

文章编号:1004-7220(2009)03-0169-05

## 足底软组织硬化对足部生物力学性能影响的三维有限元分析

李云婷<sup>1</sup>, 陶凯<sup>1</sup>, 王冬梅<sup>1</sup>, 王旭<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 复旦大学附属华山医院 骨科, 上海 200040)

**摘要:** **目的** 通过有限元方法研究足底软组织整体硬化以及跖骨头和跟骨下方软组织局部硬化对人体足踝系统力学性能的影响。**方法** 基于健康志愿者右足的核磁共振扫描图片建立足部三维有限元模型,通过改变足底软组织的生物力学属性和人体平衡站立位时的计算仿真来分析足底软组织的生物力学问题。同时,对志愿者进行足底压力测试来验证模型的有效性。**结果** 建立足踝有限元模型得到了有效的验证并完成了不同软组织属性定义下站立位的运算;在平衡站立位时足底接触压力分布状况和足踝内部一些软、硬组织的受力情况得到量化。**结论** 软组织硬化,特别是跖骨头和跟骨下方软组织局部硬化,对足底受压接触面积、压力峰值以及足底软组织垫所受的应力等产生了很大影响,增加了糖尿病患者发生足底溃烂的可能性。

**关键词:** 足踝; 糖尿病; 足底软组织; 有限元分析; 力学性能

**中图分类号:** R318.01 **文献标志码:** A

## Effects of stiffness of plantar soft tissue on foot biomechanical behavior: a 3D finite element analysis

LI Yun-ting<sup>1</sup>, TAO Kai<sup>1</sup>, WANG Dong-mei<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>2</sup>. (1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; Department of Orthopedics, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China)

**Abstract: Objective** To investigate the biomechanical effects of the whole hardening of plantar soft tissue and the local hardening under metatarsal heads and calcaneus on human foot and ankle system. **Method** Building a 3D finite element model based on the MRI scanning pictures of a healthy young volunteer and changing the material property of plantar soft tissue to simulate different plantar soft tissue status; and three solutions simulating the balanced standing were done to compare model's predictions. In addition, the plantar pressure measurement of the volunteer was used to validate the model. **Result** The foot model was created and validated. Three solutions were completed under different material properties of plantar soft tissue, and the contact pressure distribution and some mechanical information of internal soft and hard tissue were quantified. **Conclusions** The hardening of plantar soft tissue, especially the local hardening, greatly affects the contact pressure distribution and stress magnitudes in plantar soft tissue, which would increase potential risk of plantar ulcer.

**Key words:** Foot and ankle; Diabetic; Plantar soft tissue; Finite element analysis; Mechanical property

收稿日期:2008-11-28; 修回日期:2009-02-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(30530230)

作者简介:李云婷(1982-),女,研究方向:人体生物力学。

通讯作者:王冬梅,副教授,E-mail: dmw\_mail@163.net。

研究足踝关节的生物力学现象对解读足部疾病起着重要作用,特别是其内部应力应变的发生原理对于理解足病机制、确定适合的足部矫正支具和治疗方法有着重要的意义,在临床试验中,常常无法精确获知足内部应力应变等情况,而基于医学三维扫描图片进行重建的三维有限元模型,通过仿真可以提供详细的内部力学变化信息<sup>[1]</sup>。近年来一些三维有限元足踝模型被国内外学者建立,并应用于各种足踝生物力学的相关研究<sup>[2~4]</sup>,对足踝生物力学的发展起到了积极的作用。

人体足的结构在行走中起到吸收冲击并产生向前推进力的作用,足底脂肪层参与了其中大部分的功能。足部问题常因为年龄增长而更为突出,相关研究显示,随着年龄增长,对足部神经的敏感性降低,减低了人类正常情况下对行走姿势的控制<sup>[5]</sup>;同时,跖骨头下方的软组织因行走产生的长期应力集中导致其材料属性改变,损害了足部正常生物力学功能<sup>[6]</sup>。足部溃疡是糖尿病的一种严重的并发症,对糖尿病人而言,神经病变会导致长期足底麻木甚至感觉消失,而由足底组织变化引起的应力集中则更容易发展成为溃疡甚至截肢。本文的目的是建立正常人的三维有限元足模型,通过改变足底软组织属性定义来分别模拟年轻人,老年人和老年糖尿病患者的足踝系统,并通过三者平衡站立姿态的仿真计算来量化和比较足底软组织属性变化对足踝系统的力学性能的影响,从而加深对足底软组织生物力学作用的认识。

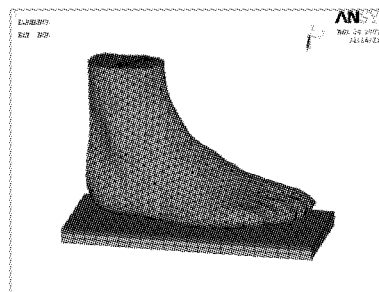
## 1 方法

### 1.1 足部有限元模型的建立

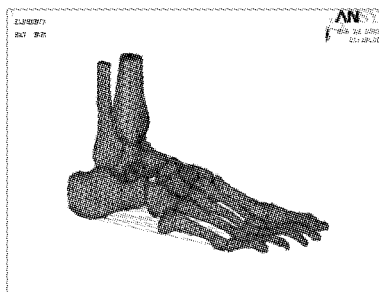
选取正常男性志愿者(26岁,身高172cm,体重62kg),足部无外伤史,X线检查未见异常。对其右脚进行MRI扫描,层距1.5mm,分辨率为256×256。每个骨骼和整个足踝的外轮廓表面点云数据分别从每张MRI图片获取,这些点云数据直接导入ANSYS 9.0(ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA),通过其强大的前处理软件进行三维几何模型重建和有限元网格划分。

整个模型包括了28块骨骼(胫骨和腓骨末端,

距骨,跟骨,舟骨,骰骨,3个楔骨,5个跖骨,2个籽骨和14个趾骨)、外部软组织囊、关节软骨、足底腱膜和23条主要韧带,见图1(a)和(b)。所有的趾关节被骨性地融合,具有大活动度的踝关节使用ANSYS中自动接触定义的surface-to-surface被定义为无摩擦的接触关系,其他跗骨间的微动关节等相互作用关系用软骨属性的实体单元固连接在一起。足底腱膜和23条主要韧带分别使用5条和84条线单元模拟,其相应的附着点根据解剖学数据来确定(Interactive Foot and Ankle II, Primal Pictures Limited, UK)。整个骨组织、外部软组织囊、关节软骨组织使用10节点的Solid 92网格化形成83 267个四面体实体单元,韧带和跖腱膜被定义为只受拉不受压的线单元Link 10。为了仿真静态下双足站立位时足底压力和应力分布,建立一个双层平板来模拟足底与支持平面之间的相互作用。目前这个模型中所有的组织属性都被假设为均匀、各向同性和线弹性的。各种组织的弹性模量、泊松比、摩擦系数和横截面积等依据文献<sup>[6,7]</sup>中的数据如表1所示。



(a)



(b)

图1 足部三维有限元模型 (a)外部软组织囊与平板支撑结构 (b)骨组织、关节软骨、韧带和足底腱膜

Fig.1 The 3D foot FE model of (a) encapsulated soft tissues and plane support, (b) bones, cartilages, ligaments and plantar fascia

## 1.2 足底软组织硬化仿真

以上三维足踝模型的属性定义是基于健康年轻男性志愿者的,由于老年人的足部软组织硬度通常比年轻人的高<sup>[8]</sup>,为了研究老年人足底软组织硬度增大后对足部的力性能学影响,考察老年人弹性模量比年轻人约高 50%<sup>[9]</sup>,在保持其他材料属性不变的情况下,通过增加足底软组织的弹性模量值,将模型中的整体软组织囊的弹性模量从 450 kPa 增大到 700 kPa。

表 1 有限元模型中各种单元类型和材料属性

Tab.1 Material properties and element types of the foot finite element model

模型构件	单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	横截面/mm <sup>2</sup>
骨组织	Solid 92	7 300	0.3	-
软组织	Solid 92	0.45	0.45	-
软骨	Solid 92	1	0.4	-
韧带	Link 10	260	-	18.4
足底腱膜	Link 10	350	-	58.6
支持结构	Brick 185	17 000 上层	0.1	-
		1 000 000 下层		

此外,由于糖尿病患者常常随年龄增大足部问题愈加严重,特别是跟骨下方和跖骨头下方的软组织常发生局部硬化<sup>[10]</sup>,这会大大增加足底发生溃烂的可能性。为了量化跟骨下方和跖骨头下方的软组织局部硬化产生的力学影响,首先提取了第一至第五跖骨头以及足后跟骨下方的软组织,如图 2 所示;在仿真老年人足状态的属性定义基础上,将提取的这部分足底软组织弹性模量从 700 kPa 增加到 1.1 MPa<sup>[7]</sup>,保持其他所有属性不变。

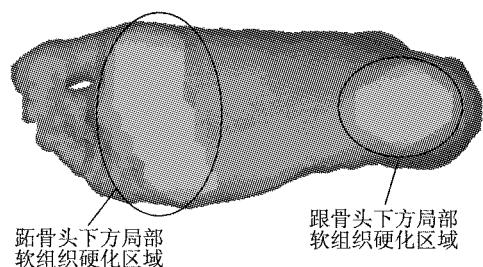


图 2 有限元模型中定义的跖骨和跟骨下方软组织局部硬化区域  
 Fig.2 The local harden region of planar soft tissue beneath metatarsal heads and calcaneus in the FE foot model

## 1.3 模型的边界约束和加载

为了比较在平衡站立时人体足部在三种不同的

足底软组织定义(年轻人,老年人以及跖骨和跟骨下方局部软组织硬化的老年人的)下的相关力学状态,对这 3 个不同属性定义下的足踝模型进行了加载和计算。

当一个 62 kg 的人在双足平衡站立时,平均单侧足承受一半人体体重,约 310 N 的垂直压力。跟腱作用在跟骨向上的力大约是足部承受载荷的 50% ~ 75%<sup>[11]</sup>,此模型中加载了 217 N 的跟腱力,通过 10 个平行、垂直向上的力直接作用在跟骨结节处的 10 个节点上来模拟。为了在有限元模型中实现上述仿真分析,胫骨和腓骨的上端表面在整个分析过程中被全约束;同时,通过调节支撑平板向上垂直位移来模拟足部静止站立,其具体位移值通过监控足底反力在 (310 ± 1) N 范围内作为运算完成的判断依据来确定。此外,支撑平板的上表面和整个足底表面的相互作用定义为接触关系,摩擦系数为 0.6<sup>[12]</sup>。在上述的各种加载和边界条件下,3 个不同属性定义的三维足部有限元模型分别在 ANSYS 求解器中进行了相应的非线性接触问题的静态有限元求解。

## 1.4 足底压力分布测量

采用足底压力分布测量鞋垫 (T&T Medilogic 3.8.10, Medizintechnik GmbH) 对此志愿者在双足平衡站立姿态下进行足底压力分布测量,记录的足底压力分布状况用于和模型预测结果进行比较。

## 2 结果和讨论

基于自然松弛状态下的足部医学核磁共振扫描图片,成功建立了一个健康人体右足的三维有限元模型,并模拟计算了此志愿者双足平衡站立时的力学状态。为了比较和量化老年人足底软组织整体硬化,以及糖尿病人在跟骨和跖骨头下方软组织基础上发生局部硬化对足部生物力学性能的影响,通过改变足底软组织属性定义来仿真计算,得到了以上两种情况下足踝平衡站立时的力学状态。

图 3(a~d)分别显示了此志愿者在平衡站立时的足底压力分布测量值和不同足底软组织属性定义下模型预测的足底压力分布图。由图 3(a)和(b)可见,此模型预测的足底接触压力分布形态与实测的分布基本一致,高接触压力都发生在跟骨和跖骨头下方,且接触压力最大峰值分别是 140 kPa 与 149

kPa,模型预测值略高出6.4%。通过对足底压力分布的比较,基本上可以认为,此有限元模型有效地模拟了平衡站立位时的足踝力学状态。同时,将模型预测的老年人和老年糖尿病患者平衡站立位时的足底压力分布图与图2(b)比较,可以足底接触面积均减少,最大接触压力值也都相应增大,如图2(c)和(d)所示。

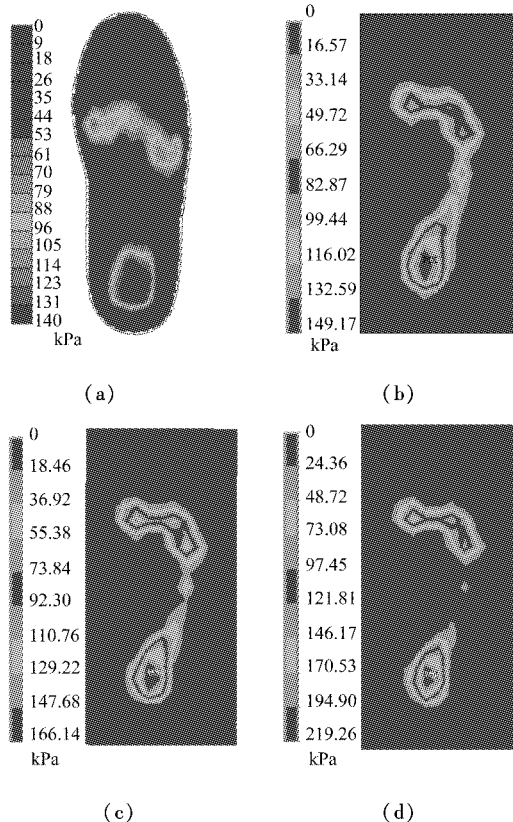


图3 (a)压力测试鞋垫测量的平衡站立时的右足足底接触分布图, (b)、(c)和(d)分别为模型预测的年轻人、老年人足底压力分布图和足底局部软组织硬化的老年糖尿病患者的足底压力分布图

Fig.3 (a)The measured plantar contact pressure distribution. The FE predicted plantar contact pressure distribution of (b) young man, (c)old man and (d) old man with diabetic foot

表2列出了正常年轻足、老年人足和老年糖尿病足3种状态下有限元模型预测的一些力学状态数值。其足底垂直反力均在(310±1)N范围内,故都可以认为是仿真了平衡站立位。由于足底软组织硬度的不同,同样的反力状态下,有限元模型的垂直位移量随着其弹性模量的增加而减小;后足的最大接触压力值由149 kPa增大至166 kPa和219 kPa,前

足的相应值亦从99 kPa增大至135 kPa和170 kPa;模型预测的足底接触面积也由正常的5 719.4 mm<sup>2</sup>分别减小为4 887.2 mm<sup>2</sup>和4 055.4 mm<sup>2</sup>,从而使得足底平均接触压力值由54 kPa增大至63 kPa和77 kPa。可见,足底软组织属性的改变对其站立时的接触状态发生了显著影响,模型的预测结果可认为与文献的结论基本一致(糖尿病足前足第三跖骨峰值是非糖尿病足的1.5~2.3倍<sup>[13]</sup>)。对于内部软组织应力变化,在预测结果中发现,由于普通老年人足底软组织的整体硬化,使得跖骨头下软组织应力有增大的现象,而后跟软组织垫内部的最大等效应力并没有发生明显变化;然而老年糖尿病患者的跟骨和跖骨头下方软组织局部硬化后,使得其内部的应力大/大增加,其最大等效应力值(193 kPa和153 kPa)比普通老年人的相应值(152 kPa和108 kPa)分别增加了约27.0%和41.7%,这对于糖尿病患者来说是比较危险的、因为足底软组织内部的应力增大通常是诱发溃烂的重要因素<sup>[13]</sup>;所以对于糖尿病患者有必要使用专门的鞋垫或护具等以增加足底受力接触面积,分散和减小内部软组织的应力,从而降低发生溃烂的可能性。

表2 不同软组织情况下的足踝有限元模型预测值  
Tab.2 The FE predicted values in the foot with different elastic modulus of plantar soft tissue

	年轻人	老年人	老年糖尿病患者
足底垂直反力/N	310.15	309.74	310.24
足底软组织垂直压缩量/mm	6.40	5.24	4.70
后足最大接触压力/kPa	149	166	219
前足最大接触压力/kPa	99	135	170
足底接触面积/mm <sup>2</sup>	5 719.4	4 887.2	4 055.4
平均接触压力/kPa	54	63	77
后跟软组织垫最大等效应力/kPa	157	152	193
跖骨头向下部分软组织的最大等效应力/kPa	81	108	153
跖骨骨干上最大等效应力/MPa	6.081	7.104	7.696
足底腱膜拉力/N	71.40	70.46	73.94
足底长韧带拉力/N	75.76	72.26	72.83

由表2还可见,足底软组织的整体和局部硬化

还引起了跖骨骨干上的最大等效应力的增加;而骨质量问题(如骨质疏松情况),在老年人中通常比年轻人更为明显,在糖尿病人群中骨质量也较正常人更差<sup>[14]</sup>,这是导致骨折的重要原因。经比较,跖骨骨干的最大等效应力也因为软组织的硬化而增大,从而进一步增加了发生骨折的风险,这一点值得关注。此外,足底腱膜和足底长韧带的受力状态受足底软组织属性变化的影响不明显,当然这是在其他所有组织属性都不变的前提下。本文正是在假设其它所有组织属性都不变的前提下,主要研究软组织硬度改变所引起的力学状态的变化,且该有限元模型忽略了足踝内部的关节软组织囊、腱鞘、趾间韧带以及内在肌的影响,加入外在肌是因为主要考虑了站立位时跟腱力的作用,这些简化和假设需要在以后的仿真模型中不断改进和提高。

### 3 结论

通过三维足踝有限元模型对人体平衡站立位的仿真结果发现,足底软组织的整体硬化以及跖骨头和跟骨下方的局部硬化,均会增加前足和后足受力区域的接触压力以及内部组织应力值,增加老年糖尿病患者发生足底软组织溃烂的可能性。这种状况十分危险,需要引起患者和临床医生特别注意。老年人和糖尿病人都应该注意足部环境的舒适,养成定期检查足部的习惯,有必要使用专门的鞋垫或者护具等以增加足底受力接触面积,分散和减小内部软组织的应力,从而避免足底溃烂的发生。同时,由于仿真是在有一定简化和假设的有限元模型下进行的,也许未能考虑到因为年龄变化或者病理影响所造成的骨质疏松、韧带属性变化等影响,这些不足可能会引起结果的偏差,需要结合临床治疗中的实际情况加以理解和分析。

### 参考文献:

[1] 夏灵,Rajab,等. 基于图像处理的个性化建模:从医学扫描到高精度计算模型的转换[J]. 医用生物力学,2008,23(1): 31-

36.  
[2] 张明,张德文,等. 足部三维有限元建模方法及其生物力学应用[J]. 医用生物力学,2007,4: 339-344.  
[3] 陶凯,王冬梅,王成焘,等. 基于三维有限元静态分析的人体足部生物力学研究[J]. 中国生物医学工程学报,2007,26(5): 763-766.  
[4] Cheung JTM, Zhang M, An KN. Effects of plantar fascia stiffness on the biomechanical responses of the ankle-foot complex[J]. *Clinical Biomechanics*, 2004, 19: 839-846.  
[5] Scott G, Menz H, Newcombe L. Age-related differences in foot structure and function [J]. *Gait & Posture*, 2007, 26(1): 68-75.  
[6] Whitney KA. Foot deformities, biomechanical and pathomechanical changes associated with aging including orthotic consideration -Part II (M). *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*, 2003, 20: 511-526.  
[7] Zheng YP, Choi YKC, Wong K, et al. Biomechanical assessment of plantar foot tissue in diabetic patients using an ultrasound indentation system[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2000, 26(3): 451-456.  
[8] McLellan K, Petrofsky J S. The effects of skin moisture and subcutaneous fat thickness on the ability of the skin to dissipate heat in young and old subjects, with and without diabetes, at three environmental room temperatures [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2008,2:165-172.  
[9] Hsu CC, Tsai WC, Chen CP, et al. Effects of aging on the plantar soft tissue properties under the metatarsal heads at different impact velocities[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2005, 31(10): 1423-1429.  
[10] Charanya G, Patil KM, et al. Standing foot pressure image analysis for variations in foot sole soft tissue properties and levels of diabetic neuropathy [J]. *ITBM-RBM*, 2004, 25(1): 23-33.  
[11] Cheung JTM, Zhang M., An KN. Effect of Achilles tendon loading on plantar fascia tension in the standing foot[J]. *Clinical Biomechanics*, 2006, 21: 194-203.  
[12] Zhang M, Mak AFT. In vivo skin friction properties [J]. *Prosthetics and Orthotics International*, 1999, 23: 135-141.  
[13] Gefen A. Plantar soft tissue loading under the medial metatarsals in the standing diabetic foot [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2003, 25: 491-499.  
[14] 张立苹,黄雁翔,张洁. 糖尿病与骨质疏松的探讨[J]. 中国骨伤, 2000,13(7): 414.