

· 临床研究 ·

弯腰挺立手法治疗腰骶关节紊乱的有限元分析

王林, 黄发森, 孙长贺, 殷京, 张清

(中国中医科学院望京医院, 北京 100102)

【摘要】 目的: 分析腰骶关节紊乱患者有限元模型及施加弯腰挺立手法后的位移、应力及作用机制。方法: 建立 1 例腰骶关节紊乱患者的三维有限元模型, 运用有限元分析方法对模型进行轴向、34° 斜向上、垂直向上 3 种工况加载进行观察分析。结果: 腰骶关节紊乱模型应力分布, L₅ 椎体集中在下终板中央、椎间盘集中在间盘中央, S₁ 及相关结构应力集中分布在椎体前后缘。模拟手法后应力主要集中在 L₅ 椎体上终板前缘、后缘和下终板中央圆形区域, 椎体后部相关结构集中在椎弓根腹侧、峡部和椎板背侧, 椎间盘应力分散于椎体后缘; S₁ 椎体相关结构集中在骶骨椎体后缘和骶骨嵴上。位移结果: 腰骶关节紊乱模型中左侧横突、上下关节突和棘突左侧部分向左明显移位, 椎间盘向前突出移位。模拟手法后: L₅ 椎体下切迹向前上方移位, 椎间孔面积增大, L₅ 椎体下关节突向前移行, 骶骨上关节突向前下方移位, 关节突关节距离加大, 骶骨位移最大集中在椎体后缘和骶正中嵴上。结论: 腰骶关节建模成功可进行有限元分析; 弯腰挺立手法作用机制明确, 用于治疗腰骶关节紊乱有效、安全可施。

【关键词】 腰骶部; 脊柱关节紊乱; 手法, 骨科; 有限元分析

中图分类号: R684, R274

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2019.06.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Finite element analysis of bending and standing manipulation in the treatment of lumbosacral joint disorder WANG Lin, HUANG Fa-sen, SUN Chang-he, YIN Jing, and ZHANG Qing. Wangjing Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China

ABSTRACT **Objective:** To analyze the displacement, stress and mechanism of lumbosacral joint disorder patients after bending and standing manipulation in the finite element model. **Methods:** A three-dimensional finite element model of a patient with lumbosacral joint disorder was established. The finite element analysis method was used to observe and analyze the three loading conditions of the model: axial, 34 degree inclined upward and vertical upward. **Results:** In the lumbosacral joint disorder model, the L₅ vertebral body was concentrated in the middle of the lower endplate, the intervertebral disc was concentrated in the center of the intervertebral disc, and the stress of S₁ and related structures were concentrated in the anterior and posterior edges of the vertebral body. After simulated manipulation, stress mainly concentrated in the anterior, posterior and central circular areas of L₅ vertebral upper endplate. The posterior structures of vertebral body concentrated in the ventral part of pedicle, isthmus and dorsal part of lamina. The stress of intervertebral disc dispersed in the posterior edge of vertebral body. **Displacement results:** In the lumbosacral joint disorder model, the left transverse process, the upper and lower articular process and the left part of spinous process were significantly displaced to the left, and the intervertebral disc was protruded forward. After simulated manipulation, the lower notch of L₅ vertebral body moved forward and upward; the area of intervertebral foramen increased; the inferior articular process of L₅ vertebral body moved forward; the superior articular process of sacrum moved forward and downward; the distance of articular process joints increased; and the displacement of sacrum concentrated on the posterior edge of vertebral body and the median sacral crest. **Conclusion:** Successful lumbosacral joint modeling can be carried out by finite element analysis, and the mechanism of bending and erecting manipulation is clear, which is effective and safe for the treatment of lumbosacral joint disorders.

KEYWORDS Lumbosacral region; Spondyloarthropathy; Manipulation, orthopedic; Finite element analysis

腰骶关节紊乱主要指由于跌扑扭挫致 L₅S₁ 相关关节错位、紊乱, 引起以腰痛、前屈受限为主要症状的疾病。该病的治疗一般采取保守方法, 其中手法治

疗以“快、效、廉”深受患者认可接受。弯腰挺立手法主要用于纠正腰骶关节错位及腰部损伤致腰部前屈功能受限者。目前的临床及基础研究对于该手法对腰骶关节紊乱复位的机制、位移、安全性等相关分析尚不足, 鲜见有限元分析。本研究通过建立 1 例腰骶关节紊乱患者的三维有限元模型, 运用有限元分析法, 研究手法作用机制、力学原理等验证其安全性及

通讯作者: 张清 E-mail: Zhangqinggys@yahoo.com.cn

Corresponding author: ZHANG Qing E-mail: Zhangqinggys@yahoo.com.cn

cn

有效性,以供参考学习,同时为进一步推广使用本手法提供有力的科学试验数据。

1 资料与方法

1.1 试验对象

根据国家中医药管理局制定的《中医病证诊断疗效标准》腰椎小关节紊乱症疗效标准:(1)有屈伸旋腰的扭伤史,或久坐、久蹲后突然站立后的损伤史。(2)腰部剧烈疼痛,活动受限,保持腰椎前屈时可缓解疼痛,后伸时疼痛加重。(3)腰部肌肉痉挛,棘突旁小关节部位深压痛。(4)直腿抬高试验阴性,下肢感觉、肌力及神经反射正常。(5)X线检查基本正常。排除腰椎峡部裂、腰椎滑脱等,确诊为腰椎小关节紊乱,具体病变部位为 L₅S₁ 关节。于门诊选取 1 例腰骶关节紊乱患者,男性,42 岁,身高 175 cm,体重 71 kg,体质指数(body mass index, BMI)23.18 kg/m²。主诉:搬重物致腰痛伴前屈受限 1 d。现病史:搬重物后出现腰部疼痛、前屈受限,无双下肢症状。体征:腰前屈明显受限,后伸、侧屈疼痛加重,左 L₅S₁ 棘突旁叩击痛阳性、深压痛阳性,右侧体征阴性,双侧直腿抬高试验阴性,双下肢肌力正常,病理征未引出,腰椎 X 线片示无明显异常。

1.2 有限元模型建立

通过专业的 CT 平扫^[2]取得图像,运用 Mimics 10.01 软件对导入的 CT 图像进行图像定位,得到 L₅、S₁ 及椎间盘的所有图片并另外保存。腰骶关节紊乱的有限元模型见图 1。对 L₅、S₁ 及椎间盘的图片进行阈值界定(骨质的阈值范围为 226~3 071),分离骨与软组织。并对图片进行擦除修整及填充孔洞,分割出 L₅、S₁ 和椎间盘的完整影像。使用 Calculate 3D from Mask 命令将编辑好的 Mask 生成 3D 模型,并对模型进行平滑处理,最后建立 L₅、S₁ 和椎间盘的三维几何模型。几何模型建立后运用 Solidworks 2016 进行逆向处理得到封闭的实体模型,再运用 Hypermesh12.0 软件对上述封闭的实体模型进行网格划分以区别皮质骨和松质骨。将建立好的三维分网模型以 inp 输出,用 Abaqus 6.13 软件将生成的文件合并读入,再根据相关的解剖位置相应加入韧带。本研究模型主要加入后纵韧带、前纵韧带、棘间韧带、棘上韧带、黄韧带,最终模型包含有皮质骨、松质骨、椎间盘、髓核、后部结构、韧带 6 种结构。

出于简化模型的考虑,认为腰椎椎体及椎间连接都是均匀的同性材料,将表层的皮质骨均处理为厚约 1 mm 的六面体网格单元,内部松质骨处理为四面体网格单元。针对间盘结构,根据髓核(居中)占 50%、纤维环占 50%~60%^[3]进行手动划分。小关节软骨表面处理为 1 层六面体单元模拟,接触面处理为

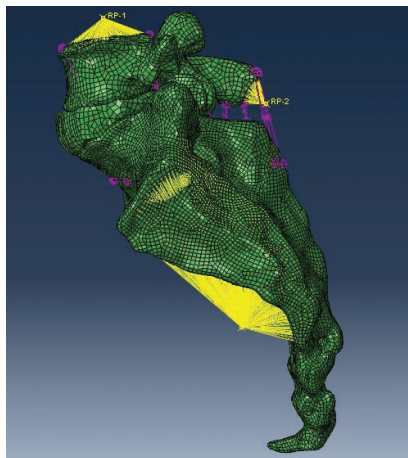


图 1 腰骶关节紊乱患者三维有限元模型

Fig.1 Lumbosacral joint disorder patient, three-dimensional finite model

面-面接触单元模拟。相关韧带都采用 spring 非线性单元模拟,考虑它只承受张力不承受压力。以上各结构的材料性质采用均参考近年来文献^[4-7],见表 1。

表 1 有限元模型的材料属性

Tab.1 Material properties of finite element model

| 部位 | 弹性模量*(Ez/MPa) | 泊松比 [#] |
|------|---------------|------------------|
| 皮质骨 | 12 000 | 0.3 |
| 松质骨 | 100 | 0.2 |
| 纤维环 | 4.2 | 0.45 |
| 髓核 | 1.0 | 0.499 9 |
| 终板 | 500 | 0.25 |
| 关节软骨 | 10 | 0.3 |
| 前纵韧带 | 20 | 0.3 |
| 后纵韧带 | 70 | 0.3 |
| 黄韧带 | 50 | 0.3 |
| 棘上韧带 | 28 | 0.3 |
| 棘间韧带 | 28 | 0.3 |

注:*弹性模量:应力和应变的比值。#泊松比:也称横向变形系数,是材料横向应变与纵向应变的比值的绝对值,是反映材料横向变形的弹性常数

Note: *Modulus of elasticity:ratio of stress to strain. #Poisson ratio,also known as transverse deformation coefficient, is the absolute value of the ratio of transverse strain to longitudinal strain of materials and the elastic constant reflecting transverse deformation of materials

1.3 弯腰挺立手法的模拟与加载

在临床弯腰挺立手法操作中观察可知,患者主要受自身重力、术者给予的斜向前的推顶力、抛出后落地地面对其的反作用力的影响。结合前期相关力学的研究数据及结果,本次手法模拟均对有限元模型 S₁ 椎体底面节点施加全约束。分别对模型施加

3 种力:(1)工况 1,于 L₅ 椎体上表面施加该患者体重 2/3 的轴向压缩载荷 463.8 N。(2)工况 2,于 L₅ 棘突施加向前上方 34°方向 186.10 N 的载荷。(3)工况 3,在模型骶骨耳状面施加垂直向上的 2 215.66 N 的载荷。最后利用 Abaqus 6.13 软件分析 3 种载荷下模型及相关结构的应力和位移分布情况。

2 试验结果

2.1 工况 1 的应力和位移分布

应力情况:腰骶关节紊乱模型 L₅ 椎体应力集中于下终板中央,由中央向四周逐渐减小;椎间盘应力明显集中在椎间盘中央;S₁ 椎体的应力集中分布于椎体前缘和后缘。位移情况:直观可见到 L₅、S₁ 之间的间盘向前稍彭出至上下椎体前缘。此模型两侧的小关节位置明显不对称,错位明显,程度从左侧横突、上下关节突和棘突左侧部分往右侧逐渐较少(图 2,3)。

2.2 工况 2 的应力和位移分布

应力情况:L₅ 椎体应力集中在上终板前缘、后缘和下终板中央圆形区域,间盘集中在髓核中央一小圆形区域,S₁ 椎体应力散在分布于椎体前缘和后缘。位移分布:左侧横突、下关节突和棘突的左侧位移最为明显,右侧移位不明显;间盘位移集中在椎间盘左半椎间盘纤维环外周;从视频动态图可以看到,在手

法加载过程中:L₅ 椎体向前方的移位增加了椎间孔的面积,L₅ 下关节突向前移行,与下位椎体上关节突接触面减少,加载力解除即回到原位,其余结构无明显变化(图 4,5)。

2.3 工况 3 的应力和位移分布

应力分布:L₅ 椎体集中在椎弓根腹侧、峡部和椎板背侧,椎间盘应力散在分布在后缘的小圆形区域,S₁ 及相关结构应力主要分布于骶骨椎体后缘和骶骨嵴上。位移分布:L₅ 及相关结构最大位移在棘突尖上,S₁ 椎体未见明显位移,椎间盘前缘发生明显的位移。从模拟过程的视频动画可以看到,关节突关节面有明显位移,骶骨上关节突向前下方移位,关节突关节距离加大,椎间孔面积较之变化小,加载力解除后恢复原位,骶骨位移最为明显,大多集中在椎体后缘和骶正中嵴上(图 6,7)。

3 讨论

3.1 有限元分析法将越来越适用于骨科相关研究

对比传统实验室研究,有限元分析法具有众多的优势及实验室不可媲美的诸多条件^[8],建模广泛,像脊柱的椎间盘^[9]、关节突关节^[10-11]或是其他软组织模型,或是病理模型^[12],或疾病模型^[13],有限元高仿真模型都能尽可能满足对研究标本的要求,且可以重复使用,减少资源的浪费。有限元建模直接对常人

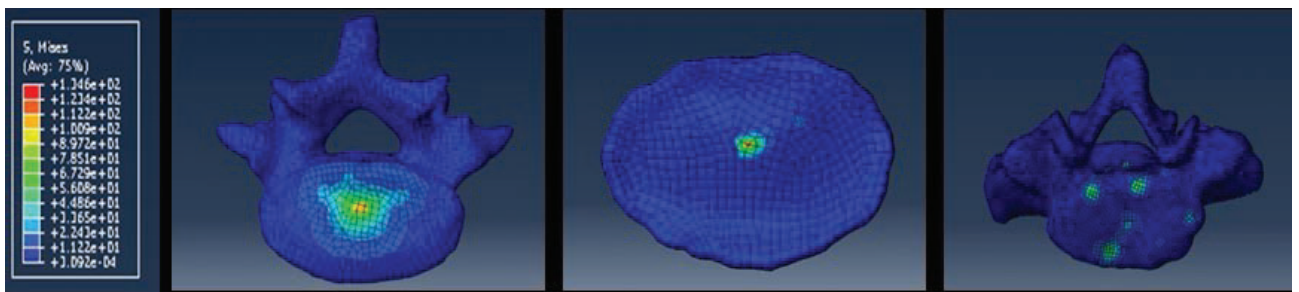


图 2 腰骶关节紊乱患者,L₅ 椎体表面施加该患者体重 2/3 的轴向压缩载荷 463.8 N 应力分布图

Fig.2 Lumbosacral joint disorder patients,patients with L₅ vertebral body surface on the weight of two-thirds of the axial compression load of 463.8 N stress pattern

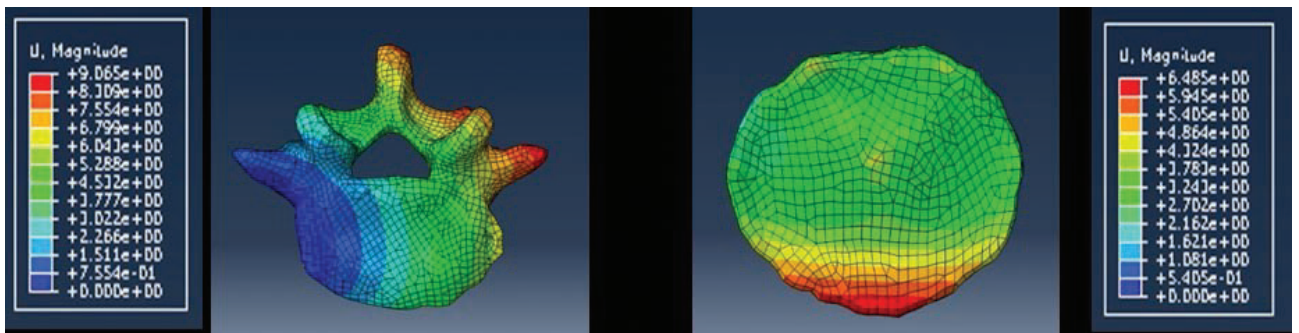


图 3 腰骶关节紊乱患者,L₅ 椎体表面施加该患者体重 2/3 的轴向压缩载荷 463.8 N 位移分布图

Fig.3 Lumbosacral joint disorder patients,patients with L₅ vertebral body surface on the weight of two-thirds of the axial compression load of 463.8 N displacement map

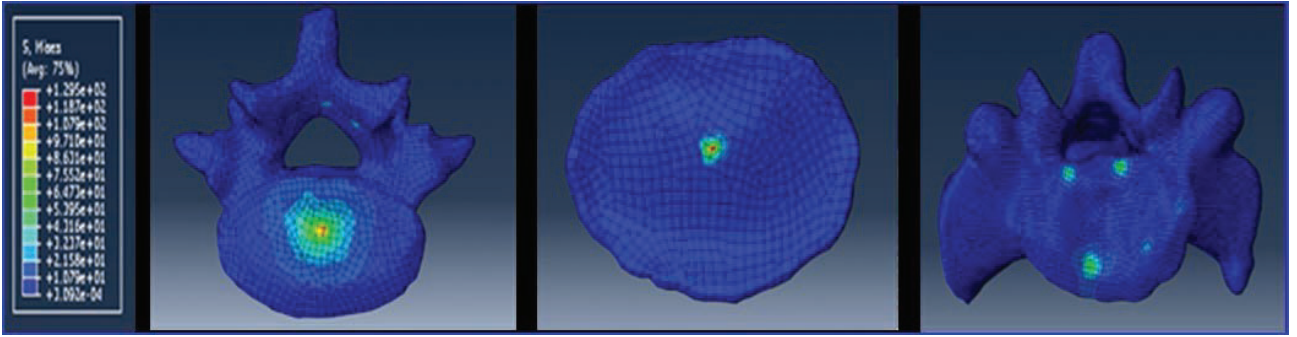


图 4 腰骶关节紊乱患者, L₅ 棘突施加向前上方 34° 方向 186.10 N 载荷的应力分布图

Fig.4 Lumbo-sacral joint disorder patients, 34° direction put forward above L₅ spinous process 186.10 N load stress pattern

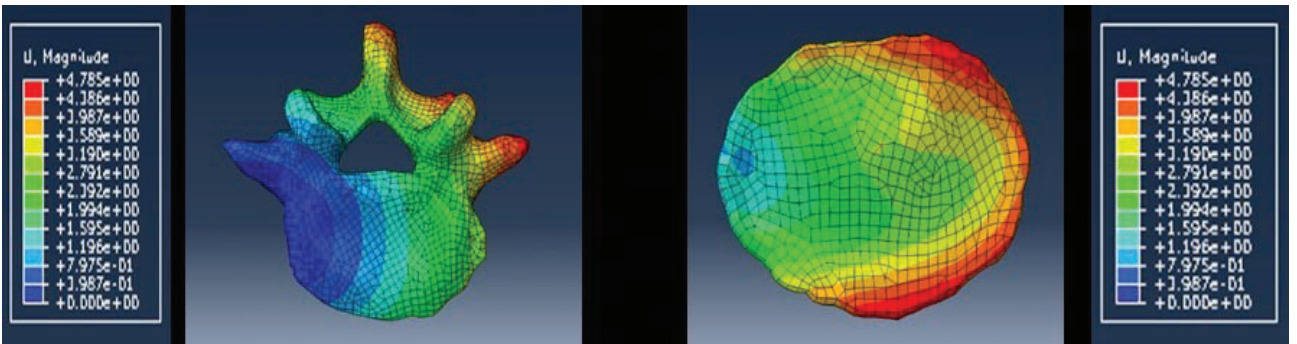


图 5 腰骶关节紊乱患者, L₅ 棘突施加向前上方 34° 方向 186.10 N 载荷的位移分布图

Fig.5 Lumbo-sacral joint disorder patients, 34° direction put forward above L₅ spinous process 186.10 N load displacement distribution

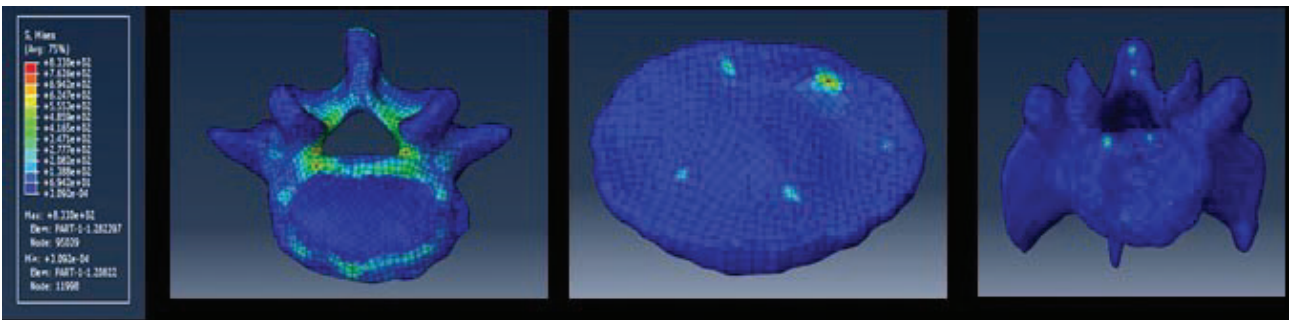


图 6 腰骶关节紊乱患者, 骶骨耳状面施加垂直向上的 2 215.66 N 载荷应力分布图

Fig.6 Lumbo-sacral joint disorder patients, applying vertical sacral auricular surface of 2 215.66 N load stress distribution

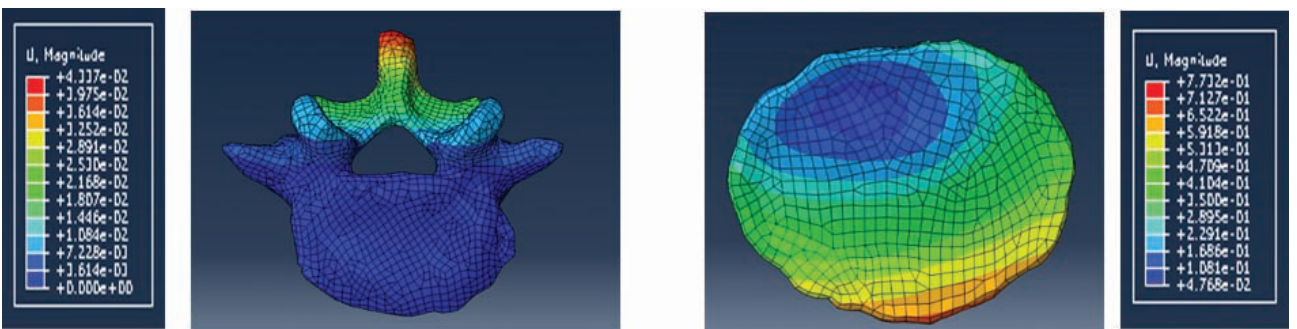


图 7 腰骶关节紊乱患者, 骶骨耳状面施加垂直向上的 2 215.66 N 载荷位移分布图

Fig.7 Lumbo-sacral joint disorder patients, applying vertical sacral auricular surface of 2 215.66 N load displacement map

或患者进行影像取样,这样模型更具真实性、可靠性、有效性。无须对模型进行解剖等任何干预措施,比起在动物身上造模取样更具人道主义和人文关怀。有限元模型可以任意加载存在于人体的力,可谓是一模多用,加载方便。

3.2 骨正筋柔是硬道理

中医骨科治疗疾病讲究“骨正筋柔,气血自流”,顾名思义即是骨与软组织各归其位、各施其职才不会引起气血阻塞不通而痛。通过观察模型可知,在正常负重情况下,该患者椎间盘向外膨出稍越过 L₅、S₁ 椎体前缘,有限元分析模型亦显示椎体前缘位移较明显,后缘未见明显位移。其应力集中在 L₅ 椎体下终板中央、间盘中央、S₁ 椎体前缘和后缘。同时伴有左侧横突、上下关节突和棘突部分明显左移。从应力和位移角度和正常腰骶关节模型对比^[14],此模型存在明显差别。在这样一个位移及应力情况下,加之人体自身重力和腰椎本身前曲弧度,长时间的应力集中及高压势必导致间盘水分大大流失变性甚至突出,相关软组织持续的拘禁、椎体的向前滑脱从而引起一系列症状。所以在早期对此进行干预治疗,以使“骨正筋柔、气血自流”非常必要。

3.3 弯腰挺立手法运用安全

通过在模型上施加斜向前的推顶力及轴向上的反作用力后,观察模型及模拟动态图可知,模拟手法施加的力均传达至手法前的主要应力点。通过推顶力的作用主要使得骶椎向前移动,在纠正关节紊乱的水平位移的同时增加了椎间孔的面积;轴向上的反作用力向上传导加之自身重力的下压,致后部上下小关节相互嵌顿后使得小关节位移归位。归位后的模型其应力和位置与正常的模型相差无几,可知弯腰挺立手法通过向前的推移,上下的嵌顿可恰使“骨正筋柔”,解除患者的症状及体征。

总而言之,通过观察腰骶关节紊乱的有限元模型,应深知腰骶关节紊乱给予及时正确治疗的必要性,否则将会带来更多更严重的后果。通过弯腰挺立手法可“巧”解紊乱的位移及应力,且安全可施,但施行手法前应给患者充分解释手法过程中注意事项;手法切忌暴力、猛力,一定要有一个斜向上的作用于骶骨棘突的力,在患者被抛后注意搀扶以免摔倒;另要注意的是弯腰挺立法治疗的是腰骶关节紊乱伴前屈受限患者,切记手法的适应证。

参考文献

[1] 国家中医药管理局. 中医病证诊断疗效标准[M]. 南京: 南京大学出版社, 1994: 201.
State Administration of Traditional Chinese Medicine. Criteria for the diagnosis of diseases and syndromes of traditional Chinese medicine [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1994: 201. Chinese.

[2] 汪芳俊,魏威,廖胜辉,等. 前屈位不同角度牵引治疗颈椎病的有限元分析[J]. 中国骨伤, 2014, 27(7): 592-596.
WANG FJ, WEI W, LIAO SH, et al. Finite element method analysis of anteflexion traction on various angles for the treatment of cervical spine[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2014, 27(7): 592-596. Chinese with abstract in English.

[3] Panagiotacopoulos ND, Pope MH, Krag MH, et al. Water content in human intervertebral discs. Part I. Measurement by magnetic resonance imaging[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1987, 12(9): 912-917.

[4] Faizan A, Sairyo K, Goel VK, et al. Biomechanical rationale of ossification of the secondary ossification center on apophyseal bony ring fracture: a biomechanical study[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2007, 22(10): 1063-1067.

[5] Gu WY, Mao XG, Foster RJ, et al. The anisotropic hydraulic permeability of human lumbar annulus fibrosus. Influence of age, degeneration, direction, and water content[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1999, 24(23): 2449-2455.

[6] Polikeit A, Nolte LP, Ferguson SJ. The effect of cement augmentation on the load transfer in an osteoporotic functional spinal unit: finite element analysis[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2003, 28(10): 991-996.

[7] 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.

[8] 范宁,藏磊,海涌,等. 脊柱侧凸有限元建模方法的应用进展[J]. 中国骨伤, 2018, 31(4): 391-394.
FANG N, ZANG L, HAI Y, et al. Advances in finite element modeling of scoliosis[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2018, 31(4): 391-394. Chinese with abstract in English.

[9] Guo LX, Li R, Zhang M. Biomechanical and fluid flowing characteristics of intervertebral disc of lumbar spine predicted by poroelastic finite element method[J]. Acta Bioeng Biomech, 2016, 18(2): 19-29.

[10] Du CF, Yang N, Guo JC, et al. Biomechanical response of lumbar facet joints under follower preload: a finite element study[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2016, 17: 126.

[11] Claeson AA, Barocas VH. Computer simulation of lumbar flexion shows shear of the facet capsular ligament[J]. Spine J, 2017, 17(1): 109-119.

[12] Wang L, Zhang B, Chen S, et al. A validated finite element analysis of facet joint stress in degenerative lumbar scoliosis[J]. World Neurosurg, 2016, 95: 126-133.

[13] 刘强,张军,孙树椿,等. 有限元在脊柱生物力学中的应用[J]. 中国骨伤, 2017, 30(2): 190-194.
LIU Q, ZHANG J, SUN SC, et al. Application of finite element method in spinal biomechanics[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2017, 30(2): 190-194. Chinese with abstract in English.

[14] 郭立新. 脊椎腰骶关节的有限元模型及其有效性验证[J]. 中国生物医学工程学报, 2006, 25(4): 426-429.
GUO LX. Finite element model of lumbosacral joint and its validation[J]. Zhongguo Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Bao, 2006, 25(4): 426-429. Chinese.