

论 著

基于CT有限元分析预测椎体撞击骨折的研究*

孟宁波¹ 徐 凯¹ 宋元礼¹
张鲁东¹ 周 静² 徐 岳^{1,*}

1.淄博一四八医院骨科二区

(山东 淄博 255300)

2.贵阳中医学院附属医院骨科

(贵州 贵阳 550001)

【摘要】目的 本研究旨在通过基于CT定量有限元分析(finite element analysis, FEA)来确定椎体强度与椎体骨折(vertebral fracture, VF)、骨密度(bone mineral density, BMD)之间的关系,以期临床诊治提供参考。方法 回顾性分析本院于2020年1月至2020年12月期间收治的26例椎体骨折患者和62例匹配的对照组。腰椎CT扫描评估椎体压缩强度、积分vBMD、骨小梁vBMD、基于CT的BMC和基于CT的aBMD。结果 调整年龄、BMI和椎体骨折状态后,基线时脊柱强度较低与新发或恶化的椎体骨折风险增加相关(OR=5.2, 95%CI: 1.3-19.8)。ROC曲线下面积显示,椎体强度比基于CT的aBMD更好地预测椎体骨折的发生(AUC=0.804比0.715, $P=0.05$),但不如积分vBMD(AUC=0.815)或基于CT的BMC(AUC=0.794)。此外,脆性骨强度阈值在识别椎体骨折方面倾向于比骨密度分类的骨质疏松症有更好的敏感性(0.46 vs. 0.23, $P=0.09$)。结论 椎体强度测量与椎体骨折事件之间存在关联,基于CT的有限元分析估计的骨强度提供了同等或更好的预测椎体骨折事件的能力,基于CT的有限元分析估计椎体强度对于识别脊柱骨折的高危患者是有用的。

【关键词】CT定量;椎体强度;椎体骨折;骨密度

【中图分类号】R274.1

【文献标识码】A

【基金项目】国家自然科学基金地区科学

基金项目(81760884)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.08.043

Research on Predicting Vertebral Impact Fractures Based on CT Finite Element Analysis*

MENG Ning-bo¹, XU Kai¹, SONG Yuan-li¹, ZHANG Lu-dong¹, ZHOU Jing², XU Yue^{1,*}.

1.Department of Orthopaedics 2, 148th Hospital, Zibo 255300, Shandong Province, China

2.Department of Orthopaedics, Affiliated Hospital of Guiyang College of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550001, Guizhou Province, China

ABSTRACT

Objective This study aims to determine the relationship between vertebral strength, vertebral fracture (VF), and bone mineral density (BMD) based on CT quantitative finite element analysis (FEA), in order to provide reference for clinical diagnosis and treatment. **Methods** A retrospective analysis was conducted on 26 patients with vertebral fractures and 62 matched control groups admitted to our hospital from January 2020 to December 2020. Lumbar CT scanning evaluates vertebral compression strength, integral vBMD, trabecular vBMD, CT based BMC, and CT based aBMD. **Results** After adjusting for age, BMI, and vertebral fracture status, lower baseline spinal strength was associated with an increased risk of new or worsening vertebral fractures (OR=5.2, 95% CI: 1.3-19.8). The area under the ROC curve shows that vertebral body strength is better than CT based aBMD in predicting the occurrence of vertebral fractures (AUC=0.804 vs 0.715, $P=0.05$), but not as good as integrating vBMD (AUC=0.815) or CT based BMC (AUC=0.794). In addition, the brittle bone strength threshold tends to have better sensitivity in identifying vertebral fractures compared to osteoporosis classified by bone density (0.46 vs. 0.23, $P=0.09$). **Conclusion** There is a correlation between vertebral body strength measurement and vertebral fracture events. Bone strength estimation based on CT finite element analysis provides equal or better predictive ability for vertebral fracture events. Estimation of vertebral body strength based on CT finite element analysis is useful for identifying high-risk patients with spinal fractures.

Keywords: CT Quantification; Vertebral Strength; Vertebral Fracture; Bone Density

椎体骨折(VF)是最常见的骨质疏松性骨折。虽然双能X射线骨密度仪(DXA)评估的面骨密度(areal bone mineral density, aBMD)是评估骨折风险的标准工具,但近一半的脊椎骨折患者在DXA检查中aBMD正常^[1]。随着人口老龄化导致的骨折数量持续上升,更准确地识别脊椎骨折的高危人群可能会促进有效地使用现有的干预措施来减少骨折^[2]。此外,随着骨质疏松症筛查率的下降,DXA对骨折风险评估的骨密度以外的技术验证可能会提供替代方法来增加骨质疏松症筛查的人数。在过去的十年中,通过定量CT图像的有限元分析(FEA)来估计整个骨强度显示出作为评估骨折风险和治疗效果的一种方法的前景。此外,有限元分析得出的椎体强度测量与普遍的椎体骨折相关^[3]。然而,到目前为止,只有两项研究调查了由有限元分析得出的椎体强度来预测椎体骨折事件^[4]。因此,需要对包括男性和女性在内的意外脊椎骨折进行更多的研究,以证实该技术的实用性。

此外,低强度和脆性骨强度的阈值最近被建议作为临床解释有限元分析强度的测量指南。先前的研究表明^[5],在预测发生椎体骨折时,基于有限元分析的强度测量似乎优于aBMD;然而,没有独立的研究测试提出的骨强度阈值识别最终骨折者的能力,也没有将它们的敏感性和特异性与基于aBMD阈值的那些进行比较^[6]。因此,本研究旨在通过基于CT定量有限元分析(finite element analysis, FEA)来确定椎体强度与椎体骨折(vertebral fracture, VF)、骨密度(bone mineral density, BMD)之间的关系,以期临床诊治提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究资料 回顾性分析本院于2020年1月至2020年12月期间收治的26例椎体骨折患者和62例匹配的对照组,该研究得到了医院伦理审查委员会的批准(2021125),所有患者均随访3年。对照组按性别、年龄和BMI与患者组进行匹配,两组间差异无统计学意义($P<0.05$)。股骨近端和腰椎的“脆弱骨强度”的性别阈值女性为4500 N,男性为6500 N。这些椎体强度阈值使用L1和L2椎体水平的平均强度来验证骨折预测,并与骨小梁vBMD的骨质疏松阈值相对应。因此,本研究CT扫描不包括L1和L2,是在L3进行。为了说明这一点,本研究通过简单地乘以0.89的比例系数,将本研究L3强度测量尺度调整为等效的L1/L2平均值,以便本研究可以直接将本研究测量结果与先前建立的L1/L2阈值进行比较。为了比较基于CT的有限元分析和基于CT的骨质疏松症的敏感性,本研究使用了骨小梁骨质疏松症的诊断阈值($80\text{mg}/\text{cm}^3$)。对于本研究基于CT的L3 aBMD, T-Score $\leq$ 2.5的人被认为是骨质疏松症。

1.2 研究方法 参与者在基线时进行体积CT扫描,管电压为120kVp,管电流为320至400 mA(取决于身体重量),机架旋转500ms,切片厚度2.5mm。采集正侧位图像后,采集CT扫描序列评估,包括一次胸部CT扫描(从气管隆突到横膈部40~68层)和一次腹部扫描

【第一作者】孟宁波,男,副主任医师,主要研究方向:脊柱外科。E-mail: liufang7784@163.com

【通讯作者】徐 岳,男,住院医师。主要研究方向:脊柱外科。E-mail: liufang7784@163.com

(L5/S1交界处上方150 mm)。使用Discovery VCT 64层PET/CT扫描仪，管电压120kVp，管电流300或350 MA(视体重而定)，机架旋转350ms，层厚2.5 mm。在获取正侧位图像后，分别对胸部(从肺底到肺尖)和腹部(S1椎体顶部上方150mm)进行CT扫描^[2]。专科医生使用Genant的半定量(SQ)方法对T4至L4椎体骨折进行评估。每个椎体按4分标准评分：无骨折(SQ0)、轻度(SQ1)、中度(SQ2)或重度(SQ3)骨折。普遍的椎体骨折定义为基线时SQ1或更高级别的任何椎体。骨折病例包括所有新发或恶化的脊椎骨折患者^[3]。新骨折定义为基线时SQ0级(无骨折)和随访时SQ1或以上的椎体，而恶化骨折定义为基线时SQ1或SQ2级在随访时至少增加一个等级的椎体^[4]。对于每个个体，脊椎骨折的严重程度由得分最高的椎体的等级决定。有限元分析和骨体积测量由专科医师在基线CT扫描上进行，盲法病例对照状态，使用VirtuOst软件对L3椎体进行分析。

脊椎强度(N)定义为2%变形时的压缩力，使用相同的软件包测定骨小梁和整体骨密度，以及椎体骨矿含量(BMC)。积分vBMD(mg/cm³)定义为包括终板在内的整个椎体的平均密度^[5]。BMC被定义为整个椎体的总矿物质质量，使用与积分vBMD相同的轮廓。骨小梁vBMD(mg/cm³)定义为位于椎体中部10mm的骨小梁内的椭圆形体积的平均密度。

1.3 统计学方法 使用SAS 9.3和R Version 3.2.5进行统计分析，使用条件Logistic回归来确定预测变量和事故骨折病例状态之间的关联，计算优势比(OR)和95%的可信区间。模型根据年龄、BMI和/或普遍的脊椎骨折状态进行了调整。对基于CT的aBMD的额外调整被添加到椎体强度模型中。在调整了年龄和BMI的模型中，本研究观察了基于CT的aBMD、BMC、积分vBMD和椎体强度的ROC曲线。测定ROC曲线的曲线下面积(AUC)，并进行统计学比较。本研究还进行了分层分析，仅包括中/重度(SQ2+)骨折病例及其对照。使用基于CT的aBMD、骨小梁vBMD和椎体强度阈值计算敏感性、特异性、阳性预测值和阴性预测值。计算了这些参数的可信区间和显著性P值。

2 结 果

2.1 基于CT有限元分析预测椎体撞击骨折的示意图 如图1所示，本研究基于半自动算法测量了基于CT的L3椎体的aBMD(g/cm²)。简而言之，在MatLab中创建了一个定制程序来勾勒椎体的轮廓，使用BMD校准衰减值和已知像素大小的平均值进行(PA) L3 aBMD的前后测量(图1A和1B)。研究发现，基于CT的aBMD测量值与DXA测量值有很强的相关性(R²=0.84，P<0.01，图1C)。本研究使用回归方程来校准基于CT的aBMD测量值，使其与临床接受的骨质疏松症阈值相同(图1D)。

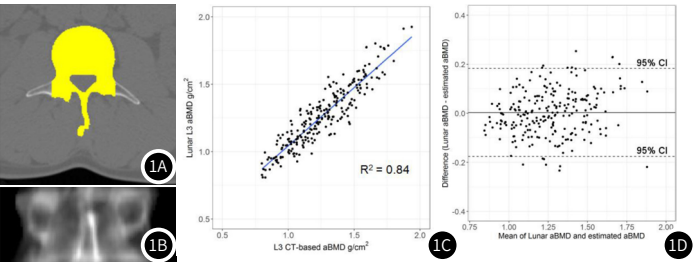


图1A 包含后方元素的等高线CT图像；
图1B 来自CT表面投影的基于CT的aBMD图像；
图1C 测量的L3 aBMD和基于CT的aBMD之间的线性回归；
图1D aBMD和估计基于CT的aBMD的Bland-A1tman图。

2.2 L3椎体水平骨测量的风险及优势比分析 具体如表1所示，调整了年龄和BMI后，较低的椎体强度仍然与椎体骨折(OR=5.1，95%CI: 1.5~17)相关，较低的积分vBMD、骨小梁vBMD和基于CT的BMC也与椎体骨折相关。椎体骨折事件与基于CT的aBMD之间的关联弱于基于CT的体积测量(OR=1.6，95%CI: 0.9-2.6，P=0.1)。在所有模型中，椎体强度是发生VF的一个显著更好的预测因子，AUC比较显示积分vBMD优于基于CT的aBMD(P=0.03)，而BMC没有，但接近(P=0.07)。当仅考虑中度和重度偶发骨折

(SQ2+)时，在调整年龄和BMI后，所有预测因素与偶发椎体骨折显著相关。在调整流行的椎体骨折状态后，小梁骨密度(P=0.053)和CT-aBMD(P=0.08)与椎体骨折的发生率不再显著相关。值得注意的是，中度和重度椎体骨折的优势比通常高于考虑所有意外骨折时的比值比。调整CT aBMD后，椎体强度降低仍与椎体骨折有关(OR=6.64，95%CI: 1.2-37.8，P=0.03)。

表1 L3椎体水平骨测量的风险及优势比

	未调整	调整年龄和BMI
是否发生脊椎骨折 (26例VF患者，62例对照)		
积分vBMD	2.8(1.4-5.5)	3.6(1.5-8.6)
小梁vBMD	2.1(1.1-4.1)	2.4(1.1-5.3)
基于CT的aBMD	1.6(0.9-2.6)	1.8(1.0-3.3)
基于CT的BMC	3.3(1.4-7.9)	3.8(1.6-9.2)
FEA椎体强度	2.8(1.3-6.2)	3.8(1.5-9.2)
急性中、重度椎体骨折 (20例VF患者，46例对照)		
积分vBMD	3.6(1.4-9.3)	5.7(1.6-20.1)
小梁vBMD	2.5(1.1-5.9)	2.9(1.1-7.9)
基于CT的aBMD	2.2(1.1-4.5)	3.7(1.4-10.0)
基于CT的BMC	6.2(1.5-25.6)	7.4(1.7-31.8)
FEA椎体强度	4.9(1.5-16.0)	8.4(1.9-36.6)

2.3 临床阈值和诊断性能 具体如表2所示，使用基于有限元分析的脆性骨强度阈值对意外骨折病例进行分类，其诊断指标大多与基于CT的骨质疏松症阈值和椎体松质骨密度相似(表3)。然而，骨质疏松症(t-Score≤-2.5)的敏感性倾向于低于脆性骨强度(0.23vs.0.46，P=0.09)，同时保持了相似的特异度、阳性预测值和阴性预测值。此外，根据椎体骨小梁密度(≤80mg/cm³)进行骨质疏松分类的诊断指标倾向于低于有限元分析得出的椎体强度。

表2 椎体骨折的敏感性和特异性分析

	椎体强度 (来自CT-FEA)	基于CT的aBMD (来自CT)	小梁vBMD (来自CT)
阈值/切割点	女性:≤4500N 男性:≤6500N	t-score≤- 2.5	vBMD≤80mg/cm ³
敏感性	0.46(0.27-0.67)	0.23(0.09-0.44)	0.27(0.12-0.48)
特异性	0.87(0.76-0.94)	0.94(0.84-0.98)	0.81(0.69-0.90)
正面预测价值	0.60(0.36-0.81)	0.60(0.26-0.88)	0.37(0.16-0.62)
负面预测价值	0.79(0.68-0.88)	0.74(0.63-0.84)	0.72(0.60-0.83)

3 讨 论

本研究结果表明，腰椎CT扫描有限元分析的椎体强度估计可以预测老年男性和女性发生椎体骨折的风险，与基于CT的面骨密度一样或更好。此外，建议的脆性骨强度阈值与基于CT的aBMD或椎体松质骨密度的骨质疏松阈值相比，至少表现出相同的诊断性能^[6]。本研究未经调整的模型显示，椎体强度每减少1SD，OR为2.8，这与先前报道的椎体骨折的优势比介于2.1至7.6之间的研究相当^[7]。在对包括年龄和BMI在内的其他协变量进行调整的模型中，这些相关性仍然相似^[8]。此外，本研究还发现，椎体强度与术后发生的椎体骨折有关对流行的椎体骨折进行调整，这本身就是一个非常强烈的预测新椎体骨折的指标。本研究看到的优势比一般低于相关研究的报告^[9]，后者报告的脊柱强度的OR值在不

同协变量调整后的模型中从7.2到9.6不等。OR值升高可能是由于在该研究中使用了临床脊椎骨折，这些骨折可能比通过放射学检查确定的更严重^[10]。因此，将本研究中和重度室性心动过速的结果与该研究的临床骨折进行比较可能更合适。在本研究中、重度椎体骨折病例中，年龄调整后的椎体强度OR为6.8，更接近相关报道的优势比7.2^[11]。

本研究首次证明了在L3椎体中基于CT的有限元强度测量用于预测意外椎体骨折的可行性。之前的研究使用了不同的CT方案检查了不同的椎骨，也就是说，先前对脊柱研究利用了L1和L2成像数据^[12]。此外，本研究中CT图像的层厚(2.5mm)比以前的研究(1 Mm)要高。综上所述，这证明了基于CT的有限元分析在预测不同腰椎水平和不同扫描方案的椎体骨折风险方面的有效性。本研究在一组新的、独立的男性和女性队列中检验了建议基于CT的椎体强度有限元分析阈值的有效性。本研究数据表明，与骨质疏松的骨密度阈值相比，这些阈值提供了同等或更好的灵敏度来识别室性心动过速的风险人群，无论是在骨密度t评分(≤ -2.5)还是在骨小梁vBMD(80 mg/cm^3)上^[13]。具体地说，本研究发现，通过基于CT的aBMD，本研究23%的骨折病例是骨质疏松的，这与参与者的最新文献非常接近^[14]，后者发现，根据基于CT的aBMD，50岁及以上的骨折病例中有26%是骨质疏松的。相比之下，46%的骨折病例符合有限元分析的脆性骨强度标准，而特异性没有太大损失。由于本研究中骨折病例的数量有限，还需要进一步的研究来验证这些阈值作为DXA的骨折风险评估的替代临床工具的前景^[15]。尽管本研究发现椎体强度与意外发生的椎体骨折的相关性显著高于本研究基于CT的aBMD测量，但在本研究队列中，椎体强度并不能比基于积分的vBMD或基于CT的BMC测量更好地预测骨折^[16]。尽管如此，FE椎体强度估计可能是有益的。本研究还表明，进行旨在确定积分vBMD或基于CT的BMC的介入阈值的研究可能是有意义的，因为它们产生的OR与脊柱强度相似，尤其是在脊柱^[17]。这些测量的阈值可能提供与DXA aBMD阈值相同或更高的敏感性，但需要进一步的研究来开发阈值并证实这一点值得注意的是，到目前为止，基于CT的有限元分析一直依赖于基于CT的X射线衰减值(Hounsfield单位)到等效的BMD值^[18]。最近的一项研究表明^[19]，常规临床CT扫描的有限元分析用于评估髌骨密度T分数和股骨强度是可行的，并且通过有限元分析从这些CT扫描得出的股骨强度值在预测髌部骨折风险方面与DXA-髌骨密度一样有效。此外，最近的一项成本效益研究表明^[20]，使用一种新的髌部CT来评估骨质疏松症可能具有成本效益。

总之，本研究证明了基于CT的椎体强度估计预测椎体骨折风险的效用。尽管本研究受到样本量小的限制，但本研究结果表明，与基于CT的aBMD和小梁vBMD相比，基于CT的FEA在识别椎体骨折患者时具有相同或更好的椎体强度诊断阈值，因此可能是重要的诊断工具。

参考文献

- [1] And A M E. Retracted: application value of the CT scan 3D reconstruction technique in maxillofacial fracture patients[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2023, 2023: 9839452.
- [2] Bodden J, Dieckmeyer M, Sollmann N, et al. Incidental vertebral fracture prediction using neuronal network-based automatic spine segmentation and volumetric bone mineral density extraction from routine clinical CT scans[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2023, 14: 1207949.

- [3] Brown P J, Wyse A, Patel K, et al. Weight-bearing CT with maximum ankle dorsiflexion to identify impingement and tibial plafond stress fracture: a case report[J]. JBJS Case Connect, 2023, 13(4).
- [4] Chan S Y, Hsu C P, Cheng C T, et al. Speeding pelvic fracture fixation: CT scan with simultaneous 3-D pelvic reconstruction in the emergency department[J]. Am J Emerg Med, 2023, 72: 170-177.
- [5] Davenport A, Clements D, Dancer S. Humeral intracondylar fissures and intracondylar sclerosis are common CT findings in the limb contralateral to a humeral condylar fracture in French bulldogs and spaniel breeds[J]. Vet Radiol Ultrasound, 2023, 64(4): 686-693.
- [6] Eisenhut F, Taha L, Wiesmuller M, et al. [Easy detection of MS-CT-invisible temporal bone fracture via FD-CT: a case report] [J]. Rofo, 2023, 195(1): 55-57.
- [7] Lin H M, Colak E, Richards T, et al. The RSNA cervical spine fracture CT dataset[J]. Radiol Artif Intell, 2023, 5(5): e230034.
- [8] Fa-Binefa A, Almenara M, Mata-Munoz J M, et al. Retrospective interobserver agreement on diagnoses of 4th and 5th carpometacarpal fracture-dislocation and hamate fracture in plain X-ray - Is CT essential after ulnar carpometacarpal pain? [J]. Skeletal Radiol, 2023, 52(12): 2427-2433.
- [9] Lu H, Liu Y, Xie W, et al. The reliability and accuracy of the medial malleolar fracture classification based on 3D CT reconstruction[J]. Orthop Surg, 2023, 15(7): 1790-1798.
- [10] Falconi S, Laszlo N, Jacob R. Imaging findings in pediatric accessory cranial sutures using 3D CT reconstruction: fracture or rudimentary suture[J]. Cureus, 2023, 15(8): e42820.
- [11] Fang H, Wang Z, Sang S, et al. Correlation evaluation and schematic analysis of influencing factors affecting pore and fracture connectivity on the microscale and their application discussion in coal reservoir based on X-ray CT Data[J]. ACS Omega, 2023, 8(13): 11852-11867.
- [12] Grunz J P, Jordan M C, Schmitt R, et al. Gantry-free high-resolution cone-beam CT: efficacy for distal radius and scaphoid fracture detection and characterization[J]. Acad Radiol, 2023, 30(7): 1358-1366.
- [13] Guo Z, Wang X, Liu G, et al. Localizing the position of the Second fracture bed under CT measurements to determine the functional tibial insertion of an anterolateral ligament[J]. Front Surg, 2023, 10: 1235750.
- [14] Hopkinson M, Jones G, Evans L, et al. A new method for segmentation and analysis of bone callus in rodent fracture models using micro-CT[J]. J Orthop Res, 2023, 41(8): 1717-1728.
- [15] Jacques T, Cardot N, Ventre J, et al. Commercially-available AI algorithm improves radiologists' sensitivity for wrist and hand fracture detection on X-ray, compared to a CT-based ground truth[J]. Eur Radiol, 2023.
- [16] Joo M W, Ko T, Kim M S, et al. Development and validation of a convolutional neural network model to predict a pathologic fracture in the proximal femur using abdomen and pelvis CT images of patients with advanced cancer[J]. Clin Orthop Relat Res, 2023, 481(11): 2247-2256.
- [17] Kim J, Seo C, Yoo J H, et al. Objective analysis of facial bone fracture CT images using curvature measurement in a surface mesh model[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 1932.
- [18] Ledeganck L, Kromhout K, Chiers K, et al. CT diagnosis of occipital condyle fracture in a dog presented for severe cervical hyperesthesia[J]. Vet Radiol Ultrasound, 2023, 64(2): E10-E13.
- [19] Lei Q, Chen P, He X, et al. Preoperative CT parameters to predict tibiofibular syndesmosis injury associated with ankle fracture: a propensity score-matched analysis[J]. Eur J Trauma Emerg Surg, 2023, 49(4): 1883-1890.
- [20] Li J, Viceconti M, Li X, et al. Cost-effectiveness analysis of CT-based finite element modeling for osteoporosis screening in secondary fracture prevention: an early health technology assessment in the Netherlands[J]. MDM Policy Pract, 2023, 8(2): 107949745.

(收稿日期: 2023-11-24)

(校对编辑: 姚丽娜)