

腰椎小关节接触模型的有限元分析

张美超袁 进袁 袁义凯袁 袁仲世袁 袁镇渊第一军医大学全军生物力学重点实验室袁 广东 广州 510515 冤

摘要目的 建立腰椎 4~5 运动节段的有限元模型袁分析小关节在不同状态下的生物力学特性遥方法 获取一新鲜成人尸体腰椎 4~5 节段的断层 CT 扫描图像袁利用此二维图像建立三维立体有限元模型袁小关节部位处理为接触问题遥模拟人体的不同承载状态对此模型进行计算处理遥结果 小关节在不同状态下承担着不同的载荷袁特别是在椎体轴向旋转运动状态下抗旋作用更明显遥结论 小关节部位应该处理为接触问题袁这有助于正确了解脊柱运动节段的生物力学特性遥

关键词 小关节 有限元 应力 / 应变 载荷

中图分类号 院 66;R323.43 文献标识码 院 文章编号 院 000-2588渊2002冤9-0836-03

Finite element analysis of lumbar facet joint contact model

ZHANG Mei-chao, XIAO Jin, LI Yi-kai, ZHONG Shi-zhen

Key Lab of Medical Biomechanics of PLA, First Military Medical University, Guangzhou 510515, China

Abstract: Objective To establish a finite element model of the fourth and fifth lumbar segments in order to analyze the biomechanical characteristics of facet joints under different pressure loads. Methods CT sectional images of L_{4,5} segments were obtained to construct a finite element model, adopting contact model to simulate the condition the superior and inferior facets were in. Results The facet joint exhibited different performances under different conditions, and more loads was forced on it when the model was twisted. Conclusion The facet joints should be simulated as in condition of contact to help correct understanding of the biomechanical characteristics of the spinal segment.

Key words: facet joint; finite element; stress/strain; load

建立与实际情况相符的三维有限元模型袁对正确分析腰椎小关节在腰椎运动中的作用具有重要意义遥本研究从实际情况出发袁以小关节面接触问题为主袁对腰椎 4 尧 5 运动节段 L₄₋₅ 进行了三维重建并作了有限元分析遥

1 材料和方法

1.1 L₄₋₅ 的二维图像获取

新鲜成人腰椎标本 1 具袁利用螺旋 CT 袁沿轴向以 2 mm 间距袁对 L₄₋₅ 节段进行断层扫描袁扫描数据经过插值尧放大处理后袁以 1 mm 层距输出二维 JPEG 格式图像袁转存入微机以作三维重建遥

1.2 三维图像重建

利用自编的二维平面点坐标记录程序袁根据三维重建的具体需要袁记录下腰椎各层面图像的二维坐标遥然后根据平面距离大小及层间距袁经过适当的空间比例调整后袁把二维坐标组合为三维空间坐标遥再利用有限元软件 Ansys 的建模功能袁根据点尧线尧面尧体从下向上的建模原则袁构造腰椎 L₄₋₅ 节段的三维空间模型遥如图 1 所示遥此模型包括骨密质尧骨松质尧终板尧纤维环尧髓核尧后部结构尧小关节尧韧带等遥根据

文献报道遥各部位的材料特性如表 1 所示遥

表 1 L₄₋₅ 运动节段有限元模型各部分材料性质

Tab.1 Material properties in the finite element model of L₄₋₅ segments

| Position | Young's modulus(MPa) | Poisson's ratio | Across area(mm ²) |
|-------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------|
| Cortical bone | 12000.0 | 0.30 | - |
| Cancellous bone | 100.0 | 0.20 | - |
| Endplate | 25.0 | 0.25 | - |
| Annulus fibers | 92.0 | 0.45 | - |
| Nucleus | 0.2 | 0.50 | - |
| Posterior structure | 3500.0 | 0.30 | - |
| Facet joints | 3500.0 | 0.25 | - |
| Cartilago articularis | 25.0 | 0.30 | - |
| Longitudinale anterior | 1.2 | 0.30 | 64 |
| Longitudinale posterior | 1.2 | 0.30 | 20 |
| Flavum | 1.2 | 0.30 | 40 |
| Interspinal | 1.2 | 0.30 | 40 |
| Supraspinal | 1.2 | 0.30 | 30 |

2 结果

腰椎各部位材料特性确定后袁对模型进行网格划分袁L₄₋₅ 节段的整体网格模型如图 1 所示遥其中小关节模型网格划分见图 2遥根据 CT 图像显示的数据袁上下关节面之间平均相距约 0.5 mm 袁且在小关节方面采用了接触单元遥

整个模型单元划分采用了 4 种单元类型袁种材

收稿日期 院 002-03-12

基金项目 院 国家自然科学基金(30171184)

作者简介 院 张美超 1974- 袁男 袁湖北蕲春人 袁 002 年毕业于第一军医大学袁 袁士袁 袁师袁 电话 5140114-8909 袁 e-mail 院 mc_zhang@21cn.com 袁 zmc@fimmu.com

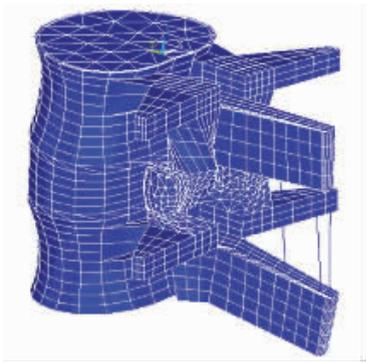


图1 腰椎L₄₋₅节段的网格模型

Fig.1 Meshed finite element model of L₄₋₅ segments

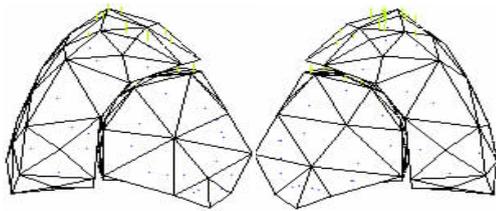


图2 腰椎L₄₋₅节段小关节网格模型

Fig.2 Meshed finite element model of the facet joints

料性质袁共划分了6944个单元袁0392个结点遥与前人所建模型相比袁网格划分精度有比较大的提高袁关键是在对小关节模型的处理上采用了接触模型袁将接触单元引入小关节的受力分析过程中遥

为了验证所建模型的正确与否袁对模型进行了轴向旋转状态的模拟分析袁并对此种运动状态下小关节的受力状况进行观察分析袁确定小关节在腰椎中的生物力学角色遥

在模拟左旋转运动状态过程中袁对模型中L₄椎体上终板位置施加200N的面压力以模拟人体自身重量对L₄₋₅节段的负荷袁另外再施加4 N·m的轴向扭矩遥在左旋转运动状态下袁小关节受力的部位与大小各不相同遥小关节面的受力状况如图3所示遥

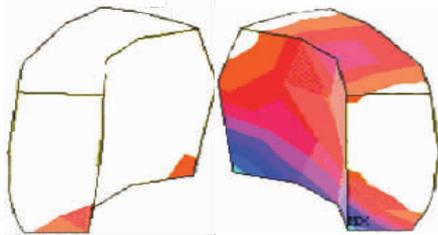


图3 小关节抗旋转运动受力状态图

Fig.3 Stress distribution of the whole facet joints

从图3可以看出袁在左旋转运动状态下袁左侧小关节两关节面因旋转运动而相互离开袁除了小关节囊的拉牵作用外袁受力较小袁右侧小关节两关节面因旋转运动相互接触并挤压袁承受较大的抗旋转力遥另从图4可见袁小关节面的受力也不均匀袁而是呈一定分布遥对上述模型纤维环部位材料进行修改袁杨氏模量

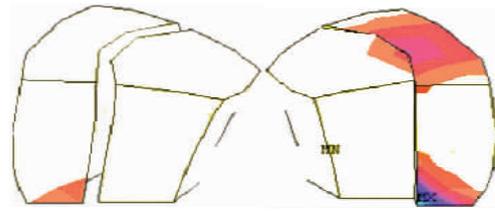


图4 L₅上小关节面抗旋转受力图

Fig.4 Stress distribution on superior facet surface

改为3MPa袁泊松比改成0.45袁可以模拟椎间盘退变模型遥同样的袁对此椎间盘退变模型进行左旋转运动分析袁扭矩大小不变袁可以比较两种不同小关节在同一载荷状态下的受力分析比较遥选取L₅的右上关节面作为比较分析对象袁用1尧尧尧尧尧尧分别代表小关节的正中部尧左边缘部尧右边缘部尧后中部和前中部袁正常椎体与退变椎体在旋转运动状态下各小关节面的范氏应力大小如图5所示遥

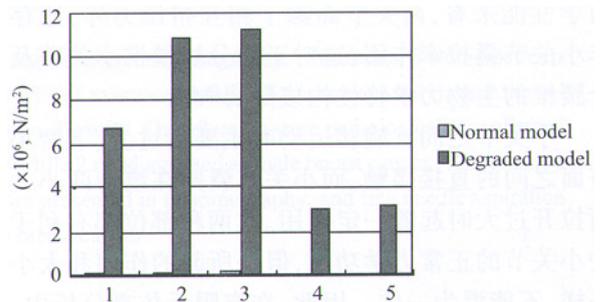


图5 椎间盘退变前后小关节受力比较

Fig.5 Stress distribution of the facet joint before and after degeneration

1:Medialarea;2:Superiorarea;3:Inferiorarea;4:Posterior area;5:Anteriorarea

由图中数据可知袁在椎间盘退变之后袁椎体的抗旋转运动大大减小袁同时在很大程度上增加了小关节的负担袁在临床上易造成小关节损伤和钙化遥

3 讨论

腰椎小关节是腰椎运动节段的重要结构袁同其他节段小关节一样袁在脊柱运动功能的结构力学中袁参与人体脊柱对抗轴向压缩尧前屈尧后伸尧轴向旋转及复合运动状态遥小关节的具体结构决定了其功能袁使其在不同的运动状态中起着性质尧大小不同的作用遥同时袁如果小关节自身性能发生了变异尧炎症尧退行性变尧袁它的作用又将发生变化袁并影响着椎间盘尧终板及腰椎其它结构的力学作用袁且从长期来看袁还将影响与改变它们的力学性能遥正确掌握腰椎小关节在其运动节段结构力学中的角色与作用袁对正确认识整个节段的力学性能有重要帮助遥

有限元法可以建立三维腰椎模型并对其进行生物力学分析袁这是近年来工程物理学法在医学领域的

一种应用遥与其他实验方法相比袁它具有分析面广尧内容多尧控制性及重复性好等优点袁因此得到了广泛的使用遥但是由于它也是一种非直接测量方法袁所以关系其分析结果正确与否的一个最直接原因袁就是分析对象 - 建立的模型的好坏遥近年来国内学者对腰椎模型进行分析的研究比较多遥其中不少模型在几何外形或材料性能上大体都比较接近真实袁但是它们有一个共同的缺陷袁就是在后部结构的小关节问题上袁所采用的处理方法并不与实际相符遥小关节的上关节面与下关节面构成一对接触面袁也就是说袁这两个面之间在接触时会出现相互挤压力与摩擦力渊小关节骨化时更大冤两面分开时应不存在相互作用遥典型的情况是在椎体作轴向旋转运动时只有一侧小关节间存在相互压力袁而另一侧由于分离而只由小关节囊韧带维持平衡遥在与腰椎相关的有限元模型中袁许多研究都未提到这一点遥而且从某些模型可清楚看出袁其中的小关节部位两个关节面是连在一起的袁从生物力学性能来看袁两个关节面除了相互挤压力外袁还存在非小关节囊拉牵作用袁这对正确分析腰椎小关节及整个腰椎的生物力学特性构成障碍遥

小关节之间抗旋转运动时主要通过上尧下两小关节面之间的直接接触袁而小关节囊则在维持两小关节面拉开过大时起着一一定作用遥这两种部位都有利于维护小关节的正常力学功能袁但是所起的作用和大小不一样袁不能混为一体遥因此袁在有限元仿真分析中袁应该把小关节处理为接触模型袁这样才能正确地分析和理解小关节在椎体中的力学功能及所起的作用遥

与前人的研究相比袁本研究的模型更接近实际袁且模型的网格划分更精细袁计算结果更准确遥从本模型可以看出袁小关节的功能在维护椎体抗旋转运动方面有一定作用袁但椎体在前屈尧后伸尧侧弯尧压缩等不同情况下小关节的受力状况如何袁此时正常椎间盘与蜕变椎间盘之间又有什么差异等等袁需要进一步的研究与分析袁将在下一步的工作中继续讨论遥

参考文献

- 咱暂VijayKG, WeizengK, JungSH, et al. A combined finite element and optimization investigation of lumbar spine mechanics with and without muscles. 咱暂Spine, 1993, 18(11):1533-41.
- 咱暂刘雷, 沈根标. 胸腰椎损伤的三维有限元模型的应力分析. 咱暂中华创伤杂志, 1995, 11(6):343-4.
- Liu L, Sheng GB. A stress analysis of three-dimensional finite element model of thoracolumbar vertebral injuries. 咱暂Chin J Traumatol, 1995, 11(6):343-4.
- 咱暂杜东鹏, 于进祥, 葛宝丰. 腰椎间盘膨隆的有限元分析. 咱暂颈腰痛杂志, 2000, 21(1):6-8.
- Du DP, Yu JX, Ge BF. The finite element analysis of lumbar disk bulging. 咱暂Cervicodynia Lumbodynia, 2000, 21(1):6-8.
- 咱暂杜东鹏, 张克华, 葛宝丰, 等. 腰椎疲劳骨折的有限元分析. 咱暂中国临床解剖学杂志, 1999, 17(3):268-9.
- Du DP, Zhang KH, Ge BF, et al. The finite element analysis of fatigue fracture of lumbar vertebrae. 咱暂Chin J Clin Anat, 1999, 17(3):268-9.
- 咱暂Shirazi AD. Finite-element evaluation of contact loads on facet of L2-L3 lumbar segment in complex loads. 咱暂Spine, 1991, 16(5):533-41.
- 咱暂Sharma M, Langrana NA, Rodriguez J, et al. Role of ligaments and facets in lumbar spinal stability. 咱暂Spine, 1995, 20(8):887-90.

渊上接 835 页冤

2 讨论

计算机三维重建技术应用于颞骨解剖研究很有意义遥颞骨内部结构复杂袁常规解剖及单纯切片均不能很好地阐释其空间结构的细节袁难以保证空间测量的精确性遥而连续切片的计算机三维重建所得图像既具备切片的细节性袁又能反映颞骨的空间特性袁是一种提高颞骨形态学研究水平的重要方法遥

将整块颞骨染色后进行冰冻切片用于形态学观察袁结果与颞骨火棉胶切片基本相同袁但对蜗管内外各结构之间的联系及蜗轴内组织结构的观察更为理想袁且有比火棉胶制片法切片薄尧切片周期短尧可以任意选择内耳终器切片角度等优点遥

要显示重建结构的形态袁断面或切片的定位非常重要遥若定位不准确袁则重建的图像失真袁失去三维重建的意义遥定位的方法有外定位法和内定位法遥外定位法是用机械或手工的方法在组织块或断面上做标记袁一般是用细针或激光穿 2 个孔作为标记用的

基孔袁通过每个层面上的基孔再加上坐标确定平面的位置袁实现层面的对位遥外定位法的缺点是院1)穿孔容易导致组织结构的损伤变形院2)穿孔若过大袁易定位不准院3)穿孔可能位于显微镜视野以外袁镜下无法定位遥内定位法是根据组织的连续性与完整性袁在切片或断面图像内寻找定位结构遥但由于生物结构形态的复杂性袁定位误差难免较大遥本实验通过在标本两侧放置定位线袁然后与组织块一起包裹袁在标本上留下 2 个定位点袁而将外定位法转化为内定位法袁保证定位的准确性遥

参考文献

- 咱暂姜泗长. 耳鼻咽喉科实验技术. 咱暂北京: 人民军医出版社, 1999. 36-8.
- 咱暂张少祥, 刘正津, 徐美和, 等. 生物塑化薄层连续断面的计算机三维重建. 咱暂解剖学报, 1996, 27(2):113-8.
- Zhang SX, Liu ZJ, Xu MH, et al. Computerized 3D reconstruction of the serial thin sections with plastination Technique. 咱暂Anat, 1996, 27(2):113-8.