

文章编号:1004-7220(2015)06-0501-05

交叉螺钉与钢板内固定治疗 Sander III 型跟骨骨折的有限元分析

倪明¹, 牛文鑫², 梅炯¹

(1. 同济大学附属同济医院 骨科, 上海 200065; 2. 同济大学附属上海市养志康复医院, 上海 201619)

摘要: **目的** 比较研究交叉螺钉与钢板固定治疗跟骨关节内骨折的术后即刻稳定性。**方法** 采集1名正常男性足部薄层CT数据集,据此建立交叉螺钉和钢板两种内植物固定跟骨 Sander-III 型骨折的三维有限元模型。分析两个模型在700 N垂直荷载下的应力分布和位移规律。**结果** 螺钉固定时应力集中于骨折端与螺钉接触的部位,不同部位螺钉的最大应力存在差别。钢板固定时应力集中于钢板与螺钉接触的位置,高应力区位于钢板中前部。钢板、螺钉与跟骨的最大应力均小于各自剪切强度。正常跟骨及骨折模型的位移集中于后距下关节,越向内侧位移越大。**结论** 交叉螺钉与钢板均可用于治疗跟骨骨折,固定具有良好的初始稳定性,建议术后早期进行功能锻炼和康复训练。

关键词: 跟骨; 骨折; 内固定; 应力; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2015.06.501

Finite element analysis on Sander III calcaneal fractures fixed by crossing screws or steel plate

NI Ming¹, NIU Wen-xin², MEI Jiong¹ (1. Department of Orthopedics, Tongji Hospital, Tongji University School of Medicine, Shanghai 201200, China; 2. Shanghai Yang Zhi Rehabilitation Hospital, Tongji University School of Medicine, Shanghai 201619, China)

Abstract: **Objective** To make comparative study on the immediate stability of intra-articular calcaneal fractures fixed by crossing screws and by plate. **Methods** A set of foot CT images from a normal male were collected to construct 3D finite element models of Scander-III calcaneau fracture fixed by crossing screws and by steel plate, respectively. The regular pattern of stress and displacement distributions on these two fracture models under vertical load of 700 N was analyzed. **Results** For the screw-fixed model, the stress was concentrated at the connecting area between screws and fracture ends, and the maximum stresses were different for screws at different places. While for the plate-fixed model, the stress was concentrated at the connecting area between plate and screw. The highest stress was concentrated in anterior segment of the plate. The maximum stresses of plate, screw and calcaneus were all lower than their shear strength. The displacements of intact calcaneus and fractures were concentrated on the posterior subtalar joints, and a larger displacement appeared on the internal part of joint facet. **Conclusions** Both crossing screws and steel plate can be used to fix calcaneal fractures with a preferable initial stability. Functional exercise and rehabilitation are recommended at early time after operation.

Key words: Calcaneus; Fracture; Internal fixation; Stress; Finite element analysis

收稿日期:2015-06-29; 修回日期:2015-07-24

基金项目:上海市卫生和计划生育委员会青年项目(20134Y207)。

通信作者:梅炯,教授, E-mail: meijiong@163.com。

经皮交叉螺钉内固定是治疗跟骨非严重粉碎骨折的重要方法,具有创伤小、恢复快、并发症少等独特优势^[1-2]。由于螺钉固定不能提供与钢板固定类似的框架式稳定结构,研究人员对其治疗跟骨骨折时是否具有足够的稳定性一直存有争议,术后的早期功能锻炼也受到一定限制。

有限元分析方法是一种重要的生物力学研究工具,可以计算复杂形态物体在不同载荷下的应力、应变和位移^[3-4]。在踝足外科中,有限元分析可以为假体设计、临床治疗方案和内固定材料选择提供参考。Bayod等^[5]通过有限元法研究跟骨松质骨缺损与应力分布的关系,发现随着骨缺损增大,跟骨应力可发生明显变化;当缺损超过 1 cm^3 时,最大应力增加约1倍,骨折风险也明显增加。王一民等^[6]通过有限元法模拟锁定钢板治疗 Sander IV 型跟骨骨折,发现术后存在较高创伤性关节炎的风险,而对现有钢板进行改良可以达到提高手术疗效的目的。

目前,有关跟骨骨折微创与传统治疗方法的生物力学稳定性比较还鲜有报道。为此,本文通过建立跟骨关节内骨折的有限元模型,比较采用交叉螺钉与钢板两种不同固定方式在生理荷载下的稳定性,为临床跟骨骨折治疗提供参考。

1 材料与方法

1.1 CT扫描

选取1名正常男性志愿者,32岁,身高172 cm,体重65 kg,下肢及足部无病变、外伤和畸形。应用GE公司Light Speed 64排螺旋CT扫描机沿人体横断面以层厚1.25 mm、螺距1.25 mm自上而下进行螺旋扫描。扫描范围起于胫骨中下1/3至足底,共得到220张CT图片,实际建模采用中间有效图片80张。

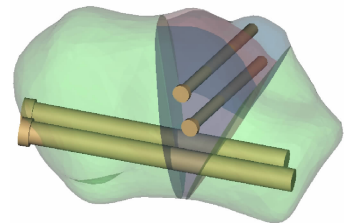
1.2 实体模型建立

使用Mimics 17.0软件的医学图像分割功能根据CT图像灰度提取跟骨的三维轮廓点云,并对皮质骨和松质骨进行有效区分。将采集的点云文件输入逆向工程软件Geomagic 12.0,在其中模型经历点阶段(point phase)、多边形阶段(polygon phase)、成形阶段(shape phase)3个处理阶段。在点阶段,对输入的点云数据进行清理,清除由于图片处理失误造成的杂乱数据。干净点云自动形成三角面片进入多边形阶段;在多边形阶段,运用基于曲率的孔填

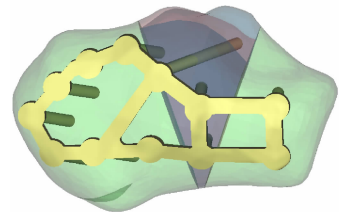
充、光滑等操作对三角面片进行编辑,构建实体外形;在成形阶段,实体是模型构建的中心环节。对曲面域基于曲率划分,最后将生成的曲面转化成C1连续的非均匀有理B样条(NURBS)曲面。

1.3 有限元模型建立

将Geomagic 12.0里生成的实体模型IGES文件导入有限元分析软件ABAQUS 13.4中去,通过布尔运算建立皮质骨和松质骨模型。建立3个模型:①正常跟骨模型;②以4枚螺钉固定的Sander III型跟骨骨折模型。两枚螺钉由跟骨外侧向内横向固定于载距突,两枚螺钉由跟骨结节向跟骰关节方向纵向固定[见图1(a)];③以锁定钢板固定的跟骨骨折模型[见图1(b)]。各模块在ABAQUS 13.4中用C3D10结构实体单元进行网格划分。骨组织材料属性参数参考文献[5],其中皮质骨弹性模量为10 GPa,泊松比为0.3;松质骨弹性模量为1.45 GPa,泊松比为0.2。钢板与螺钉的材料为钛合金,其属性按参考文献[7]选取,弹性模量为200 GPa,泊松比为0.28。



(a) 交叉螺钉固定



(b) 锁定钢板固定

图1 跟骨骨折内固定模型

Fig. 1 Calcaneal fracture fixation models (a) Fixed by crossing screws, (b) Fixed by locking plate

1.4 模型的限制及加载

固定跟骨结节后下缘、跟骰关节各方向自由度,模拟单足站立姿态。从距骨垂直向下均匀分布加载700 N,模拟正常体重。

2 结果

2.1 跟骨骨折的有限元模型结果

对完整跟骨实体模型进行有限元网格划分,共生成实体单元 105 030 个,节点 20 021 个;交叉螺钉固定跟骨模型,生成实体单元 146 608 个,节点 30 018 个;钢板固定跟骨模型,生成实体单元 186 176 个,节点 39 698 个。

2.2 跟骨及螺钉的应力分布

2.2.1 完整跟骨应力分布 应力集中区主要分布在跟骰关节、跟骨结节后下缘等处,最大应力为 10.19 MPa;中立三角为低应力区。应力分布与跟骨的生理受力基本一致,考虑建模误差和有限元计算误差,结果非常理想。

2.2.2 交叉螺钉固定跟骨骨折的应力分布 交叉螺钉固定跟骨时,应力集中于螺钉与骨折端接触的位置,分布范围较小。两枚横向螺钉中,下方螺钉最高应力大于上方螺钉;纵向螺钉中,内侧螺钉最高应力大于外侧螺钉。上、下方横向钉以及内、外侧纵向钉的最大应力分别为 61.32、97.35、39.23、29.95 MPa,而跟骨的最大应力为 115.5 MPa(见图 2)。

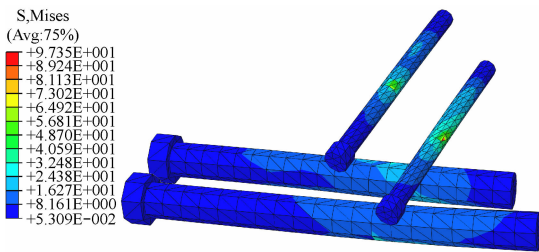


图2 不同位置螺钉的应力分布云图

Fig.2 Stress distributions on different screws

2.2.3 钢板固定跟骨骨折的应力分布 锁定钢板固定跟骨骨折时,高应力区集中于钢板前部,尤其是与跟骨中间骨折块相接触的部位。钢板固定时整体应力高于交叉螺钉,最大主应力为 275.7 MPa;载距突螺钉的最大应力为 130.6 MPa,集中在钉尾与钢板连接处。固定跟骰关节和跟骨结节螺钉的最大应力分别为 261.6、45.4 MPa,而跟骨的最大应力为 114.3 MPa(见图 3)。

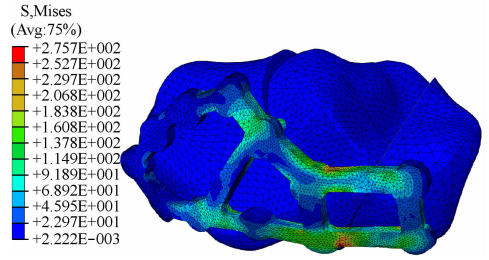
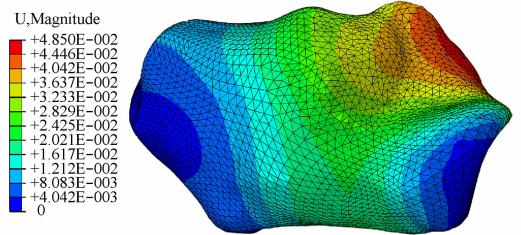


图3 钢板固定跟骨骨折模型的应力云图

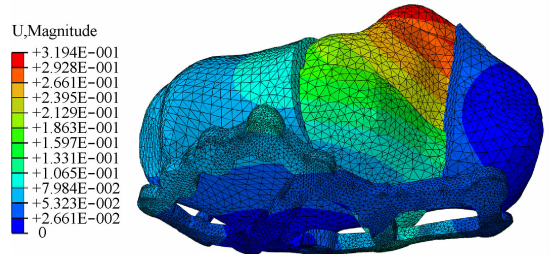
Fig.3 Stress distributions on plate-fixed model

2.3 正常跟骨及跟骨骨折的位移

正常跟骨及跟骨骨折模型的位移主要集中于距下关节,越向内侧位移越大,最大位移发生在跟骨载距突。完整跟骨的最大位移为 48 μm ,而交叉螺钉和钢板固定时跟骨的最大位移分别为 106、319 μm (见图 4)。



(a) 正常跟骨模型



(b) 钢板固定骨折模型

图4 跟骨受力后位移云图

Fig.4 Displacement distributions of the calcaneus models

(a) Intact calcaneus model, (b) Plate-fixed fracture model

3 讨论

3.1 跟骨骨折模型构建方法的比较

人体足部骨骼结构复杂,数量多、体积小、关节多,且曲面、曲率复杂,韧带、肌腱繁多,并具有复杂

的运动学与动力学特性。同时,限于医学影像技术和计算机图形学的发展程度,早期人体有限元模型大多是二维有限元模型^[8-9]。这些模型过于简化,难以准确模拟非规则几何形状并有复杂关节的真实实体。大容量电子计算机的出现,使建立足部三维有限元模型成为可能。但在早期的三维跟骨模型报道中,松质骨被假设为均一分布,皮质骨厚度也是固定的。从生物力学观点来看,这样所建立的模型必然不能反映跟骨的真实力学特性。螺旋CT为建立跟骨有限元模型带来极大方便。Keyak等^[10]提出利用CT数据自动重建骨骼三维有限元模型的方法。Tannous等^[11]详细报道了利用CT扫描数据建立踝足三维有限元模型的方法。随后建立的足部有限元模型^[12-13]不仅在几何结构上精确细致,还重建了软骨、韧带等组织,甚至考虑骨折及重建等特殊情况。

3.2 交叉螺钉与钢板固定治疗跟骨骨折的应力分布及稳定性

交叉螺钉内固定是一种适用于非严重粉碎跟骨骨折的治疗方法,目前大部分学者将其用于治疗患有糖尿病、吸烟或开放骨折等高感染风险的患者。Aldelqaid^[14]报道采用闭合复位螺钉内固定治疗60例跟骨关节内骨折患者,结果显示优良率为79.3%,故作者认为螺钉固定适用于大多数的跟骨关节内骨折,尤其适合不能耐受开放复位内固定的患者。Hammond等^[15]对17例高感染风险的跟骨骨折患者采用经皮螺钉固定进行治疗,骨折复位的优良率达到94%,无一例患者发生切口感染。尽管螺钉固定治疗跟骨骨折具有良好的临床效果,但由于其是否具有足够的固定强度尚存有争议,故术后的早期功能锻炼一直未能有效开展。在Hammond等^[15]所报道的病例中,所有患者术后8周需佩戴护具,且不能进行早期锻炼。因此,利用有限元法分析螺钉固定治疗跟骨骨折的力学稳定性,对于临床手术的开展和术后早期康复锻炼以及促进后足功能恢复均具有重要意义。

从有限元分析的结果看,与完整跟骨模型相比,骨折模型各组织最大应力都显著增大,其原因在于贯穿跟骨骨折端的4枚螺钉承载了全部载荷,发挥了类似扁担的作用,在骨折端形成明显的应力遮挡效应。从应力云图看,螺钉固定时不同位置螺钉的最大应力存在差别。在两枚横向螺钉中,下方螺钉

所承受的最大应力高于上方螺钉;在两枚纵向螺钉中,内侧螺钉的最大应力高于外侧螺钉。螺钉应力分布的差别提示,在开展跟骨骨折治疗时,应根据不同位置选择不同规格的螺钉固定。固定跟骨载距突下方和跟骨内侧骨块时,可适当选用大直径的螺钉固定,以增大骨与钉的接触面,对保护骨组织和固定位置都有积极作用。

钢板固定骨折模型的最大应力大于交叉螺钉固定骨折模型,这是因为钢板与螺钉通过锁定形成框架式悬臂固定结构,钢板分担了更大的载荷。应力云图显示,采用钢板固定时,最大应力集中在钢板中前部,而非传统的三点固定区。尽管三点固定是跟骨骨折治疗的基本原则,但固定骨折块的螺钉同样起重要的支撑作用。因此,跟骨骨折采用钢板固定时,对跟骨中间骨折块需做到确切固定。从计算结果看,无论是采用交叉螺钉还是钢板固定,在700 N荷载下的最大应力均小于其剪切强度^[16],表明两种固定方式均具有较好的初始稳定性。同时,在两种固定模式下,跟骨的最大应力非常相近,均小于骨组织的破坏强度。因此,从生物力学角度看,可优先考虑交叉螺钉固定的治疗方案。与单足站立不同,行走或剧烈运动时跟骨所承受的荷载将增加5~10倍,螺钉的最大应力理论上已超过金属材料的最大阈值。即使未发生内固定断裂,也可能出现金属切割骨折端造成固定失败的可能。综上考虑,跟骨骨折治疗时可依据具体情况选择螺钉或钢板固定骨折。不管选择何种固定方式,术后均可开展早期功能锻炼,但不建议进行早期承重运动,尤其需避免剧烈运动。

3.3 跟骨及螺钉的位移分析及意义

从位移云图看,完整及跟骨骨折模型的位移均发生在距下关节,且越向内侧位移越大。位移的发生与跟骨的受力一致,但与固定材料无明显关联。距下关节是跟骨的主要承重区域,在生理情况下所承受的压力并不相同,其内侧部分的压力高于外侧部分^[17]。螺钉固定时,螺钉内侧也相应承受较大的压力,发生的相对位移也较大。从临床角度看,跟骨内侧位移较大意味重建内侧壁对于恢复跟骨稳定具有重要意义,术中需尽量保证内侧壁的复位;同时,跟骨骨折选择螺钉固定时如果存在明显的骨缺损,建议使用人工骨或自体骨填充,以防止螺钉在受力

后位移过大导致固定失败。由两种固定方式的位移结果比较可知,钢板固定时位移稍大于金属螺钉,表明两者的稳定性差别不是很大。因此,对于无明显骨缺损的跟骨骨折,两种固定方式均可应用。

4 结语

虽然有限元法用于分析跟骨及足部的研究较多,但目前仅有少数有关人体跟骨和正常足部的三维有限元模型报道,而针对不同内固定治疗跟骨关节内骨折的有限元分析鲜有文献报道。本研究利用正常人体 CT 扫描结果,完全采用虚拟操作,进行手术设计,在术前完成生物力学分析和评价。

尽管所建有限元模型比较精细,但由于组织材料的各向异性、不均匀性、非线性,使其自身的本构关系难以确定,而有限元法只能对人体组织的各种材料属性进行粗略描述;单元划分、节点的选择、荷载和边界条件的规定在一定程度上是人为的,且不能和实验条件完全一致;模型主要用于分析跟骨的骨性结构,并未考虑与其连接的软组织,如跟腱等的影响;同时,未将跟骨置于完整足部模型中进行计算。以上因素会造成计算机模拟结果与真实情况存在一定偏差。另外,仅对站立姿态下跟骨骨折的应力进行研究,不能完全反映跟骨在人体运动中的受力情况。但有限元模型在总体变化趋势上与实验和临床应用取得一致,具有一定的指导作用。今后有必要进一步完善人体跟骨的有限元模型,对现有模型添加韧带、肌肉等黏弹性组织,实现动态模拟,从而模拟人体正常的生理情况。

参考文献:

[1] Fu TH, Liu HC, Su YS, et al. Treatment of displaced intra-articular calcaneal with combined transarticular external fixation and minimal internal fixation [J]. *Foot Ankle Int*, 2013, 34(1): 91-98.

[2] Kesemenli CC, Memisoglu K, Atmaca H. A minimally invasive technique for the reduction of calcaneal fractures using the Endobutton [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2013, 52(2): 215-220.

[3] Ni M, Weng XH, Mei J, et al. Primary stability of absorbable screw fixation for intra-articular calcaneal fractures: A finite element analysis [J]. *J Med Biol Eng*, 2015, 35(2): 236-241.

[4] 黄嘉华, 林峰, 姚天平. 应用有限元检测植入器械的可行性分析 [J]. *医用生物力学*, 2014, 29(1): 1-6.

Huang JH, Lin F, Yao TP. Feasibility of finite element analysis in the application of quality inspection on implantable medical devices [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(1): 1-6.

[5] Bayod J, Becerro-de-Bengoa-Vallejo R, Losa-Iglesias ME, et al. Mechanical stress redistribution in the calcaneus after autologous bone harvesting [J]. *J Biomech*, 2012, 45(7): 1219-1226.

[6] 王一民, 张晟, 王博炜, 等. 锁定钢板固定 Sanders IV 型跟骨骨折的有限元分析 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2013, 15(3): 225-229.

[7] Lee JY, Lee YS. Optimal double screw configuration for subtalar arthrodesis: A finite element analysis [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2011, 19(5): 842-849.

[8] Vasu R, Carter DR, Harris WH. Stress distributions in the acetabular region-I. Before and after total joint replacement [J]. *J Biomech*, 1982, 15(3): 155-164.

[9] Chu TM, Reddy NP, Padovan J. Three-dimensional finite element stress analysis of the polypropylene, ankle-foot orthosis: Static analysis [J]. *Med Eng Phys*, 1995, 17(5): 372-379.

[10] Keyak JH, Meagher JM, Skinner HB, et al. Automated three-dimensional finite element modeling of bone: A new method [J]. *J Biomed Eng*, 1990, 12(5): 389-393.

[11] Tannous RE, Bandak FA, Toridis TG, et al. Three-dimensional finite element model of the human ankle: Development and preliminary application to axial impulsive loading [J]. *Proc Stapp Car Crash Conf*, 1996, 40: 219-236.

[12] 牛文鑫, 丁祖泉. 三种三维有限元建模方法在跟骨模型建立中的应用和比较 [J]. *医用生物力学*, 2007, 22(4): 345-350.

Niu WX, Ding ZQ. Comparative study on three different methods applied to establish 3D finite element calcaneus model [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(4): 345-350.

[13] 杨云峰, 俞光荣, 牛文鑫, 等. 人体足主要骨韧带结构三维有限元模型的建立及分析 [J]. *中国运动医学杂志*, 2007, 26(5): 542-546.

[14] Aldelqaid SM. Closed reduction and percutaneous cannulated screws fixation of displaced intra-articular calcaneus fractures [J]. *Foot Ankle Surg*, 2012, 18(3): 164-179.

[15] Hammond AW, Crist BD. Percutaneous treatment of high-risk patients with intra-articular calcaneus fractures: A case series [J]. *Injury*, 2013, 44(11): 1483-1495.

[16] Yanagida H, Taira Y, Atsuta M. Effects of a fluoride etchant on resin bonding titanium-aluminum-niobium alloy [J]. *Eur J Oral Sci*, 2004, 112(4): 384-387.

[17] Wang CL, Cheng CK, Chen CW. Contact area and pressure distribution in the subtalar joint [J]. *J Biomech*, 1995, 28(4): 269-279.