

文章编号:1004-7220(2010)02-0105-07

一种新型骶髂关节内固定装置的三维仿真与对比验证

郑琦¹, 谌琦², 廖胜辉³, 石仕元¹, 费骏¹, 魏威¹, 汪翼凡¹

(1. 杭州市红十字会医院 骨科, 杭州 310003; 2. 陕西中医学院, 咸阳 712046;

3. 浙江大学计算机学院 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 目的 采用三维有限元方法对一种新型的棒-板内固定装置固定骶髂关节骨折脱位的力学性能进行分析, 并与骶髂关节螺钉和前路植入钢板两种固定方法进行比较。方法 根据 CT 扫描数据建立完整骨盆的三维有限元模型。去除模型一侧的骶髂关节韧带模拟骨折脱位, 然后使用棒-板内固定装置, 骶髂关节螺钉和前路植入钢板进行模拟固定。对各模型施加同样的载荷来确定每种固定的力学性能。结果 与骶髂关节螺钉和前路植入钢板相比, 棒-板内固定装置可使骶髂关节的最大位移分别下降 40% 和 42%。与对照组相比, 棒-板内固定装置可使主要承载区的最大应力明显下降。此外, 使用棒-板内固定装置固定可使髋部软骨和皮质骨的最大应力显著低于骶髂关节螺钉和前路植入钢板固定。结论 由于棒-板内固定装置具有较好的力学性能, 其可为骨盆骨折提供较稳定的固定方式。

关键词: 棒-板内固定装置; 骶髂关节; 内固定; 有限元模型

中图分类号: R323.5; R318.01; O242.21 文献标志码: A

Three-dimensional simulation and comparing evaluation of a new sacroiliac internal fixation device

ZHENG Qi¹, CHEN Qi², LIAO Sheng-hui³, SHI Shi-yuan¹, FEI Jun¹, WEI Wei¹, WANG Yi-fan¹. (1. Department of Orthopaedic, Red Cross Hospital of Hangzhou, Hangzhou 310003, China; 2. Shanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China; 3. State Key Laboratory of CAD and CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Objective The mechanical effect of a new Bar-Plate internal fixation device (BPIFD) were analyzed using a 3D finite element model, which were also compared to the effects of iliosacral screw (IS) and front-implanted plate (FIP) in the fixation of fracture and dislocation of sacroiliac joint. **Method** Based on CT data, a 3D finite element model was developed for whole pelvis. The ligaments at one side of sacroiliac joint were removed to simulate the fracture and dislocation of sacroiliac joint, which was then simulated fixed by BPIFD, IS and FIP. The identical load was applied on all models to determine the mechanical properties of each fixation. **Results** Compared to IS and FIP, the fixation with BPIFD decrease maximal displacement of sacroiliac joint up to 40% and 42%, respectively. Compared to the control, the maximal stress in the main loading transfer regions is significantly decreased by BPIFD fixation. In addition, the maximal stress in hip cortical bone and cartilage is significantly lower by BPIFD fixation than by IS and FIP fixation. **Conclusions** Since the new sacroiliac Bar-Plate internal fixation device has better biomechanical properties, it may provide more stable fixation for pelvic fractures. **Key words:** Bar-Plate internal fixation device; Sacroiliac joint; Internal fixation; Finite element model

收稿日期:2009-03-16; 修回日期:2010-02-02

基金项目:杭州市医学重点专科专病项目(2005633Q28), 浙江省重大科技专项支撑项目(2008C01048-2), 浙江省教育厅新上一一般项目资助(Y200804155)

作者简介:郑琦(1969-),男,副主任医生,研究方向:骨创伤,关节外科,骨盆外科及生物力学的研究。

通讯作者:廖胜辉,男,博士,E-mail:shliao@zju.edu.cn。

骶髂关节骨折脱位是创伤性骨盆环损伤中最不稳定的类型。在这种类型损伤中,垂直和旋转移位使骨盆失去了双侧对称的环状结构而变得很不稳定,其预后较差。据报道,骨盆垂直不稳定的病人有60%将遗留永久性疼痛和功能障碍。近年来各种手术固定方法日渐增多,如骶髂关节前路重建钢板固定、骶骨棒固定、经皮骶髂关节螺钉固定、S₁螺钉结合 Galveston 技术固定等方法,以上各种术式存在技术要求高、手术创伤大、强刚度不足、神经及血管损伤并发症较多等缺点^[1]。在参考分析各种现有技术的基础上,课题组在数字化手术模拟系统中开发了专门的计算机辅助解剖测量和统计技术,根据髂骨外板及骶骨的解剖形态,设计了独特的解剖型钢板,并在此基础上研制出新型骶髂关节解剖型棒-板内固定系统^[2]。本文将在高度仿真的完整骨盆三维有限元模型基础上^[3],模拟使用新型骶髂关节解剖型棒-板内固定系统对骶髂关节骨折脱位进行固定,并与骶髂关节螺钉、和前路重建钢板固定进行对比,验证和分析其的力学性能。

1 材料和方法

1.1 计算机硬件配置和建模软件系统

硬件使用普通台式个人计算机,英特尔 P4 3.0 G 中央处理器,内存为 2 GB,硬盘为 160 GB,ATI RADEON 9800 Pro 显示卡。

建模软件采用浙江大学计算机科学与技术学院开自主开发的新一代计算机辅助医疗通用外科手术

集成系统——USIS (Universal Surgical Integration System),该系统能直接读取 DICOM 3 标准的 CT/MRI 图像进行多种手术环境的模拟:计算机辅助颅颌面手术模拟,植牙手术模拟,骨盆手术模拟等。其中包含了功能强大的三维分割与重建、虚拟解剖与测量、和辅助模型设计工具,并开发了专门的流线型生物力学有限元网格划分器^[4]。

1.2 骶髂关节解剖型棒-板内固定系统的设计

由于普通的直形重建钢板在临床使用时需要根据髂骨外板的解剖形态进行折弯固定,很难准确地与髂骨复杂的解剖形态相匹配,且髂骨进钉较少,不能满足经髂骨粉碎性骨折的固定需要。利用 USIS 系统中的虚拟解剖与测量工具,根据髂骨外板及骶骨侧块的解剖形态^[5],课题组设计出能和髂骨外板面不规则的解剖结构准确匹配的解剖型钢板,并在此基础上研制出新型骶髂关节解剖型棒-板内固定系统^[2]。如图 1(a)所示,主要装置包括髂骨外板上的解剖型钢板、骶髂支持棒、固定螺钉及其连接结构。装置中关键的创新部分是髂骨外板上的解剖型钢板,如图 1(b)所示,其主体形状近似为三角形,其底边长度为 30.0 mm,高度 56.6 mm,板上设计有 4 排共 8 个钢板螺孔,可根据不同的临床情况选择使用。骶髂支持棒与解剖型钢板的 2 条斜边的夹角分别为 83.76° 和 100.01°,和骨盆的中切矢面的夹角为 30.06°,钢板螺孔的位置方向都不会指向骶孔,能方便地引导螺钉安全置入骶骨。

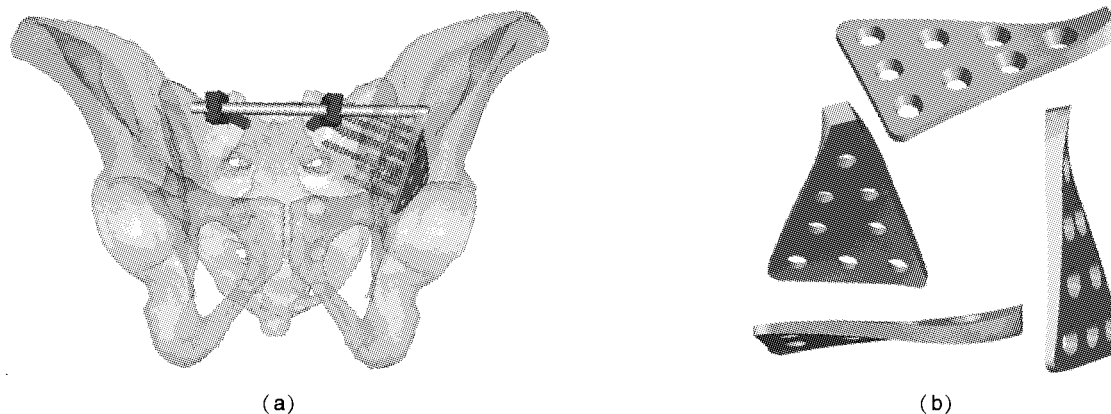


图 1 (a) 新型骶髂关节解剖型棒-板内固定系统, (b) 骶髂关节解剖型钢板

Fig.1 (a) New anatomic bar-plate internal fixation instrument for Sacroiliac joints, (b) The new anatomic plates for sacroiliac joints

1.3 全骨盆三维有限元模型的建立

选取一名32岁健康中国男性志愿者为建模素材,采用Somatom Sensation 16螺旋CT机对其骨盆部位进行扫描,扫描层厚0.75 mm。将CT数据导入USIS中进行精确的三维分割与模型重建,生成独立

的髌骨和骶骨实体模型,然后使用USIS中的扩展的流线型生物力学有限元网格划分器生成髌骨和骶骨和松质骨区域的高质量体网格,如图2(a)~(d)所示。

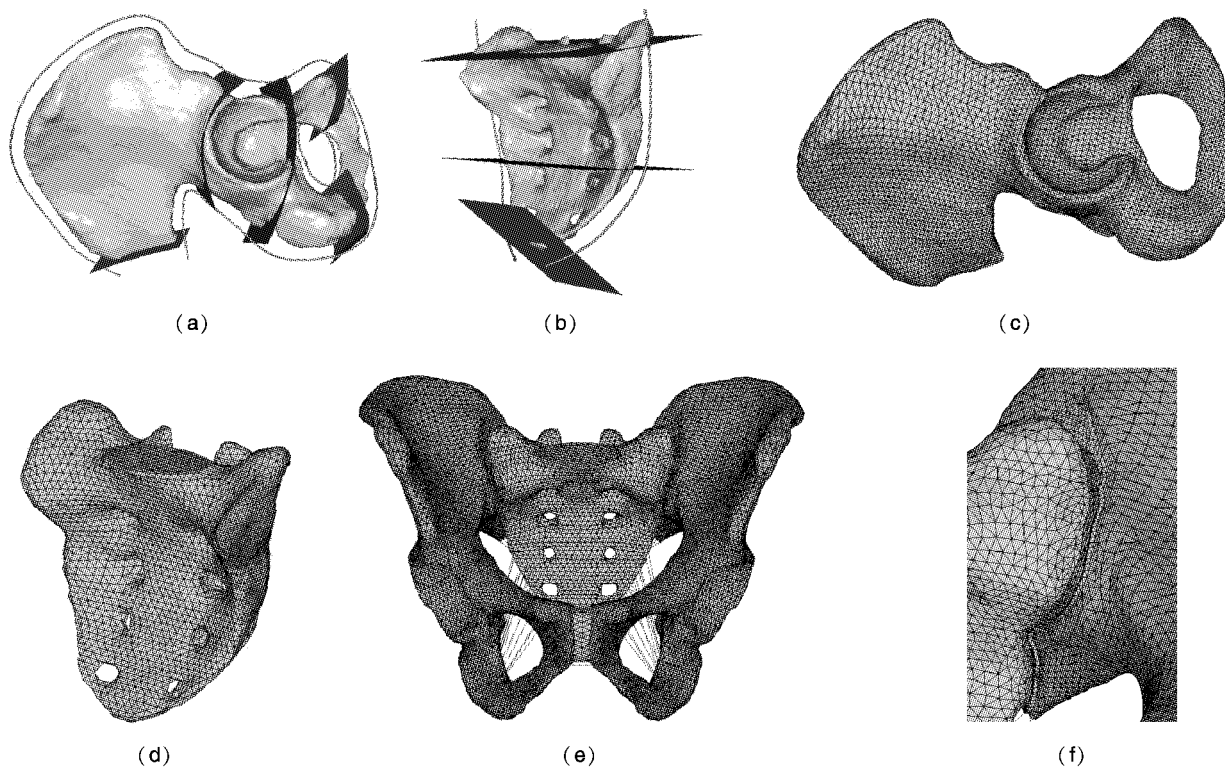


图2 (a)、(b) 流线型参考框架和关键的切割曲面, (c)、(d) 髌骨和骶骨的有限元体网格, (e) 全骨盆三维有限元模型, (f) 骶髂关节区域的放大视图

Fig.2 (a), (b) The streamline frame curves and key curve cross-section surfaces; (c), (d) The resulting FE volume meshes of the hip bone and sacral bone; (e) 3D FE model of whole pelvis; (f) Local view of sacroiliac joint region

利用USIS中的辅助模型设计工具选取表面网格(骶髂关节面上的区域除外),生成平均厚度为1.5 mm的壳单元层作为皮质骨。将壳单元层的法向设置为由外向里,同时将落入皮质层范围的内部四面体单元结点处的材质参数设置为0 MPa,以保证模型外部的几何相似性,同时消除皮质骨壳单元层和内部松质骨体网格部分重叠带来的影响。

同理,用建模工具选取骶髂关节面上相应的区域,分别生成厚度为0.36 mm和0.23 mm的壳单元层作为髌骨和骶骨的终板^[6]。用髌骨关节面向外做Sweep操作生成一层1 mm厚的体网格作为髌骨的软骨层(图2(f)中黄色的层),同时在骶骨关节面

上生成一层软骨层(图2(f)中紫色的层),使得髌、髌骨的软骨层外表面之间的间隙为0.3 mm,并用面-面接触单元生成滑动的关节接触面,摩擦系数设置为0.15。用类似的方法交互选取生成耻骨间的耻骨间盘(图2(e)中浅黄色的间盘)。

用辅助工具在模型上准确选取韧带的起始解剖位置,用抗拉力的索单元生成骨盆的主要韧带组织(图2(e)、(f)中红色的索单元)。包括连接髌骨和髌骨的韧带:骶髌骨间韧带、骶髌前韧带、骶髌后韧带;连接骶骨和坐骨的韧带:骶棘韧带、骶结节韧带;连接两侧耻骨的韧带:耻骨上韧带、耻骨弓状韧带。各韧带组织的抗拉强度、横截面积的设置见表1。

表1 各条韧带模型单元数、抗拉强度、横截面积^[4-9]Tab.1 Element numbers, tensile strength and cross-sectional area in ligament models⁴⁻⁹

材料	单元数	抗拉强度/(N·mm ⁻¹)	横截面积/mm ²
骶髂骨间韧带	111×2	800	400
骶髂前韧带	41×2	600	120
骶髂后韧带	49×2	700	180
骶棘韧带	6×2	415	80
骶结节韧带	14×2	415	300
耻骨上韧带	10	300	60
耻骨上韧带	10	300	60
耻骨弓状韧带	15	300	100

最后用 USIS 中的 ANSYS 转换接口将全骨盆三维有限元模型导入 ANSYS 10.0 有限元分析软件。其中线性的四面体、壳单元全部转换为非线性的二次 10 节点四面体和 6 节点壳单元,以提高数值计算的精度。骨盆有限元模型的各部分材料特性见表 2。

1.4 棒-板系统对骶髂关节骨折脱位固定模拟

在完整骨盆模型的基础上去掉一侧的连接骶骨和髌骨的韧带:骶髂骨间韧带、骶髂前韧带、骶髂后韧带,模拟骶髂关节骨折脱位的情况。并局部调整网格结构,使用 1.2 节中介绍的新型骶髂关节解剖型棒-板内固定系统(SABP)对骨折一侧进行固定模拟,如图 3(a),选取板上的第 2、3、4、5、6、8 共 6 个

表2 骨盆模型中各材料单元数、属性^[4-9]Tab.2 Element numbers and material properties in pelvis model^[4-9]

材料	单元数	弹性模量/GPa	泊松比
骶骨皮质骨	7320	17	0.3
髌骨皮质骨	13 441×2	17	0.3
骶骨松质骨	42 984	0.15	0.2
髌骨松质骨	71 497×2	0.15	0.2
髌骨终板	4 176×2	0.5	0.25
髌骨软骨	12 531×2	1	0.3
骶骨终板	2 506×2	0.5	0.25
骶骨软骨	9 962×2	1	0.3
耻骨间盘	426	0.005	0.45

螺钉进行固定。固定器材均为各向同性钛质,弹性模量为 105 GPa,泊松比为 0.29。各螺钉均使用实际的几何尺寸建模,包括真实的螺纹形态,如图 4 所示。而螺钉与板、螺钉与棒、螺钉与骨均以共用节点刚性连接。另外分别使用骶髂关节螺钉固定(SS)和 2 块 3 孔的前路重建钢板固定(SP)建立对比模型,如图 3(b、c)。其中前路重建钢板长 38 mm、宽 10 mm、厚 3.5 mm,根据骶髂关节骨骼解剖形态进行一定程度的折弯,但和骨质表面保持 0.2 mm 的空隙。而由于新设计的解剖型钢板能和髌骨外板的解剖形态准确匹配,使用完全的耦合连接,以模拟“自动内锁装置”。

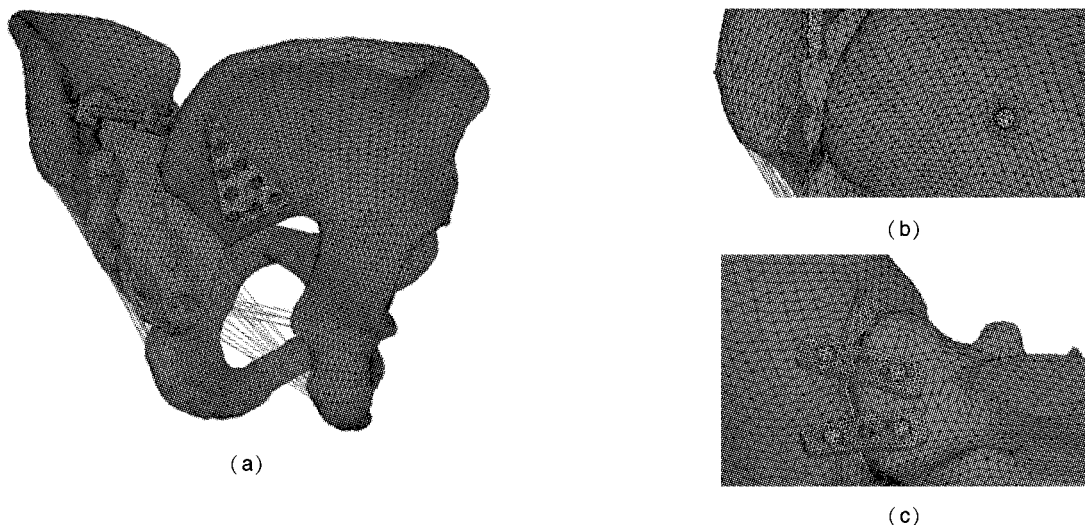


图3 (a) 使用骶髂关节解剖型棒-板内固定系统对骶髂关节骨折脱位进行固定, (b) 使用骶髂关节螺钉固定, (c) 使用前路重建钢板固定
Fig.3 (a) Fixation for sacroiliac joint fracture using SABP, (b) Using iliosacral screw fixation, (c) Using front reconstruction plate fixation

1.5 边界条件和加载模拟设置

对建立好的5组有限元模型,即正常的完整骨盆模型;骶髂关节骨折脱位模型 SABP;SS;SP,使用相同的边界和加载条件:将两侧的髌臼窝区域(和股骨头接触的部分)设置为固定边界条件,将上部躯体的荷载设定为500 N,均匀加载于骶骨的上表面进行有限元力学加载模拟。

2 结果

在500 N 荷载垂直加载情况下,正常全骨盆模

型的模拟的最大位移值约1.64 mm,左右两边的位移模式对称一致,在单侧骶髂关节骨折脱位模拟下的最大位移值约3.6 mm,骨折脱位一侧的移位大大超过了另一侧的移位值,完全破坏了骨盆的稳定性^[3](见图4)。在固定模型中,SP模型的最大位移值最大,约为1.94 mm,SS模型的最大位移值约1.89 mm,两者均超过正常模型的最大位移值。而SABP模型的最大位移值约1.12 mm,比SS模型减小了约40%,比SP模型减小约42%,并且小于正常模型的最大位移值,如图4(a~c)所示。

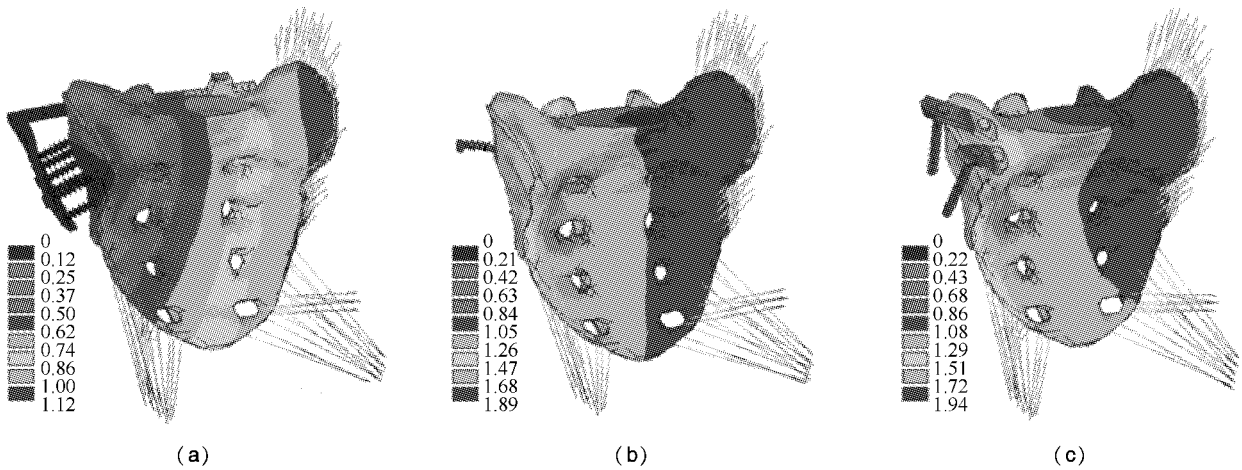


图4 垂直加载500 N 荷载下骶骨的移位等值线图 (a) SABP模型的结果, (b) SS模型的结果, (c) SP模型的结果
 Fig. 4 Displacement contour view of the sacral bone under vertical loading of 500 N (a) The result of SABP model, (b) The result of SS model, (c) The result of SP model

本文统计了7个主要传承负载区域的最大 Von Mises 应力值,包括:骶骨皮质骨、损侧(钢板固定侧)骶髂关节的骶骨软骨、健侧骶髂关节的骶骨软骨、损侧髌骨皮质骨、健侧髌骨皮质骨、损侧髌骨软骨、健侧髌骨软骨。如图5所示,同样,SABP模型

的固定效果最优,在各区域的最大应力值均为最小,应力值均不高于正常模型。在损侧髌骨皮质骨、和损侧髌骨软骨区域,SABP模型比SS模型的最小的应力值减小约33%~70%。在骶骨皮质骨、和损侧髌骨皮质骨区域,SABP模型比SP模型的最小的应

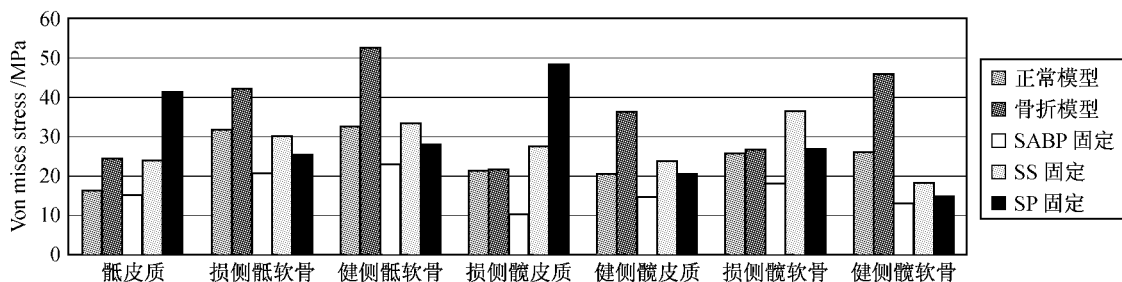


图5 垂直加载500 N 荷载下,7个主要传承负载区域的最大 Von Mises 应力值
 Fig. 5 Maximal Von Mises stress of 7 main loading transfer regions under vertical loading of 500 N

力值减小约 60% ~ 75%。SP 模型在骶骨皮质骨、和损侧髌骨皮质骨区域出现了明显的应力集中,表明可能会发生局部创作性骨吸收。

3 讨论

骨盆环是由两块髌骨和骶骨组成,骨盆环的稳定主要依赖于其周围的软组织,包括耻骨联合、骶髂关节前后部诸多韧带和骨盆面的软组织。临床及生物力学观察显示,骶髂关节前后韧带等复合结构是骨盆环的后部张力带,对骨盆环的稳定作用比前部结构重要得多。骨盆环的稳定依赖于后部骶髂关节处软组织的完整,骨盆后环是承重或负载的必经之路,各种内固定模式的生物力学研究也多集中于此。

大多数学者认为骶髂关节骨折脱位是最不稳定的 C3 型骨盆骨折,在垂直和水平方向上均不稳定,治疗困难,并发症多。目前大多学者主张积极切开复位内固定治疗,以降低伤残率。近年来各种内固定方法日渐增多,常用的如骶骨棒固定,骶髂关节螺钉固定,重建钢板固定 S₁ 螺钉结合 Galveston 技术内固定等,但各有其缺点^[1]。通过计算机辅助解剖研究及临床实践,课题组在前期研究的 S₁ 螺钉结合棒-板内固定系统的基础上,进一步设计出独特的解剖型钢板,研制出新型骶髂关节解剖型棒-板内固定系统。本文通过有限元分析模拟使用其对骶髂关节骨折脱位进行固定,并与骶髂关节螺钉固定、和前路重建钢板固定进行对比,验证和分析其力学性能。

虽然有限元方法具有可重用性、非破坏性等多方面的优点,但是分析的一切结果都依赖于为研究对象建立的生物力学模型,建立准确的模型是至关重要。由于解剖结构和几何外形非常复杂,大多有关骨盆的模拟都只建立了局部区域(如髌臼、单个的髌骨)模型,虽然有少数研究试图建立了全骨盆的三维模型^[7,9],但是生成的模型都过于简化,并且对最重要的骶髂关节没有模拟,未能正确反映骨盆的复杂解剖结构特征,必然影响力学模拟的精确度。课题组采用专门的流线型生物力学有限元网格划分器建立了高度仿真的个性化的完整骨盆三维有限元模型,模型的单元结构非常规则,单元密度过渡非常平滑,保持了高度的几何相似性。同时重建了实际骶髂关节的各种解剖结构,包括了不同实际厚度的骶、髌骨终板、软骨、和带摩擦的关节接触面。由于

骶髂关节是模拟的重点,需要精细建模,故对较薄的软骨和终板也使用实体单元进行建模(划分单元相对较密)。另外,在准确的解剖位置重建了大范围的韧带群,包括骶髌骨间韧带、骶髌前韧带、骶髌后韧带、骶棘韧带、骶结节韧带、耻骨上韧带、和耻骨弓状韧带;另外还重建了耻骨间盘。

在正常模型的基础上,本文模拟了骶髂关节骨折脱位的情况,并使用新型骶髂关节解剖型棒-板内固定系统对骨折一侧进行固定模拟,同时分别使用骶髌关节螺钉固定、和 2 块前路重建钢板固定建立对比模型。通过这 5 组模型的对比分析,证实新型 SABP 的稳定性和力学性能比 SS 和 SP 相比有显著提高。相对于普通的直形重建钢板,其关键设计的解剖型钢板的螺孔排布更加合理,可根据不同的临床情况选择使用,并加强了多点接触固定的稳定性。另外,由于解剖型钢板能和髌骨外板的解剖形态准确匹配,形成“自动内锁装置”,能够进一步分散局部应力,增加抗扭转能力,充分保证骨盆环的强度和刚度。

根据上述模拟分析结果证实,新型 SABP 的固定形式更趋合理,固定结构更趋稳定,为骨盆骨折的治疗增加了一种更有效的新方法。注意到 SABP 的稳定性甚至超过了正常模型的强度,这一定程度上可能是模拟实验中内固定系统与骨之间假设的完全骨质结合接触条件所造成的。在下一步的动物实验和临床研究中,对骨盆内固定器械做出更全面更客观的评价。

参考文献:

- [1] Gaines, Robert WJR. The use of pedicle-screw internal fixation for the operative treatment of spinal disorders [J]. The Journal of Bone and Joint Surgery, 2000, 82 (10): 1458-76.
- [2] 郑琦,廖胜辉,石仕元,等. 计算机辅助设计骶髌关节解剖型钢板[J]. 中国临床解剖学杂志(已录用).
- [3] 郑琦,廖胜辉,石仕元,等. 个性化全骨盆三维有限元建模及骶髌关节骨折脱位模拟[J]. 医用生物力学,2008(4): 296-300.
- [4] Sheng-Hui Liao, Ruo-Feng Tong, Jin-Xiang Dong. Anisotropic finite element modeling for patient-specific mandible [J]. Comput Methods Programs Biomed, 2007, 88: 197-209.
- [5] Jackson RP, McManus AC. The iliac buttress: a computed

- tomographic study of sacral anatomy [J]. Spine, 1993, 18 (3):1318-1328.
- [6] McLauchlan GJ, Gardner DL. Sacral and iliac articular cartilage thickness and cellularity; relationship to subchondral bone end-plate thickness and cancellous bone density [J]. Rheumatology, 2002, 41:375-380.
- [7] García JM, Doblaré M, Seral B, *et al.* Three-dimensional finite element analysis of several internal and external pelvis fixations [J]. J Biomech Eng, 2000, 122:516-522.
- [8] Phillips AT, Pankaj P, Howie CR, *et al.* Finite element modelling of the pelvis; inclusion of muscular and ligamentous boundary conditions [J]. Med Eng Phys, 2007, 29: 739-748.
- [9] 杜明奎, 王秋根, 张秋林, 等. 锁定加压钢板固定骶骨不稳定骨折的三维有限元分析[J]. 医用生物力学, 2007, 22(1): 94-98.

《医用生物力学》杂志征稿、征订启事

《医用生物力学》杂志由上海交通大学主办,教育部主管,是国内唯一一本公开发行,积极反映医学生物力学基础研究与应用研究成果,推动国内外学术交流,促进医、理、工各学科相互了解和合作为目的学术性刊物。报道内容主要包括医学生物力学领域中有关固体力学、流体力学、流变学、运动生物力学等方面的研究论文。本刊为美国工程索引(Ei Compendex)收录期刊(收录时间从2010年1月起)、“中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)”。

本刊为双月刊,16开本,80页,国内统一刊号CN 31-1624/R,国际标准刊号ISSN 1004-7220;定价每期9.80元,全年58.8元,由邮局向全国征订发行,邮发代号4-633。读者可在附近邮局订阅或拨打“11185”热线电话通过邮政“11185”客户服务中心电话订阅。欢迎广大读者、作者订阅本刊,踊跃来稿。

地址:上海市制造局路639号 200011;

电话:(021)23271133; 传真:(021)63137020; 电子信箱:shengwulixue@gmail.com

网站:<http://www.mechanobiology.cn>