

The Progress of Three-dimensional Finite Element Analysis in the Study of Calcaneal Fractures

Yi Zhang¹ Pei Wang^{2*}

1. Chengde Medical University, Chengde, Hebei, 067000, China

2. Department of Hand and Foot Surgery, Affiliated Hospital of Chengde Medical University, Chengde, Hebei, 067000, China

Abstract

With the rapid development of computer technology, three-dimensional finite element analysis method has become one of the important methods of biomechanics research. Due to the shortage of sources of cadaveric specimens, repeated studies under different loading conditions cannot be carried out, and the advantages of three-dimensional finite element analysis have become increasingly prominent. This paper reviews the application progress of three-dimensional finite element in the study of calcaneal fractures.

Keywords

calcaneus; fracture; finite element analysis

三维有限元分析在跟骨骨折研究中的进展

张毅¹ 王培^{2*}

1. 承德医学院, 中国·河北承德 067000

2. 承德医学院附属医院手足外科, 中国·河北承德 067000

摘要

随着计算机技术的迅速发展, 三维有限元分析方法已经成为生物力学研究的重要方法之一。由于尸体标本来源短缺, 无法对其进行不同载荷条件下的重复研究, 三维有限元分析的优势越发突出。论文就三维有限元在跟骨骨折研究中的应用进展做一综述。

关键词

跟骨; 骨折; 有限元分析

1 引言

三维有限元分析可用于计算特定模型的应力分布、接触面积以及位移等, 近年来在临床医学领域, 尤其在骨科界得到越来越多的应用。与传统骨折研究方法相比三维有限元分析方法具有无创性和可重复性等优点。在有关跟骨骨折的研究中主要聚焦于骨折的形成机制、手术方案的优化以及内固定装置的研发改进, 为跟骨骨折的诊疗提供新的方法和思路。论文就三维有限元在跟骨骨折研究中的应用进展做一综述。

2 跟骨损伤机制的有限元分析

跟骨骨折中各种各样的骨折线表明其产生机制的复杂

【作者简介】张毅(1993-), 男, 中国河南漯河人, 硕士, 从事手足显微外科及周围神经损伤修复研究。

【通讯作者】王培(1975-), 男, 中国河北衡水人, 博士, 教授、主任医师, 从事手足显微外科及周围神经损伤修复研究。

性, 并使其治疗具有挑战性。Tsubone T. 等^[1]建立健侧跟骨三维有限元模型, 基于 FEA 方法对患侧的骨折线进行预测, 并比较预测的跟骨骨折线是否与真实的骨折线相似。结果显示在一定条件下, 有限元模型成功模拟了实际的骨折线, 认为使用 FEA 方法重现跟骨骨折情况是可能的, 对进一步了解跟骨骨折的形成机制有一定价值。Wong D W. 等^[2]建立足部三维有限元模型, 通过 FEA 方法探究不同撞击速度下跟骨应力峰值的分布变化。结果显示在 5.0m/s 的轴向压缩冲击下, 应力峰值大于跟骨和距骨的屈服强度, 易发生骨折, 为研究高能量损伤机制提供了新的思路。

3 跟骨有限元分析的临床价值

3.1 术前制定或优化手术方案

术前可以根据损伤部位的三维有限元模型来制定、优化治疗方案。Pan M. 等^[3]建立外固定器结合有限内固定(EFLIF)和切开复位内固定(ORIF)治疗 Sanders II 型跟骨骨折的三维有限元模型, 利用 FEA 方法比较二者的生物力学差异, 并进行双队列研究。结果显示两种固定方式均可有效固定

Sanders II型跟骨骨折,但EFLIF具有出血量少、手术时间短、住院时间短、伤口并发症少等优点。Guo Z H.等^[4]建立经皮螺钉固定Sanders II型跟骨骨折的三维有限元模型,并利用FEA方法分析其生物力学特点。结果建议使用1枚载距突螺钉固定后,从跟骨结节处置入2枚螺钉交叉固定后关节面,最后从跟骨结节处置入2枚螺钉平行固定跟骰关节,此方法更符合生物力学要求。He K.等^[5]建立Sanders II型和III型骨折的三维有限元模型,并且采用FEA方法模拟比较微创钢板、锁定和非锁定钢板系统三种内固定方法的生物力学差异。结果表明,三种方法均可有效固定跟骨骨折,但微创钢板内固定具有损伤较小、出血少等优点。Chen C H.等^[6]建立了由跟骨、软骨、足底筋膜和软组织组成的三维有限元模型,利用FEA方法分析不同组合的锁定螺钉和非锁定螺钉在负重早期的生物力学差异。得出结论对于Sanders II B型跟骨骨折的治疗,建议采用至少4枚锁定螺钉的混合型螺钉固定是最佳选择,其中后距关节骨折处2枚,跟骨后结节骨折处2枚。跟骨骨折固定术中是否放置载距突螺钉一直备受争议。针对这一问题,Qiang M F.等^[7]建立锁定钢板固定Sanders II型跟骨骨折的三维有限元模型,根据固定螺钉置入位置的不同,将模型分为精确固定组、边缘固定组和非固定组,利用FEA方法分析三组模型的生物力学差异。结果显示,固定Sanders II型跟骨骨折时无论螺钉是否准确置入载距突锁定钢板,其最大应力分布、接触面积、距下关节最大位移等生物力学结果相似,认为载距突钢板螺钉对跟骨生物力学性能的影响较小。但另几项研究结论则与之相反,Pang Q J.等^[8]建立Sanders II型跟骨骨折的三维有限元模型并依据是否置入载距突螺钉设计了两种内固定模型模拟内固定治疗。结果证实载距突螺钉的置入是Sanders II型跟骨骨折牢固固定的关键。Pazour J.等^[9]建立了跟骨骨折的三维有限元模型并利用FEA方法模拟内骨固定治疗,其中不同模型的固定螺钉位置不同。结果表明,从骨折内固定的稳定性来看,将支持螺钉置入载距突是最稳定的,并且减少了螺钉穿透跟距关节的风险,为优化和改进手术方案提供理论支持。

3.2 研发或改进骨折固定装置

Ni M.等^[10]在Calcanail®系统基础上提出了一种改良的新技术,增加了一个固定螺钉来提高稳定性,并建立Sanders III AB型跟骨骨折的三维有限元模型,利用FEA方法模拟比较Calcanail®系统、改良Calcanail®系统以及跟骨锁定钢板内固定系统等三种内固定方法的固定效果。结果表明,改良Calcanail®系统在三种固定方式中结构刚度最高、移位最小、表面应力最小,能提供相对足够的稳定性,为改进复杂跟骨骨折的治疗方法提供了新的思路。Yu B.等^[11]建立Sanders II B型跟骨骨折的三维有限元模型,并利用FEA方法比较传统跟骨钢板和解剖型跟骨钢板的生物力学差异。结果显示相较于传统跟骨钢板,解剖型跟骨钢板能够更好地

维持骨折复位后的结构稳定性,为外科医生选择跟骨钢板以及跟骨钢板的几何设计提供了重要数据参考。Ouyang H.等^[12]分别建立分支式跟骨锁定钢板、全跟骨钢板以及拓扑优化生成的新型跟骨钢板固定Sanders II C型跟骨骨折的三维有限元模型。利用FEA方法对上述三组模型进行生物力学比较。结果提示优化后的新型钢板在固定的稳定性和安全性方面优于传统钢板,同时体积较前缩小了约12.34%,认为FEA方法可以用来设计一种外形小巧的同时不损失稳定性的新型内固定装置,为内固定装置的研发和改进提供理论支持。Ni M.等^[13]建立Sanders III型跟骨骨折的三维有限元模型,并利用FEA方法分析比较了锁定钢板、金属交叉螺钉和可吸收交叉螺钉三种固定装置的生物力学差异。结果表明在三种固定方式中,交叉金属螺钉固定更为牢固,因为它可以同时提供足够的稳定性和较少的应力屏蔽,为内固定装置的选择及研发提供了重要的理论支持。

3.3 为跟骨手术提供必要的的数据支持

跟骨的形态学参数包括长度、宽度、高度、Böhler's角、Gissane's角以及内翻角等,是术后疗效的重要评估指标。Gultekin A.等^[14]建立Böhler's角为35°的跟骨三维有限元模型,并以该模型为基础,分别建立Böhler's角为45°、40°、30°、25°、20°、10°和0°的跟骨三维有限元模型,利用FEA方法研究Böhler's角度的变化对距下关节的影响。结果表明Böhler's角的减小会导致距下关节压力负荷增加,进而增加了术后距下关节相关疾病发生的可能。Xu C.等^[15]利用FEA方法分别模拟跟骨高度的损失和宽度的增加并探究其对距下关节的生物力学影响。结果提示跟骨宽度的增加对距下关节的运动有一定的限制作用,高度的丢失降低了距下关节在外翻、内旋和外旋时的稳定性。Zhang X B.等^[16]分别建立不同内翻角度(+2°、+4°、+6°、-2°、-4°、-6°)的跟骨三维有限元模型,并利用FEA方法探究模型之间的生物力学差异。结果提示与跟骨内翻角的增加相比,跟骨内翻角的减小对跟骨后关节面上的应力分布的影响更大,并建议在手术中,跟骨内翻角的减小应控制在2°以内。综上所述,术中固定骨折块的同时应注意跟骨形态学参数的恢复。

3.4 指导术后早期康复治疗

Zhang H.等^[17]建立微创交叉螺钉固定Sanders III型跟骨骨折的三维有限元模型。利用FEA方法分析模型的应力分布、位移情况。结果显示跟骨与周围组织交界处出现集中应力区域,应力峰值超过骨小梁的屈服强度,得出结论使用微创螺钉固定Sanders III型跟骨骨折后,早期负重锻炼可导致跟骨应力性骨折和其他并发症,如足底筋膜炎等,因此不建议早期负重锻炼,为早期康复提供理论依据。

4 问题与展望

利用FEA方法可以更好地了解移位的跟骨关节内骨折,有助于开发或改进跟骨关节内骨折的治疗方法。弥补了尸体

标本来源短缺的局限性，解决了无法对尸体标本进行重复研究的问题，为临床治疗方法的优化、内固定装置的选择以及设计改进等方面提供了生物力学参考。目前，大多数跟骨三维有限元模型的建立忽略了跟骨周围肌肉、肌腱、筋膜和韧带等软组织的影响，而这些因素反过来可能反映出更真实的结果。在未来的研究中，需要更加注重跟骨周围软组织对分析结果造成的影响，加入跟骨周围的肌肉、韧带以及关节软骨等结构。相信随着技术的进步、计算手段的不断升级，三维有限元分析方法在跟骨生物力学领域的前景会更加广阔，成果将更加突出。

参考文献

- [1] Tsubone T, Toba N, Tomoki U, et al. Prediction of fracture lines of the calcaneus using a three-dimensional finite element model[J]. *Journal of Orthopaedic Research*,2019,37(2):483-489.
- [2] Wong D W, Niu W, Wang Y, et al. Finite Element Analysis of Foot and Ankle Impact Injury: Risk Evaluation of Calcaneus and Talus Fracture[J]. *PLOS ONE*,2016,11(4):154435.
- [3] Pan M, Chai L, Xue F, et al. Comparisons of external fixator combined with limited internal fixation and open reduction and internal fixation for Sanders type 2 calcaneal fractures: Finite element analysis and clinical outcome[J]. *Bone Joint Res*,2017,6(7):433-438.
- [4] Guo Z H, Yan Y Q, Tang Y, et al. Finite element optimization analysis of minimally invasive screw treatment for Sanders type calcaneal fracture[J]. *Zhongguo Gu Shang*,2021,34(2):137-142.
- [5] He K, Fu S, Liu S, et al. Comparisons in finite element analysis of minimally invasive, locking, and non-locking plates systems used in treating calcaneal fractures of Sanders type II and type III[J]. *Chin Med J (Engl)*,2014,127(22):3894-3901.
- [6] Chen C, Hung C, Hsu Y, et al. Biomechanical evaluation of reconstruction plates with locking, nonlocking, and hybrid screws configurations in calcaneal fracture: a finite element model study[J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*,2017,55(10):1799-1807.
- [7] Qiang M F, Singh R K, Chen Y X, et al. Computational Biomechanical Analysis of Postoperative Calcaneal Fractures with Different Placement of the Sustentaculum Screw[J]. *Orthopaedic Surgery*,2020,12(2):661-667.
- [8] Pang Q J, Yu X, Guo Z H. The sustentaculum tali screw fixation for the treatment of Sanders type II calcaneal fracture: A finite element analysis[J]. *Pak J Med Sci*,2014,30(5):1099-1103.
- [9] Pazour J, Horák Z, Džupa V. Does the position of a sustentacular screw influence the stability of a plate osteosynthesis of a calcaneal fracture? A biomechanical study[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2021,235(9):993-1000.
- [10] Ni M, Wong D W, Niu W, et al. Biomechanical comparison of modified Calcanail system with plating fixation in intra-articular calcaneal fracture: A finite element analysis[J]. *Medical Engineering & Physics*,2019(70):55-61.
- [11] Yu B, Chen W C, Lee P Y, et al. Biomechanical comparison of conventional and anatomical calcaneal plates for the treatment of intraarticular calcaneal fractures—a finite element study[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*,2016,19(13):1363-1370.
- [12] Ouyang H, Deng Y, Xie P, et al. Biomechanical comparison of conventional and optimised locking plates for the fixation of intraarticular calcaneal fractures: a finite element analysis[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*,2017,20(12):1339-1349.
- [13] Ni M, Wong D W, Mei J, et al. Biomechanical comparison of locking plate and crossing metallic and absorbable screws fixations for intra-articular calcaneal fractures[J]. *Science China Life Sciences*, 2016,59(9):958-964.
- [14] Gultekin A, Acar E, Ugur L, et al. The importance of Bohler's angle in calcaneus geometry: A finite element model study[J]. *Jt Dis Relat Surg*,2021,32(2):420-427.
- [15] Xu C, Liu H, Li M, et al. A Three-Dimensional Finite Element Analysis of Displaced Intra-Articular Calcaneal Fractures[J]. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*,2017,56(2):319-326.
- [16] Zhang X, Wu H, Zhang L, et al. Calcaneal varus angle change in normal calcaneus: a three-dimensional finite element analysis[J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*,2017,55(3):429-437.
- [17] Zhang H, Lv M L, Liu Y, et al. Biomechanical analysis of minimally invasive crossing screw fixation for calcaneal fractures: Implications to early weight-bearing rehabilitation[J]. *Clinical Biomechanics*, 2020(80):105143.