods and evaluations of MRI content-adaptive finite element mesh generation for bioelectromagnetic problems. *Phys Med Biol*, 2006, 51 (23): 6173-6186.
- [2] Di Mascio V, Bellini CM, Galbusera F, et al. Lumbar total disc replacement: A numerical study. *J Appl Biomater Biomech*, 2010, 8(2): 97-101.
- [3] Cheung CL, Xiao SM, Kung AW. Genetic epidemiology of age-related osteoporosis and its clinical applications. *Nat Rev Rheumatol*, 2010, 6(9): 507-517.
- [4] Walsh CJ, Phan CM, Misra M, et al. Women with Anorexia Nervosa: Finite Element and Trabecular Structure Analysis by Using Flat-Panel Volume CT. *Radiology*, 2010, 257 (1): 167-174.
- [5] Stein EM, Liu XS, Nickolas TL, et al. Abnormal microarchitecture and reduced stiffness at the radius and tibia in postmenopausal women with fractures. *J Bone Miner Res*, 2010, 6 (18): 263-274.
- [6] 杨展宗,沈信伟,陈文全. 退行性关节炎与骨质疏松性股骨颈骨小梁的有限元分析. *中华创伤骨科杂志*, 2005, 7(10): 913-917.
- [7] 王亦聰. 骨与关节损伤第4版. 北京: 人民卫生出版社, 2007: 1149-1151.
- [8] 刘忠厚. 骨矿与临床. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 3-4.
- [9] 赵万鹏, 林峰, 卢清萍, 等. 三维重建及有限元分析预测股骨头坏死塌陷. *中国生物医学工程学报*, 2005, 24(6): 784-787.
- [10] 李苏皖, 卜海富, 何仿, 等. 正常双膝站立位股骨上段应力分布的三维有限元分析. *临床骨科杂志*, 2003, 6(1): 1-4.
- [11] Li W, Abram F, Beaudoin G, et al. Human hip joint cartilage: MRI quantitative thickness and volume measurements discriminating acetabulum and femoral head. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2008, 55(12): 2731-2740.
- [12] Marsh JL, McKinley T, Dirschl D, et al. The sequential recovery of health status after tibial plafond fractures. *J Orthop Trauma*, 2010, 24(8): 499-504.
- [13] 马洪顺, 周振平, 王玉臣, 等. 模拟股骨颈骨折外固定器固定结构模型三维有限元计算与应力分布实验研究. *中国生物医学工程学报*, 2005, 24(1): 8-11.

- [14] Eberle S, Bauer C, Gerber C, et al. The stability of a hip fracture determines the fatigue of an intramedullary nail. *Proc Inst Mech Eng H*, 2010, 224(4):577-584.
- [15] 许瑞杰,李涤尘,孙明林. 股骨颈骨折内固定方式的有限元分析. *医用生物力学*, 2004, 19(6):88-92.
- [16] Pérez MA, García-Aznar JM, Doblaré M. Does increased bone-cement interface strength have negative consequences for bulk cement integrity? A finite element study. *Ann Biomed Eng*, 2009, 37(3):454-466.
- [17] Scheerlinck T, Broos J, Janssen D, et al. Mechanical implications of interfacial defects between femoral hip implants and cement: a finite element analysis of interfacial gaps and interfacial porosity. *Proc Inst Mech Eng H*, 2008, 222(7):1037-1047.
- [18] Ralf U, Kleeman A, Markus O, et al. Thawing a rising from increased femoral antever stress. *Orthop Res*, 2003, 21(11):767-774.
- [19] Gross S, Abele W A. Finite element analysis of hollow stem medhip prostheses as a means of reducing stress shielding of the femur. *Biomechanics*, 2001, 34(2):995-1003.
- [20] 马文辉,张学敏,王继芳,等. 三翼髓内假体有限元模型的建立及其力学分析. *中华骨科杂志*, 2010, 30(8):778-782.
- [21] Moazen M, Jones AC, Jin Z, et al. Periprosthetic fracture fixation of the femur following total hip arthroplasty: A review of biomechanical testing. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2011, 26(1):13-22.
- [22] 戴晓霞,孔亮,刘宝林. 包含直径和长度连续变化种植体骨块三维有限元模型的建立. *中国组织工程研究与临床康复*, 2007, 11(1):115-126.
- [23] Lang TF. Quantitative computed tomography. *Radiol Clin North Am*, 2010, 48(3):589-600.
- [24] Efsthopoulos N, Nikolaou VS, Xypnitos FN, et al. Investigation on the distal screw of a trochanteric intramedullary implant (Finail) using a simplified finite element model. *Injury*, 2010, 41(3):259-265.
- [25] Long JP, Santner TJ, Bartel DL. Hip resurfacing increases bone strains associated with short-term femoral neck fracture. *J Orthop Res*, 2009, 27(10):1319-1325.
- [26] Bessho M, Ohnishi I, Matsumoto T, et al. Prediction of proximal femur strength using a CT-based nonlinear finite element method: differences in predicted fracture load and site with changing load and boundary conditions. *Bone*, 2009, 45(2):226-231.
- [27] Pal B, Gupta S, New AM. A numerical study of failure mechanisms in the cemented resurfaced femur: effects of interface characteristics and bone remodeling. *Proc Inst Mech Eng H*, 2009, 223(4):471-484.
- [28] Bryan R, Nair PB, Taylor M. Use of a statistical model of the whole femur in a large scale, multi-model study of femoral neck fracture risk. *J Biomech*, 2009, 42(13):2171-2176.
- [29] Kerrigan JR, Parent DP, Untaroiu C, et al. A new approach to multibody model development: pedestrian lower extremity. *Traffic Inj Prev*, 2009, 10(4):386-397.
- [30] Chang CY, Rupp JD, Reed MP, et al. Predicting the effects of muscle activation on knee, thigh, and hip injuries in frontal crashes using a finite-element model with muscle forces from subject testing and musculoskeletal modeling. *Stapp Car Crash J*, 53(11):291-328.

(收稿日期: 2010-10-15)