

基础研究

不同分型腰椎-骨盆矢状位序列的
模型建立及应力分析姜 帅¹, 孙卓然¹, 李危石¹, 胡 磊², 张小娟²

(1 北京大学第三医院骨科 100191 北京市; 2 北京航空航天大学机器人研究所 100083 北京市)

【摘要】目的:依据腰椎-骨盆矢状位序列分型,建立 4 例腰椎有限元模型,比较其在椎间盘及椎弓峡部的应力分布。**方法:**依据腰椎-骨盆矢状位序列分型,选取 4 名青年健康志愿者,每型各 1 名志愿者(I 型,女,20 岁;II 型,男,21 岁;III 型,男,26 岁;IV 型,女,19 岁)。4 名志愿者行腰椎 CT 检查,并通过 Mimics、Geomagic、Hypermesh、ABAQUS 软件构建 4 例 L1~L5 腰椎有限元模型。在施加 400N 垂直压缩载荷和沿 X、Y、Z 轴方向施加 10N·m 的力矩载荷后,计算模型在前屈、后伸、侧弯、扭转工况下的平均刚度,并验证模型的有效性。只施加 400N 垂直压缩载荷的情况下,分析各模型纤维环及椎弓峡部的应力分布。**结果:**4 例模型在前屈、后伸、侧弯、扭转工况下平均刚度与既往体外实验文献结果较为接近。在承受 400N 的垂直压缩载荷下,4 例模型均从 L1/2 至 L4/5 纤维环所受应力逐渐增加,且应力大多集中在纤维环的后部;I 型和 II 型椎弓峡部的应力主要集中在 L4,而 III 型和 IV 型椎弓峡部应力主要集中在 L3。从 I 型到 IV 型,L4/5 纤维环后部平均应力与 L1/2 纤维环后部平均应力的比值逐渐减少(203.69%,197.58%,167.74%,139.85%);L5 双侧椎弓峡部平均应力与 L1 双侧椎弓峡部平均应力的比值逐渐增加(204.38%,212.59%,271.43%,292.98%)。**结论:**本实验所建立的 4 例腰椎有限元模型验证有效,可以进行生物力学分析与模拟,不同类型腰椎-骨盆矢状位序列个体腰椎在纤维环及椎弓峡部的应力分布存在差异。

【关键词】腰椎-骨盆矢状位序列;有限元分析;生物力学

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2016.05.09

中图分类号:R681.5,R318.01 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2016)-05-0434-07

Model establishment and stress analysis on the different types of sagittal lumbar-pelvic alignment/JIANG Shuai, SUN Zhuoran, LI Weishi, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2016, 26(5): 434-440

【Abstract】Objectives: To establish 4 cases of lumbar finite element model, according to the classification of sagittal lumbar-pelvic alignment, and to compare the stress distribution in the intervertebral disc and the vertebral arch isthmus. **Methods:** On the basis of the sagittal lumbar-pelvic alignment, 4 young healthy volunteers were selected, 1 volunteer for each type (type I, female, 20 years old; type II, male, 21 years old; type III, male, 26 years old; type IV, female, 19 years old). 4 volunteers underwent lumbar CT examination, and were built L1-L5 lumbar finite element models of 4 cases by using Mimics, Geomagic, Hypermesh, ABAQUS. After applying the 400N vertical compression load and the torque load of 10N·m along the X, Y and Z axes, the average stiffness of the models was calculated under the conditions of flexion, extension, lateral bending and axial rotation, and the validity of models was verified. Under the condition of only applying 400N vertical compression load, the stress distributions of the annulus fibrosus and the vertebral arch isthmus were analyzed. **Results:** Under the conditions of flexion, extension, lateral bending and axial rotation, the average stiffness of 4 cases was similar to that of previous vitro experiment. After applying 400N vertical compression load, the stress of annulus fibrosus from L1/2 to L4/5 increased gradually, and the stress was mostly concentrated in the posterior part of annulus fibrosus. In type I and II, the stress of isthmus was mainly focused on L4, however, in type III and IV, the stress of isthmus was mainly focused on L3. From type I

第一作者简介:男(1991-),医师,硕士在读,研究方向:脊柱外科

电话:(010)82267361 E-mail:js45518@163.com

通讯作者:李危石 E-mail:liweishi@medmail.com

to type IV, the mean stress of the posterior part of annulus fibrosus from L4/5 to L1/2 decreased gradually (203.69%, 197.58%, 167.74%, 139.85%). However, the mean stress of bilateral vertebral arch isthmus from L5 to L1 increased gradually (204.38%, 212.59%, 271.43%, 292.98%). **Conclusions:** In the different types of sagittal lumbar-pelvic alignment, there are different types of stress distribution of the annulus fibrosus and the vertebral arch isthmus.

【Key words】 The sagittal lumbar-pelvic alignment; Finite element analysis; Biomechanics

【Author's address】 Department of Orthopedics, Peking University Third Hospital, Beijing, 100191, China

腰椎-骨盆矢状位形态对于维持躯体矢状位平衡起到了重要作用。研究表明骨盆入射角 (pelvic incidence, PI) 的增加是腰椎峡部裂型腰椎滑脱的主要病因^[1-3], 而 PI 的减少可能是腰椎间盘突出和退变性椎间盘疾病的病因之一^[4,5], 并且与脊柱畸形矫形手术策略的制定和患者的临床预后密切相关^[6,7]。但是这些推测还缺乏生物力学的有效验证, 有必要通过生物力学研究来明确不同类型腰椎-骨盆矢状位形态腰椎应力分布的特点, 为腰椎-骨盆矢状位序列各类型之间发生退行性病变的风险提供生物力学的依据。本研究依据国人腰椎-骨盆矢状位序列分型^[8], 分别采用 4 名正常人腰椎 CT 图像建立 L1~L5 腰椎三维有限元模型并验证其有效性, 比较不同类型间腰椎椎间盘及椎弓峡部的应力分布情况。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

依照腰椎前凸顶点的不同, 将腰椎-骨盆矢状位序列分为 4 型^[8]: I 型, 顶点位于 L5 椎体或 L4/5 椎间隙; II 型, 顶点位于 L4 底部或中部; III 型, 顶点位于 L4 上部或 L3/4 椎间隙; IV 型, 顶点位于 L3 椎体及其以上。每型招募健康志愿者 1 名, I 型, 女, 20 岁; II 型, 男, 21 岁; III 型, 男 26 岁; IV 型, 女, 19 岁。志愿者均无明显腰椎退行性疾病、腰痛及外伤病史。经伦理委员会批准, 签署知情同意, 拍摄全腰椎薄层 CT。拍摄前先行全脊柱正侧位 X 线片检查, 以明确其腰椎-骨盆矢状位序列分型并排除脊柱畸形、脊柱肿瘤、感染和代谢性骨病。

1.2 方法

1.2.1 图像扫描 4 名志愿者行站立位全脊柱 (包含双侧髋关节) 正、侧位 X 线片检查。投照源固定, 连续曝光后自动拼接成像。摄片体位取站立位, 充分伸展膝关节、髋关节, 肘关节完全屈曲, 双

拳置于同侧锁骨上。采用美国通用电气集团生产的 64 排螺旋 CT 对 4 名志愿者行 L1~L5 薄层扫描, 扫描层厚 0.6mm, 管电压 120kV, 管电流 200mA, 矩阵: 512×512。图像格式存储为 DICOM 格式。经医院伦理委员会批准, 检查前充分告知其辐射的危害性。

1.2.2 三维模型的建立 将 DICOM 格式文件导入三维重建软件 Mimics 17.0, 得到 L1~L5 的椎体模型, 导出为 STL 格式。导入 Geomagic studio 2013, 将椎体模型生成光滑 NURBS 曲面, 再导入 Hypermesh 13.0 划分网格, 将椎体划分为四面体单元, 重建纤维环基质、髓核、小关节软骨并划分为六面体单元, 髓核占整个椎间盘体积的 43%^[9]。根据解剖位置建立前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘上韧带、棘间韧带、横突间韧带、关节囊韧带及纤维环纤维, 并采用桁架单元来模拟。纤维环纤维在纤维环基质中呈剪刀状方式走行, 并与椎间盘平面成平均 25°~40°夹角^[10]。

1.2.3 有限元模型的前处理 将生成的三维模型导入 Abaqus 6.13, 对腰椎各结构赋予泊松比及弹性模量, 所有参数均来自既往经典文献^[11-15] (表 1)。对各个部件进行装配, 创建分析部, 定义小关节面之间为面面接触。约束 L5 下终板六个方向的活动。

1.2.4 有限元模型的计算 4 例模型分别在 L1 上终板施加 400N 的垂直压缩载荷, 模拟在站立位情况下腰椎承受重力载荷下的负重情况。分别在模型上施加沿 X、Y、Z 轴方向施加 10N·m 的力矩载荷, 用于模拟前屈、后伸、侧弯、扭转等情况下的负荷。将 L1~L5 上终板表面最前点、最后点、最左点、最右点共 4 点的空间位置坐标连接成线, 各线间夹角代表相邻两椎体上终板间的夹角。加载前后, 计算此夹角差值即测量该模型在前屈、后伸、侧弯、扭转的活动的角位移。再以力矩除以角位移计算出本研究 L1~L5 模型的各方向平均刚

表 1 有限元模型的材料属性
Table 1 Material properties used in the finite element model

部位 Part	单元类型 Element type	弹性模量(MPa) Young modulus	泊松比 Poisson ratio
皮质骨 ^[11-13] Cortical bone	壳单元 Shell	12000	0.3
松质骨 ^[12] Cancellous bone	四面体 Tetrahedron	100	0.2
后方骨 ^[11, 13, 14] Posterior bone	四面体 Tetrahedron	3500	0.25
纤维环基质 ^[13] Annulus(ground)	六面体 Hexahedron	4.2	0.45
纤维环纤维 ^[15] Annulus(fiber)	桁架 Truss elements	550	0.3
髓核 ^[13] Nucleus pulposus	六面体 Hexahedron	1	0.499
关节软骨 ^[14] Articular cartilage	六面体 Hexahedron	10.4	0.4
前纵韧带 ^[14, 15] Anterior longitudinal	桁架 Truss elements	20	0.3
后纵韧带 ^[14, 15] Posterior longitudinal	桁架 Truss elements	70	0.3
黄韧带 ^[14, 15] Ligamentum flavum	桁架 Truss elements	50	0.3
横突间韧带 ^[14, 15] Intertransverse	桁架 Truss elements	50	0.3
棘间韧带 ^[14, 15] Interspinous	桁架 Truss elements	28	0.3
棘上韧带 ^[14, 15] Supraspinous	桁架 Truss elements	28	0.3
关节囊韧带 ^[14, 15] Capsular	桁架 Truss elements	20	0.3

度^[10, 16],与文献结果对比,验证模型的有效性。

在施加 400N 垂直压缩载荷下,计算椎间盘及椎弓峡部的应力分布情况,直接记录 4 例模型的椎间盘及椎弓峡部的 Von Mises 应力分布情况,并计算各椎间盘纤维环后部^[17]及双侧椎弓峡部的平均应力。分别计算 4 例模型中 L1/2 纤维环后部及 L4/5 纤维环后部平均应力值,并计算 L4/5 纤维环后部平均应力与 L1/2 纤维环后部平均应力的比值。分别计算 4 例模型中 L1 及 L5 双侧椎弓峡部平均应力值,并计算 L5 双侧椎弓峡部平均应力与 L1 双侧椎弓峡部平均应力的比值。

2 结果

2.1 有限元模型形状的准确性

4 例志愿者模型在施加 400N 垂直压缩载荷后,Ⅰ型志愿者有限元模型及全脊柱侧位 X 线片显示腰椎前凸顶点均位于 L4/5 椎体间隙,Ⅱ型志愿者有限元模型及全脊柱侧位 X 线片显示腰椎

前凸顶点均位于 L4 椎体中线,Ⅲ型志愿者有限元模型及全脊柱侧位 X 线片显示腰椎前凸顶点均位于 L3/4 椎体间隙,Ⅳ型志愿者有限元模型及全脊柱侧位 X 线片显示腰椎前凸顶点均位于 L3 椎体下缘,4 例模型基本符合Ⅰ型~Ⅳ型的情况,且与志愿者之前的全脊柱侧位 X 线片相接近(图 1~4),可以证明模型形状的准确性基本符合要求。

2.2 有限元模型有效性的验证

4 例模型在不同工况下的平均刚度均为旋转>后伸>侧弯>前屈(表 2),与体外实验^[11, 16, 18, 19]对比基本相近。确认建立的 4 例有限元模型有效,可以进行生物力学分析与模拟。

2.3 模型椎间盘、椎弓峡部的应力分布情况

在承受 400N 的垂直压缩载荷下,4 例模型均从 L1/2 至 L4/5 椎间盘所受应力逐渐增加,且应力大多集中在椎间盘纤维环的后部;Ⅰ型和Ⅱ型的椎弓峡部的应力主要集中在 L4,而Ⅲ型和Ⅳ型椎弓峡部应力主要集中在 L3(图 5~8)。从Ⅰ型到Ⅳ型,L4/5 纤维环后部平均应力与 L1/2 纤维环后部平均应力的比值逐渐减少,而 L5 双侧椎弓峡部平均应力与 L1 双侧椎弓峡部平均应力的比值逐渐增加(表 3)。

3 讨论

腰椎-骨盆矢状位形态对于维持躯体矢状位平衡起到了重要作用,而且参与了峡部裂型腰椎滑脱、退变性椎间盘疾病的发病机制,同时还影响了脊柱畸形矫形手术策略的制定^[20, 21],并与患者的预后情况密切相关。但是腰椎-骨盆矢状位形态是如何影响到疾病的发生及进展尚无定论,且不同腰椎-骨盆矢状位形态之间生物力学的差异尚缺乏相关的研究。本研究通过有限元分析的方法依据腰椎-骨盆矢状位序列分型来建立不同类型的腰椎有限元模型,通过生物力学的测试比较腰椎-骨盆矢状位序列各类型之间的应力分布特点,从而希望为腰椎-骨盆矢状位序列各类型之间发生退行性病变的风险提供生物力学的依据。因为中国人腰椎-骨盆形态序列特点与西方人及韩国人存在显著性差异^[8],所以我们在 Roussouly 等^[22]及 Lee 等^[23]分型的基础上,依据腰椎前凸顶点的不同提出了国人腰椎-骨盆矢状位序列分型,且发现从Ⅰ型到Ⅳ型,其 PI、骶骨倾斜角(sacral

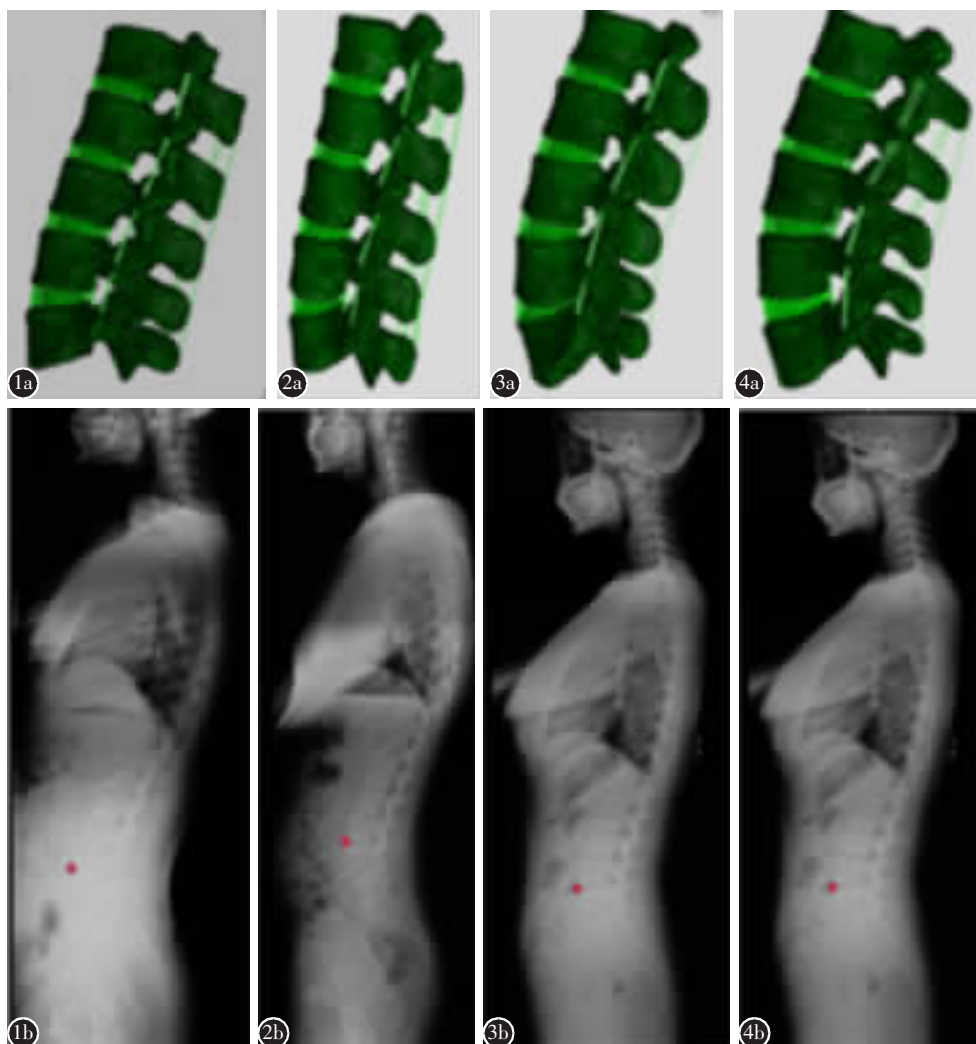


图 1 a I 型志愿者有限元模型 b I 型志愿者全脊柱侧位 X 线片 图 2 a II 型志愿者有限元模型 b II 型志愿者全脊柱侧位 X 线片 图 3 a III 型志愿者有限元模型 b III 型志愿者全脊柱侧位 X 线片 图 4 a IV 型志愿者有限元模型 b IV 型志愿者全脊柱侧位 X 线片(图 1~4 腰椎前凸顶点由红色圆圈标注)

Figure 1 a Type I volunteer finite element model b Type I volunteer lumbar lateral X-ray **Figure 2** a Type II volunteer finite element model b Type II volunteer lumbar lateral X-ray **Figure 3** a Type III volunteer finite element model b Type III volunteer lumbar lateral X-ray **Figure 4** a Type IV volunteer finite element model b Type IV volunteer lumbar lateral X-ray(Figure 1~4 the red circle marked the apex of lumbar lordosis)

slope, SS)、腰椎前凸角(lumbar lordosis, LL)均逐渐增大($P < 0.001$)^[8]。

Roussouly 等^[1]通过研究 82 例 L5-S1 腰椎滑脱的患者,发现 L5-S1 腰椎滑脱患者的 PI 与对照组相比明显增加,并推测 PI 越大,患者腰椎-骶骨交界区的剪切应力越大,从而增加了腰椎滑脱的风险。这与 Rajnics 等^[24]、Marty 等^[25]的结论基本吻合,但是其推测缺乏生物力学的有效验证。以往 El-Rich 等^[26]在 L5-S1 峡部裂型腰椎滑脱的有限元分析中,发现了患者椎弓峡部存在明显的应力

集中,但是其分析的均为已经发生峡部裂型腰椎滑脱的患者,并没有讨论健康人群不同腰椎-骨盆矢状位形态之间其峡部应力改变的情况。我们的研究发现,从 I 型到 IV 型, L5 双侧椎弓峡部平均应力与 L1 双侧椎弓峡部平均应力的比值逐渐增加,从而增加了 L5-S1 峡部裂型腰椎滑脱的风险,推测 IV 型患者峡部裂型腰椎滑脱的风险相对较高,与 Roussouly 的假设相符。推测可能是因为随着腰椎前凸顶点的升高, PI 和 SS 逐渐增大,骶骨终板更加接近垂直,会增加腰椎-骶骨交界区

的剪切应力,进一步导致作用于 L5 椎弓峡部的牵引力增加,如果峡部受力超过承受范围,对抗该剪切力和维持局部平衡的结构被破坏,增加了椎弓峡部断裂的可能性。

在不同的腰椎-骨盆矢状分型中,应力云图都显示从 L1/2 至 L4/5 椎间盘,其受力逐渐增加,且应力大多集中在椎间盘的后部。这与既往的有限元文献报道^[27]相符,也与临床上退变性椎间盘

疾病等容易发生在 L4/5 椎间盘相一致。Yang 等^[5]通过研究 60 例退变性腰椎间盘突出疾病的患者及 110 例无症状志愿者,发现退变性椎间盘突出患者 PI 显著低于对照组。但 Liu 等^[28]对 126 例退变性腰椎疾病患者的影像学观察发现,过高或过低的 PI 对腰椎间盘的退变均有显著影响。这两种观点均缺乏生物力学的有效支持,我们通过分析不同腰椎-骨盆矢状位形态的有限元模型发现,从 I 型到 IV 型, L4/5 纤维环后部平均应力与 L1/2 纤维环后部平均应力的比值逐渐减少,从而降低了椎间盘后部退行性变的风险,推测 I 型患者发生椎间盘退行性变的风险较高,这与 Yang 等^[5]的结论相一致。推测可能是因为随着腰椎前凸顶点的升高,PI 的增加,整个腰椎后倾减少,从而对椎间盘后部的压力逐渐减少,减少了腰椎间盘退变的风险。

随着计算机技术的发展和有限元理论的完善,三维有限元建模的方法逐渐成熟,有限元分析通过采用精准的 CT 原始影像数据来模拟人体结

表 2 4 例有限元模型不同力矩下的平均刚度

Table 2 the average stiffness of 4 finite element models under different moments

	I 型 Type I	II 型 Type II	III 型 Type III	IV 型 Type IV
前屈 Flexion	0.34	0.40	0.32	0.32
后伸 Extention	0.55	0.54	0.48	0.55
侧弯 Bending	0.39	0.45	0.46	0.40
旋转 Rotation	1.23	1.34	0.92	1.09

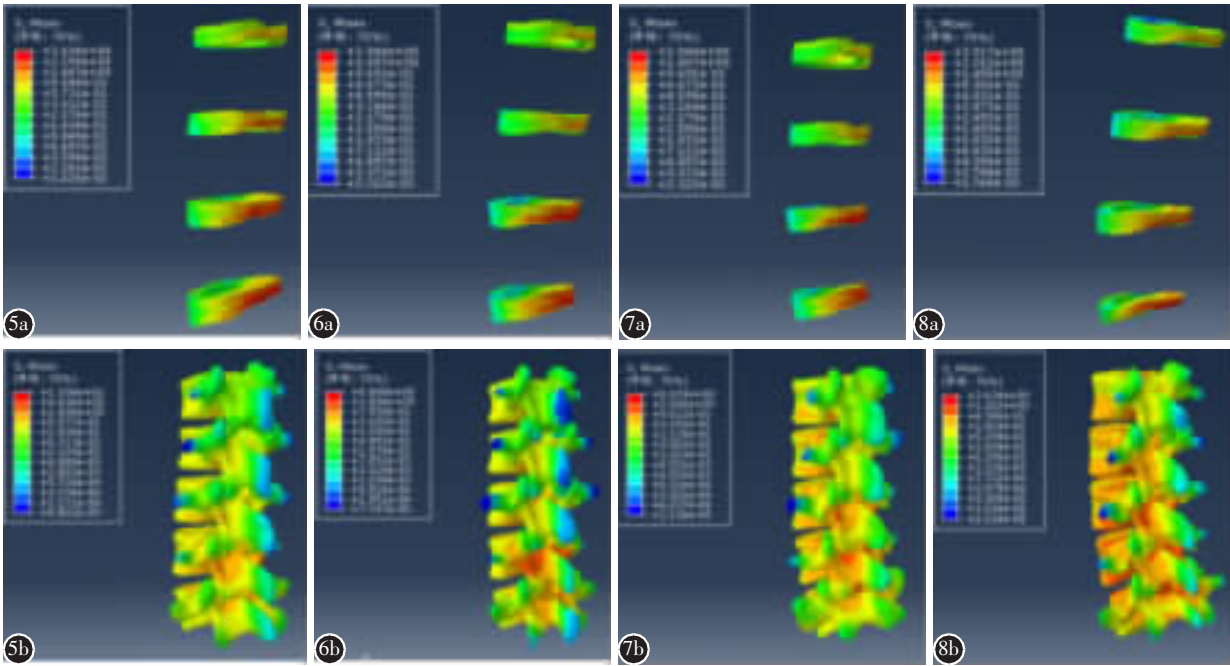


图 5 a I 型志愿者纤维环应力分布 b I 型志愿者椎弓峡部应力分布 图 6 a II 型志愿者纤维环应力分布 b II 型志愿者椎弓峡部应力分布 图 7 a III 型志愿者纤维环应力分布 b III 型志愿者椎弓峡部应力分布 图 8 a IV 型志愿者纤维环应力分布 b IV 型志愿者椎弓峡部应力分布

Figure 5 a Type I volunteer annulus stress b Type I volunteer vertebral arch isthmus stress Figure 6 a Type II volunteer annulus stress b Type II volunteer vertebral arch isthmus stress Figure 7 a Type III volunteer annulus stress b Type III volunteer vertebral arch isthmus stress Figure 8 a Type IV volunteer annulus stress b Type IV volunteer vertebral arch isthmus stress

表 3 不同类型有限元模型 L4/5 与 L1/2 纤维环后部平均应力的比值(A)及 L5 与 L1 双侧椎弓峡部平均应力的比值(B) (%)

Table 3 In different types of finite element models the ratio of the average stress of L4/5 and L1/2 annulus fibrosus(A) and the ratio of the average stress of L5 and L1 bilateral vertebral arch isthmus(B)

	I 型 Type I	II 型 Type II	III 型 Type III	IV 型 Type IV
A	203.69	197.58	167.74	139.85
B	204.38	212.59	271.43	292.98

构,可以弥补既往尸体实验受到标本获得、实验条件、样本数量等限制无法广泛应用研究的弊端。本研究在有限元分析的过程中,赋予 4 例志愿者相同的骨骼、韧带、椎间盘等物理参数,且赋予 4 例志愿者相同的垂直压缩载荷来模拟重力作用。这样就能够从一定程度上控制志愿者们因不同的性别、年龄、体重等所导致的骨骼、椎间盘、韧带强度及刚度的差异。但有限元分析却很难模拟肌肉、皮肤、脂肪、肌腱等非线性特征对于脊柱生物力学的影响,而这些都不可避免地对研究结果产生一定的影响。本研究通过分析椎间盘及椎弓峡部应力分布异常这一因素来推测腰椎峡部裂型滑脱及椎间盘退行性疾病的病因,但这两种疾病的病因较为复杂,仍需要通过增加样本量,运用其他体内生物力学实验和统计学方法进一步验证。

总之,本研究通过建立 4 种不同类型的腰椎-骨盆矢状位形态的有限元模型,验证其模型有效,发现不同类型腰椎-骨盆矢状位序列的个体腰椎椎间盘及椎弓峡部的应力特征存在差异。这些为峡部裂型腰椎滑脱、椎间盘突出、退行性椎间盘疾病等的发病机制提供了生物力学的依据。但有限元分析本身存在其局限性,未来更多关于体内生物力学的实验有待进一步研究。

4 参考文献

1. Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud E, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis in the presence of L5-S1 isthmic lysis and low-grade spondylolisthesis[J]. Spine, 2006, 31 (21): 2484-2490.
2. Labelle H, Mac-Thiong JM, Roussouly P. Spino-pelvic sagittal balance of spondylolisthesis: a review and classification[J]. Eur Spine J, 2011, 20(Suppl 5): 641-646.
3. Oh SK, Chung SS, Lee CS. Correlation of pelvic parameters with isthmic spondylolisthesis[J]. Asian Spine J, 2009, 3(1):

21-26.

4. Barrey C, Jund J, Nosedá O, et al. Sagittal balance of the pelvis-spine complex and lumbar degenerative diseases: a comparative study about 85 cases[J]. Eur Spine J, 2007, 16 (9): 1459-1467.
5. Yang X, Kong Q, Song Y, et al. The characteristics of spinopelvic sagittal alignment in patients with lumbar disc degenerative diseases[J]. Eur Spine J, 2014, 23(3): 569-575.
6. 孙卓然, 李危石, 陈仲强, 等. 正常人脊柱-骨盆矢状位序列拟合关系研究[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2015, 25(1): 1-5.
7. Schwab F, Lafage V, Patel A, et al. Sagittal plane considerations and the pelvis in the adult patient[J]. Spine, 2009, 34 (17): 1828-1833.
8. 李危石, 孙卓然, 陈仲强. 正常脊柱-骨盆矢状位参数的影像学研究[J]. 中华骨科杂志, 2013, 33(5): 447-453.
9. Liu CL, Zhong ZC, Shih SL, et al. Influence of Dynesys system screw profile on adjacent segment and screw[J]. J Spinal Disord Tech, 2010, 23(6): 410-417.
10. 朱震奇, 刘辰君, 王捷夫, 等. 正常男性全腰椎三维有限元模型的建立及探讨[J]. 中华医学杂志, 2014, 94(37): 2919-2922.
11. Erbulut DU, Zafarparandeh I, Hassan CR, et al. Determination of the biomechanical effect of an interspinous process device on implanted and adjacent lumbar spinal segments using a hybrid testing protocol: a finite-element study[J]. J Neurosurg Spine, 2015, 23(2): 200-208.
12. Ambati DV, Wright EK Jr, Lehman RA Jr, et al. Bilateral pedicle screw fixation provides superior biomechanical stability in transforaminal lumbar interbody fusion: a finite element study[J]. Spine J, 2015, 15(8): 1812-1822.
13. Lee KK, Teo EC, Fuss FK, et al. Finite-element analysis for lumbar interbody fusion under axial loading [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2004, 51(3): 393-400.
14. Polikeit A, Ferguson SJ, Nolte LP, et al. Factors influencing stresses in the lumbar spine after the insertion of intervertebral cages: finite element analysis[J]. Eur Spine J, 2003, 12 (4): 413-420.
15. Sylvestre PL, Villemure I, Aubin CE. Finite element modeling of the growth plate in a detailed spine model [J]. Med Biol Eng Comput, 2007, 45(10): 977-988.
16. Yamamoto I, Panjabi MM, Crisco T, et al. Three-dimensional movements of the whole lumbar spine and lumbosacral joint[J]. Spine, 1989, 14(11): 1256-1260.
17. 张先予, 李正维, 吴立军, 等. 退变性椎间盘应力分布变化的有限元分析[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2013, 23(4): 359-363.
18. 陈更新. 老年人腰椎三维运动范围的实验研究[J]. 生物医学工程学杂志, 1999, 16(4): 438-440.
19. Dreischarf M, Zander T, Bergmann G, et al. A non-optimized follower load path may cause considerable intervertebral rotations[J]. J Biomech, 2010, 43(13): 2625-2628.
20. Li WS, Li G, Chen ZQ, et al. Sagittal plane analysis of the

- spine and pelvis in adult idiopathic scoliosis[J]. Chin Med J (Engl), 2010, 123(21): 2978-2982.
21. Upasani VV, Tis J, Bastrom T, et al. Analysis of sagittal alignment in thoracic and thoracolumbar curves in adolescent idiopathic scoliosis: how do these two curve types differ [J]. Spine, 2007, 32(12): 1355-1359.
22. Roussouly P, Gollogly S, Berthonnaud E, et al. Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in the standing position [J]. Spine, 2005, 30(3): 346-353.
23. Lee CS, Chung SS, Kang KC, et al. Normal patterns of sagittal alignment of the spine in young adults radiological analysis in a Korean population [J]. Spine, 2011, 36(25): E1648-1654.
24. Rajnics P, Templier A, Skalli W, et al. The association of sagittal spinal and pelvic parameters in asymptomatic persons and patients with isthmic spondylolisthesis [J]. J Spinal Disord Tech, 2002, 15(1): 24-30.
25. Marty C, Boisaubert B, Descamps H, et al. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants, and spondylolisthesis patients [J]. Eur Spine J, 2002, 11(2): 119-125.
26. El-Rich M, Aubin CE, Villemure I, et al. A biomechanical study of L5-S1 low-grade isthmic spondylolisthesis using a personalized finite element model [J]. Stud Health Technol Inform, 2006, 123(6): 431-434.
27. 闫家智, 吴志宏, 汪学松, 等. 腰椎三维有限元模型建立和应力分析 [J]. 中华医学杂志, 2009, 89(17): 1162-1165.
28. Liu H, Shrivastava SR, Zheng ZM, et al. Correlation of lumbar disc degeneration and spinal-pelvic sagittal balance [J]. Zhonghua Yi Xue Za Zhi, 2013, 93(15): 1123-1128.
- (收稿日期: 2016-01-11 末次修回日期: 2016-05-08)
(英文编审 蒋欣/贾丹彤)
(本文编辑 李伟霞)

消息

第四届全国颈椎外科学术会议通知

由中国康复医学会脊柱脊髓损伤专业委员会颈椎外科研究学会主办, 漯河市中心医院、郑州大学第一附属医院、河南省人民医院等承办, 《中国脊柱脊髓杂志》、《中华外科杂志》、《中华骨科杂志》、《脊柱外科杂志》、骨科在线等协办的“第四届全国颈椎外科学术大会(颈椎畸形及感染专题)”将于 2016 年 6 月 24~26 日在河南省漯河市开元名都酒店(漯河市迎宾馆)召开, 期待您的光临。参会者授予国家级 I 类继续教育学分 10 分(省内参会代表请携带继续教育 IC 卡刷卡记分, 省外代表凭签到表会后办理)。

届时国内外脊柱外科领域百余名知名专家将聚首中国食品名城漯河, 通过专题演讲、中心发言、焦点论坛(设正方、反方)、主题发言、疑难病例讨论、专家点评、优秀论文评选等形式与大家一起进行全面、深入的剖析。会议还邀请著名国际颈椎外科专家, 将带来国际颈椎外科领域的最新进展。会议同时增设微信转播与互动环节, 每一位代表均有机会与国内外知名专家进行交流。诚挚欢迎全国各地同道参加会议并莅临指导!

会议时间: 2016 年 6 月 23~24 日报到, 24 日为学习班, 2016 年 6 月 25~26 日大会; 会议及报到地点: 河南省漯河市开元名都大酒店(又名为漯河迎宾馆); 漯河市郾城区黄河路西段 826 号, (0395)3588333; 邮编: 462000; 住宿地点: 开元名都大酒店; 喜来登大酒店; 长城酒店; 黄河假日酒店。会议负责参会期间用餐; 交通和住宿费自理。

注册费: 2016 年 5 月 30 日前提前注册者 600 元/人(以汇款时间为准); 现场注册者 800 元/人。付款方式: ①邮局汇款, 漯河市中心医院脊柱科 崔巍 收(河南省漯河市人民东路 54 号 漯河市中心医院 脊柱外科 462000); ②银行汇款, 开户单位: 漯河市第一人民医院; 开户银行: 漯河市建行召陵支行; 账号: 41001555321050000365。

会议咨询: 温艳(136039543557)、崔巍(13938035185)、李程(13849496056); 办公室电话及传真: (0395) 3356027; 会议邮箱: qgjzhy@126.com。