

DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.201606005

· 论著 ·

两种齿状突切除术对颅颈交界区稳定性影响的有限元分析

谢天浩¹, 张新元¹, 刘征¹, 王在贵¹, 伍杰¹, 徐国政¹, 马廉亭¹, 骆纯²

(1. 中国人民解放军武汉总医院 神经外科, 湖北 武汉 430070; 2. 第二军医大学附属上海长征医院 神经外科, 上海 200003)

摘要: **目的** 通过构建上颈椎有限元模型研究两种齿状突切除术对颅颈交界区 (craniocervical junction, CCJ) 稳定性影响的生物力学差异。**方法** 采用有限元软件构建 Oc - C2 的正常上颈椎实体模型, 然后在正常模型的基础上构建常规齿状突切除模型及保留 C1 前弓的微创齿状突切除模型, 进而在有限元软件 ABAQUS v6.9.1. 中分析各种模型的生物力学差异, 从而得出齿状突切除术中保留 C1 前弓的生物力学优势。**结果** 常规齿状突切除术对 C1 - C2 的活动度影响较 Oc - C1 显著, 各向活动度增加分别为前屈 23%、后伸 97%、侧弯 231%、轴向旋转 349%; 对 Oc - C1 的稳定性同样有明显影响, 其中 Oc - C1 后伸活动度影响最大, 增加达 196%。保留 C1 前弓的齿状突切除术可明显缩减 C1 - C2 轴向旋转活动度的增加, 实验中仅出现轻度代偿性的活动度减少; 而其他方向活动度仍有异常的增加 (Oc - C1 后伸活动度增加 167%、C1 - C2 侧弯活动度增加 181%)。**结论** 齿状突切除术对 C1 - C2 的活动度影响显著, 但对 Oc - C1 的活动度同样有明显影响。保留 C1 前弓的齿状突切除术可保护脊柱轴向旋转的活动度, 但仍存在脊柱不稳定因素。

关键词: 颅颈交界区; 齿状突切除术; 有限元; 稳定性

中图分类号: R651.19 文献标识码: A 文章编号: 1007 - 1520(2016)06 - 0442 - 06

Finite element analysis of the effect of two kinds of odontoidectomy on the stability of cervical junction

XIE Tian-hao, ZHANG Xin-yuan, LIU Zheng, WANG Zai-gui, WU Jie, XU Guo-zheng, MA Lian-ting, LUO Chun
(Department of Neurosurgery, Wuhan General Hospital of PLA, Wuhan 430070, China)

Abstract: **Objective** To study the biomechanical impact of two different kinds of odontoidectomy on the stability of cervical junction through a validated finite element model of Oc - C2. **Methods** A validated finite element model of Oc - C2 was constructed to study the biomechanical changes due to the surgery of traditional odontoidectomy and odontoidectomy with anterior C1 arch preservation. These models were analyzed in ABAQUS v6.9.1. to study the biomechanical impact of anterior C1 arch preservation. **Results** Odontoidectomy produced more motion increase at C1 - C2 than Oc - C1. At C1 - C2, the percentages of motion increase were 23%, 97%, 231% and 349% in flexion, extension, lateral bending and rotation. However, the motion increase at Oc - C1 was also significant, especially in extension with 196% increase than normal model. Odontoidectomy with preservation of anterior C1 arch preserved the motion of axial rotation at C1 - C2, but the deviant increase also could be seen in extension at Oc - C1 (167%) and bending at C1 - C2 (181%). **Conclusions** Odontoidectomy can produce more motion increase at C1 - C2 than Oc - C1, but also produce significant motion increase at Oc - C1. Odontoidectomy with preservation of anterior C1 arch can preserve the axial rotation motion at C1 - C2, but the abnormal increase can also be seen in other segmental motions.

Key words: Craniocervical junction; Odontoidectomy; Finite element; Stability

前路齿状突切除术是解决颈延髓腹侧压迫的有

效手术入路, 但其对颅颈交界区 (craniocervical junction, CCJ) 的稳定性有着非常严重的影响, 临床中超过 2/3 的患者在齿状突切除术后表现出明显的脊柱不稳^[1-3]。先前的 in vitro 研究分析了该手术对 C1 - C2 的生物力学影响^[4], 但其并未分析该手术对

基金项目: 湖北省自然科学基金项目青年基金 (2015CFB382);
武汉市中青年医学骨干人才培养工程。
作者简介: 谢天浩, 男, 博士, 在读博士后, 主治医师。
通信作者: 骆纯, Email: boyluochun@126.com

Oc - C1 稳定性的影响,而由于 C1 前弓以及翼状韧带的切除,齿状突切除术同样可能对 Oc - C1 的生物力学特性产生影响,因此本研究将同时分析 Oc - C1 及 C1 - C2 的生物力学改变,这将有助于我们理解齿状突切除术对 Oc - C1 稳定性的影响。近年来随着内镜技术的发展,保留 C1 前弓的微创齿状突切除术得以实现^[5-7],而保留 C1 前弓是否会较好的保护脊柱的稳定性,目前均不得而知,因此本研究将通过上颈椎有限元模型模拟这些手术入路并分析其生物力学信息,从而为其临床应用提供实验室依据。

1 材料和方法

1.1 正常 Oc - C2 上颈椎有限元模型的建立

健康男性志愿者 1 例,25 岁,身高 175 cm,体重 70 kg。应用 64 排螺旋 CT(GE Lightspeed)扫描 Oc - C2 椎体层面获得体层图像,设定扫描条件为:120 KV,300 MA,层厚 0.625 mm,层间距 0 mm。在 Mimics 10.01 (Materialise Inc., Leuven, Belgium) 软件、Geomagic Studio 12.0 (Geomagic, Inc., Research Triangle Park, NC, USA) 软件及 Hyperworks v10.0 (Altair engineering, Inc., Executive Park, CA, USA) 软件中进行曲面模型构建、曲面优化及实体网格划分,从而得到 Oc - C2 的上颈椎实体模型。

在 Hyperworks 软件中,椎体被划分为两个部分:皮质骨和松质骨。皮质骨被划分为 41 499 个 C3D6 实体单元,皮质骨厚度设定为均一的 0.5 mm;松质骨由 123 368 个 4 节点 C3D4 实体单元构成。

上颈椎的韧带严格按照其解剖位置进行构建,这些韧带包括寰枕前膜、齿状突尖韧带、覆膜、横韧带、十字韧带、翼状韧带、寰枕后膜、前纵韧带、黄韧带、关节囊韧带^[8-14]。横韧带采用 M3D4R 膜单元来构建。除横韧带外,其他所有韧带均采用 2 节点仅有张力的非线性弹簧单元来构建,这些韧带的材料属性如表 1 所示,其材料属性采用文献中载荷 - 变形曲线赋值,载荷 - 变形曲线分为中性区、弹性区、塑形区、破坏失效区^[13, 15-17],df 指达到破坏失效区 (failure) 时的位移 (distance),ff 指达到破坏失效区 (failure) 时的受力 (force),dn 指中性区 (neutral) 最大的位移 (distance),fn 指中性区 (neutral) 最大的受力 (force)。

寰枕关节、关节突关节、寰枢关节、齿状突 - 横韧带接触面由面 - 面接触单元来构建,接触面之间的摩擦系数设定为 0.1。以上用于构建上颈椎模型

的各种单元类型均采用既往文献最常用的单元类型^[13, 17-20]。最终所构建的完整模型如图 1(A 正后位, B 侧位),模型中各韧带的构建情况如图 2。模型中皮质骨、松质骨、横韧带、关节软骨均赋予文献中最常用的材料属性^[17-19],其相应的材料属性详见表 2。

表 1 上颈椎模型各韧带材料属性

韧带	节段	df(mm)	ff(N)	fn:ff	dn:df
髌关节囊韧带	Oc - C1	9.9	320	1:10	1:3
寰枕前膜	Oc - C1	18.9	232	1:10	1:5
寰枕后膜	Oc - C1	18.1	83	1:10	1:3
前纵韧带	C1 - C2	11.8	263	1:10	1:5
关节囊韧带	C1 - C2	9.3	314	1:10	1:2
黄韧带	C1 - C2	9.6	111	1:10	1:3
覆膜	Oc - C2	11.9	76	1:10	1:3
齿状突尖韧带	Oc - C2	8.0	214	1:10	1:5
翼状韧带	Oc - C2	14.1	357	1:10	1:5
十字韧带(垂直部分)	Oc - C2	12.5	436	1:10	1:5

表 2 上颈椎有限元模型中壳单元、膜单元及实体单元的材料属性

颈椎组织	节段	Young's 模量(MPa)	泊松比
皮质骨	Oc - C2	15 000	0.29
松质骨	Oc - C2	500	0.29
横韧带	C1	20	0.3
关节软骨	C1 - C2	10	0.3

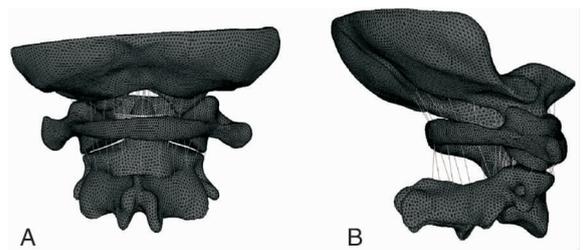


图 1 上颈椎有限元模型的正后位观(A)及侧位观(B)

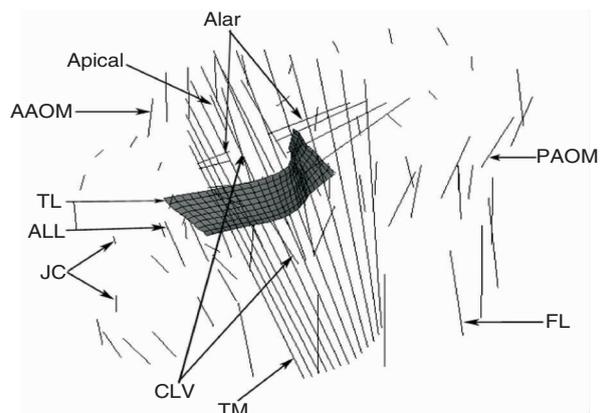


图 2 上颈椎有限元各韧带构建情况 Alar:翼状韧带; Apical:齿状突尖韧带; AAOM:寰枕前膜; TL:横韧带; ALL:前纵韧带; JC:关节囊韧带; CLV:十字韧带垂直支; TM:覆膜; FL:黄韧带; PAOM:寰枕后膜

1.2 上颈椎模型约束边界及载荷条件

上颈椎模型的载荷条件设定为:在枕骨(Oc)上表面给予各方向(矢状方向、轴向方向及冠状方向)的1.5 Nm纯扭矩载荷,使模型产生前屈-后伸、左右旋转及左右侧屈运动。其边界条件为:C2椎体下缘全部节点各方向固定,位移为0。

1.3 正常上颈椎模型的验证

将构建完成的上颈椎有限元模型导入大型FE软件ABAQUS v6.9.1.(SIMULIA Inc, Providence, RI, USA)中进行生物力学分析,分别计算施加1.5 Nm纯扭矩载荷后上颈椎各个节段(Oc-C1, C1-C2)各方向的活动度,所得活动度同既往生物力学研究数据进行比较^[17, 21-24],相应比较结果详见图3、4。

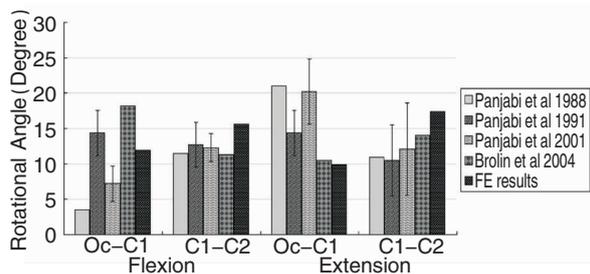


图3 上颈椎有限元模型各节段前屈及后伸方向活动度同既往生物力学研究文献报告的活动度比较图

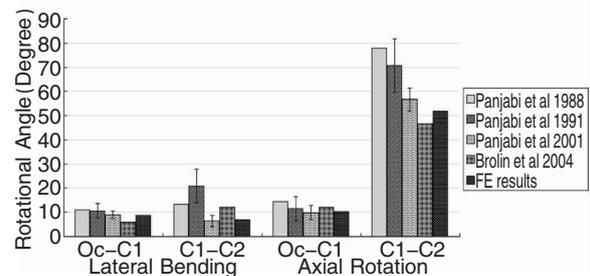


图4 上颈椎有限元模型各节段侧弯及轴位旋转方向活动度同既往生物力学研究文献报告的活动度比较图

1.4 齿状突切除术模型的建立

目前前路齿状突切除的手术方式有两种,一种为传统的手术方式,切除C1前弓及齿状突,另一种手术方式是内镜辅助下保留C1前弓。因此本研究根据两种手术方式对CCJ区结构切除程度的不同,构建以下两个模型:①保留C1前弓的齿状突切除术(图5A):保留C1前弓,切除C1-2前纵韧带及AAOM,与齿状突紧密相连的翼状韧带及齿状突尖韧带均予以切除,并切除齿状突后方的横韧带;②常规齿状突切除术(图5B):在上一个模型的基础上,

切除C1前弓。

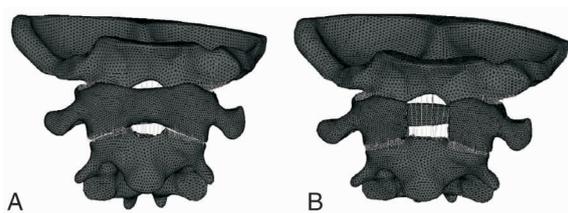


图5 两种齿状突切除术 A:保留C1前弓的齿状突切除术;B:常规齿状突切除术

1.5 手术模型生物力学的分析

对各种手术模型分别施以3个方向(矢状方向、轴向方向及冠状方向)1.5Nm的纯扭矩载荷,载荷及边界条件同正常模型,在ABAQUS v6.9.1.软件中计算手术模型各个节段前屈-后伸、左右旋转及左右侧屈的活动度(ROM),所得ROM同正常模型的各节段ROM相比较。

2 结果

2.1 正常上颈椎有限元模型构建

正常上颈椎模型通过精度分析来划分合理的网格,严格按照解剖特点构建皮质骨、松质骨、韧带及各个关节,通过精度分析最终构建的有限元模型共由173047个单元和52562个节点组成(图2A)。

2.2 正常上颈椎有限元模型验证

正常上颈椎模型在1.5Nm的纯扭矩下各方向的ROM同既往文献研究(in vitro研究及有限元研究)的结果进行比较,结果显示该模型的活动度均位于既往研究的范围之内(图3、4),这提示该模型验证良好,可用于CCJ区手术模型的力学分析。

2.3 前路齿状突切除术对上颈椎活动度的影响

图6~8显示两种齿状突切除术后Oc-C1及C1-C2活动度较正常模型变化的百分比。传统齿状突切除术可引起Oc-C1及C1-C2活动度在各个方向发生变化,其中Oc-C1后伸及C1-C2后伸、侧弯、轴位旋转活动度变化较显著。

在矢状方向活动度方面,齿状突切除后Oc-C1及C1-C2前屈活动度出现轻度的增加,增加程度不超过23%,两种手术方式前屈活动度的增加程度无明显差别。而后伸活动度在各节段则均有明显增加:在Oc-C1节段,常规齿状突切除术后约196%的后伸活动度增加;保留C1前弓则后伸活动度增加约167%。C1-C2节段,两种手术模型后伸活动

度增加程度差别不大,分别为97%和94%。

在侧弯方向活动度上,齿状突切除术对 Oc - C1 节段活动度影响相对较小,两种模型 Oc - C1 侧弯活动度增加程度差异不明显,增加程度不超过40%。齿状突切除术对 C1 - C2 侧弯活动度影响较大,传统模型 C1 - C2 侧弯活动度最高增加231%,保留 C1 前弓则最高增加181%。

在轴向旋转方向,传统模型可引起 Oc - C1 旋转活动度最高增加63%。保留 C1 前弓后 Oc - C1 轴位旋转活动度增加较小,最高增加30%。在 C1 - C2 节段,传统模型可引起旋转活动度的显著增加,增加程度最高达349%,而保留 C1 前弓则无明显活动度的增加,仅出现了轻度代偿性的活动度减少。

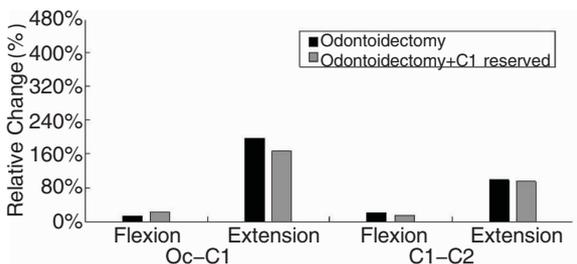


图6 不同方式齿状突切除模型 Oc - C1 及 C1 - C2 前屈 - 后伸活动度较正常模型变化的百分比

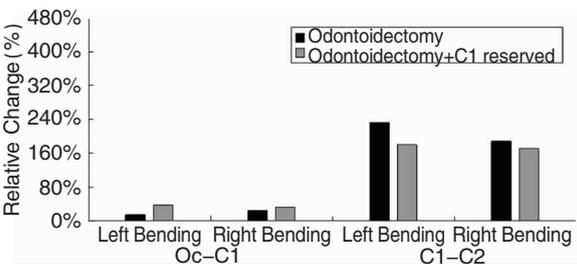


图7 不同方式齿状突切除模型 Oc - C1 及 C1 - C2 侧弯活动度较正常模型变化的百分比

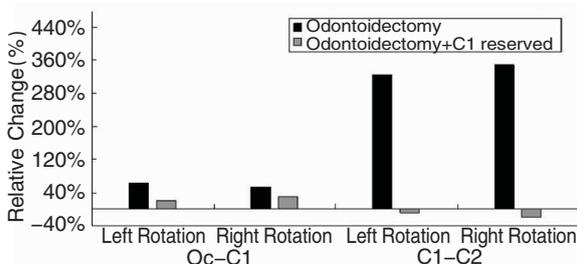


图8 不同方式齿状突切除模型 Oc - C1 及 C1 - C2 轴向旋转活动度较正常模型变化的百分比

3 讨论

齿状突切除术导致颅颈交界区显著力学改变的原因是显而易见的,其切除了颅颈交界区重要的解剖结构,包括齿状突、寰椎前弓以及这些骨性结构所附着的翼状韧带、齿状突尖韧带、横韧带等结构,而这些结构是维系颅颈交界区稳定的核心结构。Dickman 等^[4]在人类及狒狒尸体标本中模拟经口齿状突切除术,并检测其生物力学改变,发现齿状突切除术可引起 C1 - C2 显著的活动度改变以及载荷 - 变形反应的改变。我们的结果同 Dickman 的生物力学研究一致,齿状突切除术后可导致 C1 - C2 后伸、侧弯及轴向旋转活动度的大幅增加,其中轴向旋转方向活动度增加超过300%。这些生物力学数据同临床中的现象也是一致的,Dickman 等^[2]发现齿状突切除后一旦发生脊柱不稳,多表现为 C1 - C2 半脱位,因此许多学者在齿状突切除后常选择 C1 - C2 内固定术作为治疗方式^[25]。

在临床随访中同样有患者在齿状突切除后出现寰枕(Oc - C1)不稳,也有不少患者需行后路枕颈融合来维持寰枕交界区的稳定性^[26]。然而 Dickman 的前期生物力学研究并未分析齿状突切除后 Oc - C1 的力学变化情况,因此本研究对其进行了分析,我们发现齿状突切除术对 Oc - C1 的稳定性影响确实小于其对 C1 - C2 的影响,但其对 Oc - C1 的稳定性同样有一定影响,其中对 Oc - C1 后伸活动度影响最大,常规齿状突切除术后后伸活动度增加高达196%,因此对齿状突切除术后同样要严密随访患者 Oc - C1 的稳定性,必要时需行枕颈融合术来维持 Oc - C1 的稳定。

随着神经内镜技术的发展,保留 C1 前弓的微创齿状突切除术得以实现,一些学者认为这种手术方式可在避免内固定的情况下维持枕寰枢的稳定性^[5-7, 27]。其实在神经内镜广泛应用之前,已有不少学者认为保护 C1 前弓有益于维持枕寰枢的稳定性。Spetzler 等^[1]认为仅切除部分 C1 前弓将有助于减轻齿状突切除术后的枕寰枢不稳^[25];Naderi 和 Pamir 也发现保持 C1 前弓的完整性可减少 C1 侧块的移位,从而维持枕寰枢的稳定性^[28]。Agrawal 等^[29]在尸体标本中模拟前路齿状突切除术,其采用钛片将整块切除的 C1 前弓复位,发现 C1 复位后仅可部分保护寰枢关节的稳定度,但其非常有助于抵抗齿状突切除后 C1 侧块的外移。为研究其确切临

床效果,本研究分析了保留 C1 前弓齿状突切除后的生物力学特点,我们发现保留 C1 前弓后可极大的保护 CCJ 区轴向旋转的活动度(图 8),尤其是 C1 - C2 轴向旋转的活动度;保留 C1 前弓也可使后伸活动度的增加程度减少,但并不显著(减少约 29%)。本研究中我们发现尽管保留 C1 前弓, Oc - C1 后伸活动度及 C1 - C2 侧弯活动度仍有异常的增加(均超过 100%),因此保留 C1 前弓并不能完全预防齿状突切除术后的脊柱不稳。

综上所述,齿状突切除术可引起显著的颅颈交界区失稳,包括 Oc - C1 节段和 C1 - C2 节段。在 Dickman 的临床随访中,70% 的患者在齿状突切除后发生了脊柱不稳^[2],因此齿状突切除术后的患者均应进行严密的随访,对于脊柱不稳发生风险高的患者应考虑同期行后路脊柱内固定术。术中保留 C1 前弓也不能完全预防齿状突切除术后的脊柱不稳。

4 结论

齿状突切除对 C1 - C2 的活动度影响显著,但对 Oc - C1 的活动度同样有一定的影响,术后应严密随访患者 Oc - C1 的稳定性,必要时需考虑行寰枕融合。保留 C1 前弓的齿状突切除术可保护脊柱轴向旋转的活动度,但 Oc - C1 后伸活动度及 C1 - C2 侧弯活动度仍有异常的增加,仍存在脊柱不稳定因素。

参考文献:

[1] Spetzler RF, Hadley MN, Sonntag VK. The transoral approach to the anterior superior cervical spine. A review of 29 cases[J]. *Acta Neurochir Suppl (Wien)*, 1988, 43(1): 69 - 74.

[2] Dickman CA, Locantore J, Fessler RG. The influence of transoral odontoid resection on stability of the craniocervical junction[J]. *J Neurosurg*, 1992, 77(4): 525 - 530.

[3] Crockard HA, Pozo JL, Ransford AO, et al. Transoral decompression and posterior fusion for rheumatoid atlanto-axial subluxation [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1986, 68(3): 350 - 356.

[4] Dickman CA, Crawford NR, Brantley AG, et al. Biomechanical effects of transoral odontoidectomy[J]. *Neurosurgery*, 1995, 36(6): 1146 - 1152; discussion 1152 - 1143.

[5] Iacoangeli M, Gladi M, Alvaro L, et al. Endoscopic endonasal odontoidectomy with anterior C1 arch preservation in elderly patients affected by rheumatoid arthritis [J]. *Spine J*, 2013, 13(5): 542 - 548.

[6] Wu JC, Huang WC, Cheng H, et al. Endoscopic transnasal tran-

salival odontoidectomy: a new approach to decompression; technical case report [J]. *Neurosurgery*, 2008, 63 (1 Suppl 1): ONSE92 - 94; discussion ONSE94.

[7] Zenga F, Marengo N, Pacca P, et al. C1 anterior arch preservation in transnasal odontoidectomy using three-dimensional endoscope: A case report[J]. *Surg Neurol Int*, 2015, 6(2): 192.

[8] Rhoton AL. Anatomical basis of surgical approaches to the region of the foramen magnum[M]. New York: Thieme, 2012.

[9] Bogduk N, Mercer S. Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2000, 15(9): 633 - 648.

[10] Saldinger P, Dvorak J, Rahn BA, et al. Histology of the alar and transverse ligaments[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1990, 15(4): 257 - 261.

[11] Panjabi MM, Oxland TR, Parks EH. Quantitative anatomy of cervical spine ligaments. Part I. Upper cervical spine[J]. *J Spinal Disord*, 1991, 4(3): 270 - 276.

[12] Przybylski GJ, Patel PR, Carlin GJ, et al. Quantitative anthropometry of the subatlantal cervical longitudinal ligaments [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1998, 23(8): 893 - 898.

[13] Yoganandan N, Kumaresan S, Pintar FA. Biomechanics of the cervical spine Part 2. Cervical spine soft tissue responses and biomechanical modeling[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2001, 16(1): 1 - 27.

[14] Menezes AH, Traynelis VC. Anatomy and biomechanics of normal craniocervical junction (a) and biomechanics of stabilization (b) [J]. *Childs Nerv Syst*, 2008, 24(10): 1091 - 1100.

[15] Dvorak J, Schneider E, Saldinger P, et al. Biomechanics of the craniocervical region: the alar and transverse ligaments[J]. *J Orthop Res*, 1988, 6(3): 452 - 461.

[16] Carter DR, Hayes WC. The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1977, 59(7): 954 - 962.

[17] Brolin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29(4): 376 - 385.

[18] Zhang H, Bai J. Development and validation of a finite element model of the occipito-atlantoaxial complex under physiologic loads [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32(9): 968 - 974.

[19] Zhang QH, Teo EC, Ng HW, et al. Finite element analysis of moment-rotation relationships for human cervical spine [J]. *J Biomech*, 2006, 39(1): 189 - 193.

[20] Panzer MB, Fice JB, Cronin DS. Cervical spine response in frontal crash[J]. *Med Eng Phys*, 2011, 33(9): 1147 - 1159.

[21] Panjabi MM, Crisco JJ, Vasavada A, et al. Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26(24): 2692 - 2700.

[22] Panjabi M, Dvorak J, Duranceau J, et al. Three-dimensional movements of the upper cervical spine [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1988, 13(7): 726 - 730.