

# 退变性腰椎滑脱的三维有限元分析

齐振熙, 马英锋

(福建中医学院, 福建 福州 350003)

**摘要** 目的: 探讨退变性腰椎滑脱的应力分布及其变化规律。方法: 通过 CT 扫描建立退变性腰椎滑脱节段的有限元力学模型, 模拟前屈、中立、后伸 3 种体位下的加载, 计算和分析滑脱节段各部应力分布。结果: ①腰段脊柱发生滑脱后, 下位椎体在 Z 轴上的应力前移。②椎间盘的剪切应力主要分布在纤维环, 前屈时椎间盘纤维环前缘所受剪切应力最大。③无论在前屈位还是在后伸位小关节的平均剪切应力都明显高于椎间盘。左、右侧的小关节的剪切应力相互间也存在着差异。④峡部应力集中, 以后伸位时的应力最大, 也最具有被破坏的可能性。结论: 腰椎发生退变性滑脱后, 下位椎体对重力的承载部位前移; 小关节分布的剪切应力值是椎间盘的 7.2 倍, 退变的椎间盘与小关节总剪切负荷之比为 1: 1.86, 小关节成为剪切应力的主要承载者; 峡部具有应力集中, 尤以后伸位最显著。

**关键词** 腰椎; 生物力学; 成像, 三维

**Analysis on 3D finite element of the degenerative lumbar spondylolisthesis** QI Zhen-xi, MA Ying-feng.  
Fujian College of TCM (Fujian Fuzhou, 350003, China)

**Abstract Objective:** To inquire into the stress distribution and changes of the degenerative lumbar spondylolisthesis. **Methods:** A 3D model of the lumbar spondylolisthesis was created according to CT sectional images of the L<sub>4</sub> to L<sub>5</sub> spondylolisthesis. When adding the relative loading on the model, the condition of 3 kinds of postures were imitated, such as flexive, extensive and vertical positions. The stress state of every segment of the L<sub>4</sub> to L<sub>5</sub> spondylolisthesis was calculated and analysed. **Results:** ①After spondylolisthesis generated, the compressive stress mainly distributed in anterior segment of L<sub>5</sub> vertebra. ②The shear stress in intervertebral disc mainly distributed in annulus fibrosus and the shear stress distributed in anterior segment of intervertebral disc were the greatest in vertical condition. ③Shear stress on facet joints was greater than that on intervertebral disc in whatever condition. ④Von Mises stress on the pars interarticularis was intensive, and the most intensive Von Mises stress in extension, so it was the greatest possibility to be destroyed in extension. **Conclusion:** After lumbar spine is displacing toward anterior, the compressive stress transfers the posterior parts to the anterior parts of the lower vertebral body. The average shear stress on facet joints is 7.2 times to that on intervertebral disc, the ratio of total shear stress between intervertebral disc and facet joints is 1: 1.86. Shear stress mostly distributed in facet joints. The pars interarticularis has intensive Von Mises stress, and especially the most intensive stress in extension.

**Key words** Lumbar vertebrae; Biomechanics; Imaging, three dimensional

本文采用三维有限元方法, 从生物力学角度研究退变性腰椎滑脱, 探讨其应力分布及变化规律。

## 1 材料和方法

**1.1 病例的选取** 临床选取了 1 名 45 岁的女性患者, 具有 20 余年的慢性腰痛病史, 无下肢放射痛, 无间歇性跛行, 既往有扭伤史, 无外伤史, 拍 X 线正侧位及左右双斜位平片示: L<sub>4</sub> 椎体向前滑脱 I 度, 椎

体、椎间盘及后部结构退行性变, 椎体无楔形变、无压缩性骨折, L<sub>4,5</sub> 椎间隙变窄、椎间孔变小, 双斜位片上未见峡部崩裂。

**1.2 模型的建立** 以患者腰段脊柱的病变部位(L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub> 腰椎运动节段) 为中心, 用 GH Hispeed CT/I 型螺旋 CT 扫描机对本标本进行层厚 3 mm 的连续 CT 扫描后自动处理为层厚 1 mm 的图像, 将图像输入计算机, 在 Adobe Photoshop 5.0 系统中对图像进行放大 1.5 倍的处理, 然后由打印机输出图形文件。在打印

出的图像上划分节点和单元,严格区分各种特性材料的边界,在图纸上测得节点 X、Y 坐标,通过层厚推算 Z 坐标。将节点的坐标值输入计算机,运用超级空间有限元计算程序 Super Sap V(93),得到 L<sub>4,5</sub> 滑脱节段的有限元模型。

本模型共有 1162 个节点,662 个立体单元。包括皮质骨、松质骨、终板、椎间盘、髓核、后部结构、韧带和关节囊 8 种结构。在模型中涉及到的各种组织材料均简化各项同性的均质线弹性材料,各个材料的弹性模量、泊松比、剪切模量等相关数据均采用最新文献报道的数据<sup>[1-3]</sup>(见表 1)。韧带作为一个腰椎运动节段的组成部分,在脊柱的各种运动状态中主要承受拉伸载荷,所以各个韧带的作用力将以拉伸载荷的形式平均加入相应各个节点,韧带力的大小采用戴力扬等<sup>[4]</sup>报道的数据(见表 2)。

表 1 腰椎运动节段各部材料的性质系数

Tab. 1 Material properties in motive segment of the lumbar spine

材料名称	E(kg/cm <sup>2</sup> )	μ	G= E/(2(1+μ))(kg/cm <sup>2</sup> )
椎体皮质	1.0×10 <sup>3</sup>	0.20	4.17×10 <sup>2</sup>
椎体松质	1.2×10 <sup>5</sup>	0.30	4.62×10 <sup>4</sup>
终板	1.2×10 <sup>5</sup>	0.25	4.80×10 <sup>4</sup>
纤维环*	3.1×10 <sup>2</sup>	0.40	1.11×10 <sup>2</sup>
髓核	2.0	0.49	6.70×10 <sup>-1</sup>
小关节	3.5×10 <sup>4</sup>	0.25	1.40×10 <sup>4</sup>
关节囊	5.0×10 <sup>2</sup>	0.30	1.92×10 <sup>2</sup>
后部结构	3.5×10 <sup>4</sup>	0.25	1.40×10 <sup>4</sup>
关节软骨	2.5×10 <sup>2</sup>	0.25	1.00×10 <sup>2</sup>

注: \* 为退变性纤维环的材料系数

表 2 椎间盘退变时韧带所受拉力(N)

Tab. 2 The tensile force on the ligament by degenerated intervertebral disc(N)

韧带	直立位	前屈位	后伸位
前纵韧带	0	0	68.674
后纵韧带	0	34.084	0
黄韧带	0	21.903	0
关节囊	0	11.593	0
横突间韧带	0	4.964	0
棘突上韧带	0	22.434	0
棘突间韧带	0	11.751	0

1.3 有限元模型的加载 充分研究: ①中立位,垂直压缩 1 800 N; ②前屈位,1 800 N 加上 60 N·M 矢状方向弯矩; ③后伸位,1 800 N 加上 -60 N·M 矢状方向弯矩。

1.4 实验条件与边界条件 在模型中涉及到的各种组织材料均简化各项同性的均质线弹性材料。考虑到在人体的各种运动姿势中, L<sub>5</sub> 椎体底部相对于

S<sub>1</sub> 的移动很小,可忽略不计,故设定模型的最下端各节点固定,也即将这些节点固定在 XY 平面上。

1.5 统计学处理 各项测试数据采用 SPSS 11.0 软件进行成组设计定量资料的 t 检验进行分析。

## 2 结果

2.1 中立位滑脱节段上下椎体的压缩应力分布情况 腰椎滑脱发生后,在中立位时 L<sub>4</sub> 椎体前半部在 Z 轴上的平均应力值为 22.07±97.79,后半部在 Z 轴上的平均应力值为 -8.84±34.94, L<sub>4</sub> 椎体前、后部的平均应力值比较, P>0.05; 而滑脱节段的下位 L<sub>5</sub> 椎体上,前半部在 Z 轴上的平均应力值为 -37.49±32.84,后半部在 Z 轴上的平均应力值为 -7.48±6.93,两者比较, P<0.01。

2.2 椎间盘、小关节剪切应力的分布及变化情况 结果见表 3。

表 3 不同体位时椎间盘、小关节各部的剪切应力值( $\bar{x} \pm s$ , kg/cm<sup>2</sup>)

Tab. 3 Stress distributed in intervertebral disc and facet joints under different conditions( $\bar{x} \pm s$ , kg/cm<sup>2</sup>)

部位	前屈位	中立位	后伸位
纤维环前缘	27.57±6.39 <sup>#</sup> &	10.60±2.75 <sup>&amp;</sup>	4.86±1.23 <sup>&amp;</sup>
髓核	0.31±0.08	0.19±0.05	0.16±0.05
纤维环后缘	5.42±2.07 <sup>&amp;</sup>	6.46±3.41 <sup>&amp;</sup>	8.07±4.97 <sup>&amp;</sup>
椎间盘	14.60±1.70 <sup>*</sup>	7.60±3.70	5.00±1.20
左侧小关节	163.40±105.80 <sup>△</sup> ★	52.60±30.60 <sup>△</sup> ★	121.60±92.60 <sup>△</sup> ★★
右侧小关节	86.70±59.96 <sup>△</sup> ★	54.70±38.95 <sup>*</sup>	82.80±57.99 <sup>△</sup> ★

注: # 表示前屈位与中立位、后伸位的差异有显著性意义, P<0.01; \* 表示前屈位与中立位、后伸位的差异有显著性意义, P<0.05; & 表示与髓核的差异有显著性意义, P<0.01; △ 表示与另外两种体位的差异有显著性意义, P<0.01; ★ 表示与中立位的差异有显著性意义, P<0.05; ◇ 表示与右侧小关节的差异有显著性意义, P<0.01; ◆ 表示与右侧小关节的差异有显著性意义, P<0.05; \* 表示与椎间盘的差异有显著性意义, P<0.05。

2.3 峡部 M 应力的变化 结果见表 4。

表 4 侧峡部、椎弓根以及椎板 M 应力值( $\bar{x} \pm s$ , kg/cm<sup>2</sup>)

Tab. 4 Von Mises stress distributed in pars interarticularis, pedicles and lamina of vertebral arch( $\bar{x} \pm s$ , kg/cm<sup>2</sup>)

部位	前屈位	中立位	后伸位
椎弓峡部	204.7±184.1 <sup>◎</sup>	161.8±154.0 <sup>◎</sup>	418.0±423.3 <sup>▼</sup> ◎
椎弓根	78.8±25.3 <sup>◎</sup>	59.1±24.2 <sup>◎</sup>	139.2±47.9 <sup>▼</sup> ◎
椎板	26.8±8.3 <sup>*</sup>	12.7±3.7	33.4±9.9 <sup>*</sup>

注: ▼ 表示与中立位、前屈位的差异有显著性意义, P<0.01 及 P<0.05; \* 表示与中立位、后伸位的差异有显著性意义, P<0.05; \* 表示与中立位的差异有显著性意义, P<0.01; ◎ 表示与椎板的差异有显著性意义, P<0.01; ◯ 表示与椎弓根的差异有显著性意义, P<0.05。

## 3 讨论

3.1 滑脱后下位椎体对重力的承载向脊柱的前柱

转移 本研究表明:当腰椎发生退变性 I 度滑脱后椎体压缩应力的分布在下位椎体上明显前移,对压缩载荷的承载,前柱变得与中柱一样重要,甚至比中柱承担更多的压缩载荷。椎体发生滑脱后重力分布前移,椎体损伤发生时更可能的是引起椎体前部楔形变,这是由于压缩应力的前移使得椎体的损伤机制发生了改变。

**3.2 滑脱后退变的椎间盘与小关节抗剪能力发生变化** 本研究表明:椎间盘的剪切应力主要分布在纤维环,髓核所能提供的抗剪能力对于整个椎间盘来说是微不足道的。在前屈位时椎间盘的剪切应力加大,纤维环的前缘承受了较大的剪切应力,而在后伸位时椎间盘的剪切应力分布无明显变化。退变性腰椎滑脱发生后小关节的平均剪切应力明显高于退变的椎间盘,即在单位面积内小关节分布的剪切应力值是椎间盘的 7.2 倍左右,而在总剪切负荷上椎间盘与小关节之比约为 1:1.86。说明滑脱发生后,因退变的椎间盘的力学性能减弱,使得小关节上剪切应力的分布增大,小关节成为剪切力的主要承载者。小关节在这种长期局部高应力作用下发生的退变或损伤会进一步促使椎体向前滑脱。在本实验中也发现当腰椎发生 I 度滑脱后左右侧小关节所受剪切应力也具有明显差异,这可能与脊柱的长期退变

中左右侧小关节的结构不对称有关,这种结构的不对称主要表现在小关节面角度的差异上。

### 3.3 滑脱后峡部在后伸位更具有被破坏的可能性

本实验的研究结果显示退变性腰椎滑脱后椎弓根和峡部都有应力集中,尤其以峡部最为显著,无论是前屈位还是后伸位,峡部的应力都明显增大,但在后伸位的增大更为显著,是一个局部的高应力集中。由此看来,传统的针对因脊柱退行性病变引发的脊柱失稳而进行的腰背肌功能锻炼,不适用于退变性脊柱滑脱症。背伸式的腰背肌功能锻炼将会导致已发生退变性滑脱的腰椎运动节段的椎弓峡部多次重复出现一个局部高应力,在这种长期反复的高应力作用下,峡部容易发生损害,从而产生峡部裂,使退变性腰椎滑脱转变为峡部裂性腰椎滑脱,腰椎滑移程度加大,临床症状加重,治疗的难度增加。

#### 参考文献

- 1 靳安民,袁野,曹虹,等.腰椎活动节段的有限元模型研究.颈腰痛杂志,2002,23(3):181.
- 2 刘雷,裴福兴,宋跃明,等.暴力下胸腰椎三柱结构的应力分布及临床意义.临床骨科杂志,2002,5(1):6.
- 3 毕胜,张德文,张明.不同扭矩作用下腰椎有限元模型分析.医用生物力学,2002,17(1):20.
- 4 戴力扬,屠开元,徐印坎,等.腰椎韧带的三维有限元分析.第二军医大学学报,1992,13(2):133.

(收稿日期:2004-02-05 本文编辑:王宏)

## 北京市京华行科贸有限责任公司

生产研制产品报价单

京药管械经营许 20000737 号 京医械广备(字)第 200312099 号

一、牵引康复设备 (D)代表全电脑控制

1. JKF 系列多功能脊柱牵引康复床:电脑程控,腰椎、颈椎、全身静止、间歇牵引,侧扳,腰部热疗按摩。

II型 19 800 元/台 IIIA 型:26 500 元/台 IIIA(D)型:38 000 元/台

IB 型:8 800 元/台 IB(D)型:19 800 元/台 IC 型:13 000 元/台 IC(D)型:23 900 元/台

2. FYC 系列俯卧式多功能腰椎治疗床:屈膝俯卧位牵引、捶击、热疗一体化,颈牵、下肢摇摆。

II型:9 850 元/台 IIIA 电动型:13 900 元/台 IIIA(D)型:29 000 元/台

3. JQY 系列多功能颈椎牵引治疗仪:颈牵、电针、热疗一体化。

I 型:5 800 元/台 I(B)型:12 600 元/台 I(A)型:8 800 元/台 IC 家用型:520 元/台

二、RLY-A 系列 BH 型中频热场针灸按摩仪

该系列产品均为电脑程控,I 型产品具有人工针灸的各种针法及按摩手法,手法逼真、柔和、深沉,力度等同人工。中频波渗透性强,可调至较深层次的穴位及病灶处。III型和IV型增设远红外线热疗、药物离子导入,配有与人体各部位相吻合的药物模具。主治:风湿病、腰椎间盘突出症、颈椎病、骨质增生、关节炎、急性慢性扭拉伤、偏瘫肢体恢复等。

I 型:6 000 元/台 III型:9 000 元/台(双功能型) VI型:12 000 元/台(双功能智能型)

三、其他设备

1. XN 心脑检查治疗仪 IIIA 型 2 960 元/台 2. GZ 骨质增生药物电泳治疗仪 IIIA 型 3 260 元/台

3. FD 风湿治疗仪 IIIA 型 2 880 元/台 4. DJS 胆结石治疗仪 IIIA 型 3 380 元/台

邮购办法:(1)邮局,银行汇款均可,款到后立即发货。(2)厂家销售,所售产品保修壹年,长期维修。运费保险费由我方负责。(3)面向全国常年办理邮购,欢迎来函来电索取资料。公司地址:北京广安门外大街 305 号八区荣丰嘉园 8 号楼 2722 号 邮编:100055 联系人:徐照 电话:010-63275185,63275186 值班电话:010-66031777 手机:13901040602,13910097637 银行汇款户名:北京市京华行科贸有限责任公司 开户行:北京建行玉泉路支行 帐号:6510006032630017010