

骨密度对腰椎终板最大抗压强度影响的实验研究

侯 洋, 罗卓荆

(第四军医大学西京医院骨科研究所 710032 陕西省西安市)

【摘要】目的:探讨腰椎骨密度(BMD)与腰椎终板生物力学性质的关系。**方法:**选用人体新鲜腰椎标本(L1~L5) 7具,共 35 个椎体,用双能 X 线吸收骨密度仪(DEXA)测试每个椎体的 BMD,游离成单个椎体,按骨质疏松试验诊断标准分成正常对照组($n=16$)、骨密度减低组($n=10$)和骨质疏松组($n=9$),每个椎体上、下终板平面上设定 24 个特定测试点,用直径 1.5mm 的半球形压头以 12mm/min 的速度垂直于终板平面在每个测试点进行连续压缩加载试验,记录最大压缩力,并对数据进行统计学分析。**结果:**三组腰椎的骨密度分别为 $1.085\pm 0.101\text{g/cm}^2$ 、 $0.781\pm 0.095\text{g/cm}^2$ 和 $0.498\pm 0.085\text{g/cm}^2$; 平均最大抗压力分别为 $84.74\pm 29.97\text{N}$ 、 $74.98\pm 23.57\text{N}$ 和 $61.88\pm 16.09\text{N}$,三组间存在显著性差异($P<0.01$),最大压缩力与 BMD 呈明显的正相关关系($r_s=0.632$, $P<0.01$)。腰椎终板表面的最大抗压力点位于紧邻椎弓根的终板后外侧边缘,BMD 对腰椎终板不同位点生物力学强度分布无明显影响。**结论:**椎体 BMD 是预测椎体生物力学特性的重要指标,建议术前常规查 BMD,术中置入物应尽量放置于椎体终板的后外侧部以减少置入物沉陷的发生。

【关键词】 骨密度;腰椎;终板;生物力学

doi: 10.3969/j.issn.104-406X.2009.02.11

中图分类号:R318.01 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2009)-02-0125-05

A study on the effect of bone mineral density on the failure load of the lumbar endplate/HOU Yang, LUO Zhuojing//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2009, 19(2):125~129

【Abstract】 Objective: To determine the relationship between the bone mineral density(BMD) and biomechanical properties of the lumbar endplate. **Method:** 35 lumbar vertebrae were dissociated from 7 cadaver lumbar spines after the BMD of each vertebral body was evaluated with DEXA. According to the value of their BMD, all vertebral bodies were divided into 3 groups, normal group($n=16$), osteopenia group($n=10$) and osteoporotic group ($n=9$). A continuous compression test was performed perpendicularly to the endplate surface through 24 standardized test sites using a 1.5mm in diameter, hemispherical indenter under a rate of 12mm/min. The failure load at each test site was determined using the load-displacement curves. Data was analyzed statistically. **Result:** The BMD of the vertebrae in 3 groups was $1.085\pm 0.101\text{g/cm}^2$, $0.781\pm 0.095\text{g/cm}^2$ and $0.498\pm 0.085\text{g/cm}^2$ respectively and the mean failure load was $84.74\pm 29.97\text{N}$, $74.98\pm 23.57\text{N}$ and $61.88\pm 16.09\text{N}$ correspondingly. The differences among the 3 groups were significant ($P<0.01$). BMD was positively correlated with the failure loads of lumbar endplates ($r_s=0.632$, $P<0.01$). The posterolateral margin in front of the pedicles was the strongest region of the lumbar endplate, but BMD had little influence on the biomechanical distribution of lumbar endplates. **Conclusion:** It is necessary that BMD should be measured before operation and implants should be placed in posterior-lateral regions of lumbar endplates so that subsidence can be reduced as much as possible.

【Key words】 Bone mineral density; Lumbar vertebra; Endplate; Biomechanics

【Author's address】 Institute of Orthopaedics of PLA, Xijing Hospital, the Fourth Military Medical University, Xi'an, 710032, China

进行椎体和椎间盘切除后通常要在椎体间置入结构性支撑物,如自体骨、同种异体骨、椎间融

合器或人工椎间盘等,用来维持脊柱前柱结构的生物力学功能。但是临床上经常会出现置入物沉陷到一个或两个椎体的终板内,从而导致手术失败^[1]。有研究表明,在老龄骨质疏松患者和骨密度

第一作者简介:男(1982-),医师,医学硕士,研究方向:脊柱外科
电话:(029)82539800 E-mail:alexandersuper@163.com

减低的人群中,椎间融合手术后置入物沉陷的发生率增加^[2]。本研究对不同骨密度(BMD)腰椎终板的不同位点进行测试,分析终板表面不同位点压缩强度的分布以及 BMD 与终板表面最大压缩力的关系,为椎间置入物的放置位置、椎间融合器的改进及临床手术相关操作提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 生物力学测试

7 具成人新鲜腰椎标本(L1~L5),均行 X 线正、侧位摄片,以排除先天性畸形、骨折及肿瘤等,剔除周围软组织,分离各节段,游离成单个椎体,共 35 个椎体,去除椎间盘及软骨终板,显露骨性终板。用 LUNAR BX-1L 型双能 X 线吸收骨密度仪(dual energy X-ray absorptiometry,DEXA)测试每个椎体的 BMD,按骨质疏松试行诊断标准^[3]将骨密度正常的椎体定为正常对照组($n=16$),骨量减少者定为骨密度减低组($n=10$),符合骨质疏松诊断标准者定为骨质疏松组($n=9$)。所有标本置于 -20°C 冰箱冷冻保存,实验前于室温下解冻。

在每个椎体终板表面直接建立坐标系统,以椎体的正中矢状径作为纵轴,纵轴的中点为原点 O,过原点作纵轴的垂直线定为横轴,用微米游标

卡尺精确测量纵轴、横轴的长度,用油性笔分别在纵轴、横轴上标注出 5 等分点、7 等分点,分别过各等分点作纵轴和横轴的垂线,得到 4 条横线、6 条纵线,横线分别命名为 a、b、c、d,纵线分别命名为 1、2、3、4、5、6。横线与纵线的交点共 24 个点即为测试点(图 1)。

用高 6cm、直径 10cm 固定夹具,四周以螺栓固定椎体,固定接触面覆以 4mm 厚的胶皮以保护椎体。应用 858 Mini Bionix II 材料测试系统(MTS 公司)将直径 1.5mm 的半球形压头以 12mm/min 的速度垂直于终板表面在每个测试点进行连续压缩加载试验,计算机记录压缩力-位移曲线,在最大压缩力(最大破坏载荷)下降 5%后停止加载,于实验机上读取最大压缩力数值(图 2)。

1.2 统计学分析

测试结果用 $\bar{x} \pm s$ 表示,应用 SPSS 13.0 统计软件对数据进行统计学分析。平均最大压缩力与骨密度的关系采用单因素方差分析(双侧 $\alpha=0.05$),并对每个腰椎平面的平均最大压缩力与骨密度进行 Spearman 相关分析,分别对 3 组腰椎终板表面横线与纵线之间最大压缩力进行析因分析,对横线、纵线之间的最大压缩力进行 SNK 检验,显著性水平设为双侧 $\alpha=0.05$ 。

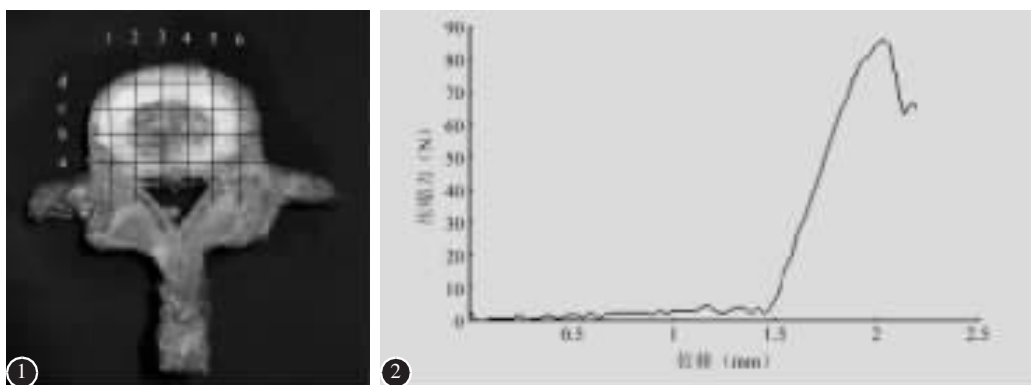


图 1 腰椎终板表面生物力学测试的坐标系,横线与纵线的交点即为测试点 图 2 腰椎终板的最大压缩力-位移曲线(峰值上对应的数值即为最大压缩力)

2 结果

3 组椎体骨密度与最大压缩力见表 1。三组间两两比较存在显著性差异($P<0.01$)。

BMD 与最大抗压力之间相关性分析的 $r_s=0.632$ ($P<0.01$),两者之间存在显著正相关关系。

终板表面最大压缩力分布规律见表 2。上终板平面正常对照组 a、d 线与 b、c 线两组之间存在

统计学差异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异,1、6 线,3、4 线与 2、5 线这 3 组之间存在统计学差异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异。骨密度减低组横线间 a 线与 b、c、d 线存在统计学差异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异,纵线之间无统计学差异。骨质疏松组横线之间无统计学差异,纵线之间 1、6 线与其他各线存在统计学差

异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异。

下终板平面正常对照组 a、d 线与 b、c 线两组之间存在统计学差异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异。3、4 线与其他各线之间存在统计学差异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异。骨密度减低组 a 线与 b、c、d 线之间存在统计学差异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异。3、4 线与其他各线之间存在统计学差异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异。骨质疏松组 d 线与其他各线有统计学差异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异。1、6 线,2、5 线与 3、4 线这三组之间有统计学差异($P<0.05$),其余两两比较无统计学差异。

表 1 不同骨密度组椎体骨密度值及最大压缩力

	<i>n</i>	骨密度(g/cm ²)	最大抗压力(N)
正常对照组	16	1.085±0.101	84.74±29.97
骨密度减低组	10	0.781±0.095 ^①	74.98±23.57 ^①
骨质疏松组	9	0.498±0.085 ^{①②}	61.88±16.09 ^{①②}

注:①与正常对照组比较 $P<0.01$,②与骨密度减低组比较 $P<0.01$

三组腰椎上、下终板表面最大压缩力点位于 a1 或 a6 点。

腰椎终板表面外周部的生物力学强度大于中央部,最大压缩力由前向后有逐渐增大的趋势,腰椎终板的最大抗压部位位于紧挨椎弓根的终板的后外侧边缘。三组腰椎终板表面最大压缩力分布规律基本类似,即 BMD 降低时腰椎终板最大抗压部位并未随之改变,说明骨密度对腰椎终板生物力学分布无明显影响。

3 讨论

3.1 终板的生物力学特性及影响因素

椎体终板是位于椎体上、下面的皮质骨结构,表面呈轻度凹陷,中央较薄,边缘增厚隆起,形成环状骨突,在骨性终板中央表面有一薄层透明软骨覆盖,即软骨终板。尽管椎体终板厚度不一,但大都小于 1mm,邻近髓核的终板中央区域最薄^[4]。终板对于维持椎间盘的功能起着十分重要的作用,而且与椎间盘的退变密切相关^[5]。Oxland 等^[7]

表 2 三组腰椎终板最大抗压力的测试结果

(N)

	正常对照组(<i>n</i> =16)		骨密度减低组(<i>n</i> =10)		骨质疏松组(<i>n</i> =9)	
	上终板	下终板	上终板	下终板	上终板	下终板
a1	100.4±31.8	117.6±33.8	98.4±26.6	101.4±19.9	79.5±12.4	76.5±9.2
a2	81.7±30.4	115.4±35.0	79.9±29.0	93.0±22.1	53.3±7.8	73.2±14.4
a3	68.6±23.9	89.5±33.7	72.5±26.7	70.8±23.4	58.3±9.7	57.2±15.6
a4	64.1±27.8	85.8±31.4	74.9±29.5	69.6±18.5	61.7±7.2	58.1±15.9
a5	80.3±22.0	104.7±36.4	77.6±27.3	87.2±28.2	61.8±11.7	52.5±10.1
a6	95.1±36.9	105.9±33.2	86.9±19.7	97.6±25.3	81.2±9.7	69.5±9.0
b1	82.4±28.2	100.5±33.7	70.7±15.9	89.9±24.8	70.4±8.9	80.8±16.2
b2	67.3±27.6	81.4±27.9	60.5±24.1	79.1±20.6	50.1±13.4	56.8±12.0
b3	60.9±29.1	74.1±26.9	62.8±21.7	70.8±20.8	43.5±19.0	47.3±15.2
b4	55.2±18.6	75.7±28.9	64.6±21.2	66.4±23.3	40.9±11.2	44.5±14.8
b5	68.9±24.6	83.7±26.3	67.2±27.9	73.2±21.3	56.6±8.7	57.5±19.8
b6	94.1±34.8	101.9±26.4	81.2±27.1	79.9±16.6	74.2±9.4	70.2±9.9
c1	85.5±23.4	93.3±28.4	69.9±18.3	77.9±15.1	72.8±10.4	65.3±9.7
c2	65.7±17.3	84.9±18.6	66.7±25.1	81.6±18.0	63.6±4.2	65.4±14.2
c3	58.7±19.5	69.0±13.9	62.5±22.8	68.3±14.9	46.9±6.9	45.1±4.5
c4	61.5±17.1	74.0±25.6	59.8±22.8	70.7±14.9	45.4±9.1	45.0±10.4
c5	74.6±23.2	89.6±16.9	73.9±22.5	78.8±25.9	62.4±11.9	66.2±7.2
c6	94.3±23.1	95.3±25.9	69.2±23.7	79.6±23.8	72.6±13.2	65.5±6.1
d1	83.7±20.2	97.9±25.7	68.6±29.5	85.9±14.1	66.2±8.9	78.1±19.9
d2	89.9±22.9	96.7±29.1	62.9±10.3	79.7±15.7	56.0±12.3	63.8±9.3
d3	88.3±22.9	90.3±24.1	65.6±13.8	71.3±12.4	60.1±4.7	64.4±14.3
d4	80.4±27.7	86.5±29.8	60.2±17.5	73.2±15.3	55.4±7.9	73.1±7.3
d5	82.3±29.4	92.8±22.5	67.3±26.3	80.5±20.7	55.6±11.8	71.4±5.9
d6	90.3±27.9	94.8±27.7	71.5±23.7	77.2±18.3	67.6±6.8	76.0±13.3

认为椎体终板能够将压力平衡分布于其下的松质骨上,从而使椎体的抗压强度增大。如果将终板去除,椎体最大抗压力会下降 33%。因此,行椎间植骨融合时,保留终板十分重要,能有效增加椎体的抗压强度,防止植骨块沉陷,减少后凸畸形,维持椎间高度。

Grant 等^[8]的研究中选取了 65 个完整的终板平面 (L3~S1), 每个终板平面确定了 27 个测试点,用直径 3mm 的半球形压头以 0.2mm/s 的速度对终板表面垂直下压,通过最大压缩力-位移曲线确定最大抗压强度,发现椎体的后外侧部的生物力学强度大于中央部,终板中央部是强度最弱区。李鉴轶等^[9]在 66 个人体新鲜颈椎标本终板表面 20 个特定测试点进行垂直压缩试验,用直径 2mm 的半球形压头以 0.03mm/s 的速度下压,计算最大压缩力,发现颈椎上终板的后部和下终板的后外侧部是椎体生物力学强度最大的区域。Lowe 等^[10]认为椎体前柱结构的完整在脊柱重建中起着十分重要的作用。置入物的沉陷现象不仅与椎体终板表面局部区域的生物力学性质有关,而且与置入物的形状、构造、术中是否保留终板有关。据此他们将(T1~L5)标本分为 3 组,第一组在 65 个椎体终板表面选取了 6 个不同的测试点,用直径 9.53mm 的探头进行压缩试验;第二组选取 48 个椎体终板表面的中央区域为测试区,用 3 个中空的和 2 个实心的不同直径的圆柱形探头进行压缩试验;第三组则是将 24 个椎体分为三种情况,即保留终板、部分保留终板、完全去除终板进行压缩试验,通过数据的统计学分析发现终板的后外侧区是最能抵抗置入物沉陷的部位,而中央区则是沉陷最易发生的部位。大直径的实心置入物不易发生沉陷,而中空结构的置入物较易发生沉陷,可能与中空结构更易传导压力有关。同时指出部分保留终板更有优势,因为这样既可以提供足够的生物力学强度,又有利于血管的长入以利融合。

但前述实验测定的是正常人群的椎体终板的生物力学分布情况,并未考虑骨密度对终板生物力学性质的影响。随着人口老龄化,骨质疏松症的发病率明显增加。目前全世界约有 2 亿骨质疏松症患者,我国估计有 5000 万左右。椎体压缩性骨折是骨质疏松症的重要并发症之一。因此研究不同 BMD 条件下椎体终板的生物力学特性及其分布规律对于指导临床具有十分重要的意义。

3.2 BMD 对终板生物力学特性的影响及其临床意义

Belkoff 等^[11]和樊仕才等^[12]的研究发现椎体的最大抗压力与 BMD 呈显著的正相关关系,但这些实验仅是将椎体作为整体进行垂直压缩,因而不能完全反应终板的生物力学特性。本研究采用了 Grant 的实验方法,在每个终板表面直接建立坐标系,避免了因椎体不规则及大小不同对测试点选择的影响,结果更具可比性。共设置了 4 条横线、6 条纵线共 24 个测试点。采用的半球形压头直径为 1.5mm,速度为 12mm/min,这样既可避免加载过快造成骨破坏又可以防止加载过慢造成骨蠕变的情况发生。应用直径 1.5mm 的半球形压头提高了实验的灵敏性,同时还可以有效防止压头落入血管襻。在试验中未发现点与点之间互相干扰影响实验结果的情况。

进行椎体间融合手术时通常需要在椎体间置入结构性支撑物,如同种异体骨、椎间融合器等,但临床上经常出现置入物沉陷的情况,导致渐进性的脊柱生理曲度异常,从而造成手术的失败。作为置入物和椎体间的界面,终板要有足够的强度来承受局部的最大载荷来避免沉陷现象的发生。当椎体所受的压缩负荷超过其压缩强度时即发生椎体压缩性骨折,影响椎体压缩强度的主要因素有椎体的骨矿物质含量、骨小梁的疏密及排列情况、终板的完整性等,而椎体的骨矿物质含量主要表现在椎体的 BMD 值大小上。正常椎体的骨小梁较厚,能提供足够的强度和弹性。当骨量减少、BMD 降低时,骨的微观结构退化,表现为骨小梁变薄、变细,出现断裂,骨的脆性增加,这种疏松而脆弱的椎体受压很容易出现骨折,因此 BMD 是预测椎体塌陷和压缩性骨折的重要指标。

本研究通过对尸体腰椎标本进行 BMD 测定,按我国骨质疏松试行诊断标准分组,分别对各组腰椎终板表面选定测试点进行生物力学测试,结果表明当 BMD 减少时,置入物沉陷的发生频率增加,上、下终板的最大抗压缩力减小。3 组间最大抗压力的分布图形基本相似,即随着骨密度的降低,腰椎最大抗压力部位并未改变,因而认为骨密度对于腰椎终板生物力学强度的分布并无明显影响。腰椎终板最大抗压力由前向后有逐渐增大的趋势,外周部的生物力学强度大于中央部,紧邻椎弓根的后外侧边缘是压缩强度最大的部位。

因此建议术前常规行 BMD 检查,必要时对椎体进行强化处理;在进行椎间手术时,置入物应尽量放置于终板的后外侧部,同时可以考虑将椎间融合器设计为楔形,既可以增大融合器与终板的接触以增加界面固定力,也可以减小对终板的损伤以降低术后沉陷的发生。

4 参考文献

1. Lim TH, Kwon H, Jeon CH, et al. Effect of endplate conditions and bone mineral density on the compressive strength of the graft-endplate interface in anterior cervical spine fusion[J]. Spine, 2001, 26(8):951-956.
2. Grant JP, Oxland TR, Marcel F, et al. The effects of bone density and disc degeneration on the structural property distributions in the lower lumbar vertebral endplates[J]. J Orthop Res, 2002, 20(5):1115-1120.
3. 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会.原发性骨质疏松诊疗指南(讨论稿)[J].中华全科医师杂志, 2006, 5(8):455-457.
4. Edwards WT, Zheng Y, Ferrara LA, et al. Structural features and thickness of the vertebral cortex in the thoracolumbar spine[J]. Spine, 2001, 26(2):218-225.
5. Moore RJ. The vertebral endplate: disc degeneration, disc regeneration [J]. Eur Spine J, 2006, 15(Suppl 3):S333-S337.
6. Benneker LM, Heini PF, Alini M, et al. 2004 young investigator award winner: vertebral endplate marrow contact channel occlusions and intervertebral disc degeneration[J]. Spine, 2005, 30(2):167-173.
7. Oxland TR, Grant JP, Dvorak MF, et al. Effects of endplate removal on the structural properties of the lower lumbar vertebral bodies[J]. Spine, 2003, 28(8):771-777.
8. Grant JP, Oxland TR, Dvorak MF. Mapping the structural properties of the lumbosacral vertebral endplates[J]. Spine, 2001, 26(8):889-896.
9. 李鉴轶, 朱青安, 原林, 等. 颈椎终板结构的生物力学研究[J]. 中华骨科杂志, 2004, 24(2):108-112.
10. Lowe TG, Hashim S, Wilson LA, et al. A biomechanical study of regional endplate strength and cage morphology as it relates to structural interbody support [J]. Spine, 2004, 29(21):2389-2394.
11. Belkoff SM, Morney M, Fenton DC, et al. An in vitro biomechanical evaluation of bone cements used in percutaneous vertebroplasty[J]. Bone, 1999, 25(Suppl 2):23-26.
12. 樊仕才, 朱青安, 王柏川, 等. 椎体骨密度与抗压强度的关系及临床意义[J]. 中国临床解剖学杂志, 2001, 19(1):74-76.

(收稿日期:2008-07-16 修回日期:2008-11-21)

(英文编审 郭万首)

(本文编辑 卢庆霞)

消息

第三届颈椎外科学学习班通知

由北京大学第三医院(下简称为北医三院)骨科主办的“第三届颈椎外科学学习班”将于 2009 年 5 月 29~31 日在北医三院召开。拟对近十年颈椎外科新理论和新技术进行全面回顾和展望。

北医三院骨科是国内开展颈椎疾病外科治疗最早的科室之一,已有 50 年的历史,累计手术治疗颈椎病患者 2 万余例,目前每年平均超过 2 千例。在颈椎退变性疾病、颈椎肿瘤、炎症(结核)、颈椎先天畸形、颈椎外伤和颅椎区疾患等多个领域都形成了具有北医三院特色的理论和临床经验,2002 年颈椎病诊断与治疗研究荣获国家科学技术进步二等奖。本次学习班将在以上几个专题范围内,结合外科治疗的新理念和新技术,着重介绍北医三院自己的理论、技术、经验和教训。会议形式以专家授课为主结合经典手术演示和典型病例讨论。届时参加授课的除北医三院专家外,还将邀请国内外知名学者与会,和大家共同交流。相信您将不虚此行。

会议时间:2009 年 5 月 28 日报到,2009 年 5 月 29 日~31 日学习班。会议地点:北京大学第三医院眼科楼科学报告厅。住宿地点:赢家大酒店(至北医三院步行需 5 分钟)。注册费(含餐费):2009 年 5 月 10 日前注册 800 元(以汇款时间为准);现场注册 1000 元。付款方式:邮局汇款请寄北京大学海淀区花园北路 49 号 北医三院骨科秘书组 吴云霞(收),邮编 100191。银行汇款:开户单位:北京大学第三医院;开户银行:北京银行学知支行;帐号:010903757001201090230-52。会议咨询:北京大学第三医院骨科;联系人:张振会,任趁梅;电话及传真:(010)82267368;82266699-8821、8819。E-mail:Puh3_gk@bjmu.edu.cn。学习班结业将授予国家 I 类继续教育学分。会议网上报名及实时信息敬请浏览:<http://www.bysyguke.com>。