

腓骨支撑踝关节融合的三维有限元分析*☆

欧阳汉斌, 熊军, 项鹏, 崔壮, 陈丽光, 余斌

Three-dimensional finite element analysis of ankle arthrodesis with fibular strut graft

Ouyang Han-bin, Xiong Jun, Xiang Peng, Cui Zhuang, Chen Li-guang, Yu Bin

Department of
Orthopedic Trauma,
Nanfang Hospital of
Southern Medical
University,
Guangzhou
510515, Guangdong
Province, China

Ouyang Han-bin☆,
Studying for
doctorate,
Department of
Orthopedic Trauma,
Nanfang Hospital of
Southern Medical
University,
Guangzhou
510515, Guangdong
Province, China
robin85@163.com

Corresponding
author: Yu Bin,
Doctor, Professor,
Doctoral supervisor,
Department of
Orthopedic Trauma,
Nanfang Hospital of
Southern Medical
University,
Guangzhou
510515, Guangdong
Province, China
yubinol@163.com

Supported by: the
National Natural
Science Foundation
of China, No.
81071233*

Received: 2011-12-11
Accepted: 2012-01-12

Abstract

BACKGROUND: Finite element modeling in biomechanical experiment has advantages in shorter experiment time, lower expense, simulation of complex boundary condition, full analysis of biomechanical characteristics and repeatability.

OBJECTIVE: To establish a finite element model of ankle arthrodesis with fibular strut graft, to evaluate the biomechanical stability and safety, and to study the biomechanical characteristics of ankle arthrodesis with fibular strut graft.

METHODS: A three-dimensional model of a healthy ankle was developed from computed tomography images. Ankle arthrodesis was simulated by Abaqus 6.9 software, and the model was submitted to mechanical analysis under four load procedures according to the postoperative activity pattern of ankle (neutral position, dorsiflexion, external rotation and internal rotation).

RESULTS AND CONCLUSION: The model was successfully established and had high geometric similarity. In dorsiflexion status, posterior-anterior screw yielded maximum stress concentration at middle part; meanwhile, maximum displacement occurred at the fusion site. Screw stress at posterolateral tibial was maximal. A high concentrated stress was found surrounding the screw hole. High stress was distributed between the screw holes of fibular strut. To avoid the high concentration of stress distribution, the crossed screws should be configured appropriately. And additional ante-dorsiflexion immobilization might lower the risk of screw implant failure. Shortening of distance between parallel screws and centralized drilling on fibula also tended to reduce the risk of strut failure.

Ouyang HB, Xiong J, Xiang P, Cui Z, Chen LG, Yu B. Three-dimensional finite element analysis of ankle arthrodesis with fibular strut graft. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2012;16(13): 2296-2299. [http://www.crter.cn http://cn.zglckf.com]

摘要

背景: 利用有限元法进行模拟实验具有实验时间短、费用低、可模拟复杂边界条件、力学性能测试全面和可重复性好等优点。

目的: 通过建立腓骨支撑固定融合踝关节三维有限元模型, 分析其生物力学稳定性及安全性, 并进一步探讨其生物力学特性。

方法: 基于正常人体足踝部的三维 CT 断层数据集, 重建踝关节几何形态, 应用 Abaqus6.9 软件模拟踝关节 4 种活动模式(中立位、背屈位、内旋位和外旋位)时的受力状况, 进行静力学有限元分析。

结果与结论: 成功建立了腓骨支撑固定踝关节融合三维有限元模型, 具有良好的几何相似性; 在 4 种载荷下, 背屈位引起的螺钉应力峰值最大, 应力分布主要集中在螺钉的融合面水平, 同时融合面发生的位移最大; 而 4 枚螺钉中, 胫骨后外侧螺钉应力最大; 外侧支撑腓骨的应力主要集中在钉孔周围及上下钉孔之间的腓骨体部。说明踝关节行腓骨支撑固定融合时, 应注意合理放置 2 枚交叉螺钉, 避免应力过分集中, 而内固定后应加强抗背屈方向的制动; 在处理外侧支撑腓骨时, 螺钉钉孔应避免靠近腓骨边缘且上下钉距不宜过大, 可有效降低内固定失效的风险。

关键词: 腓骨; 踝关节; 螺钉; 融合; 有限元; 生物力学

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2012.13.004

欧阳汉斌, 熊军, 项鹏, 崔壮, 陈丽光, 余斌. 腓骨支撑踝关节融合的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(13):2296-2299. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

踝关节骨关节炎是足踝部常见的疾病之一, 终末期骨关节炎常常导致严重的疼痛症状以及活动功能丧失, 严重影响患者的生活质量。常规抗炎药物、局部注射等保守治疗往往不能有效改善该期骨关节炎患者的症状及功能, 此时手术成为惟一的治疗选择^[1]。在当前人工踝关节置换技术尚未成熟的情况下, 踝关节融合仍然是终末期骨关节炎治疗的“金标准”^[2]。尽管踝关节融合已发展成为较为成熟的一种治疗手段, 而既往文献报道的不愈合率在 5%~37%^[3]。

相对于外固定架、髓内钉等其他固定术式, 加压螺钉固定因其较高的融合率以及更少的并发症一直被认为是首选的融合术式^[4]。而对于类风湿性关节炎的患者, 由于往往合并骨质疏松的问题, 加压螺钉固定难以维持良好的稳定性, 术后的不愈合率普遍较高^[5-6]。为此, 有学者提出腓骨支撑植骨联合螺钉固定融合以增加额外的稳定性^[7], 该术式主张保留踝关节外侧部分腓骨并分别以螺钉跨胫距关节固定于上下方, 从而提供对抗内旋及外旋的作用, 而外侧支撑腓骨则被认为是一种“骨性钢板”结构。有报道指出利用该术式行踝关节融合, 融合率达到 100%^[8]。尽管如此, 近数十年来针对该术式的

生物力学以及临床研究却鲜有报道。为此, 本文利用正常人体踝关节二维CT数据集, 建立起踝关节腓骨支撑固定融合模型, 在模拟正常踝关节活动作用下, 对术式的生物力学机制进行初步的分析, 进一步评估其固定稳定性及安全性。

1 对象和方法

设计: 三维有限元分析。

时间及地点: 于2011-11在南方医科大学附属南方医院创伤骨科数字骨科工作室完成。

对象: 选取健康青年男性志愿者1名, 体重60 kg。在除外踝关节损伤及其他相关病史后, 进一步行X射线检查除外足部肿瘤、畸形等病变, 志愿者对实验过程均知情同意, 实验符合医学伦理学标准。

方法:

踝关节数字化三维模型的建立: 对志愿者进行右足踝部64排螺旋CT平扫, 层厚0.45 mm, 断层图像数据以DICOM格式输出保存。利用Mimics 10.0软件(Materialise公司, 比利时)读取DICOM格式图像, 根据骨组织灰度值的差异, 利用阈值分割法对感兴趣区域的骨组织进行图像分割, 最终建立踝关节骨性结构的几何模型。将模型输出为STL文件, 然后导入逆向工程软件Geomagic Studio 10.0(Geomagic公司, 美国)中, 对模型进行除噪点、平滑化、缝合曲面处理, 生成实体模型并输出为Iges文件格式。再将Iges文件导入通用有限元分析软件Abaqus 6.9(达索SIMULIA公司, 法国)中进行前处理, 得到完整踝关节的三维几何模型。

此外, 利用Abaqus实体建模功能, 忽略螺纹部分的几何结构并以直径6.5 mm的圆柱体代替螺钉主干, 同时螺钉长度根据踝关节模拟固定时的实际情况而作出相应的调整。

腓骨支撑踝关节融合模型的建立: 根据临床实际, 腓骨支撑术式取外侧入路, 暴露腓骨远端, 水平切断下段腓骨, 以平行矢状面方向纵行切开游离的腓骨远端, 保留软组织附着的外侧部分作为支撑结构; 再以水平方向截骨并清除胫距关节软骨及软骨下骨组织, 暴露新鲜的松质骨面, 胫距关节对合复位形成紧密贴合的融合平面。完成复位后, 打入4枚加压螺钉实现固定, 其中经腓骨的2枚加压螺钉由外向内将支撑腓骨以跨关节的方式固定于踝关节外侧^[9]。

单元划分与材料参数赋值: 本研究采用

Abaqus/standard中修正的二阶四面体单元(C3D10M), 该单元更适用于复杂的接触模拟问题的求解。最后得到的网格模型共包含节点73 969个, 单元49 958个。骨性结构模拟为各向同性的线弹性材料, 骨与螺钉的材料特性参数参照文献确定^[10-11], 见表1。

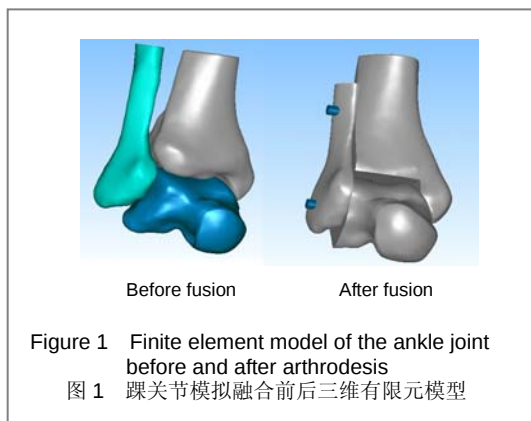
表1 骨与螺钉材料属性
Table 1 Material properties of bone and screws

Material	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson's ratio
Bone	7 300	0.3
Screw	200 000	0.3

定义接触、边界条件及载荷: 由于螺纹部分已进行简化处理, 为模拟螺纹部分产生的加压预紧作用, 螺纹与距骨之间的接触面以及螺钉上段与胫骨接触面均设置为tie约束, 余接触部分设置为硬接触, 摩擦因数取0.15; 胫距融合面摩擦因数为0.7; 其余对结果影响小的接触部位均定义为无摩擦的硬接触^[12]。结合实际情况, 对除胫距关节以外的距骨关节面(前跟、中跟及后跟关节面)实施水平面、矢状面和冠状面3个平面自由度的完全约束, 并模拟踝关节中立位、背屈位、内旋位和外旋位4种状态, 其中内旋(转矩)为10 N·m, 外旋(转矩)为10 N·m, 背屈(弯矩)为10 N·m, 中立(垂直)为2 100 N, 受力状况参考文献数据^[11-12]。

2 结果

2.1 踝关节模拟融合前后三维有限元模型 成功建立踝关节融合前后的三维有限元模型, 模型形态仿真度高, 能进行任意方向旋转和平移操作, 可获得完整的三维空间信息, 见图1。



2.2 不同活动模式下螺钉应力分布 在不同受力状态下, 4枚加压螺钉受力情况, 见图2。

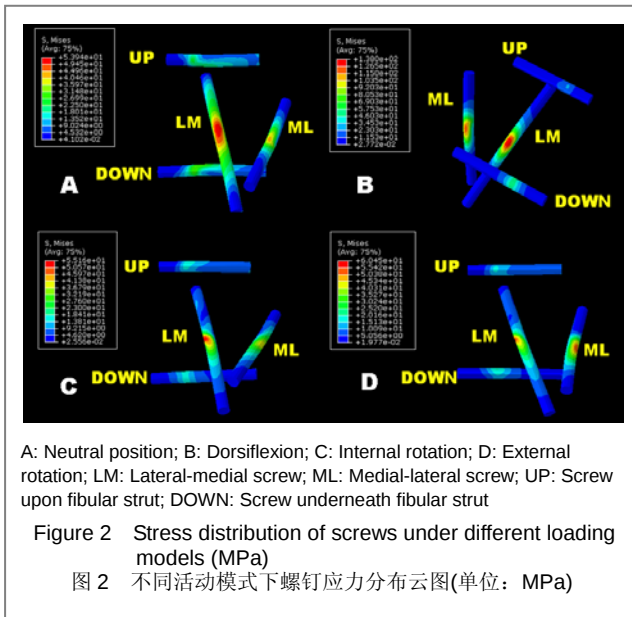
南方医科大学附属南方医院创伤骨科, 广东省广州市 510515

欧阳汉斌☆, 男, 1985年生, 南方医科大学在读博士, 主要从事数字骨科方面的研究。robin85@163.com

通讯作者: 余斌, 博士, 教授, 博士生导师, 南方医科大学附属南方医院创伤骨科, 广东省广州市 510515 yubinol@163.com

中图分类号: R318
文献标识码: A
文章编号: 1673-8225 (2012)13-02296-04

收稿日期: 2011-12-11
修回日期: 2012-01-12
(20111219006/D · G)



由图中可以看出,同一位置的螺钉在不同载荷状态下的应力分布比例不同,而主要应力范围集中在钉体的中部,即位于骨性融合面附近。此外,无论对模型施加何种载荷,产生最大应力的螺钉为胫骨后外侧螺钉(LM),其次为胫骨后内侧螺钉(ML)。在4种载荷条件中,踝关节背屈位下螺钉应力最大,达138.0 MPa;中立位下螺钉应力最小,为53.94 MPa;模拟踝关节内旋、外旋运动时,螺钉于外旋位时的最大应力峰值 60.45 MPa大于内旋位时的最大应力峰值55.16 MPa。

2.3 不同活动模式下融合面位移分布 在不同活动模式下,融合面的总位移是反映固定后力学稳定性的重要指标,见图3。

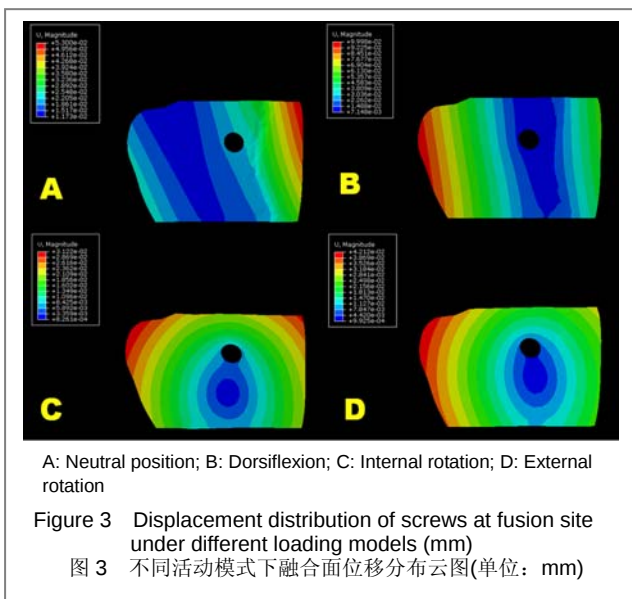
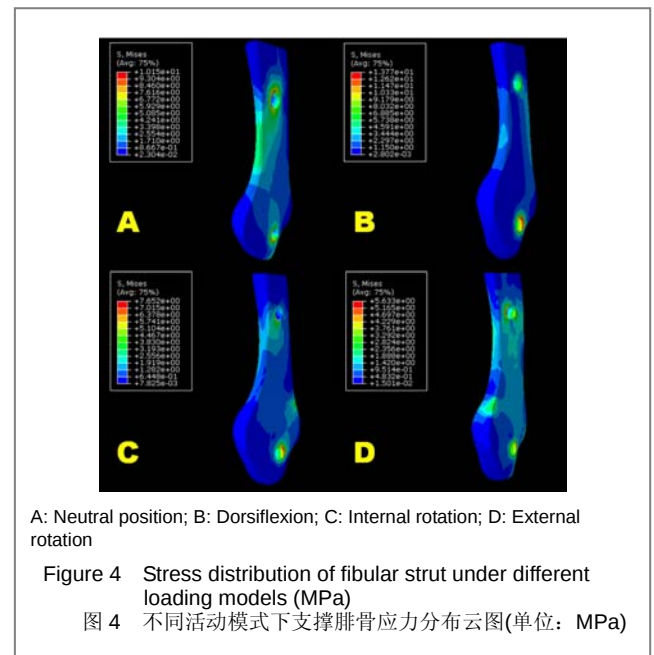


图3显示了踝关节4种载荷模式下融合面位移的分布。从图中可见,在背屈位时,融合面的位移最大,主要集中在融合面后方并向前方逐渐递减,最大位移峰值

为0.100 mm;内旋和外旋位时,融合面位移以中心钉孔为圆心呈环形分布,并由外向内逐渐递减,内旋和外旋最大位移峰值分别为0.031 mm和0.042 mm;中立位时,融合面位移方向以平行胫骨长轴为主要方向,最大位移峰值为0.053 mm。

2.4 不同活动模式下支撑腓骨应力分布 4种载荷模式下外侧支撑腓骨的应力峰值分布,见图4。



从图中可见,作为共同承担载荷的结构,外侧腓骨的总体应力分布小于螺钉应力,而最大应力主要集中在腓骨上下螺钉的钉孔附近。中立位时,腓骨最大应力峰值为10.15 MPa,应力主要分布在腓骨中段前部;背屈位时,最大应力峰值为13.77 MPa,总体应力分布相对较中立位均匀,主要位于腓骨中段后部;在内旋位和外旋位下,腓骨主要应力分布分别位在上下方钉孔附近,最大应力峰值分别为7.65 MPa和5.63 MPa。

3 讨论

坚强固定和融合面紧密的骨性接触是踝关节融合成功的两大关键因素,同时也是融合过程中人为可控的两个因素^[13]。在已有报道的踝关节融合术式中,绝大多数均主张切除远端腓骨以作为融合区植骨的供体,同时可避免术后发生外侧撞击。而近年来腓骨在踝关节中的稳定作用备受关注。腓骨部分切除后,踝关节背屈、跖屈、内翻以及外翻活动时,外踝的上下移位和侧向移位都明显增加,特别是腓骨远端的切除可明显改变腓骨内应力分布及分载能力,从而影响了距骨内外侧的应力分布,降低踝关节的稳定性^[14]。研究表明,腓骨内固定后有利于胫骨内固定的稳定,而恢复腓骨的连续性,可增加踝关节的稳定性^[15]。而腓骨支撑术式主张保留外侧腓

骨结构,并将其作为外踝的支撑稳定结构。从理论上讲,该术式可保留胫距关节面植骨供体的来源,同时还可以增加踝关节固定后的抗旋转能力。尽管如此,近数十年来该术式的相关应用报道并不多见,仅有的一项生物力学测试对该术式与单纯螺钉固定融合进行了对比,并认为该术式优于双螺钉交叉固定^[9]。然而传统的生物力学试验尚难以揭示其内部的生物力学机制,且该术式的稳定性及安全性仍有待评估。

根据临床实际情况,本实验设计了踝关节融合术后4种载荷作用模式,包括中立、背屈、内旋和外旋。在同为10 N·m的载荷下,背屈位相比内旋和外旋所产生的螺钉应力最接近螺钉的屈服应力,这一现象提示在背屈位状态下发生螺钉断裂的风险较高,而在术后制动方面,临床上应注意采取适当的外固定措施加强对踝关节背屈运动的制动。与此同时,内旋和外旋状态下产生的螺钉应力峰值较小,提示外侧结构固定的抗旋转稳定性较为满意。值得指出的是,无论在何种载荷下,胫骨后外侧螺钉均表现出较高的应力峰值,因此该螺钉发生断裂的风险最大,造成这一现象的原因可能是由于外侧螺钉本身较内侧螺钉更长,因而在同样外力作用条件下易形成更长的力臂,导致其产生的剪切应力更大。

在受外力作用下,胫距融合面难免产生一定程度的张开位移,如果张开位移过大将影响最终的融合面对合的效果,从而影响胫骨关节的骨性融合。本实验结果显示,在背屈位时,融合面发生的总位移最大,并自融合面后方向前方逐渐递减,这一结果与临床实际情况基本符合,反映了该模型的有效性。另一方面,外侧支撑腓骨作为一种附加的稳定装置,能提供类似加压钢板的固定效应。由于腓骨本身的刚度和强度均不如钢板,存在着一定的失固定风险,特别对于骨质疏松的患者而言,过大的转矩同样可造成腓骨的折断。结果显示,上下钉孔之间的腓骨中段部分的应力分布相对集中,在反复受力的情况下,该区域发生骨折的风险相对较高,而该区域的应力分布可能与上下钉孔的距离有关。而在临床实际操作中,在术中尽量避免靠近腓骨边缘钻孔的同时,应适当缩短上下钉孔距离以降低术后发生腓骨断裂的风险。

本实验采用正常人体踝关节CT断层数据集,构建出完整的踝关节三维有限元模型,并在此基础上进行了模拟腓骨支撑螺钉固定踝关节融合,而建立起的有限元模型用于足踝部生物力学分析具有较高的可行性和有效性。

致谢:感谢南方医科大学南方医院创伤骨科全体医师提供技术支持。

4 参考文献

- [1] Nihal A, Gellman RE, Embil JM, et al. Ankle arthrodesis. Foot Ankle Surg.2008;14(1):1-10.

- [2] Saltzman CL. Perspective on total ankle replacement. Foot Ankle Clin. 2000;5(4):761-775.
- [3] Zwipp H, Rammelt S, Endres T, et al. High union rates and function scores at midterm follow-up with ankle arthrodesis using a four screw technique. Clin Orthop Relat Res.2010;468(4): 958-968.
- [4] Thermann H, Huefner T, Schratz HE, et al. Screw fixation for ankle arthrodesis. Foot and Ankle Surgery. 1999;5(3):131-142.
- [5] Maenpaa H, Lehto MU, Belt EA. Why do ankle arthrodeses fail in patients with rheumatic disease? Foot Ankle Int. 2001;22(5):403-408.
- [6] Moran CG, Pinder IM, Smith SR. Ankle arthrodesis in rheumatoid arthritis. 30 cases followed for 5 years. Acta Orthop Scand. 1991; 62(6):538-543.
- [7] Adams JC. Arthrodesis of the ankle joint; experiences with the transfibular approach. J Bone Joint Surg Br.1948;30B(3):506-511.
- [8] Akra GA, Middleton A, Adedapo AO, et al. Outcome of ankle arthrodesis using a transfibular approach. J Foot Ankle Surg.2010; 49(6):508-512.
- [9] Thordarson DB, Markolf KL, Cracchiolo AR. Arthrodesis of the ankle with cancellous-bone screws and fibular strut graft. Biomechanical analysis. J Bone Joint Surg Am. 1990;72(9):1359-1363.
- [10] Lu CH, Yu B, Chen HQ, et al. Zhongguo Jiaoxing Waik Zazhi. 2011;19(5):402-405.
卢昌怀,余斌,陈辉强,等.正常步态下距骨关节面接触特征的有限元分析[J].中国矫形外科杂志,2011,19(5):402-405.
- [11] Alonso-Vazquez A, Lauge-Pedersen H, Lidgren L, et al. Initial stability of ankle arthrodesis with three-screw fixation. A finite element analysis. Clin Biomech (Bristol, Avon).2004;19(7): 751-759.
- [12] Yang CW, Li Q, Sun W, et al. Zhongguo Jiaoxing Waik Zazhi. 2009;17(14):1077-1080.
杨成伟,李全,孙伟,等.内收型股骨颈骨折多根空心螺钉固定的三维有限元分析[J].中国矫形外科杂志,2009,17(14):1077-1080.
- [13] Kirkpatrick JS, Goldner JL, Goldner RD. Revision arthrodesis for tibiotalar pseudarthrosis with fibular onlay-inlay graft and internal screw fixation. Clin Orthop Relat Res.1991;268:29-36.
- [14] Ding YL, Song YM. Zhongguo Xiufu Chongjian Waik Zazhi. 2002; 16(4):245-247.
丁永利,宋跃明.腓骨在踝关节稳定性中的作用[J].中国修复重建外科杂志,2002,16(4):245-247.
- [15] Xie ZJ, Yan DQ, Zhang HY, et al. Zhongguo Jiaoxing Waik Zazhi. 2000;7(6):34-36.
谢志军,闫德强,张汉瑜,等.腓骨内固定对胫骨愈合及踝关节稳定的作用[J].中国矫形外科杂志,2000,7(6):34-36.

来自本文课题的更多信息--

基金声明: 国家自然科学基金项目(81071233)。

作者贡献: 第一作者完成实验设计、实施及完成论文,第二、三、四作者进行实验评估,第五作者负责资料收集,第六作者完成文章审核并对全文负责。

利益冲突: 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

伦理要求: 本实验已通过南方医科大学附属南方医院伦理委员会审批。参与实验的患病个体及其家属自愿参加,所有供者、受者均应对实验过程完全知情同意,在充分了解本治疗方案的前提下签署“知情同意书”。

本文创新性: 应用有限元方法研究腓骨支撑固定踝关节融合的生物力学特性,研究结果有助于深入了解该固定术式的生物力学机制,为其在临床应用提供了一定指导意义。临床上对踝关节行腓骨支撑固定融合时,应注意合理放置2枚交叉螺钉,避免应力过分集中,而术后应加强抗背屈方向的制动措施;在处理外侧支撑腓骨时,应注意避免靠近腓骨边缘钻孔且上下钉距不宜过大,可有效降低内固定失效的风险。实验利用有限元分析方法对踝关节融合腓骨支撑固定术式的生物力学特性进行了深入研究。不足之处在于建模过程中对模型的细节作了一定的简化,结果数据尚不能作为真实值而直接应用于临床。