

文章编号: 1004-7220(2023)02-0303-07

跟骨骨囊肿病灶范围与病理性骨折的生物力学关系分析

李鹏飞^{1,2}, 徐子环^{1,2}, 王永钦^{1,2}, 苏志豪^{1,2}, 孙万驹², 倪明^{1,2,3}

(1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 上海市浦东新区人民医院 骨科, 上海 201299;
3. 上海交通大学医学院附属瑞金医院 科技发展处, 上海 200025)

摘要:目的 探究跟骨孤立性骨囊肿(solitary bone cyst, SBC)病灶范围与病理性骨折的关系,为SBC治疗提供参考。方法 基于CT图像建立足踝三维有限元模型,在病灶好发区构建4种梯度球形骨缺损模型,模拟不同的SBC病灶范围,分析步态周期不同时相跟骨的生物力学特征。结果 在步态周期下,随着SBC范围增加,跟骨位移无明显变化,但峰值应力逐渐增大。当SBC直径超过跟骨宽度的75%时,跟骨沟和病灶下方皮质区域应力增加到正常跟骨的1.48倍和7.74倍。结论 当SBC直径超过跟骨宽度的75%时,应力性骨折风险增大,可早期手术干预。跟骨沟和SBC下方骨皮质是应力集中区,可作为评估应力性骨折的重点区域。

关键词: 孤立性骨囊肿; 跟骨; 病理性骨折; 步态时相; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.02.015

Analysis on Biomechanical Relationship Between Calcaneal Cyst Lesion Size and Pathological Fracture

LI Pengfei^{1,2}, XU Zihuan^{1,2}, WANG Yongqin^{1,2}, SU Zhihao^{1,2}, SUN Wanju², NI Ming^{1,2,3}

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Orthopedics, Shanghai Pudong New Area People's Hospital, Shanghai 201299, China; 3. Department of Science Development, Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China)

Abstract: Objective To investigate the relationship between lesion size of solitary bone cyst (SBC) and pathological fracture of calcaneus, so as to provide references for the treatment of SBC. **Methods** The three-dimensional (3D) finite element model of foot and ankle was established based on CT images. Four models with gradient spherical bone defects were constructed in the focal area to simulate different SBC lesion sizes, and the biomechanical characteristics of calcaneus in different gait phases were analyzed. **Results** With the increasement of SBC size, the kinematics of calcaneus did not change significantly, but the peak stress of calcaneus increased gradually. When the SBC size exceeded 75% of the calcaneal width, the stress in calcaneal sulcus and cortical bone below SBC increased by 1.48 times and 7.74 times, respectively. **Conclusions** The risk of pathological fracture increases when the SBC diameter exceeds 75% of the calcaneal width, and early surgical intervention should be recommended. The calcaneal sulcus and the cortex bone below SBC are stress concentration regions and can be used as important areas to evaluate pathological fractures.

Key words: solitary bone cyst (SBC); calcaneus; pathological fracture; gait phase; finite element analysis

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-05-27

基金项目: 上海市科委港澳合作项目(21410760200), 生物医药科技支撑项目(22S31900700), 上海市浦东新区新兴交叉学科-数字骨科项目(PWX2020-08)

通信作者: 倪明, 副主任医师, 硕士生导师, E-mail: gendianqing@163.com

跟骨位于人体足部后侧,是足内外侧纵弓的起点,跟骨的正常形态和功能是人类直立行走和跑跳运动的保证。骨肿瘤可破坏跟骨结构,降低骨骼强度,诱发病理性骨折。孤立性骨囊肿(solitary bone cyst, SBC),也称为单房性骨囊肿和单纯性骨囊肿,是跟骨常见的良性肿瘤,发生率约占病例总数的4%~6%^[1]。手术是治疗跟骨 SBC 的主要方案,早期手术可以避免病理性骨折,降低治疗难度,但目前对跟骨 SBC 的手术指征存在一定争议^[2]。Pogoda 等^[3]认为,如果 SBC 病灶横径与跟骨宽度相当,长度超过跟骨长度 30%,即需要手术治疗。Saraph 等^[4]认为,跟骨 SBC 主要位于中立三角区,正常运动下受力较小,病灶大小不应作为手术治疗的依据。生物力学有限元分析法可以对人体运动时跟骨的受力特征进行研究,明确 SBC 病灶尺寸对跟骨强度的影响,评估病理性骨折的风险。本文建立人体站立及行走状态下的足踝部有限元模型,分析 SBC 病灶范围与跟骨病理性骨折的关系,为 SBC 治疗提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 足踝几何模型

采用 1 名男性志愿者(年龄 30 岁,身高 172 cm,体重 60 kg)足踝计算机断层(computed tomography, CT)扫描图像信息,采集自上海市浦东新区人民医院,设备为美国 GE 公司 CT750 HD 和德国 Siemens 公司磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)图像采集设备 Skyra 3.0。扫描部位为左足,层厚 0.5 mm,层距 1 mm。志愿者足部无畸形、外伤及手术史。志愿者在扫描前已被告知相关信息,并签订知情同意书。本研究通过了上海市浦东新区人民医院伦理委员会的伦理审批。

所建模型包括足部 30 块骨骼(胫骨、腓骨、距骨、跟骨、骰骨、舟骨、3 个楔骨、5 个跖骨、14 个趾骨、2 个籽骨)(见图 1)。模型中包括胫腓前后韧带、跟腓韧带、距腓后韧带、距跟前后韧带、距舟韧带、三角韧带、跗跖骨和跖间韧带、足底长韧带和足底筋膜等。

将 CT 图像以 DICOM 格式导入 Mimics 21.0 (Materialise 公司,比利时)重建足部骨骼几何结构以及外包软组织结构,经 Geomagic Warp 2017

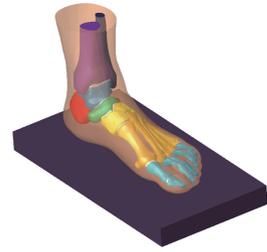


图 1 足踝几何模型

Fig. 1 Geometric model of the foot ankle

(Geomagic 公司,美国)进行曲面光滑以及尖锐三角面优化,构建 NUBRS 曲面。不同骨骼间采用软骨关节连接,使用 SolidWorks 2021 (Dassault Systemes 公司,美国)构建。使用 HyperMesh 2021 (Altair 公司,美国)有限元前处理软件进行网格划分以及足底筋膜和韧带建模。

跟骨 SBC 多见于跟骨中立三角区,形态为不规则球形或类三角体结构^[5-7]。考虑到在有限元分析中不规则形状尤其是尖角处极易造成应力集中,会很大程度上影响计算结果。为尽可能准确模拟 SBC 特征,使实验结果更具普遍性,选择建立球形病灶模型。选取 SBC 病灶多发区处冠状面近似跟骨宽度(25.02 mm)的 25%、50%、75% 以及近似 100% 建立球型 SBC 模型(见图 2)。球直径分别为 6、12、18、24 mm,约占跟骨长度(72.21 mm)的 8.31%、16.62%、24.93%、33.24%。体积分别为 113.04、904.32、3 052.08、7 234.56 mm³,约占跟骨总体积(52 971.53 mm³)的 0.21%、1.71%、5.76%、13.66%。

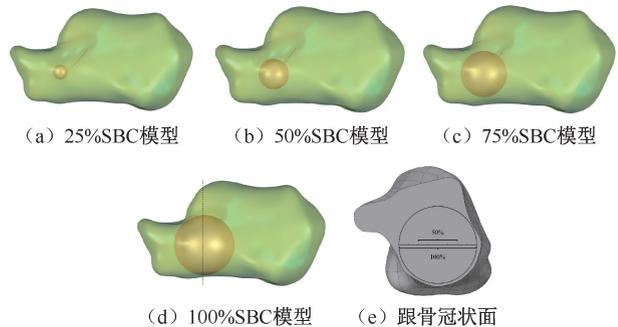


图 2 SBC 模型

Fig. 2 Solitary bone cyst (SBC) model (a) 25% SBC model, (b) 50% SBC model, (c) 75% SBC model, (d) 100% SBC model, (e) Coronal plane of calcaneus

1.2 材料属性及网格重建

将骨骼、软骨、足底筋膜及韧带假设为均匀、各

向同性、线弹性材料,外包软组织假设为 Mooney-Rivlin 模型的超弹性材料。外包软组织 C_{10} 、 C_{01} 、 C_{20} 、 C_{11} 、 C_{02} 、 D_1 、 D_2 分别为 0.085、-0.058、0.039、-0.023、0.009、3.652、0^[8-9]。材料参数设定见表 1。

表 1 材料参数^[8-10]Tab. 1 Material parameters^[8-10]

材料	E/MPa	ν	横截面积/ mm^2
骨骼	7 300	0.30	—
软骨	10	0.45	—
韧带	260	—	18.4
足底筋膜	350	—	58.6
地面支撑物	17 000	0.10	—

1.3 网格重建及模型敛散性分析

骨骼、软骨及外包软组织使用 4 节点三维应力四面体单元 (C3D4) 划分网格。足底筋膜和韧带假定仅承受拉力,根据足部解剖学采用 2 节点 Truss 桁架单元 (T3D2) 构建,选择无压缩,仅产生张力,并指定截面面积。使用 8 节点缩减积分六面体网格 (C3D8R) 划分地面支撑物。试验通过减小约 10% 的网格尺寸进行模型敛散性分析,足底压力峰值、跟骨峰值应力与距舟骨关节应力峰值偏差为 3.12%、0.56%、3.57%。

最终得到包含正常跟骨的足踝模型,共计 135 026 个节点,816 304 个实体单元,194 个 Truss 桁架单元。

1.4 边界条件与加载

当人体静态站立时,自身体重产生的 600 N 垂直压力被双足共同分担,根据载荷与支反力的等效互换性原理,单足承受 300 N 垂直地板向上的反向支撑力。站立时,小腿三头肌群收缩会产生对跟骨的拉力即跟腱力,数值为足部承重的 75%^[11]。在跟骨跟腱止点处施加垂直向上 225 N 拉力模拟跟腱力。本文仅考虑准静态加载,均采用隐式加载方式求解。选取步态周期支撑相 3 个典型时相,即着地期、支撑中期和推离期代表整个人体行走步态^[11-13] (见图 3),3 个时相的地面支反力分别为 660、570、690 N,相当于体重的 110%、95% 和 115%^[8,14];相应状态下的跟腱力分别为 450、510、1 020 N^[15-16]。

将 20 组模型导入 ABAQUS 2020 (Dassault Systemes 公司,美国)中,边界条件设置模型顶部完全固定,足底软组织与地面支撑物之间定义为带有

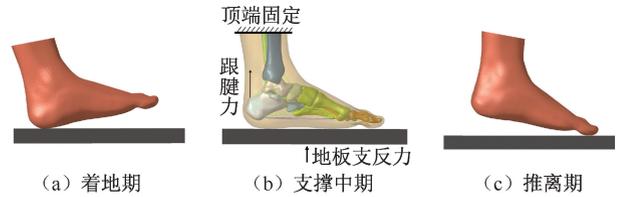


图 3 步态时相及模型边界条件设置

Fig. 3 Gait phases and setting of model boundary condition

(a) Heel-strike phase, (b) Midstance phase, (c) Push-off phase

摩擦的硬接触,摩擦因数为 0.6^[9,17]。

1.5 模型验证

通过 TPScan 足底压力系统 (Biomecha 公司,韩国)测量志愿者静态站立状态的足底压力,并将结果与有限元分析的足底压力结果进行对比,以验证模型的准确性。结果表明,TPScan 测量与有限元分析得到的足底压力峰值分别为 253、243 kPa,两者相差 3.95%,足底压力均集中于足跟和第 2 趾骨头。TPScan 测量和有限元分析计算得到的足底与地面接触面积分别为 56.84、59.06 cm^2 ,后者计算值略高于前者测量值 3.90%。另外,有限元计算得到内侧楔骨下降高度为 7.9 mm,与文献[18]报道的 7.3~9.0 mm 一致。本文认为,所建足踝有限元模型准确度较高,可用于仿真分析。

2 结果

2.1 位移

在静态站立和行走状态下,正常跟骨与跟骨 SBC 模型在前后 (anterior-posterior, AP) 与内外 (medial-lateral, ML) 方向位移无明显差异。对于跟骨 SBC 模型,随着 SBC 体积增加,AP 与 ML 的位移略有增大,但幅度较小 (见表 2)。

2.2 应力分布

等效应力 (von Mises stress) 是研究组织负荷的一种指标,在有限元分析中应用广泛^[12,19-22]。等效应力综合考虑了所有的主应力,可对线性材料提供最有价值的判断标准,能够预测总体的部位痛症^[23]。

正常跟骨和跟骨 SBC 模型在行走时承受的应力均高于站立状态,应力主要集中在载距突、跟骨沟、跟骨结节后上缘和后下缘,跟骨 SBC 模型在病灶下方骨皮质区域也有明显应力集中 (见图 4)。

表2 跟骨位移

Tab. 2 Calcaneal displacement

步态时期	前后位移/mm					内外位移/mm				
	正常	25%	50%	75%	100%	正常	25%	50%	75%	100%
	跟骨	SBC	SBC	SBC	SBC	跟骨	SBC	SBC	SBC	SBC
静态站立期	1.573	1.575	1.578	1.579	1.603	0.598	0.597	0.602	0.605	0.601
着地期	2.713	2.720	2.717	2.721	2.728	0.362	0.368	0.365	0.371	0.373
支撑中期	2.124	2.126	2.120	2.128	2.201	0.827	0.828	0.825	0.830	0.835
推离期	3.200	3.202	3.210	3.208	3.223	0.547	0.545	0.541	0.549	0.561

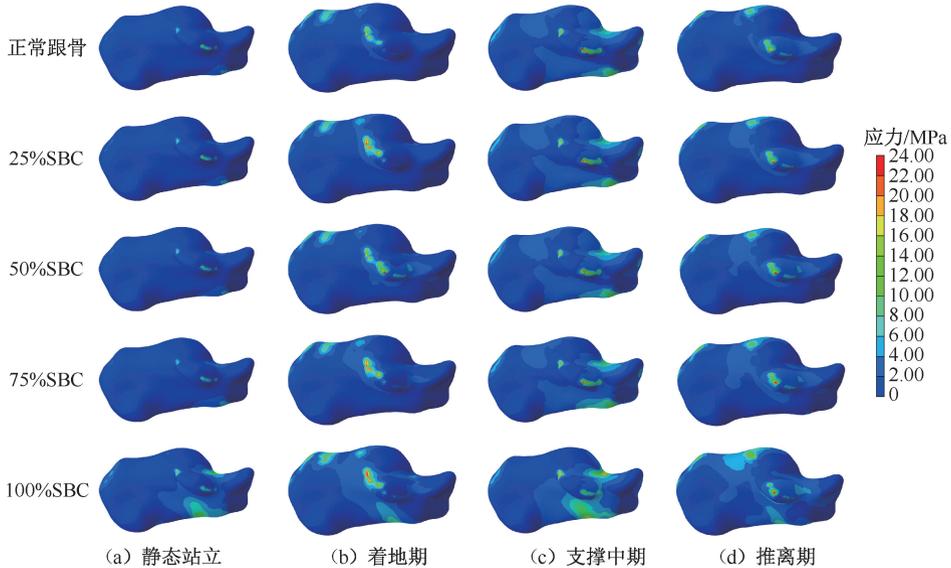


图4 不同步态时相跟骨应力分布

Fig. 4 Distributions of calcaneal stress at different gait phases (a) Static standing, (b) Heel-strike phase, (c) Midstance phase, (d) Push-off phase

跟骨 SBC 模型在站立和行走时承受的压力均高于正常跟骨。正常跟骨在静态站立期、着地期、支撑中期与推离期的峰值应力分别为 9.67、17.15、24.31、18.64 MPa。随着 SBC 体积的增大,跟骨峰值应力相应增大。当 SBC 病灶直径为跟骨宽度的 25% 时,静态站立期、着地期、支撑中期与推离期的峰值应力分别为 10.38、18.38、26.57、19.53 MPa;当直径增大到跟骨宽度的 100% 时,峰值应力增加至 12.55、25.65、35.11、27.71 MPa,分别增大了 0.21 倍、0.40 倍、0.32 倍和 0.42 倍[见图 5(a)]。

对于跟骨 SBC 模型,跟骨沟和病灶下方骨皮质是应力变化最明显的区域,尤其是在病灶范围较大的情况下。在跟骨沟处,当 SBC 直径从跟骨宽度的 25% 增加至 75% 时,峰值应力增大了 0.11 倍;从 75% 增加至 100% 时,峰值应力增大了 0.75 倍,应力

增加显著[见图 5(b)];在病灶下方跟骨皮质处,当 SBC 直径从跟骨宽度的 25% 增加至 75% 时,峰值应力增大了 0.46 倍;但从 75% 增加至 100% 时,峰值应力增大了 4.22 倍[见图 5(c)]。

3 讨论

本文通过有限元方法对跟骨 SBC 病灶范围与生物力学特征进行分析。结果表明,病灶范围是影响跟骨结构强度的重要因素。跟骨 SBC 在人体运动时承受的应力超过正常跟骨,且与 SBC 范围呈正相关。当 SBC 直径由跟骨宽度的 75% 增加至 100% 时,跟骨沟和 SBC 病灶下方骨皮质的应力急剧增加至正常跟骨的 1.48 倍和 7.74 倍。跟骨局部区域峰值应力的急剧变化可导致病理性骨折,可作为 SBC 手术治疗的重要依据。

跟骨 SBC 多见于 30 岁以上中年患者,男女发

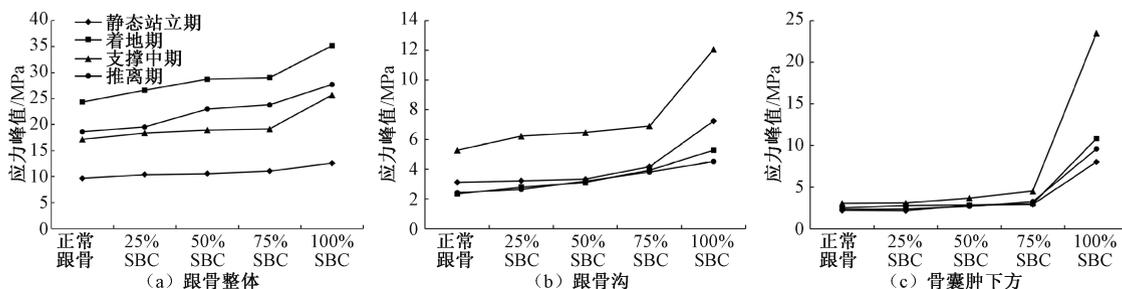


图5 各模型不同区域应力峰值

Fig. 5 Peak stress in different regions of each model (a) Overall calcaneus, (b) Calcaneal sulcus, (c) Below the solitary bone cyst

病率约为 2:1, 一般为单侧发病, 双侧罕见^[6,24-25]。绝大部分跟骨 SBC 无明显症状, 一般是在体检或其他足踝疾病就诊时被发现^[6,26-28]。SBC 的发病机制目前尚不明确, 有动脉萎缩、静脉回流障碍、脂肪瘤变性以及骨质吸收等多种假说^[28]。也有研究认为, SBC 的发生与骨组织受力有关, 多发生于承重骨内受力较小的中间区域, 如股骨和跟骨的中立三角区^[3,29]。从 X 线片看, SBC 病灶主要位于跟骨中立三角区, 冠状面上可在中间或偏一侧, 向后侵犯跟骨结节, 向前延伸至跟骨前突。微小的病理性骨折在 X 线片上难以显示, 往往需要 CT 或 MRI 检查。CT 图像上, SBC 呈不规则类圆形, 病灶密度与水接近, 其内无坏死或松质骨等结构, 周围可见明显骨硬化带。MRI 图像上, SBC 在 T1 为低信号, T2 为高信号 (比脂肪更亮), 边缘有增强影^[3,30-33]。

跟骨 SBC 病灶内主要是血性液体, 病灶扩张可导致骨质变薄和强度下降。由于 SBC 位于中立三角区, 压应力和拉应力均较小, 故 SBC 范围较小时, 对跟骨强度的影响不大。但如果 SBC 范围超过中立三角区, 侵犯跟骨结节, 有可能诱发病理性骨折。Pogoda 等^[3]通过对 47 例 SBC 患者的回顾性分析, 发现当 SBC 病灶横径与跟骨宽度相当、纵径超过跟骨长度 30% 时, 病理性骨折风险较大, 建议手术治疗。Symeonides 等^[34]通过对 10 例 SBC 患者的临床治疗和实验研究, 发现跟骨强度不会因 SBC 存在而显著降低, 故不需要手术干预。本文结果表明, 当 SBC 病灶直径超过跟骨宽度的 75% 时 (约占跟骨长度 33%), 跟骨在行走时承受的应力将急剧增加, 存在病理性骨折的风险。因此, SBC 病灶范围可以作为手术治疗的重要参数, 当直径超过跟骨宽度的 75% (长度 33%), 即可以早期手术干预。

本文发现, 载距突、跟骨沟和病灶下方骨皮质是跟骨 SBC 应力最集中的区域, 载距突由于骨质密, 骨折相对罕见。跟骨沟和 SBC 下方骨皮质在运动时应力明显增加, 这与既往临床报道中, 跟骨 SBC 病理性骨折的区域高度一致^[3]。从跟骨解剖结构看, 跟骨由一层紧密的皮质骨包裹丰富的海绵状松质骨组成, 内侧骨皮质厚度超过外侧。跟骨沟位于后关节面前缘, 骨质相对薄弱, 下方为中立三角区, 缺乏骨质支撑, 是跟骨骨折最先发生的区域。Ni 等^[35]通过骨折地图技术对跟骨骨折特征进行分析, 发现跟骨骨折线首先沿跟骨沟横向延伸, 再纵向累及后关节面和跟骨结节。因此, 对跟骨 SBC 患者进行影像学检查时, 需重点观察跟骨沟和病灶下方骨皮质。当 SBC 病灶靠近皮质骨或存在骨小梁形态变化时, 需评估病理性骨折风险。

手术是治疗跟骨 SBC 的主要方法, 包括开放手术或关节镜监视下病灶刮除+植骨术, 必要时可以辅助内固定^[7]。植骨材料包括自体松质骨、异体骨和人工骨等。总体上看, 跟骨 SBC 手术治疗效果较好。Innami 等^[36]对 13 例跟骨 SBC 运动员患者采用内镜病灶刮除+磷酸钙骨水泥充填治疗, 术后囊肿无复发且未见病理性骨折, 8 周后所有患者恢复运动功能。液体人工骨可以随病灶形态自行填充整个缺损区, 支撑跟骨沟和病灶下方的骨皮质, 是目前最常用的植骨材料。对于已发生病理性骨折的 SBC, 使用磷酸钙骨水泥填充前需要测量病灶体积, 以免过量填充造成骨水泥渗漏, 影响足部运动功能。

本研究结果对于跟骨创伤性骨缺损的治疗也有一定指导意义。跟骨骨折时由于距骨体的挤压, 松质骨会被压缩。手术治疗恢复跟骨的外形后, 会

遗留范围大小不一的骨缺损。对于骨缺损是否需要修复,目前也存在不一致的观点。根据一项对荷兰骨科医师的临床调查,约20%的医师会在跟骨骨折手术治疗中采用植骨,42%的医师会视骨缺损程度决定是否植骨,而38%的医师则拒绝植骨^[37]。Zheng等^[38]对跟骨骨折骨缺损治疗的资料进行Meta分析,发现植骨患者术后足部功能评分略好,其余方面无差异。本文认为,如果跟骨缺损位于中立三角区,且缺损范围超过跟骨宽度的75%和长度的33%,则可以选择性植骨。

本研究的局限性如下:①所建模型只考虑了骨骼外包软组织,并将它简化为单一均质材料;韧带和足底筋膜简化为桁架单元且韧带和筋膜数量上仅依靠经验,并假设具有相同的横截面积;未考虑足部肌肉以及内在肌的影响,且忽略足底软组织硬化的情况;跟骨模型将其简化为单一均质,未考虑皮质骨和松质骨的影响。但根据以往足部有限元分析结果可知,将皮质骨视为线弹性、各向同性材料对结果没有较大影响^[10,12,39];②模型只模拟了步态周期中的几个阶段,完整模拟步态周期有助于更好理解跟骨的应力变化;③将SBC病灶简化为球形,与真实形态存在一定差异,但SBC病灶通常无尖处或局部明显凸起,不会造成应力集中。因此,从病灶范围与应力分布的关系看,结果并不会太大的差异。

4 结论

跟骨SBC病灶范围是影响跟骨结构强度的重要因素。随着跟骨SBC范围的增加,跟骨在人体运动时承受的应力逐渐增大;当SBC病灶横径超过跟骨宽度的75%时,跟骨沟和病灶下方骨皮质的应力显著增大,病理性骨折风险增大,建议早期手术干预。跟骨沟和病灶下方骨皮质是跟骨SBC模型的应力集中区,可作为评估病理性骨折的重点区域。

参考文献:

[1] KILGORE WB, PARRISH WM. Calcaneal tumors and tumor-like conditions [J]. *Foot Ankle Clin*, 2005, 10(3): 541-565.
[2] DONALDSON S, WRIGHT JG. Recent developments in treatment for simple bone cysts [J]. *Curr Opin Pediatr*, 2011, 23(1): 73-77.

[3] POGODA P, PRIEMEL M, LINHART W, *et al.* Clinical relevance of calcaneal bone cysts: A study of 50 cysts in 47 patients [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2004(424): 202-210.
[4] SARAPH V, ZWICK EB, MAIZEN C, *et al.* Treatment of unicameral calcaneal bone cysts in children: Review of literature and results using a cannulated screw for continuous decompression of the cyst [J]. *J Pediatr Orthop*, 2004, 24(5): 568-573.
[5] YAN LT, ZONG JW, CHU J, *et al.* Primary tumours of the calcaneus [J]. *Oncol Lett*, 2018, 15(6): 8901-8914.
[6] POLAT O, SAĞLIK Y, ADIGÜZEL HE, *et al.* Our clinical experience on calcaneal bone cysts: 36 cysts in 33 patients [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2009, 129(11): 1489-1494.
[7] YILDIRIM C, AKMAZ I, SAHIN O, *et al.* Simple calcaneal bone cysts: A pilot study comparing open versus endoscopic curettage and grafting [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2011, 93(12): 1626-1631.
[8] BULAQI HA, MOUSAVI MASHHADI M, SAFARI H, *et al.* Dynamic nature of abutment screw retightening: Finite element study of the effect of retightening on the settling effect [J]. *J Prosthet Dent*, 2015, 113(5): 412-419.
[9] WONG DWC, WANG Y, ZHANG M, *et al.* Functional restoration and risk of non-union of the first metatarsocuneiform arthrodesis for hallux valgus: A finite element approach [J]. *J Biomech*, 2015, 48(12): 3142-3148.
[10] CHEN CH, HUNG C, HSU YC, *et al.* Biomechanical evaluation of reconstruction plates with locking, nonlocking, and hybrid screws configurations in calcaneal fracture: A finite element model study [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2017, 55(10): 1799-1807.
[11] CHEUNG JT, ZHANG M, AN KN. Effect of Achilles tendon loading on plantar fascia tension in the standing foot [J]. *Clin Biomech*, 2006, 21(2): 194-203.
[12] WANG Y, LI Z, WONG DWC, *et al.* Finite element analysis of biomechanical effects of total ankle arthroplasty on the foot [J]. *J Orthop Translat*, 2018, 12: 55-65.
[13] WONG DWC, ZHANG M, YU J, *et al.* Biomechanics of first ray hypermobility: An investigation on joint force during walking using finite element analysis [J]. *Med Eng Phys*, 2014, 36(11): 1388-1393.
[14] YU J, WONG DWC, ZHANG H, *et al.* The influence of high-heeled shoes on strain and tension force of the anterior talofibular ligament and plantar fascia during balanced standing and walking [J]. *Med Eng Phys*, 2016, 38(10): 1152-1156.
[15] ARNOLD EM, WARD SR, LIEBER RL, *et al.* A model of

- the lower limb for analysis of human movement [J]. *Ann Biomed Eng*, 2010, 38(2): 269-279.
- [16] EICHINGER M, BRUNNER A, STOFFERIN H, et al. Screw tip augmentation leads to improved primary stability in the minimally invasive treatment of displaced intra-articular fractures of the calcaneus: A biomechanical study [J]. *Int Orthop*, 2019, 43(9): 2175-2181.
- [17] ZHANG M, MAK AF. *In vivo* friction properties of human skin [J]. *Prosthet Orthot Int*, 1999, 23(2): 135-141.
- [18] POTTER MQ, NUNLEY JA. Long-term functional outcomes after operative treatment for intra-articular fractures of the calcaneus [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2009, 91(8): 1854-1860.
- [19] 李鹏祥, 赵改平, 夏费一, 等. 膝关节前交叉韧带断裂单侧置换生物力学特性的有限元分析 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(1): 70-76.
LI PX, ZHAO GP, XIA FY, et al. Finite element analysis on biomechanical properties of unicompartamental knee arthroplasty in ACL fracture of the knee joint [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(1): 70-76.
- [20] 缪伟, 施建东, 陆爱清, 等. 新型关节突钉板系统联合单侧椎弓根螺钉固定的生物力学研究 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 201-207.
MIAO W, SHI JD, LU AQ, et al. Biomechanical study of novel articular process fixation system combined with unilateral pedicle screw fixation [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 201-207.
- [21] 章浩伟, 吕琳, 刘颖, 等. 两点固定和三点固定治疗跟骨 Sanders III型骨折的生物力学比较 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(1): 55-61.
ZHANG HW, LV L, LIU Y, et al. Biomechanical comparison of two-point and three-point fixation for treating sanders III calcaneal fracture [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(1): 55-61.
- [22] ZHANG S, WANG K, ZHU R, et al. Penguin suit and fetal position finite element model to prevent low back pain in spaceflight [J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2021, 92(5): 312-318.
- [23] DOBLARÉ M, GARCA JM, GÓMEZ M. Modelling bone tissue fracture and healing: A review [J]. *Eng Fract Mech*, 2004, 71(13-14): 1809-1840.
- [24] DEVENTER N, DEVENTER N, GOSHEGER G, et al. Current strategies for the treatment of solitary and aneurysmal bone cysts: A review of the literature [J]. *J Bone Oncol*, 2021, 30: 100384.
- [25] CSIZY M, BUCKLEY RE, FENNELL C. Benign calcaneal bone cyst and pathologic fracture—Surgical treatment with injectable calcium-phosphate bone cement (Norian): A case report [J]. *Foot Ankle Int*, 2001, 22(6): 507-510.
- [26] HANNA SJ, DASIC D, FLOYD A. Simple bone cysts of the calcaneus: A report of five cases and a review of the literature [J]. *Foot Ankle Int*, 2004, 25(9): 680-684.
- [27] MALIK A, DEB P, MANI NS, et al. Aneurysmal bone cyst of the calcaneus: An expansile locally destructive lesion [J]. *J Cancer Res Ther*, 2010, 6(4): 570-572.
- [28] TAKADA J, HOSHI M, OEBISU N, et al. A comparative study of clinicopathological features between simple bone cysts of the calcaneus and the long bone [J]. *Foot Ankle Int*, 2014, 35(4): 374-382.
- [29] HOSHI M, IWAI T, OEBISU N, et al. Pathological fracture of a solitary bone cyst in the calcaneus: A case series and literature review [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, doi: 10.1007/s00402-021-04202-6.
- [30] 徐黎, 屈辉. 原发动脉瘤样骨囊肿的X线平片, CT和MRI表现与诊断价值 [J]. *中国医学影像技术*, 2007, 23(8): 1224-1228.
- [31] 陈凯, 刘军泉, 袁君君. 跟骨肿瘤及肿瘤样病变的影像学诊断价值 [J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2011, 18(17): 1395-1397.
- [32] TEMPLE EW, PRUSA RD. Calcaneal bone tumors [J]. *Clin Podiatr Med Surg*, 2021, 38(2): 227-233.
- [33] AZZOPARDI C, PATEL A, JAMES S, et al. A radiological diagnostic approach to tumours and tumour-like lesions of the calcaneus [J]. *Br J Radiol*, 2021, 94(1127): 20210330.
- [34] SYMEONIDES PP, ECONOMOU CJ, Papadimitriou J. Solitary bone cyst of the calcaneus [J]. *Int Surg*, 1977, 62(1): 24-26.
- [35] NI M, LV ML, SUN W, et al. Fracture mapping of complex intra-articular calcaneal fractures [J]. *Ann Transl Med*, 2021, 9(4): 333.
- [36] INNAMI K, TAKAO M, MIYAMOTO W, et al. Endoscopic surgery for young athletes with symptomatic unicameral bone cyst of the calcaneus [J]. *Am J Sports Med*, 2011, 39(3): 575-581.
- [37] SCHEPERS T, VAN LIESHOUT EM, VAN GINHOVEN TM, et al. Current concepts in the treatment of intra-articular calcaneal fractures: Results of a nationwide survey [J]. *Int Orthop*, 2008, 32(5): 711-715.
- [38] ZHENG W, XIE L, XIE H, et al. With versus without bone grafts for operative treatment of displaced intra-articular calcaneal fractures: A meta-analysis [J]. *Int J Surg*, 2018, 59: 36-47.
- [39] WANG Y, LI Z, ZHANG M. Biomechanical study of tarsometatarsal joint fusion using finite element analysis [J]. *Med Eng Phys*, 2014, 36(11): 1394-1400.