

基础研究

下颈椎全椎板切除后生物力学特性
改变机制的有限元分析

张 辉, 段 扬, 刘成龙, 张 力, 闵少雄, 靳安民

(南方医科大学珠江医院骨科中心 510282 广州市)

【摘要】目的:探讨下颈椎全椎板切除后生物力学特性改变的机制。**方法:**采集 1 例成年健康男性志愿者下颈椎(C3~C7)的 CT 数据集,应用 Mimics 10.01、Geomagic studio 10.0、HyperMesh 10.0、Abaqus 6.9.1 等软件建立下颈椎(C3~C7)完整有限元模型、完整保留双侧关节突关节三节段(C4~C6)全椎板切除后有限元模型。模拟施加 74N 头颅预载荷和 1.8Nm 运动附加力矩,使模型产生前屈、后伸、侧屈和旋转运动,测试颈椎全椎板切除前后的运动范围和关节囊韧带、后纵韧带在各种加载方式下的拉力。**结果:**C4~C6 全椎板切除后即刻颈椎屈伸、侧弯和旋转的运动范围与完整状态下比较均没有增加,但 C4~C6 节段之间的关节囊韧带和后纵韧带在各种加载方式下受到的拉力均增大。**结论:**完整保留双侧关节突关节的全椎板切除术不会对下颈椎即时稳定性造成影响,但关节囊韧带和后纵韧带承受着超正常生理负荷。

【关键词】 颈椎;全椎板切除术;有限元;生物力学

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2012.01.11

中图分类号:R687.3,R318.01 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2012)-01-0054-05

Finite element analysis of biomechanics mechanism for the lower cervical spine after laminectomy/ZHANG Hui, DUAN Yang, LIU Chenglong, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2012, 22(1):54-58

【Abstract】 Objective: To investigate the biomechanics mechanism for the lower cervical spine after laminectomy. **Method:** CT scans were performed on a healthy adult male volunteer. Mimics 10.01, Geomagic studio 10.0, HyperMesh 10.0 and Abaqus 6.9.1 softwares were used to establish the intact model of C3-C7. The model was subjected to three-level (C4-C6) laminectomy. The skull preload of 74N and torsion preload of 1.8Nm was added on the model, which simulated flexion, extension, lateral bending and axial rotation. The immediate biomechanics mechanism of facet capsule and posterior longitudinal ligament of cervical spine after laminectomy was analyzed. **Result:** Under different loading, the immediate stability after C4-C6 laminectomy remained unchanged compared with intact specimen, however the stress of facet capsule and posterior longitudinal ligament in C4-C6 under different load increased significantly. **Conclusion:** Laminectomy without removal of bilateral facet joints do not have effect on the immediate stability of subaxial cervical spine, however the facet capsule and posterior longitudinal ligament sustain excessive load.

【Key words】 Cervical spine; Laminectomy; Finite element; Biomechanics

【Author's address】 Department of Orthopaedics, Zhujiang Hospital, Southern Medical University, Guangzhou, 510282, China

颈椎全椎板切除减压术通过切除双侧椎板达到减压或暴露椎管的目的,已沿用数十年且比较简单,虽然对颈椎结构有较大破坏,但在严重的颈椎管狭窄、多节段颈椎病、颈椎管内肿瘤的外科治

疗中广泛应用。由于此术式对颈椎后部结构破坏广泛,相应的颈椎生物力学改变在所难免,术后远期易引起颈椎后凸畸形^[1]。但目前国内外尚无对其产生机制的研究。本研究利用颈椎三维有限元模型,对下颈椎全椎板切除后即刻稳定性和各部分韧带的拉力进行测量,探讨下颈椎全椎板切除术后生物力学特性改变的机制。

第一作者简介:男(1968-),主任医师,医学博士,研究方向:脊柱外科

电话:(020)62782578 E-mail:zhanghuixf@163.com

1 材料和方法

1.1 数据来源及软件

选择 1 例成年健康男性志愿者为研究对象, 无明显的颈椎病史, 拍摄颈椎正侧位、斜位、过伸过屈位 X 线片及 CT 扫描以排除颈椎病变。在本院影像科 CT 室完成 CT 数据的采集, 扫描条件: 120kV, 125mA, 层厚 0.625mm; 扫描范围: C3~C7。数据以标准 Dicom 格式存贮。所用软件: Mimics 10.01 (Materialise Company, Belgium); Geomagic studio 10.0 (Raindrop Company, USA); HyperMesh 10.0 (Altair Company, USA); Abaqus 6.9.1 (SIMULIA Company, USA)。

1.2 颈椎有限元模型的建立与验证

将扫描获得的图像 (Dicom 格式) 导入 Mimics 10.01 中。通过阈值分割骨组织及软组织, 进行布尔运算及三维自动/手动交互切割, 分别将 C3/4、C4/5、C5/6、C6/7 纤维环和髓核及韧带结构分离出来, 建立 C3~C7 功能节段的几何实体模型。将其导入 Geomagic studio 10.0、HyperMesh 10.0 软件, 利用上述软件完成模型的处理、分割、面/体网格划分等前处理工作, 生成三维有限元原始模型。最后导入有限元分析软件 (Abaqus 6.9.1) 进行单元设置、材料属性定义和有限元分析。

颈椎椎体、后部结构、椎间盘纤维环、髓核均模拟为四面体单元。椎体皮质骨、软骨终板模拟为壳单元。韧带使用非线性单轴连接单元模拟其只

受拉、不受压的特性。C3~C7 的 8 对关节突关节定义为面-面接触。由于滑膜和滑液的存在关节面间的摩擦非常小, 模型中关节的面-面接触都定义为无摩擦特性。骨性结构和椎间盘均模拟为各向同性的弹性材料, 骨、椎间盘、韧带的材料特性依据文献^[2-4]确定 (表 1、2)。

约束边界: C7 椎体下缘所有节点各方向的自由度均被限制, C3 不受任何约束, 椎体上缘中心接受模拟头部重量的载荷。假设条件: 本实验所涉及生物材料的材料属性均假定为连续、匀质和各向同性。受力时模型各截面之间不产生相互滑动, 各单元之间有足够的稳定性, 不计加载过程中各

表 1 有限元模型中骨与椎间盘的材料属性

Table 1 Material properties of bone and disc used in the finite element model

	弹性模量 (MPa) elasticity	泊松比 poisson ratio
椎体皮质骨 cortical bone	12000.0	0.29
椎体松质骨 cancellous bone	100.0	0.29
终板 end plate	500	0.4
后部结构 posterior structure	3500.0	0.29
椎间盘纤维环 annulus fibrosus	3.4	0.4
椎间盘髓核 nucleus pulposus	1.0	0.49

表 2 有限元模型中主要韧带的力学特性

Table 2 Mechanical properties of different ligaments used in the finite element model

变形 deformation (mm)	受力 force (N)									
	前纵韧带 anterior longitudinal ligament		后纵韧带 posterior longitudinal ligament		棘韧带 supra- and inter- spinal ligament		黄韧带 ligamentum flavum		关节囊韧带 fact capsule	
	C3-C5	C5-C7	C3-C5	C5-C7	C3-C5	C5-C7	C3-C5	C5-C7	C3-C5	C5-C7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	28	20	25	20	7	8	—	—	—	—
2	52	40	44	40	12.5	14	38	30	55	75
3	72	58	62	60	18	20	—	—	—	—
4	89	78	78	78	22.5	25	60	68	130	145
5	102	98	89	92	26	29	—	—	—	—
6	115	112	—	—	30	32.5	80	102	180	204
7	—	120	—	—	32.5	35	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	108	130	210	250
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	145	230	265

部分材料受力变形。加载条件:在 C3 上面施加模拟头部的平均重量 74N 预载荷,运动附加纯力矩为 1.8Nm^[5]。模型已在前期研究中验证(图 1)。

1.3 颈椎三节段全椎板切除有限元模型的建立

依据临床全椎板切除的手术方法,将经过验证的完整有限元模型修改为全椎板切除模型。模拟全椎板切除术式:切除 C4~C6 椎板和 C3~C7 之间的黄韧带和棘韧带,保留完整双侧关节突关节,建立下颈椎 C4~C6 三节段全椎板切除模型^[6]。

1.4 完整模型及 C4~C6 全椎板切除后模型即刻稳定性和韧带力学特性测试

根据颈椎运动特点结合标本的实验方法,模拟颈椎前屈、后伸、侧屈和旋转四种运动类型,在各种工况下测定完整状态、C4~C6 全椎板切除术后即刻的稳定性和各部分韧带受到的拉力。

2 结果

在经过验证的颈椎完整有限元模型上模拟临

床全椎板切除术式切除 C4~C6 椎板和 C3~C7 之间的黄韧带和棘韧带,建立了下颈椎 C4~C6 三节段全椎板切除的有限元模型(图 2)。

完整模型及 C4~C6 全椎板切除后模型各椎间活动度和总活动度见表 3。C4~C6 全椎板切除后模型与完整模型在各加载模式下的活动度无明显增加。说明 C4~C6 全椎板切除后颈椎稳定性没有明显丧失。

完整模型及 C4~C6 全椎板切除后模型在各加载模式下韧带的受力情况见表 4~6。完整模型在除后伸外 C4~C6 的黄韧带(flavum ligaments, FL)和棘韧带(spinous ligaments, SL)均受到一定的拉力。C4~C6 全椎板切除后模型在各加载模式下 C4~C6 的关节囊韧带(capsular ligaments, CL)和后纵韧带(posterior longitudinal ligaments, ALL)受到的拉力与完整状态下比较均明显增加,而前纵韧带(anterior longitudinal ligaments, ALL)所受拉力没有明显改变。

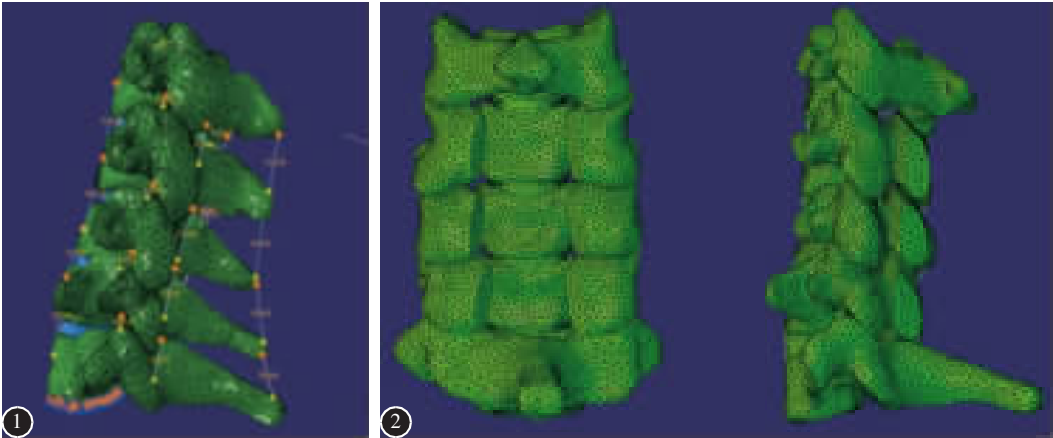


图 1 C3~C7 完整有限元模型 图 2 C4~C6 全椎板切除后有限元模型

Figure 1 The intact finite element model of the C3~C7 vertebrae. Figure 2 The finite element model following C4~C6 level laminectomy view of the C3~C7

表 3 下颈椎全椎板切除前、后各种工况后的活动度 (°)

Table 3 Comparison of intersegmental rotational motions following C4~C6 level laminectomy

	屈曲 Flexion		侧屈 lateral bending		旋转 rotation	
	完整模型 intact model	全椎板切除模型 laminectomy model	完整模型 intact model	全椎板切除模型 laminectomy model	完整模型 intact model	全椎板切除模型 laminectomy model
C3~C4	8.91	9.93	8.02	5.41	8.52	5.65
C4~C5	7.91	7.69	6.24	4.02	7.37	4.35
C5~C6	5.32	4.96	3.86	2.43	4.93	3.03
C6~C7	7.69	8.68	7.96	5.99	7.27	4.66
总计 Sum	29.83	31.26	26.08	17.84	28.09	17.69

3 讨论

颈椎后路减压术常涉及到对颈椎后部结构的损伤或切除,其结果是破坏了颈椎正常结构,增加术后颈椎不稳定的风险。了解手术后颈椎的生物力学特性是预防和治疗颈椎失稳、退变等疾病的基础。由于存在如加载模式和试验设备的多种多样、微小纯弯矩生理载荷的难以施加等多方面因素,颈椎全椎板切除对颈椎生物力学影响的离体实验研究结果,特别是在保留双侧关节突关节复合体上存在较大的争论。

Panjabi等^[7]首次报道了关节突关节及其关节囊在维持颈椎稳定性方面的重要作用。White等^[8]所做离体生物力学实验发现,关节突关节切除越

多,颈椎不稳的发生率增加。Zdeblick等^[9]进行了双侧关节突关节切除的离体生物力学实验研究,发现只有关节突关节切除 50%以上才会产生颈椎失稳。Nowinski等^[10]报告,在椎板切除同时,只要复合切除关节突关节的 25%以上,就可发生颈椎失稳。Ng等^[4]的有限元研究表明单侧或双侧关节突切除可造成颈椎即刻稳定性的下降。本研究基于完整保留双侧关节突关节复合体建立了全椎板切除术的三维有限元模型,经测试保留关节突复合体的全椎板切除术后有较好的即刻稳定性,从理论上证实了文献相关的研究结果。

但为何全椎板切除术后中远期易发生稳定性下降和颈椎后凸畸形?本研究对两种模型主要韧

表 4 完整模型加载后 C4-C5、C5-C6 黄韧带和棘韧带受到的拉力

(N)

Table 4 The magnitude of ligament force in intact segment

	C4-C5		C5-C6	
	黄韧带 ligamentum flavum	棘韧带 supra- and inter-spinal ligament	黄韧带 ligamentum flavum	棘韧带 supra- and inter-spinal ligament
预加载 preload	3.04	2.21	1.20	1.07
前屈 flexion	20.86	13.84	14.93	12.14
后伸 extention	0	0	0	0
旋转(左) rotation(left)	5.21	1.52	2.35	0.80
旋转(右) rotation(right)	5.94	4.49	2.44	1.77
侧屈(左) left bending	7.42	4.80	3.76	2.93
侧屈(右) right bending	8.97	4.02	3.96	2.05

表 5 加载后 C4-C5 节段主要韧带受到的拉力

(N)

Table 5 Comparison of ligament force in the C4/5 level of models

	全椎板切除前 pre-laminectomy			全椎板切除后 post-laminectomy		
	前纵韧带 anterior longitudinal ligament	关节囊韧带 fact capsule ligament	后纵韧带 posterior longitudinal ligament	前纵韧带 anterior longitudinal ligament	关节囊韧带 fact capsule ligament	后纵韧带 posterior longitudinal ligament
预加载 preload	0	2.91	0.61	0	41.62	12.46
前屈 flexion	0	23.62	10.51	0	69.95	25.14
后伸 extention	9.81	2.30	0	3.13	35.34	8.23
旋转(左) rotation(left)	0.01	9.97	2.64	0	45.24	16.18
旋转(右) rotation(right)	0.15	13.20	1.14	0	46.26	11.37
侧屈(左) left bending	0.28	18.58	2.40	0	47.59	12.18
侧屈(右) right bending	0.05	21.26	4.99	0	45.25	15.98

表 6 加载后 C5-C6 节段主要韧带受到的拉力(N)

Table 6 Comparison of ligament force in the C5/6 level of models

	全椎板切除前 pre-laminectomy			全椎板切除后 post-laminectomy		
	前纵韧带 anterior longitudinal ligament	关节囊韧带 fact capsule ligament	后纵韧带 posterior longitudinal ligament	前纵韧带 anterior longitudinal ligament	关节囊韧带 fact capsule ligament	后纵韧带 posterior longitudinal ligament
预加载 preload	0	2.48	0.082	0	45.45	8.53
前屈 flection	0	27.93	6.37	0	71.21	15.64
后伸 extention	5.57	4.96	0	2.76	42.87	7.26
旋转(左) rotation(left)	0.01	12.75	1.11	0	50.92	9.71
旋转(右) rotation(right)	0.04	11.41	0.36	0.24	45.60	7.98
侧屈(左) left bending	0.04	15.44	1.18	0	47.95	8.64
侧屈(右) right bending	0.04	21.40	2.43	0	51.32	9.86

带的拉力进行了测试,在完整模型中,棘韧带和黄韧带在各种工况下都受到一定拉力;C4~C6 全椎板切除模型因 C4~C6 之间可承受部分拉力的棘韧带和黄韧带已切除,载荷的传递路径得到改变,前纵韧带、关节囊韧带和后纵韧带的拉力明显增加,有些数值已超过人体韧带的正常上限。我们认为韧带在较大载荷情况下的疲劳、断裂可能是全椎板切除术后中远期颈椎稳定性下降和颈椎后凸畸形的原因。但本模型无法反映离体实验中不断加载过程中韧带特性的改变。

结合文献和本研究结果,我们认为全椎板切除手术时完整保留双侧关节突关节复合体将不会对颈椎即刻稳定性造成较大影响,但因全椎板切除术后颈椎主要韧带承受着非正常超生理负荷,其远期结果将会是韧带丧失生物力学特性,无法在中远期起到稳定性约束作用,从而导致临床术后中远期颈椎稳定性降低、后凸畸形发生。因此在颈椎全椎板切除术后需要植骨融合或使用颈椎内固定器械来稳定颈椎^[11]。

4 参考文献

1. Epstein NE. Laminectomy for cervical myelopathy[J]. Spinal Cord,2003,41(2):317-327.

2. Zhang QH,Teo EC,Ng HW. Development and validation of a C0-C7 FE complex for biomechanical study [J]J Biomech Eng,2005,127(10):729-735.

3. Yoganandan N,Kumaresan S,Pintar FA,et al. Biomechanics of

the cervical spine(Part 2):cervical spine soft tissue responses and biomechanical modeling [J].Clin Biomechanics,2001,16(1):1-27.

4. Ng HW,Teo EC,Zhang QH. Biomechanical effects of C2-C7 intersegmental stability due to laminectomy with unilateral and bilateral facetectomy[J].Spine,2004,29(16):1737-1745.

5. Duan Y,Zhang H,Min SX,et al.Posterior cervical fixation following laminectomy:a stress analysis of three techniques[J].Eur Spine J,2011,20(9):1552-1559.

6. 段扬,靳安民,张辉,等.下颈椎全椎板切除后不同内固定技术螺钉的应力分布 [J]. 中国脊柱脊髓杂志,2010,20(11):889-894.

7. Panjabi MM,White AA 3rd,Johnson RM. Cervical spine mechanics as a function of transection of components [J].J Biomech,1975,8(5):327-336.

8. White AA 3rd,Panjabi MM. Biomechanical considerations in the surgical management of cervical spondylotic myelopathy[J]. Spine,1988,13(7):856-860.

9. Zdeblick TA,Zou D,Warden KE,et al. Cervical stability after foraminotomy:a biomechanical in vitro analysis[J].J Bone Joint Surg Am,1992,74(1):22-27.

10. Nowinski GP,Visarius H,Nolte LP, et al. A biomechanical comparison of cervical laminaplasty and cervical laminectomy with progressive facetectomy [J].Spine,1993,18(14):1995-2004.

11. Kwon BK,Vaccaro AR,Grauer JN,et al. The use of rigid internal fixation in the surgical management of cervical spondylosis[J].Neurosurgery,2007,60(1 Suppl):118-129.

(收稿日期:2011-05-20 修回日期:2011-09-04)
(英文编审 蒋欣/贾丹彤)
(本文编辑 卢庆霞)