

· 临床研究 ·

基于有限元模型研究椎骨错缝对颈椎病患者关节应力的影响

张明才¹, 吕思哲², 程英武¹, 顾力栩², 詹红生¹, 石印玉¹, 王翔¹, 黄仕荣¹

(1.上海中医药大学附属曙光医院骨伤科, 上海 200021; 2.上海交通大学软件学院)

【摘要】 目的:应用颈椎三维有限元模型,探讨颈椎“椎骨错缝”对颈椎病患者关节和椎间盘应力的影响。**方法:**选取颈椎病患者,通过颈椎动静触诊和 X 线判定发生“椎骨错缝”的患者 1 例(男,28 岁),CT 扫描 C₁-C₇(层厚 0.75 mm),基于 CT 数据,应用特定三维有限元分析软件对椎骨错缝节段(C₄-C₆)进行三维有限元模型创建,基于本模型应用软件模拟临床手法矫正“错缝椎骨”C₅,然后应用有限元分析软件计算和分析这一形变过程关节突关节和椎间盘的应力变化。**结果:**错缝节段 C₅ 对相邻节段 C_{4,5}、C_{5,6} 的椎间盘和关节突关节的应力均发生改变,且 C_{5,6} 椎间盘和关节突关节的应力均明显大于 C_{4,5} 椎间盘和关节突关节受到的应力。**结论:**“椎骨错缝”后易引起相应关节突关节和椎间盘的异常应力,而手法矫正“椎骨错缝”能有效改善异常应力分布。

【关键词】 颈椎病; 有限元分析; 应力,物理; 椎间盘

DOI:10.3969/j.issn.1003-0034.2011.02.009

Study on the effect of vertebrae semi-dislocation on the stress distribution in facet joint and intervertebral disc of patients with cervical syndrome based on the three dimensional finite element model ZHANG Ming-cai, LÜ Si-zhe, CHENG Ying-wu, GU Li-xu, ZHAN Hong-sheng*, SHI Yin-yu, WANG Xiang, HUANG Shi-rong. *Department of Orthopaedics and Trauma, Shuguang Hospital Affiliated to Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200021, China

ABSTRACT Objective:To study the effect of vertebrae semi-dislocation on the stress distribution in facet joint and intervertebral disc of patients with cervical syndrome using three dimensional finite element model. **Methods:**A patient with cervical spondylosis was randomly chosen, who was male, 28 years old, and diagnosed as cervical vertebra semidislocation by dynamic and static palpation and X-ray, and scanned from C₁ to C₇ by 0.75 mm slice thickness of CT. Based on the CT data, the software was used to construct the three dimensional finite element model of cervical vertebra semidislocation (C₄-C₆). Based on the model, virtual manipulation was used to correct the vertebra semidislocation by the software, and the stress distribution was analyzed. **Results:**The result of finite element analysis showed that the stress distribution of C₅₋₆ facet joint and intervertebral disc changed after virtual manipulation. **Conclusion:**The vertebra semidislocation leads to the abnormal stress distribution of facet joint and intervertebral disc.

KEYWORDS Cervical spondylosis; Finite element analysis; Stress, mechanical; Intervertebral disk

Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2011, 24(2): 128-131 www.zggszz.com

相关研究表明^[1-2],中医学认为颈椎病的临床发病机制与颈椎“椎骨错缝”有关,“椎骨错缝”往往导致颈椎异常应力,关节在异常应力作用下会产生异常运动轨迹,久之则易造成颈椎节段性失稳。而中医手法正是通过纠正“错缝椎骨”对颈椎的异常应力,重建颈椎稳定性而实现对颈椎病的有效治疗,这一观点有着多项临床研究结果支持^[2]。但如何从生物

力学实验角度,进一步可视化研究“椎骨错缝”对颈椎的异常应力,一直是中医推拿临床的难题之一。而成熟的三维有限元分析技术能够为攻克这一难题奠定基础。本研究基于颈椎“椎骨错缝”三维有限元模型,以 C₅ 后仰式错缝为例,应用有限元分析技术探讨“椎骨错缝”对颈椎的异常应力分布情况,旨在为今后探讨矫正“椎骨错缝”手法治疗颈椎病的生物力学机制奠定基础。

1 资料与方法

1.1 材料与设备 随机选取 1 例门诊颈型颈椎病患者,男,28 岁,身高 176 cm,体重 69 kg,经动静触诊和 X 线检查确诊其 C₅ 发生后仰式错缝(错位),同时排除颈椎创伤、骨折、结核、肿瘤等异常;飞利浦

基金项目:1.国家自然科学基金青年基金项目(编号:81001528);2.国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号:2007CB 512700)

Fund programs:1.The National Natural Science Foundation of China (Young Scholars Program) (No:81001528);2. The National Basic Research program of China(973 Program)(No:2007CB 512700)

通讯作者:詹红生 E-mail:shgsyjs@139.com

16 排螺旋 CT 机, 由上海中医药大学附属曙光医院放射科提供; 三维重建软件 ITK-SNAP、网格化软件 NETGEN 及有限元形变分析软件均由上海交通大学软件学院提供。

1.2 步骤和方法

1.2.1 CT 数据扫描 采用飞利浦 16 排螺旋 CT 机对已选定的研究对象进行螺旋扫描及断层图像处理。扫描时受试者取仰卧位, 尽量保持扫描断面与身体长轴垂直。扫描参数如下: 层厚 0.75 mm, 球管电流与电压 200 mA/120 Kv, 扫描范围自 C₁ 上方 2 mm 始至 C₇ 下方 2 mm 止。为获得高清和能够很好反映关节组织间位置关系, 在 CT 工作站中, 通过调整图像灰度、增加对比度等对图像观察细节进行调整, 并将其保存 DICOM 格式, 刻录为光盘保存。

1.2.2 椎体和椎间盘图像分割 将 DICOM 格式的 CT 图像数据导入三维重建软件 ITK-SNAP, 应用 ITK-SNAP, 分割组织像素点: 骨节, 灰度远高于软组织, 把灰度 >200 的像素点抽取出来; 椎间盘, CT 抽取数据图像方法, 填充骨节之间的缝隙。

1.2.3 三角形表面网格重建 应用 ITK-SNAP 软件运用 Marching Cube 法进行三角形表面网格重建, 以便于数据的可视化及后续的处理。

1.2.4 四面体网格模型建立 使用 NETGEN 软件将三角表面网格面模型, 转化为四面体网格体模型。

1.2.5 赋予各结构材料学参数 参照文献 [4-5], 弹性模量 (Young's modulus) 和泊松比 (Poisson's ratio) 各参数见表 1。

1.2.6 有限元模型形变及应力计算 为了创建椎骨错缝矫正模型, 我们需要运用有限元法对物体的形变进行数学建模, 其原理主要是推导有限元法对物体形变的计算过程。数学建模完成后, 对错缝椎骨节段应用有限元形变软件模拟临床手法矫正错缝椎骨, 然后由软件计算这一形变过程中, 相应椎间盘和

表 1 有限元模型的材料常数

Tab.1 Material parameter of three dimensional finite element model

结构	单元类型	弹性模量 (MPa)	泊松比
皮质骨	四面体	12 000	0.3
松质骨	四面体	100	0.2
椎间盘	四面体	500	0.3

关节突关节在形变前后的应力变化。

1.3 观察项目 本研究观察项目主要包括: ①建立 C₅ 后仰式错缝有限元模型, 观察错缝节段 C₅ 椎骨三维空间位移, 分析错缝节段 C₅ 椎骨在两维与三维图像上的一致性; ②建立 C₅ 错缝有限元形变模型, 对比错缝节段 C₅ 椎骨矫正前后位置关系; ③分析 C₅ 矫正后关节突关节及椎间盘应力变化, 观察错缝节段 C₅ 椎骨对相邻椎体关节突及椎间盘的应力影响。

2 结果

2.1 C₅ 后仰式错缝有限元模型建立 对符合纳入标准的受试者进行问诊、触诊资料收集后, 按照实验要求对其行颈椎 X 线检查, 结果提示 C₄₋₅ 棘突间距大于 C₅₋₆ 棘突间距, 即 C₅ 椎体呈后仰式错缝 (见图 1); 将 DICOM 格式的图像 (300 幅) 数据读入三维重建软件 ITK-SNAP, 在软件界面上操作分割出 C₄₋₆ 节段 DICOM 数据图像 (45-192 层, 共 148 幅), 依据这些数据对错缝节段的 C₄₋₆ 椎体和椎间盘按前述方法进行有限元模型的三维重建, 得到椎骨错缝三维有限元模型 (见图 2)。三维有限元模型观察结果表明, 三维有限元模型在反映 C₅ 椎骨后仰式错缝方面, 不仅与 X 线观察结果一致, 而且从三维角度反映了错缝椎骨 C₅ 与相邻椎骨之间的位置关系, 即 C₅ 椎体错缝的空间位移是: 下平移 0.9 mm, 绕 X 轴顺时针旋转 4.5°。

2.2 C₅ 错缝有限元形变模型建立 基于上述有限元模型, 应用有限元形变软件手工矫正 C₅ 到正常位

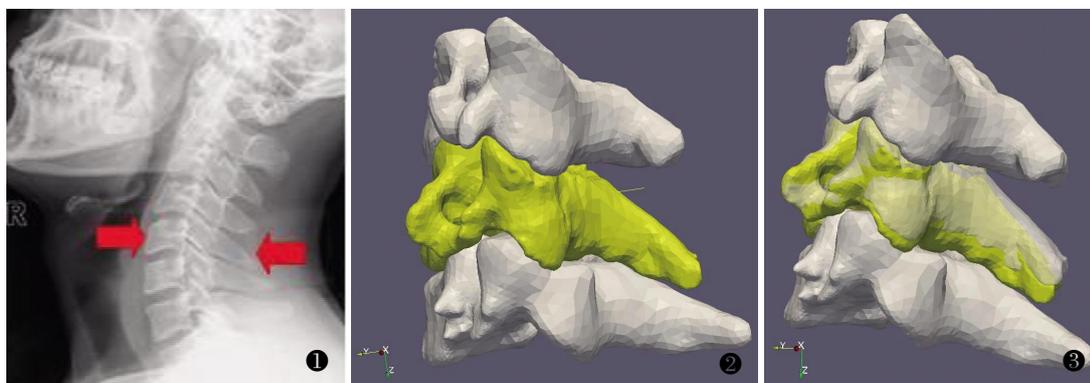


图 1 X 线提示 C₅ 后仰式错缝 (红色箭头所示) 图 2 C₅ (黄色) 后仰式错缝三维有限元模型 图 3 矫正前后 C₅ 位置对照 (黄色为矫正前, 白色为矫正后)

Fig.1 C₅ hypsokinesia-type semi-dislocation (showed by red arrow) Fig.2 C₅ hypsokinesia-type semi-dislocation (showed by yellow) Fig.3 C₅ semi-dislocation before and after manipulation (yellow-before treatment, white-after treatment)

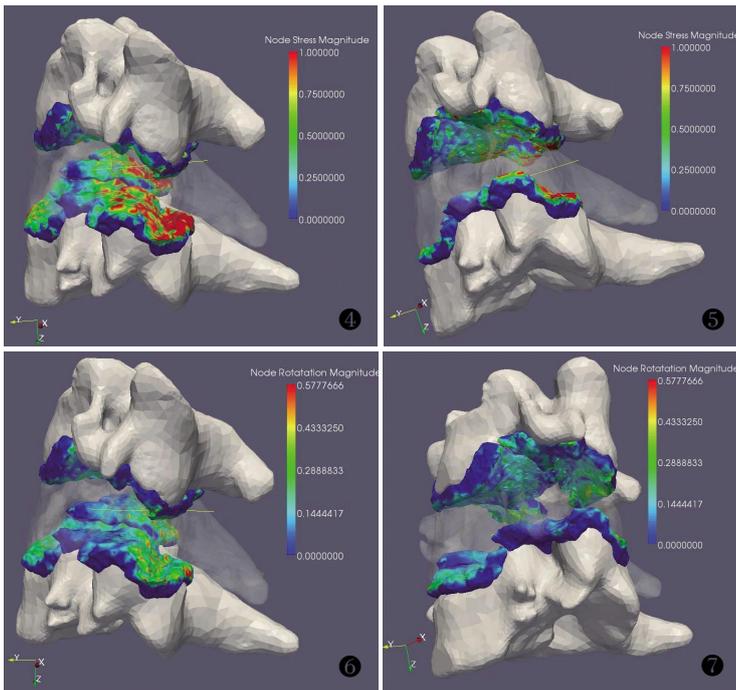


图 4 C₅₋₆ 椎间盘和关节突压力分布图 参照标尺: 蓝色到红色表示应力渐大(下同) 图 5 C₄₋₅ 椎间盘和关节突压力分布图 图 6 C₅₋₆ 椎间盘和关节突旋转力分布图 图 7 C₄₋₅ 椎间盘和关节突旋转力分布图

Fig.4 Stress forth of C₅₋₆ facet joint and intervertebral disc, and stress increase from blue to red by scaleplate Fig.5 Stress forth of C₄₋₅ facet joint and intervertebral disc, and stress increase from blue to red by scaleplate Fig.6 Rotary forth of C₅₋₆ facet joint and intervertebral disc, and stress increase from blue to red by scaleplate Fig.7 Rotary forth of C₄₋₅ facet joint and intervertebral disc, and stress increase from blue to red by scaleplate

置(本例中,上平移 0.9 mm,绕 X 轴逆时针旋转 4.5°)。计算出 C₅ 所有顶点刚体变换后的位置,矫正后 C₅ 位置如图 3,矫正前后 C₅ 位置对照如图 3。

2.3 C₅ 矫正后关节突关节及椎间盘应力变化分析
依据上述原理中所提方法计算节点位移向量 a,由公式算出应力,主要包括了具体应力张量大小和方向,如图 4-7。

结果表明,错缝节段 C₅ 对相邻节段 C_{4,5}、C_{5,6} 的椎间盘和关节突关节都产生了明显的应力,对本实验而言发生的应力主要是压力与扭距力(旋转力)的合力。其中相邻节段受到的应力分布相比,C_{5,6} 椎间盘和关节突关节的压力和扭距力均明显大于 C_{4,5} 椎间盘和关节突关节受到的压力;同一节段应力分布情况:C_{5,6} 的压力主要分布于两侧关节突关节,其次是椎间盘后缘,压力以 X 轴和 Z 轴方向为主;C_{5,6} 的扭距力主要分布于两侧关节突关节和椎间盘后缘,以 X 轴向为主。

3 讨论

3.1 重视椎骨错缝研究的必要性 以往的研究表明^[6],颈椎“骨节错缝、筋骨失和,气血不通”是中医对颈椎病的发病机制认识,手法治疗颈椎病的靶

点是针对颈椎“骨错缝、筋出槽”,有效病例的复查 X 线和 CT 也充分证实中医矫正手法可使错缝椎骨关节得到不同程度地矫正。但是,颈椎“骨错缝、筋出槽”包含着“结构异常”和(或)“功能异常”两方面^[7],X 线和 CT 复查错缝椎骨关节得到矫正仅是“结构异常”的纠正,而对于以“功能异常”为主或兼有的病例,除了颈椎动静态触诊、颈椎活动度异常得到纠正外,如何从生物力学角度来阐述矫正手法可有效纠正“功能异常”,或者是纠正了“结构异常”带来哪些颈椎生物力学改变,这些都是中医手法客观化研究亟待解决的难题。

3.2 椎骨错缝致病生物力学机制分析

本研究的着眼点在于,初步探讨如何从生物力学实验角度来进一步证实颈椎“椎骨错缝”是颈椎病发病的主要病理环节之一,及手法针对这一病理环节对颈椎病干预的生物力学机制所在。为了解决这一问题,本研究选择 1 例触诊和 X 线检查提示发生颈椎“骨错缝、筋出槽”的颈椎病患者,对其颈椎 CT 扫描,基于 CT 值对错缝节段椎节(C₄₋₆)创建了三维有限元模型,然后应用软件对后仰式错缝椎体(C₅)进行了虚拟手法矫正,应用有限元分析软件观测了矫正前后 C₅ 椎体对 C₄₋₅、C₅₋₆ 的椎间盘及关节突的应力变化情况。

研究表明,错缝节段 C₅ 对相邻节段 C_{4,5}、C_{5,6} 的椎间盘和关节突关节都产生了明显的应力,对本实验而言发生的应力主要是压力与扭距力(旋转力)的合力。其中相邻节段受到的应力分布相比,C_{5,6} 椎间盘和关节突关节的压力和扭距力均明显大于 C_{4,5} 椎间盘和关节突关节受到的压力;同一节段应力分布情况:C_{5,6} 的压力主要分布于两侧关节突关节和椎间盘后缘,且以 X 轴和 Z 轴方向为主;C_{5,6} 的扭距力主要分布于两侧关节突关节和椎间盘后缘,以 X 轴向为主。

椎间盘和关节突关节均是颈椎的重要结构,颈椎关节突关节通过导向控制、对抗压缩和向前剪切载荷维持颈椎的稳定性^[8]。而颈椎的稳定性反映了载荷与其作用下所发生位移之间的关系^[9]。在同样的载荷下,位移越大,稳定性就越差。而“椎骨错缝”即是椎体关节发生一定的位移(错缝),但就是这一微小位移就足可引起颈椎在正常载荷下即出现了异常活动、应变和变形。本研究发现错缝节段 C₅ 不仅存在着一定的后仰式位移,而且 C₅ 还对相邻节段

C_{4,5}、C_{5,6} 的椎间盘和关节突关节都产生了明显的应力。在这种异常应力作用下,关节突关节会产生异常运动轨迹,久之则加重“错缝”节段关节的位移,从而加重颈椎节段性失稳。这种节段性失稳则会加重颈椎周围神经、血管的刺激,从而产生临床症状。而中医手法正是通过纠正“错缝椎骨”对颈椎的异常应力,重建颈椎稳定性而实现对颈椎病的有效治疗。

3.3 手法矫正椎骨错缝力学机制分析 椎骨错缝(半脱位)会对周围神经、血管产生机械性压迫而引发临床症状,手法作用机制在于矫正“椎骨错缝”,解除机械性压迫;但这一学说很难解释那些病例“椎骨错缝”未明显纠正,而临床症状却治愈的现象,因此,对于手法矫正“椎骨错缝”的机制认识,除了考虑“矫正错缝,解除机械压迫”外,还应重视手法调整关节或软组织应力等角度的研究。

本研究认为,错缝节段会给相邻节段的椎间盘或关节突关节等关节带来异常应力,依据错缝形式不同(前倾、后仰、旋转、倾倒等错缝),对错缝节段上或下位的颈椎关节或椎间盘产生应力也有所不同。本研究发现,椎骨发生后仰式错缝,会对下位椎骨关节突关节产生较大的应力,且应力主要集中在关节突关节,虚拟手法矫正错缝椎骨后,关节突关节应力改变也是最明显的。以往研究证实^[10-12],关节突关节是维持颈椎稳定性的主要解剖结构,关节突关节异常应力受到损害,则会引起颈椎稳定性的破坏,使颈椎周围神经、血管受到刺激而引发临床症状。

而中医关节矫正手法治疗颈、腰椎病的关键是,一方面,矫正“椎骨错缝”,解除机械性压迫刺激;另一方面,通过矫正错缝椎骨关节来重新调整关节突关节和椎间盘的应力分布,尤其是关节突关节上的应力分布,恢复椎骨关节的功能活动,重建其力学平衡。因此,即使有些病例经手法矫正后,虽然椎骨错缝没有太明显改善,但其临床症状得到了治愈,其机制主要是在于有效调整了关节突关节和椎间盘部位的异常应力,解除椎骨关节的功能活动异常,解除颈部肌腱、韧带痉挛,重建颈椎力学平衡。由于本模型没有重建颈椎肌腱、韧带等软组织,所以,这一认识机制有待于进一步完善。

参考文献

[1] Haldeman S, Carroll L, Cassidy JD, et al. The bone and joint decade

2000-2010 task force on neck pain and its associated disorders: executive summary[J]. Spine, 2008, 33(4 Suppl): 5-7.

- [2] 张明才,詹红生,石印玉,等.基于“骨错缝、筋出槽”诊治椎间盘病症[J].中国骨伤,2008,21(6):441-443.
- Zhang MC, Zhan HS, Shi YY, et al. Diagnosis and treatment of intervertebral disc disease based on the theory of "Gucufeng and Jinchucuo" (骨错缝、筋出槽)[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2008, 21(6): 441-443. Chinese with abstract in English.
- [3] 陈立,詹红生.仰卧整复法治颈椎不稳所致颈性眩晕的经颅多普勒超声和X线观察[J].中西医结合学报,2003,1(4):262-264.
- Chen L, Zhan HS. An transcranial Doppler ultrasonography and X-ray study of cervical vertigo patients treated by manipulation in supine position[J]. Zhong Xi Yi Jie He Xue Bao, 2003, 1(4): 262-264. Chinese.
- [4] Kumaresan S, Yoganandan N, Pintar FA. Posterior complex contribution to the axial compressive and distraction behavior of the cervical spine[J]. Musculoskeletal Res, 1998, 2: 257-262.
- [5] Goel VK, Kong W, Han JS, et al. A combined finite element and optimization of lumbar mechanics without muscles[J]. Spine, 1993, 18(11): 1533-1541.
- [6] 詹红生,石印玉,张明才.基于“骨错缝、筋出槽”病机认识的椎间盘病症诊治新观点[J].上海中医药杂志,2007,41(9):4-6.
- Zhan HS, Shi YY, Zhang MC. New diagnostic and treatment concepts of pathogenesis of intervertebral disc diseases[J]. Shang Hai Zhong Yi Yao Za Zhi, 2007, 41(9): 4-6. Chinese.
- [7] Scott Haldeman. Principles and Practice of Chiropractic[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2005: 25-26.
- [8] 吴强,李康华.下颈椎关节突关节解剖及生物力学研究进展[J].中国脊柱脊髓杂志,2006,16(9):715-718.
- Wu Q, Li KH. Investigation progress of anatomic and biomechanical for lower cervical zygapophyseal joints [J]. Zhongguo Ji Zhu Ji Sui Za Zhi, 2006, 16(9): 715-718. Chinese.
- [9] Matilla B, Ortiz J, Gonzalez P, et al. Effects of parenteral nutrition supplemented with glutamine or glutamine dipeptides on liver antioxidant and detoxication systems in rats[J]. Nutrition, 2000, 16(2): 125-128.
- [10] 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.
- [11] Crawford NR, Duggal N, Chamberlain RH, et al. Unilateral cervical facet dislocation: injury mechanism and biomechanical consequences[J]. Spine, 2002, 27(17): 1858-1864.
- [12] Voo LM, Kumaresan S, Yoganandan N, et al. Finite element analysis of cervical facetectomy[J]. Spine, 1997, 22(9): 964-969.

(收稿日期:2010-07-21 本文编辑:王宏)