

文章编号:1004-7220(2014)02-0126-05

脊柱胸腰段骨折后路经伤椎单节段固定与常规短节段固定的力学性能比较

徐桂军^{1,2}, 马信龙^{1,2}, 张 骏², 马剑雄², 付 鑫¹, 杜长岭²

(1. 天津医院 骨研所生物力学室, 天津 300211; 2. 天津医科大学总医院 骨科, 天津 300052)

摘要: **目的** 应用三维有限元技术构建胸腰椎骨折经伤椎单节段固定及常规短节段固定模型, 研究经伤椎单节段固定的生物力学特点, 论证其在胸腰椎骨折治疗中应用的可行性。 **方法** 选取青壮年健康男性志愿者, 利用 CT 扫描数据建立脊柱 T10 ~ L2 正常模型、T12 骨折模型以及经伤椎单节段固定和短节段固定模型; 分析在轴向压缩、前屈、后伸、侧屈及轴向旋转下各个节段的最大位移差及内固定物的应力情况。 **结果** 骨折模型 T10 ~ T11、T11 ~ T12、T12 ~ L1 的最大位移差较正常模型在大多数加载情况时明显增大, 经短节段或者经伤椎单节段固定后, 该值明显减小, 两种固定方式无显著差异。内固定物应力方面: 在轴向压缩及前屈时, 经伤椎单节段固定模型中螺钉应力明显低于短节段固定; 而在后伸、侧屈及轴向旋转时, 螺钉应力无明显差异。对于固定棒, 轴向压缩及前屈时, 两种固定方式无差异; 后伸及侧屈时经伤椎节段固定应力高于短节段固定, 而旋转时则恰恰相反。 **结论** 对于胸腰段单节段不完全骨折, 经伤椎单节段固定可以提供与常规短节段固定相近的生物力学稳定性, 是治疗胸腰椎不完全骨折的一种良好的选择。

关键词: 胸腰椎骨折; 单节段固定; 力学特性; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Biomechanical comparison of monosegmental and short transpedicular fixation for stabilization of thoracolumbar fractures

XU Gui-jun^{1,2}, MA Xin-long^{1,2}, ZHANG Tao², MA Jian-xiong², FU Xin¹, DU Chang-ling²

(1. Biomechanics Lab of Orthopaedic Institute, Tianjin Hospital, Tianjin 300211, China; 2. Department of Orthopedics, General Hospital of Tianjin Medical University, Tianjin 300052, China)

Abstract: Objective To establish the monosegmental transpedicular fixation model and short segmental fixation model by three-dimensional finite element technique, and evaluate the biomechanical properties of monosegmental transpedicular fixation for thoracolumbar fractures and verify its feasibility for application. **Methods** T10-L2 motion segment of a young healthy subject was used to establish the normal finite element model. The superior 1/2 cortical bone of the T12 segment was removed and superior 1/2 cancellous bone of the same vertebrae was assigned material property of the injured bone to simulate the thoracolumbar fracture. Transpedicular screw fixation of the T11 and T12 segment was performed in monosegmental fixation model. T11 and L1 segment were instrumented in the short segmental fixation model. All the four finite element models were applied with loading of axial compression, anteflexion, extension, lateroflexion and axial rotation, respectively. Motion difference of each functional unit and the stress of implants were measured to evaluate biomechanical behaviors of monosegmental fixation. **Results** The motion difference of all the functional units (T10-T11, T11-T12, T12-L1) in the fractured model was obviously increased under all loading conditions as compared to the normal model, but the motion differ-

收稿日期:2013-01-16; 修回日期:2013-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11072021), 吴阶平医学基金会临床科研专项资助基金(320.6750.11017)。

通信作者:马信龙, 教授, 主任医师, 博士研究生导师, E-mail:mjx969@163.com

ence in the fractured models was decreased after monosegmental fixation and short segmental fixation, and no significant differences were found between monosegmental fixation and short segmental fixation. The stress on screws in monosegmental fixation model was significantly lower than that in short segmental fixation under axial compression and anteflexion, but the stress on screws of two fixation models had no significant difference under extension, lateroflexion and axial rotation. The stress on the rods of monosegmental fixation model was apparently higher than that of short segmental fixation under extension and lateroflexion, and lower under axial rotation, but no significant difference was found for two fixation models under axial compression and anteflexion. **Conclusions** Monosegmental transpedicular screw fixation would give the similar stabilization as short segmental fixation and could be an effective alternative to treat incomplete fractures in thoracolumbar spine.

Key words: Thoracolumbar fracture; Monosegmental fixation; Mechanical properties; Finite element analysis

胸腰椎容易发生应力集中,为脊柱骨折的高发节段。不稳定胸腰椎骨折需要手术治疗,后路经椎弓根螺钉内固定操作相对简单,在临床中广为应用。其中,经椎弓根短节段螺钉内固定是胸腰椎骨折后路手术治疗的主要方法。但是该手术方式仍需固定伤椎两侧的健康椎体,多丢失一个运动节段,邻近节段较容易出现退变^[1]。有学者认为,邻近关节突关节退变程度随融合节段的增多而愈加严重^[2]。因此,一些学者提出经伤椎单节段固定的理念,并将其应用于特定骨折的治疗,临床报道随访结果较好^[3-5]。本文旨在采用有限元方法分析比较常规短节段固定及经伤椎单节段固定的生物力学特点,为经伤椎单节段固定在临床的应用提供指导。

1 材料和方法

1.1 脊柱胸腰段正常及骨折三维有限元模型建立

选择青壮年男性志愿者,数据获取前拍摄 X 线平片排除脊柱病理情况。采用 GE 公司的 Light Speed 16 排螺旋 CT 对脊柱 T10 ~ L2 沿横断面连续扫描,扫描条件如下:扫描电压 120 kV,扫描电流 300 mA,层厚 1.25 mm,层间隔 0.625 mm。扫描得到的 CT 图像以 Dicom 3.0 标准存储。将上述 Dicom 格式 CT 数据导入 Mimics 10.01 (Materialise, 比利时),经阈值分割、动态区域增长及三维计算等操作建立脊柱 T10 ~ L2 三维模型,并利用逆向工程软件 Geomagic Studio 进行光滑处理。利用有限元前处理软件 Hypermesh,补充建立椎间盘及相应韧带,其中髓核面积约为椎间盘总面积的 43%,纤维环模拟为包含斜行 30°排列的纤维的基质。划分各部分网格并赋予不同的材质属性^[6-9](见表 1),建立 T10 ~ L2 节段正常模型。根据 Denis 脊柱骨折分类,建立 T12

椎体上部不完全骨折模型。具体设置如下:去除 T12 椎体前中部上 1/2 皮质骨,赋予其上终板及前中部上 1/2 松质骨损伤后材料属性。

表 1 模型各部位材质属性

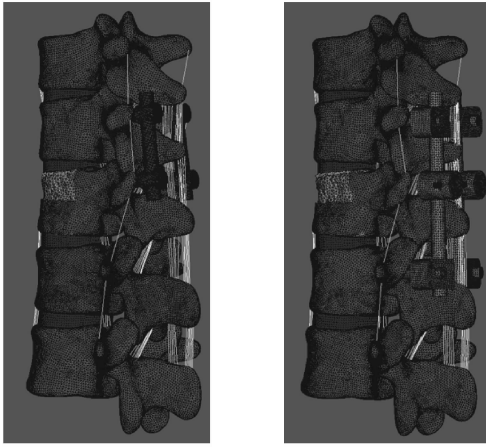
Tab. 1 Material properties of the finite element model

部位	弹性模量/MPa	泊松比	横截面积/mm ²
椎体皮质骨	12 000	0.3	-
椎体松质骨	100	0.3	-
骨折后松质骨	67	0.2	-
软骨	10	0.4	-
终板	1 000	0.4	-
髓核	1	0.499	-
纤维环基质	4.2	0.45	-
纤维环纤维	450	0.3	-
前纵韧带	20	0.3	63.7
后纵韧带	20	0.3	20
黄韧带	19.5	0.3	40
棘间韧带	11.6	0.3	40
棘上韧带	15	0.3	30
横突间韧带	58.7	0.3	3.6
关节囊	32.9	0.3	60
内固定物	110 000	0.3	-

1.2 经伤椎单节段固定及常规短节段固定三维有限元模型建立

利用 Pro/Engineer 软件三维重建脊柱胸腰段爆裂性骨折手术使用的内固定系统,并与脊柱 T10 ~ L2 段三维模型进行装配。其中,由于 T12 椎体上部造成骨折,故经伤椎单节段固定模型固定 T11 及 T12 椎体。常规短节段内固定模型跨节段固定 T11 及 L1 椎体。螺钉置入及固定方式参考文献[3]。

经伤椎单节段固定及常规短节段固定模型见图1。



(a) 经伤椎单节段固定模型 (b) 常规短节段固定模型

图1 T10~L2 三维有限元固定模型

Fig.1 3D finite element fixation models of T10-L2 segment

(a) Monosegmental fixation model, (b) Short segmental fixation model

1.3 三维有限元模型约束条件及加载模式

在有限元软件 Abaqus 求解器中,椎间盘与椎体间设定为绑定约束,保证椎体的力通过椎间盘传递,螺钉及椎弓根、螺钉与棒之间的接触设定为绑定约束,无相对滑动。上、下关节突之间设定为面-面接触,无摩擦力。节选 T11~L1 节段,约束最下方椎体下终板及下关节突,上方椎体上表面施加单纯 $7.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 力矩,观察模型在前屈、后伸、侧屈及旋转时的运动情况,并与既往研究进行比较,对本研究所建立的模型进行验证。

所有模型加载时,约束 L2 椎体下表面及下关节突。轴向压缩时,在 T10 上终板及上关节突施加 500 N 轴向力,根据既往研究^[10-11],T10 上终板施加 400 N 、上关节突施加 100 N ;前屈、后伸、侧屈及旋转时,轴向 500 N 力联合 $7.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 力矩。求解各模型在 5 种加载情况下模型各个节段最大位移差及内固定物应力情况。最大位移差是指模型空间 3 个方向位移变化量最大值的差值,用以反映脊柱模型空间运动情况。根据临床观察及既往实验研究,椎弓根螺钉与固定棒连接处为应力集中部位,故选取交界处螺钉及棒各 40 个节点,计算节点的平均值作为螺钉及棒的应力。

2 结果

2.1 三维有限元模型验证

对 T11~L1 节段施加 $7.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的单纯力矩,对比模型弯曲结果与文献[12-13]结果。建立的 5 节段有限元模型中截取的 3 节段弯曲范围与文献[12-13]研究总体相近(见图2),故推断 5 节段模型有效,可应用于生物力学的研究。

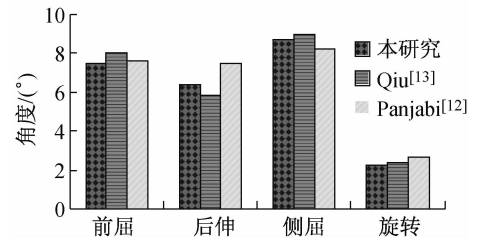


图2 单纯 $7.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 力矩下本研究模型与既往研究运动范围比较
Fig.2 Comparison of range of motion under pure moments of $7.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ with previous studies

2.2 不同加载情况下 4 种三维有限元模型各相邻节段的最大位移差

骨折模型 T10~11、T11~12 及 T12~L1 的最大位移差较正常模型在大多数加载情况时明显增大,经短节段或者经伤椎单节段固定后,该值明显减小。在 5 种加载情况下,4 种模型 L1~2 的最大位移差无明显变化(见图3)。

2.3 不同加载情况下不同固定方式内固定物的应力情况

两种内固定方式下,椎弓根螺钉及棒的应力在不同加载情况下的表现不同(见图4)。对于螺钉,在轴向压缩及前屈时,短节段固定模型中螺钉应力明显高于经伤椎单节段固定;在后伸、侧屈及轴向旋转时,螺钉应力无明显差异。对于固定棒,轴向压缩及前屈时,两种固定方式无显著差异;后伸及侧屈时短节段固定应力低于单节段固定,而旋转时则恰恰相反。

3 讨论

对于胸腰椎骨折选用何种治疗方式,一直存在争议。针对特定的骨折情况,前路手术、后路手术及

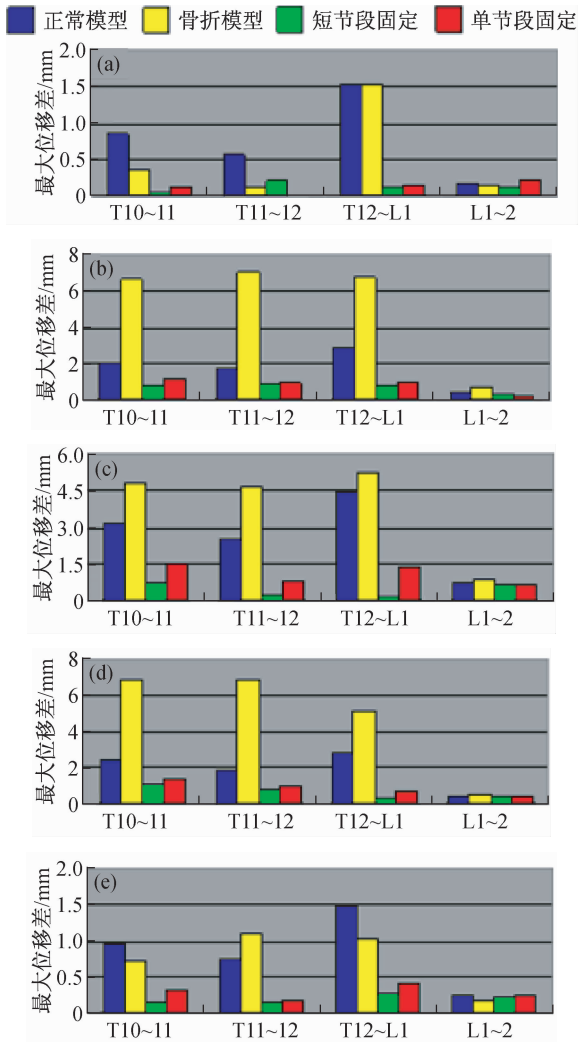


图3 4种模型在不同加载情况下各个节段的最大位移差比较

(a)轴向压缩,(b)前屈,(c)后伸,(d)侧屈,(e)轴向旋转

Fig.3 Motion difference of adjacent segments under different loading for four models (a) Axial compression, (b) Anteflexion, (c) Extension, (d) Lateroflexion, (e) Axial rotation

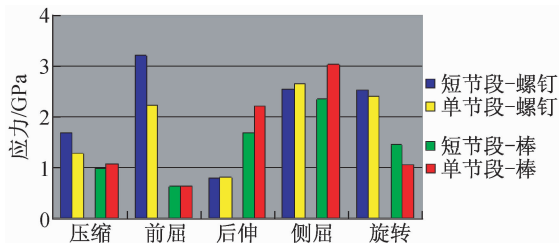


图4 两种固定方式中内固定物在不同加载情况下的应力比较

Fig.4 Stress of the instrumentations for two kinds of fixation under different loading

前后路联合手术都可以选用,并得到满意的临床效果。通过减少融合节段来保存更多的运动节段一直是脊柱外科手术的基本原则^[14]。正是基于此原则,

学者提出经伤椎单节段固定的理念并应用于临床。

尽管临床报道经伤椎单节段固定治疗胸腰椎单椎体骨折效果满意,但是关于该固定方式的生物力学研究并不多。魏富鑫等^[15]利用新鲜小牛椎体骨折模型测试单椎间及双椎间椎弓根固定的力学性能,结果显示仅在前屈时单椎间固定组的运动范围稳定指数小于双椎间固定组。旋转及侧屈时单椎间固定的抗疲劳性能不如双椎间固定,其他情况下两种固定方式无明显差异。李熙雷等^[16]利用6具T10~L2人尸体标本建立AO分型A3.1型T12爆裂骨折模型,采用单节段椎弓根螺钉固定,比较正常模型、骨折模型及单节段固定模型的稳定性。结果显示,扭转相同角度时,单节段固定模型所需扭力与正常组相当。本研究采用三维有限元法建立T10~L2正常模型、骨折模型、经伤椎单节段固定及常规短节段固定4种模型,探究经伤椎单椎体固定胸腰椎骨折的力学特性,获得同上述动物模型及尸体标本模型相近的结果。结果显示,两种固定方式均可作为胸腰段骨折提供稳定性,两者之间无显著性差异。

究其原因,经椎弓根螺钉内固定脊柱时,椎弓根发挥着重要的作用。既往生物力学研究表明,完整的椎弓根提供了至少60%的抗拔出力及80%的轴向刚度,而椎体松质骨仅提供15%~20%的拔出强度,只要螺钉进入椎体的一半就可以达到穿透椎体前缘的抗拔出力及轴向刚度^[17-18]。临床中,大部分胸腰段爆裂性骨折为椎体不完全骨折^[19-20],椎弓根多保持完整。本研究结果显示,经伤椎单节段固定时,其内固定器械的应力与常规短节段固定相比,在轴向压缩及前屈时,经伤椎单节段固定模型中螺钉应力明显低于短节段固定;而在后伸、侧屈及轴向旋转时,螺钉应力无明显差异。对于固定棒的应力,除后伸及侧屈时单节段固定略高于短节段固定外,其他加载情况下与短节段内固定无明显差异。因此,如果术前经X线及CT等影像资料确定患者伤椎椎弓根保持完整,椎体损伤不是很严重,采用经伤椎单节段固定可以为脊柱提供与常规短节段固定相似的稳定性。

对于AO分型中A3.1及A3.2型骨折,椎体骨折不完全,骨折片较少,通过韧带、纤维环及周围其他软组织,经体位复位及内固定器械的撑开作用,骨折产生的畸形大部分得以恢复,通常无需再行减压^[21-22]。而且,椎管在术后康复过程中会自发地进

行重塑^[23],这就为经皮进行经伤椎单节段固定提供了前提条件^[4];从而以更小的手术切口完成骨折固定,减少椎旁肌肉的剥离,减小手术造成的创伤,预防术后腰部疼痛的出现。但是经伤椎单节段固定的应用需严格掌握适应症,对于严重骨质疏松、骨折程度较重的患者,由于螺钉的把持力明显下降,经伤椎单节段固定不能提供足够的把持力,内固定容易松动,不宜采用该术式。

本研究采用三维有限元模拟的方法研究经伤椎单节段固定治疗胸腰段骨折,得到的结果支持该方法在单节段椎体不完全骨折中应用。但是,鉴于计算机模型的材料属性多来源于既往文献,无法完全模拟患者实际的骨折情况,故本研究结果尚需更多的生物力学实验及临床应用长期随访观察的验证。

参考文献:

- [1] Miyakoshi N, Abe E, Shimada Y, *et al.* Outcome of one-level posterior lumbar interbody fusion for spondylolisthesis and postoperative intervertebral disc degeneration adjacent to the fusion [J]. *Spine*, 2000, 25(14): 1837-1842.
- [2] Umehara S, Zindrick MR, Patwardhan AG, *et al.* The biomechanical effect of postoperative hypolordosis in instrumented lumbar fusion on instrumented and adjacent spinal segments [J]. *Spine*, 2000, 25(13): 1617-1624.
- [3] 庄青山,夏德涛,葛吉玉,等. 单节段与短节段椎弓根内固定治疗胸腰段单椎体骨折的疗效比较 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2010, 12(3): 294-296.
- [4] 李熙雷,马易群,董健,等. 经皮单节段椎弓根螺钉固定治疗胸腰椎爆裂骨折 [J]. *中华创伤杂志*, 2012, 28(6): 496-499.
- [5] Mueller LA, Mueller LP, Schmidt R, *et al.* The phenomenon and efficiency of ligamentotaxis after dorsal stabilization of thoracolumbar burst fractures [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2006, 126(6): 364-368.
- [6] Noailly J, Lacroix D, Planell JA. Finite element study of a novel intervertebral disc substitute [J]. *Spine*, 2005, 30(20): 2257-2264.
- [7] 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*, 2003, 28(10): 991-996.
- [8] 何登伟,吴立军,池永龙. 双侧关节突联合棘突间植骨融合预防胸腰椎骨折术后矫正丢失的生物力学三维有限元分析 [J]. *医用生物力学*, 2009, 24(3): 193-210.
He DW, Wu LJ, Chi YL. Biomechanical finite element analysis of bone graft fusion of bilateral articular process combined with spinous process preventing postoperative correction loss for thoracolumbar fracture surgery [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(3): 193-210.
- [9] 苏晋,赵文志,陈秉智,等. 建立全腰椎有限元接触模型 [J]. *医用生物力学*, 2010, 25(3): 200-205.
Su J, Zhao WZ, Chen BZ, *et al.* Establishing finite element contact model of human L1 ~ L5 lumbar segments [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(3): 200-205.
- [10] Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries [J]. *Spine*, 1983, 8(8): 817-831.
- [11] Goel VK, Kong W, Han JS, *et al.* A combined finite element and optimization investigation of lumbar spine mechanics with and without muscles [J]. *Spine*, 1993, 18(11): 1531-1541.
- [12] Panjabi MM, Oxland TR, Lin RM, *et al.* Thoracolumbar burst fracture. A biomechanical investigation of its multidirectional flexibility [J]. *Spine*, 1994, 19(5): 578-585.
- [13] Qiu TX, Teo EC, Zhang QH. Effect of bilateral facetectomy of thoracolumbar spine T11-L1 on spinal stability [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2006, 44(5): 363-370.
- [14] Yurac R, Marre B, Urzua A, *et al.* Residual mobility of instrumented and non-fused segments in thoracolumbar spine fractures [J]. *Eur Spine J*, 2006, 15(6): 864-875.
- [15] 魏富鑫,刘少喻,梁春祥,等. 单椎间椎弓根钉固定胸腰椎骨折生物力学评价 [J]. *生物医学工程与临床*, 2008, 12(2): 85-89.
- [16] 李熙雷,车武,董健,等. 经伤椎单节段椎弓根螺钉固定治疗胸腰椎爆裂骨折的生物力学研究 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2012, 14(3): 225-227.
- [17] Zindrick MR. The role of transpedicular fixation systems for stabilization of the lumbar spine [J]. *Orthop Clin North Am*, 1991, 22(2): 333-344.
- [18] Hirano T, Hasegawa K, Takahashi HE, *et al.* Structural characteristics of the pedicle and its role in screw stability [J]. *Spine*, 1997, 22(21): 2504-2509.
- [19] Denis F, Armstrong GW, Searls K, *et al.* Acute thoracolumbar burst fractures in the absence of neurologic deficit. A comparison between operative and nonoperative treatment [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1984: 142-149.
- [20] Vaccaro AR, Kim DH, Brodke DS, *et al.* Diagnosis and management of thoracolumbar spine fractures [J]. *Instr Course Lect*, 2004, 53: 359-373.
- [21] Sjoström L, Karlström G, Pech P, *et al.* Indirect spinal canal decompression in burst fractures treated with pedicle screw instrumentation [J]. *Spine*, 1996, 21(1): 113-123.
- [22] Mueller LA, Mueller LP, Schmidt R, *et al.* The phenomenon and efficiency of ligamentotaxis after dorsal stabilization of thoracolumbar burst fractures [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2006, 126(6): 364-368.
- [23] Scapinelli R, Candioto S. Spontaneous remodeling of the spinal canal after burst fractures of the low thoracic and lumbar region [J]. *J Spinal Disord*, 1995, 8(6): 486-493.