

应用有限元法定量分析绝经后女性骨强度的研究

谭松¹, 贾莹¹, 燕燕¹, 汤婷婷¹, 胡曼云², 赵璨², 潘亮¹

(贵阳市第四人民医院医学影像科¹, 内分泌科², 贵州 贵阳 550002)

摘要:目的 应用有限元法计算机辅助生物力学分析法评定绝经期女性骨强度值,判断其骨质疏松程度。方法 收集已具有骨密度检查结果的 23 名绝经后女性股骨颈 CT 数据,对数据进行分割处理,同时创建有限元数学模型,把相应数据代入 ANSYS 分析软件进行结构力学分析,获取股骨上段的应力云图,分析研究对象的骨强度与骨密度情况。结果 23 例女性骨密度值为 0.470~0.792 g/cm²,骨强度值为 1094~3078 N,均低于文献报道的正常成人左股骨上段骨强度值(约 4000 N);ANSYS 分析软件显示,骨强度与骨密度呈正相关($r=0.617, P<0.05$)。结论 绝经期女性骨强度与骨密度均低于正常人,应用有限元法计算出的骨强度定量值与骨密度值呈正相关,有限元法可用于定量评估骨强度。

关键词:绝经;股骨;有限元法;骨强度

中图分类号:R580

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1006-1959.2020.12.025

文章编号:1006-1959(2020)12-0088-03

Quantitative Analysis of Postmenopausal Female Bone Strength Using Finite Element Method

TAN Song¹, JIA Ying¹, YAN Yan¹, TANG Ting-ting¹, HU Man-yun², ZHAO Can², PAN Liang¹

(Department of Medical Imaging¹, Department of Endocrinology², the Fourth People's Hospital of Guiyang City, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract: Objective To use the finite element method computer-aided biomechanical analysis method to evaluate the bone strength value of menopausal women and determine the degree of osteoporosis. Methods Collecting the CT data of 23 postmenopausal female femoral necks with bone density examination results, segment the data, and create a finite element mathematical model, and substitute the corresponding data into ANSYS analysis software for structural mechanical analysis to obtain the stress cloud of the upper femur to analyze the bone strength and bone density of the research object. Results The bone mineral density of 23 women was 0.470~0.792 g/cm², and the bone strength value was 1094~3078 N, which were all lower than the bone strength value of normal adult left femur reported in the literature (about 4000 N); ANSYS analysis software showed that the bone strength, there was a positive correlation with bone density ($r=0.617, P<0.05$). Conclusion The bone strength and bone density of menopausal women are lower than those of normal people. The quantitative value of bone strength calculated by the finite element method is positively correlated with the bone density value. The finite element method can be used to quantitatively evaluate bone strength.

Key words: Menopause; Femur; Finite element method; Bone strength

随着人口老龄化的进展,骨质疏松症已经成为我国常见慢性病,特别是绝经后女性,已成为该病高发人群。如何有效的诊断、预防、治疗、评估骨质疏松症是当前医学关注的课题。目前判断骨质疏松程度的方法主要是基于双能 X 光吸收法(DEXA)的骨密度测量,但骨密度仅仅是判断骨骼脆性的部分指标,单独使用容易造成误诊。骨强度概念的引入强调了骨质量的重要性,而目前尚缺乏准确的定义。骨强度和生物力学相关,有准确的力学定量结果才有临床意义,因此估强度策略成为临床医生最关心的问题之一。目前研究骨强度的文献多为定性的评估,缺乏相关定量研究。本研究通过有限元法计算机辅助生物力学分析法计算受检者的定量骨强度值,以此来评估其骨质疏松程度,现报告如下。

1 材料与方法

1.1 材料来源 受检者选择:根据 DEXA 检查 T 值评分随机选择正常或骨量减少或骨质疏松 23 名绝经后女性,年龄在 52~87 岁;骨密度(BMD)选择股骨颈区域值。男性患者、绝经前患者、股骨颈骨折后的患者、长期卧床患者、继发于其他疾病所致骨质疏松患者(比如肾性质骨质疏松、甲状旁腺功能亢进性骨

质疏松)等排除在本项研究之外。

1.2 方法 采用飞利浦 Brilliance64 排螺旋 CT 扫描受检者髋关节,扫描参数 120 KV、140 mAs、1 mm 层厚、0.75 mm 层间距、512×512 矩阵;扫描范围:髋臼上方 1 cm 处到股骨小粗隆下方 0.5 cm 处。扫描完成后,导出 DICOM 格式图像数据,并将之代入骨强度相关软件处理。骨密度检查仪为 GE Lunar Prodigy DEXA 机,检查位置为受检者股骨颈。

1.3 图像处理 电脑硬件:英特尔 Core i7-7700 3.60 GHz 四核中央处理器;金士顿 DDR4 2666MHz 4×16G 64 G 内存;东芝 DT01ACA200 2 TB 硬盘;AMD Barco MXRT 2600 2 GB 显卡。操作系统:Windows 10 教育版,应用软件:交互式医学图像控制系统 MIMICS 17.0、有限元分析软件 ANSYS 16.0。将 CT 扫描数据代入 MIMICS,进行分割、填充、编辑后获得股骨上段的三维模型,同时进行网格化处理(图 1),并将网格化的数据以 element 格式输入到 ANSYS 软件进行有限元分析,获得应力云图(图 2),并计算出相应的应力值——骨强度值,单位为牛顿(N)。

1.4 统计学分析 运用 IBM SPSS Statistics 26 统计学软件对所测得的骨密度值与计算出的骨强度进行相关性分析。

作者简介:谭松(1975.3-),男,贵州贵阳人,本科,副主任医师,主要从事骨关节影像、医学信息学研究



图 1 element 格式的网格化模型



图 2 应力云图

2 结果

23 例女性骨密度值为 $0.470\sim 0.792\text{ g/cm}^2$, 骨强度值为 $1094\sim 3078\text{ N}$, 均低于文献报道的正常成人

左股骨上段骨强度值(约 4000 N), 具体年龄、骨密度及骨强度结果见表 1。相关性分析显示, 骨强度与骨密度呈正相关($r=0.617, P<0.05$)。

表 1 23 例女性骨密度及骨强度数据

编号	年龄(岁)	骨密度(g/cm^2)	ANSYS 骨强度(N)	编号	年龄(岁)	骨密度(g/cm^2)	ANSYS 骨强度(N)
1	58	0.735	1764	13	76	0.470	1291
2	71	0.624	2068	14	72	0.711	1633
3	78	0.577	1094	15	77	0.549	1214
4	82	0.657	1137	16	67	0.616	2109
5	63	0.768	2972	17	78	0.697	2811
6	73	0.802	2567	18	66	0.669	2838
7	72	0.542	2037	19	60	0.737	1663
8	65	0.519	1325	20	83	0.656	1491
9	87	0.604	1742	21	64	0.629	1909
10	67	0.736	2451	22	68	0.792	2409
11	62	0.672	1619	23	63	0.792	3078
12	52	0.633	2608				

3 讨论

骨质疏松症是由于多种原因导致的骨密度和骨质量下降, 骨微结构破坏, 造成骨脆性增加、骨强度降低, 从而容易发生骨折的全身性骨病。目前用于诊断骨质疏松的主要检查手段为基于双能 X 光吸收法的骨密度测量, 由于其经济简便安全、重复性较好等优势在临床广泛应用, 也是世界卫生组织推荐的测量骨密度的重要方法; 其他较常用的方法还有 CT 定量骨密度检测法(QCT), 该方法排除了软组织以及骨皮质的干扰, 测出的骨密度值能够更加准确、

客观的反映人体骨矿物质的代谢情况, 目前已经逐渐获得医学界的认可。骨密度全称是骨骼矿物质密度, 是骨骼强度的一个重要指标, 在临床使用骨密度值时由于各种骨密度检测仪器的绝对值不同, 通常使用 T 值判断骨密度是否正常。骨密度广泛用于骨质疏松症诊断和骨折风险评估, 其可以较好的预测骨质疏松的人群发病趋势, 但对于识别处于危险状态的个体并不敏感。

近年来, 有限元法(FEM)在生物力学方面受到了广泛关注, 最常见的临床应用是利用髋关节 CT

数据的有限元模型来评估骨强度^[1]。骨强度主要由骨密度和骨质量两部分决定,骨密度可以通过 DEXA、QCT 等直接测定,但骨质量如何测定是当前的一个医学难题。骨质量的影响因素包括骨结构、骨转换、矿化程度、损伤累计、胶原特性等,目前的研究大都停留在定性评估上,定量评估多是在离体解剖标本上进行的生物力学研究,几乎没有在活体上无损的、可靠的定量评估方法。

有限元分析是计算机辅助运用数学模型对物理系统的近似模拟,利用有限的单元去探知无限未知量的真实世界的方法。其基本原理是将采集到的真实系统数据进行规范分割,应用矢量分析软件给分割采样的数据赋值,并建立网格化数学模型,最后应用有限元分析软件对数学模型进行计算,获取所需要的相应数据。这是一个类似求解连续体的计算方法,网格化就是把真实的连续型结构转化为节点状的离散型结构的过程;矢量化就是对离散结构的每一个节点所构建单元选定的函数关系赋值的过程,因此有限元分析计算出的结果只能是整个求解域上的近似解。在生物力学中,有限元分析法可根据需要产生各种各样的生物模型,对模型进行实验条件仿真,在不同实验条件下模拟任意部位变形(拉伸、弯曲、扭转等),从而分析其中的应力应变分布、内部能量变化、极限破坏分析、强度分析、稳定性和疲劳损伤以及寿命的预测等。有限元法目前已成为工程科学技术中用于模拟并解决各种工程力学等物理问题的最好方法之一^[2]。

本研究主要运用有限元分析受检者股骨颈的 CT 数据,建立数学模型,通过计算机虚拟股骨颈数字模型的在外部压力的施加下,其内部应力发生的变化情况,计算出其能够承受的最小断裂力,即骨强度的定量值。基于 CT 图像的有限元法的因素整体个性化评估骨强度,是一种具有无创性、定量分析、早期综合评估骨强度,预测骨折风险和部位的方法^[3]。本研究初步发现在应力云图上股骨粗隆间及股骨颈头下部分显示的骨强度最低,与临床上股骨颈骨折常见发生部位相吻合,从结构力学的层面上解释了其内在联系,究其原因可能和其应力塑形、几何形态、皮质骨与松质骨的比例等因素有关,具有个性化的倾向。本研究结果显示,23 名女性骨密度值为 0.470~0.792 g/cm²,骨强度值为 1094~3078 N,均低于文献报道的正常成人左股骨上段骨强度值(约 4000 N),其骨强度与骨密度呈正相关($r=0.617, P<0.05$),因此从总体上看,骨密度降低时骨强度也随之降低。有限元分析大多数为静态分析其应力-应变分布的状态^[4],其在运动中的生物力学分析稍显不足,这使仿真分析的准确度和效率降低。在仿真分析的过程中,其结果本身的精确度受到很多因素的影响,特别是有限

单元的分割对仿真计算的结果影响就很大。合理的单元形状和尺寸能极大提高分析结果的精度和可行度,反之则影响精度。因此分割步骤是有限元分析过程中的关键元素,由于骨质量的降低和关节间隙的狭窄,在关节退变的病例中具有很大的挑战性。因为需要大量的手动交互来保证有限元模型创建的合适几何形状,所以骨骼分割被认为是最耗时的步骤^[5]。快速准确的图像分割、合理有效的边界条件及载荷是决定有限元分析的两个关键点,边界条件和载荷的合理设定是保证有限元分析正确性的决定因素。有限元模拟的边界条件被定义为复制髋关节的侧向下移,这被认为是低强度创伤性髋关节骨折最相关的加载模式。本研究中,有限元模型图像平面的内侧及外侧的 X 轴以及 Y 轴被定义为外力冲击方向。本研究也存在一定的不足之处:只有 23 名受检者数据,所使用的标准参考值均为国外的生物力学研究数值,是否适合我国人群还需进一步探讨。随着人们对生物力学的认识加深,计算机技术及软件的进一步发展,相信今后骨质疏松症研究的前景会更加广阔,通过有限元分析方法对骨质疏松性股骨上段生物力学进行分析,为疾病的发生、发展提供生物力学和形态学上的数据支持;有限元分析还可以从生物力学的角度分析骨折术后生物力学变化的影响,能够对疾病的预后提供准确的参考方向。下一步的研究需要搜集健康国人的相关资料,建立标准化的国人左侧股骨颈骨强度的数据库,为进一步研究骨质疏松时骨强度的变化做好理论基础。

综上所述,本研究发现绝经期女性骨强度与骨密度均低于正常人,应用有限元法计算出的骨强度定量值与骨密度值呈正相关,该法可用于定量评估骨强度。

参考文献:

- [1]Engelke K,Lang T,Khosla S,et al.Clinical Use of Quantitative Computed Tomography-Based Finite Element Analysis of the Hip and Spine in the Management of Osteoporosis in Adults:the 2015 ISCD Official Positions-Part II [J].Journal of Clinical Densitometry,2015,18(3):359-392.
- [2]倪鹏辉,张鹰,杨晶,等.临床骨科中应用的有限元分析法:新理论与新进展[J].中国组织工程研究,2016,20(31):4693-4699.
- [3]仰嘉轩,郭海玲,毛敦,等.骨质疏松症患者腰椎有限元模型的建立与骨骼强度分析[J].中国中医骨伤科杂志,2016,25(5):13-17.
- [4]万义文.基于股四头肌有限元模型的推拿揉法生物力学参数研究[D].成都中医药大学,2016.
- [5]Schwarzenberg P,Dailey HL.Elementwise material assignment in reconstructed or transformed patient-specific FEA models developed from CT scans [J].Computer Methods in Biomechanics&Biomedical Engineering,2019(2019):92-102.

收稿日期:2020-02-28;修回日期:2020-04-13

编辑/成森