

## · 基础研究 ·

# 模拟肿瘤对颈胸段脊柱不同部位破坏后的生物力学研究

滕红林<sup>1</sup>, 杨胜武<sup>1</sup>, 吴春雷<sup>1</sup>, 池永龙<sup>2</sup>, 徐华梓<sup>2</sup>, 肖建如<sup>3</sup>, 贾连顺<sup>3</sup>, 王以进<sup>4</sup>

(1. 温州医学院附属第一医院骨科, 浙江 温州 325000; 2. 温州医学院附属第二医院骨科; 3. 上海长征医院骨科; 4. 上海大学生物力学研究所)

**【摘要】** 目的: 评价颈胸段脊柱 T<sub>1</sub> 在模拟溶骨性肿瘤不同部位(肋椎关节、椎弓根和关节突)的破坏情况下的生物力学特性, 从而为采取预防性稳定手术提供理论依据, 减少脊柱不稳发生神经损害的可能性, 指导临床工作。方法: 取 6 具新鲜冷藏人体尸体脊柱标本(C<sub>7</sub>-T<sub>2</sub>), 测量胸椎在不同部位损伤后对脊柱稳定性的影响。按照不同的破坏部位分别为正常标本组(IS), 椎体破坏(30% 椎体面积破坏, 下同)+椎体后壁破坏(VB+PW), 椎体破坏+肋椎关节破坏(VB+CVJ), 椎体破坏+椎弓根破坏(VB+P), 椎体+肋椎关节+椎弓根破坏(VB+CVJ+P), 椎体+肋椎关节+椎弓根+关节突破坏(VB+CVJ+P+FJ)。结果: 椎体按照不同的部位破坏后, 其屈服载荷按照完整标本、VB+PW、VB+CVJ、VB+P、VB+CVJ+P 和 VB+CVJ+P+FJ 依次分别为(3 549±254)、(3 043±204)、(2 680±164)、(2 440±146)、(2 168±110)和(1 734±74) N, 依次比正常标本下降了 14. 2%、24. 5%、32. 8%、40. 0% 和 52. 8%。结论: 椎体和椎弓根同时破坏比单纯椎体破坏更加不稳, 此时如有关节突关节破坏, 后方承受载荷的结构如关节突关节将不能从后方支持椎体, 发生椎体塌陷的危险性更高, 可考虑采取预防性稳定手术。

**【关键词】** 胸椎; 颈椎; 肿瘤; 骨组织; 生物力学

**Biomechanical evaluation on the cervicothoracic spine stability after destruction induced by simulated osteolytic tumor at different sites of cervicothoracic vertebrae** TENG Hong-lin\*, YANG Sheng-wu, WU Chur-lei, CHI Yong-long, XU Hua-zhi, XIAO Jian-ru, JIA Lian-shun, WANG Yi-jin.\* Department of Orthopaedics, the 1th Affiliated Hospital of Wenzhou Medical College, Wenzhou 325000, Zhejiang, China

**ABSTRACT Objective:** To evaluate the biomechanical alteration after the destruction induced by simulated osteolytic tumor at different sites of cervicothoracic vertebrae, including costovertebral joints, pedicles and facet joints, so as to provide the evidence to support the decision of operations for prophylactic stabilization. **Methods:** Six specimens obtained from human cervicothoracic spine were used. Each specimen consisted of three vertebrae(C<sub>7</sub>-T<sub>2</sub>) with intervertebral discs and ribs. To evaluate the effect of tumor at different locations on the spinal stability, metastatic involvement were simulated as follows: intact specimen (IS), vertebral body defect (30%) + posterior wall violation (VB+PW), vertebral body defect+ costovertebral joints violation (VB+CVJ), vertebral body+ pedicle violation (VB+P), vertebral body+ costovertebral joints+ pedicle violation (VB+CVJ+P), vertebral body+ costovertebral joints+ pedicle+ facet joints violation (VB+CVJ+P+FJ). **Results:** It was demonstrated that the failure loads of the intact specimen (IS), VB+PW, VB+CVJ, VB+P, VB+CVJ+P and VB+CVJ+P+FJ were (3 549±254), (3 043±204), (2 680±164), (2 440±146), (2 168±110) and (1 734±74) N, respectively. **Conclusion:** The destructions of both vertebral body and pedicles will be more unstable than the destruction of vertebral body merely. When the destructions of vertebral body, pedicles and facets joints simultaneously happened, the vertebra would potentially be more unstable and easier to collapse, therefore the surgical prophylactic stabilization should be operated.

**Key words** Thoracic vertebrae; Cervical vertebrae; Neoplasms, bone tissue; Biomechanics

脊柱骨肿瘤病灶的位置是引起椎体塌陷的重要因素之一, 然而目前对此方面的研究比较少。本实验的目的是研究脊柱颈胸段椎体在模拟转移肿瘤破坏的情况下的力学特性,

研究在椎体部分破坏的情况下, 脊柱的各个部分破坏后对脊柱稳定性的影响, 为临床医师术前判断脊柱潜在的不稳提供生物力学依据。

1 材料和方法

1.1 标本的采集和制作 采集6具新鲜人体颈胸段脊柱标本, 范围为C<sub>6</sub>-T<sub>5</sub>, 并从中截取C<sub>7</sub>-T<sub>2</sub>为脊柱功能单位。将肌肉、软组织剔除, 保留韧带、骨性结构和关节囊。双层塑料袋密封, 在-20℃低温冰箱保存。实验前对标本进行骨密度测量, 排除骨密度异常的标本。

1.2 实验方法和内容 按照不同的破坏部位(T<sub>1</sub>椎体)分为正常标本组(intact specimen, IS), 椎体破坏(30%椎体面积破坏, 下同)+椎体后壁破坏(vertebral body+posterior wall violation, VB+PW), 椎体破坏+肋椎关节破坏(vertebral body+costovertebral joints violation, VB+CVJ), 椎体破坏+椎弓根破坏(vertebral body+pedicle violation, VB+P), 椎体+肋椎关节+椎弓根破坏(vertebral body+costovertebral joints+pedicle violation, VB+CVJ+P), 椎体+肋椎关节+椎弓根破坏+关节突(vertebral body+costovertebral joints+pedicle+facet joints violation, VB+CVJ+P+FJ)。

1.3 实验准备 制作骨水泥平台、制作传感器和测定位移。

表1 胸椎不同部位模拟肿瘤破坏后对胸椎稳定性的影响( $\bar{x} \pm s$ )

Tab. 1 Cervicothoracic spine stability influenced by the simulated various sites of tumorous destruction ( $\bar{x} \pm s$ )

标本破坏部位	比例极限 Pb(N)	屈服载荷 Ps(N)	破坏载荷 Pb(N)	屈服位移 Δs(mm)	破坏位移 Δb(mm)
IS	3 372±230	3 549±254	4 732±274	3.91±1.41	5.20±3.14
VB+PW	2 859±186	3 043±204	4 112±220	3.89±1.34	5.26±3.16
VB+CVJ	2 493±148	2 680±164	3 672±176	4.03±1.48	5.01±2.88
VB+P	2 265±130	2 440±146	3 384±138	4.12±1.60	5.01±2.88
VB+CVJ+P	1 994±98	2 168±110	2 270±130	3.89±1.70	5.21±3.04
VB+CVJ+P+FJ	1 590±62	1 734±74	1 816±82	3.87±1.64	4.98±2.94

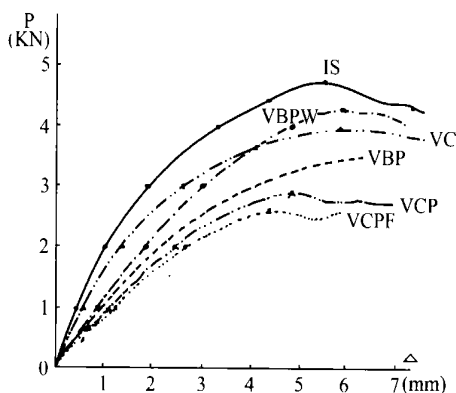


图1 颈胸段脊柱胸椎模拟各种不同的破坏部位的载荷-位移曲线

Fig. 1 Load-displacement curve after the various sites of tumorous destruction in the cervicothoracic spine

2.2 胸椎失稳时的极限载荷、强度(见表1, 图1) 胸椎失稳时往往在尚未达到极限载荷时, 由于应力集中, 胸椎开始丧失稳定性。实验结果发现一般在屈服载荷附近, 屈服载荷的大小直接影响胸椎的稳定性。在正常标本时, 胸椎一般能承受3 549 N的载荷, 当椎体破坏(面积为30%)合并后壁破坏时,

在实验标本的上下两端浇注骨水泥平台, 以便正确平整加载。骨水泥平台上下端平行度 $\leq 1.0^\circ$ , 以精确测量各类数据。应变式传感器采用与脊柱相近刚度的优质镀锌铜作为弹性元件, 构成了弓形式应变传感器, 经过标准校正后, 绘制应力-应变曲线, 予调整范围 $2\ 500\ \mu\epsilon \pm 2\%$ , 灵敏度 $< 2\ \mu\epsilon$ , 刚度和椎体相一致。全部试验中标本在载荷的作用下, 发生位移均采用高精度数字显示光栅位移传感器, 型号为KG 101光栅数显高精度测微仪, 精度达0.01%进行测量。

1.4 标本的测试与步骤 实验标本于实验前2 h逐级解冻, 按照实验应力分析要求严格进行贴片、接线、密封和温度补偿等电测技术准备。每步加载30 s内采集一次数据, 并重复实验。整个操作和测定过程中控制室温为17~20℃, 室内湿度为20%~24%, 并间断用生理盐水喷洒在标本上, 以保持其湿润。每一标本每种加载方式测试完毕后, 标本卸载一定时间后再行下一次加载方式的测定。本实验数据以统计软件SPSS 11.0进行t检验处理。

2 结果

2.1 颈胸段脊柱的胸椎不同部位损伤对胸椎稳定性的影响(见表1, 图1)

屈服载荷下降为3 043 N, 下降了14.2%。同样大小的椎体破坏面积合并肋椎关节破坏时, 屈服载荷下降为2 680 N, 比正常标本降低了24.5%。当椎弓根破坏时, 载荷下降了32.8%; 当肋椎关节和椎弓根同时破坏后, 载荷又下降了40%; 一直到关节突关节破坏后, 载荷下降已经达52.8%以上, 基本上已经失去稳定性。以上结果与正常椎体相比, 结果均具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

从强度来看, 应力正常时为0.86 MPa, 逐步模拟椎体被肿瘤破坏后, 下降为0.18 MPa, 强度几乎丧失了79.1%。椎体只剩下20.9%的承载能力, 已经失去稳定性, 毫无支撑外载荷能力。其结果具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

2.3 胸椎损伤时刚度的变化 胸椎在不同部位的破坏将直接影响椎体的刚度大小的变化。刚度的大小与抵抗变形能力的大小成正比。根据所有标本的测量结果, 胸椎不同部位破坏的刚度变化结果见表2。

同样从胸椎的倾角变化, 可以看到胸椎的失稳状态, 从17°增加到38°、42°、50°, 最后达到60°。胸椎已经失去稳定性, 无承受载荷能力而丧失稳定性; 当然此时的应变从8.9%增加到16.0%, 变形增加了1倍, 相互印证了胸椎失稳时变形极大而破坏。

## 3 讨论

目前癌症仍然是人类死亡的主要原因之一。据报道,

表 2 胸椎不同部位模拟肿瘤破坏后强度、刚度和倾角值( $\bar{x} \pm s$ )

Tab. 2 Intensity, rigidity and obliquity after the various sites of tumorous ( $\bar{x} \pm s$ )

标本破坏部位	应力 (MPa)	刚度 (N/mm)	倾角 ( $^{\circ}$ )	应变 (%)
IS	0.86 $\pm$ 0.12	910 $\pm$ 210	17 $\pm$ 3	8.91 $\pm$ 1.21
VB+PW	0.72 $\pm$ 0.10	774 $\pm$ 91	20 $\pm$ 4	10.30 $\pm$ 1.32
VB+CVJ	0.65 $\pm$ 0.09	692 $\pm$ 88	22 $\pm$ 4	11.04 $\pm$ 1.44
VB+P	0.55 $\pm$ 0.07	588 $\pm$ 70	25 $\pm$ 3	12.75 $\pm$ 1.45
VB+CVJ+P	0.36 $\pm$ 0.04	438 $\pm$ 43	38 $\pm$ 3	14.20 $\pm$ 1.47
VB+CVJ+P+FJ	0.18 $\pm$ 0.02	337 $\pm$ 28	42 $\pm$ 3	16.18 $\pm$ 1.56

50%~85%的肿瘤患者曾经发生骨骼转移性的肿瘤,其中大多数病灶位于脊柱。脊柱承受体重和保护神经的功能,因为转移性肿瘤破坏造成其完整性丧失常常导致严重的轴性疼痛,甚至肢体瘫痪。严重的轴性疼痛和肢体瘫痪常常是影响患者生存质量的问题之一<sup>[1]</sup>。

肿瘤影响松质骨而尚未累及椎体皮质时,对脊柱的稳定性可能影响不很大。同样,如果椎体仅仅是前柱破坏时,不稳也未必一定发生。包括皮质骨在内的椎体后半部分,也就是椎体的中柱破坏,可导致脊柱的压缩骨折。后凸畸形、肿瘤骨、骨碎片、椎间盘等突入椎管,将导致神经损害。因为剪力的存在,椎体可以出现前向或后向的椎体滑移,从而造成患者出现局部疼痛和神经功能损害。

椎体转移性肿瘤的生物力学和椎体塌陷的机制目前尚未有明确的研究和定义。理论上来说,如果椎体转移性肿瘤对放疗敏感,椎体塌陷可以在放疗后减少发生机会。但是,一旦肿瘤到达一定体积,并且有即将发生塌陷的危险,只有预防性手术固定才能防止椎体骨折。因此,如果有一些可靠的无创的方法能够预测椎体即将发生塌陷,将非常有临床意义<sup>[24]</sup>。

临床中脊柱颈胸段手术入路的选择非常困难<sup>[5]</sup>,椎体塌陷后将使手术野减小,造成操作更困难。本实验研究分析了颈胸段脊柱在肿瘤溶骨性破坏的情况下,肿瘤破坏部位的不同对脊柱稳定性的不同影响,便于选择手术时机。而在实际临床中,有不少人忽视椎体后结构和胸椎肋椎关节对胸椎稳定性的作用。

本实验显示肋椎关节承担了相当一部分胸椎的压力,这也是胸椎不同于颈椎和腰椎之处。因为肋椎关节不同于终板与椎间盘之间的关节,破坏了肋椎关节之后,终板上将发生应力集中。在本实验中,当椎体破坏(面积为30%)合并后壁破坏时,屈服载荷下降了14.2%。同样大小的椎体破坏面积合并肋椎关节破坏时,屈服载荷下降了24.5%,与正常椎体相比,结果均具有显著性差异( $P < 0.05$ )。总之,胸椎椎体转移性肿瘤的载荷承受能力与椎体内破坏的大小和肋椎关节是否破坏都有关。因此,必须重视肋椎关节在胸椎中防止椎体因转移性肿瘤产生塌陷的重要作用。如果肋椎关节被转移性肿

瘤破坏,同时椎体也有一定程度的破坏,则椎体在潜在的破坏性外力下很可能不稳,此时需要手术治疗。

本研究还发现,单纯椎弓根的破坏通常不影响椎体的稳定性。转移性肿瘤主要破坏椎体而非椎弓根,但随着肿瘤进一步侵犯,常常出现椎弓根破坏与椎体破坏一起发生<sup>[6]</sup>。椎体和椎弓根同时破坏比单纯椎体破坏更不能承受轴向载荷。这是因为椎体和后方的关节突关节因为椎弓根破坏分离,后方承受载荷的结构如关节突关节将不能从后方支持椎体。所以椎体伴有椎弓根破坏发生椎体塌陷的危险性非常高。本研究发现上述结构破坏后,脊柱明显出现不稳,已经无稳定性可言。这种稳定性的丧失表现为胸椎的抗压强度的降低,软骨终板的破裂,椎间盘的过度膨出,胸椎整体承载能力的下降。

本研究的一个缺点是未能真正模拟胸椎在活体内的状态,因为胸廓对胸椎来说,提供了较大的刚度,其作用有:①肋椎关节提供了犹如韧带样的结构;②胸廓的参与使胸椎的横径相对增加,从而增加了脊柱惯性的力矩,增加了脊柱抵抗旋转和抗侧屈的能力<sup>[7]</sup>。本文实验中肋骨的长度两侧各保留了约5cm的长度,虽然保留了肋椎关节,但仍然无法模拟整个胸廓的作用。因此肋椎关节和胸廓的存在使得胸椎转移性肿瘤的患者神经症状出现要比疼痛早,而颈椎和腰椎的疼痛症状通常早于神经体征6个月之久。

值得提出的是,由于标本量较少(人体新鲜颈胸段脊柱标本取材非常困难),给不少值得探讨的问题及实验结果带来影响,加上实际问题的复杂性,对于胸椎在模拟肿瘤破坏的情况下,预测椎体失稳的阈值有待于我们在今后的研究中进一步深入探讨。临床工作中,决定脊柱患者手术时机还要结合患者的症状、生活方式(预期可能要承受的载荷)、对生活质量的要求,以及患者的神经功能状况等等多方面因素。

## 参考文献

- 1 Fourney DR, Abi Said D, Lang FF, et al. Use of pedicle screw fixation in the management of malignant spinal disease: Experience in 100 consecutive procedures. *J Neurosurg (Spine 1)*, 2001, 94: 25-37.
- 2 Windhagen H, Hipp JA, Hayes WC. Postfracture instability of vertebrae with simulated defects can be predicted from computed tomography data. *Spine*, 2000, 25(14): 1775-1781.
- 3 Lunt M, O'Neill TW, Felsenberg D, et al. Characteristics of a prevalent vertebral deformity predict subsequent vertebral fracture: Results from the European Prospective Osteoporosis Study (EPOS). *Bone*, 2003, 33(4): 505-513.
- 4 Dimar JR 2nd, Voor MJ, Zhang YM, et al. A human cadaver model for determination of pathologic fracture threshold resulting from tumorous destruction of the vertebral body. *Spine*, 1998, 23(11): 1209-1214.
- 5 滕红林, 贾连顺, 肖建如, 等. MRI 测量颈胸角在选择颈胸段脊柱手术入路中的临床应用. *中国骨伤*, 2004, 17(6): 325-328.
- 6 Asdourian PL, Mardjetko S, Rauschnig W, et al. An evaluation of spinal deformity in metastatic vertebral breast cancer. *Clin Orthop*, 1990, 250: 164-170.
- 7 Panjabi MM, White III A. Physical properties and functional biomechanics of the spine. In: White III A, Panjabi MM, eds. *Clinical biomechanics of the spine*. Philadelphia: JB Lippincott, 1990. P 84.

(收稿日期: 2004-09-18 本文编辑: 王玉蔓)