

文章编号:1004-7220(2016)02-0102-05

基于 ANSYS 的人体膝关节半月板撕裂数值模拟

朱水文, 陈国平, 彭伟

(西南科技大学 土木工程与建筑学院,力学教研室,绵阳 621010)

摘要: **目的** 研究半月板在撕裂情况下膝关节应力、应变以及有效表面压力分布的情况。**方法** 基于 CT 和 MR 扫描图像数据,使用软件 Mimics 和 ANSYS,应用逆向工程原理建立膝关节的三维有限元模型(包括上、下膝盖骨和半月板),模型中处理忽略关节软骨和韧带。分析和对比健康完整膝关节、内侧半月板“V”字形撕裂膝关节和半月板纵向撕裂膝关节 3 种模型在承受轴向载荷时的力学响应情况。**结果** 在轴向载荷作用下,健康膝关节半月板要传递大部分压应力载荷,且这些载荷主要集中在半月板中部的横侧向,最大的接触压力出现在半月板中间部分的后方。半月板撕裂时,应力最大的部位出现在撕裂部位周边,且由于撕裂部位的存在,半月板的接触应力分布有显著变化。**结论** 半月板撕裂对膝关节各部件的应力分布和峰值有很大影响,医生可根据半月板的撕裂形状,通过确定半月板上应力集中的位置,有效、准确地确定半月板撕裂患者最需要重点修复治疗的地方。

关键词: 膝关节;半月板;撕裂;接触应力;有限元分析

中图分类号: R318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.02.102

Numerical simulation on meniscus tears of knee joint based on ANSYS

ZHU Shui-wen, CHEN Guo-ping, PENG Wei (*Department of Mechanics, College of Civil Engineering & Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China*)

Abstract: **Objective** To study the distribution of stress, strain and effective surface pressure in knee joint with meniscus tear. **Methods** Based on CT/MR scan image data and using the Mimics/ANSYS software, a three-dimensional finite element model of knee joint (including upper/lower knee and meniscus) was established with the principle of reverse engineering, while the treatment of articular cartilage and ligament was ignored in this model. The mechanical responses from three models, i. e. healthy knee joint, knee joint with V-shape medial meniscal tears, knee joint with longitudinal meniscal tears, under axial loading were analyzed and compared. **Results** Under axial loading, healthy knee joint would transfer the majority of the compressive stress loads, which were mainly concentrated in the lateral side of the middle part of meniscus, and the maximum contact pressure appeared in the rear area of the middle part of meniscus. When the meniscus was torn, the maximum stress appeared at the periphery of the tear, and the contact stress distribution of meniscus was significantly changed due to the presence of the tear. **Conclusions** The meniscal tears can significantly influence the stress distribution and peak stress of knee joint. According to the shape of torn meniscus, doctors can effectively find out position of the stress concentration in meniscus, so as to determine the most important part that needs to be treated and repaired.

Key words: Knee joint; Meniscus; Tear; Contact pressure; Finite element analysis

收稿日期:2015-09-15; 修回日期:2015-10-17

基金项目:西南科技大学博士基金项目(09zx7127)

通信作者:陈国平,教授, E-mail:guopingchen2002@163.com。

半月板是膝关节一个重要的多功能组成部分及部件,对膝关节其他部件的运动具有传力、减震、有效分配表面压力等作用,其最重要的作用是传输腿关节 50% ~ 70% 的压缩载荷^[1]。很多学者探讨了完整半月板传递载荷的作用及机制^[2-3]。正因为半月板需要传递腿关节的大部分载荷,其发生撕裂的情形往往较为常见。半月板撕裂会导致半月板功能减弱,从而在关节软骨点轴向产生异常剪切应力^[4]。然而,因半月板撕裂而导致的膝关节具体的应力变化仍然不明了。因此,半月板的损伤会导致软骨退化,这一关系看起来合理,但尚未被清楚证实。部分半月板切除术已经成为治疗半月板损伤手术的首选。但大量的临床研究数据表明,半月板切除手术会导致发生关节炎的风险增加^[5-6]。Yang 等^[7]认为,膝关节炎发生的原因很可能是因为半月板的变化而导致接触应力改变。因此,有必要研究膝盖上部分半月板切除对膝关节各部件生物力学性能的影响,从而进一步探讨部分半月板切除与膝关节炎症发生之间的关系。

考虑到膝关节几何结构与材料特性本身的复杂性,为了研究其生物力学性能,有限元分析方法是一种比较适当的选择。在采用合理的几何模型与关节组织力学性能的基础上,有限元模型可以计算出膝关节的力学分布情况,从而为半月板异常导致膝关节炎症的发生和发展提供力学机制的解释。为研究半月板损伤对膝关节生物力学行为的影响,Vadher 等^[8]建立了二维轴对称膝关节模型,结果表明,半月板切除会导致接触应力增加;然而,二维半月板与真实半月板是不规则三维实体这一事实严重不符,故该结果的说服力欠佳。Yang 等^[9]建立了膝关节三维有限元模型,以研究切除半月板的不同部分对膝关节接触应力变化的影响。目前的研究主要集中在半月板部分切除和完全切除对膝关节生物力学特性的影响,而有关半月板撕裂对膝关节生物力学影响的研究鲜有报道。

本文通过有限元仿真模拟膝关节在轴向压力作用下,在半月板健康以及撕裂情况时,膝关节股骨、胫骨以及半月板上的应力、应变分布情况。主要工作如下:① 建立三维膝关节模型;② 通过对膝关节轴向加载,分析膝关节以及半月板上的应力、应变分布情况;③ 改变半月板的撕裂类型,分析和比较半

月板在不同撕裂类型情况下膝关节以及半月板上的应力、应变分布情况。研究结果可为半月板撕裂导致软骨和半月板性能退化提供力学机制的解释。

1 研究方法

1.1 膝关节三维有限元模型

首先,将获取的 CT 和 MRI 膝关节影像数据导入软件 Mimics 10.0 中。膝盖骨的轮廓(股骨、胫骨、髌骨和腓骨)很容易被提取图像,因为其中的骨头相比较骨结构有更高的灰度值。在 Mimics 10.0 中进行阈值处理,其目的是分割对象,获得只包含大于等于阈值像素的图像。有时,一个上、下限阈值是必要的;分割对象包含这两个值之间的所有像素。换言之,阈值处理后,在所生成的 3D 图像中,只对阈值设定像素范围内的图片进行显示,不在阈值设定范围内的图片则没有出现在所生成的 3D 图形中。Mimics 的网格重划功能为所有有限元分析(finite element analysis, FEA)软件提供高度自动化的接口,它能显著提高 STL 模型 FEA 结果的可靠性和精确性。

在 Mimics 10.0 中可对模型进行简单处理,但生成的 3D 模型依然有孔洞和缝隙。为了得到可在 FEA 软件中进行计算的模型,还必须将模型导入 Solidworks 2010 软件并进行修复。利用 Mimics 和 Solidworks 对膝关节 CT 图像进行处理,得到膝关节几何模型。一个完整的膝关节模型包括大腿骨、胫骨、关节软骨、半月板和主要韧带等。为了保证研究的可行性,对膝关节模型进行简化,只包含膝关节大腿骨与半月板部分。通过将上述几何模型导入 ANSYS 中,最终得到膝关节的几何模型。

1.2 半月板撕裂模型

文献[5]中对半月板撕裂模型进行了比较详细的描述:半月板垂直面上的纵向撕裂,能沿着任何方向改变长度;因此,垂直面上的撕裂经常能达到半月板长度的 50% ~ 65%,有时撕裂会把半月板分成前后两半。倾斜和鸢鹞嘴形的撕裂也可能沿着半月板的任何方向,但是最有可能的交叉点是在中间和后面的 1/3 处,这些撕裂在半月板上将渐渐延伸直到半月板完全破裂,典型的放射性撕裂在半月板的中间和后面 1/3 处交接。本文假设撕裂发生在半月板的中间,并且考虑“V”字形和纵向撕裂两种情况(见图 1)。

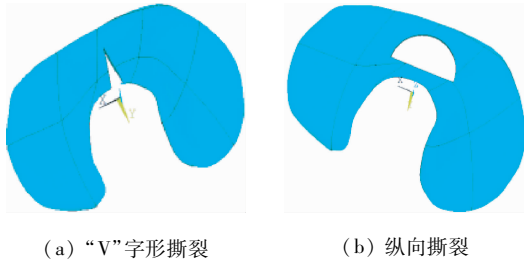


图1 半月板撕裂模型

Fig. 1 Geometrical models of meniscal tears (a) V-shape tear, (b) Longitudinal tear

1.3 材料参数、加载及边界条件

为了简化计算,把股骨与胫骨考虑成单个状态和线弹性各向同性材料,且假设股骨与胫骨的材料参数相同。假设半月板也为单个状态,线弹性各向同性材料。膝关节的材料参数见表1。

表1 膝关节材料参数

Tab. 1 Material properties of the knee joint

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
股骨与胫骨	1.3×10^3	2.06×10^5	0.30
半月板	$(1.1 \sim 1.2) \times 10^3$	59	0.49

边界条件定义为:在实际情况中,每个半月板的角依附在胫骨的托盘上,中间半月板外部的边缘连

接在中间十字架韧带上。由于本研究的模型没有考虑胫骨和韧带,故可以假设半月板直接与大腿骨相连:半月板上部只有一部分与大腿骨上部连接,半月板下部与膝关节大腿骨下部完全连接。大腿骨的下表面完全约束,不允许有任何方向的位移。加载方案考虑在大腿骨上表面加载 1.15 kN 轴向压力,与人在行走的步态循环情况下全面伸展位置及单腿站立时的压力相一致。

2 结果与讨论

2.1 健康膝关节分析

对健康膝关节加载 1.15 kN 轴向压力。计算结果表明,大腿骨与半月板相互接触时,大腿股骨没有明显的位移,而半月板上有明显的位移;同时,在大腿股骨和胫骨上,应力、应变较小,且分布比较均匀。应力、应变主要集中在半月板的横向上,最大接触压力、应变出现在中间半月板的背后部位,最大应力为 37.2 MPa。中间半月板的接触压力明显偏高。在静态加载下,关节在大部分情况下维持着半月板和胫骨的垂直位移的关系。在较低的加载下,半月板变形不大;在承受较大压力下,半月板产生强大的变形以分担与大腿骨所承受的压力(见图 2、3)。

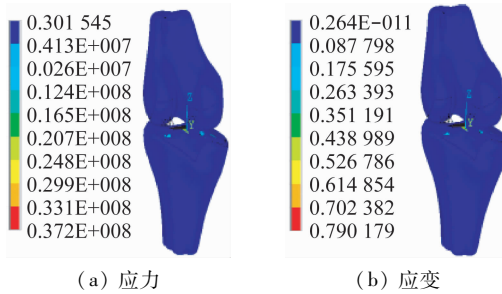


图2 膝关节应力应变分布图

Fig. 2 Contour of the knee joint (a) Stress, (b) Strain

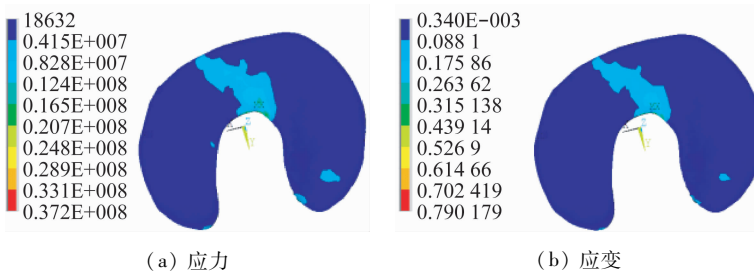


图3 健康半月板应力应变分布图

Fig. 3 Contour of the healthy meniscus (a) Stress, (b) Strain

2.2 半月板撕裂对膝关节影响分析

对半月板“V”字形撕裂模型,同样加载 1.15 kN 的轴向压力。计算结果表明,股骨与半月板都发生了较大的位移,均为向它们的四周延伸,并且膝关节股骨与胫骨在加载过程中发生了明显的移位——向左错动。股骨和胫骨上的应力、应变与健康膝关节骨一样,分布比较均匀,并且非常小。半月板上的应力分布主要位于半月板的中间以及右边半月板部

位,且右边部位的半月板应力分布较中间半月板应力分布要多一些,但相对小一些,左边半月板应力、应变较大的部位主要集中在一个小边角部位。健康半月板应力、应变最大的点在半月板的背后部位,但在半月板“V”字形撕裂时,最大应力、应变发生在“V”字的尖端,最大应力为 16.4 MPa。半月板上平均应力为 8.23 MPa(见图 4)。

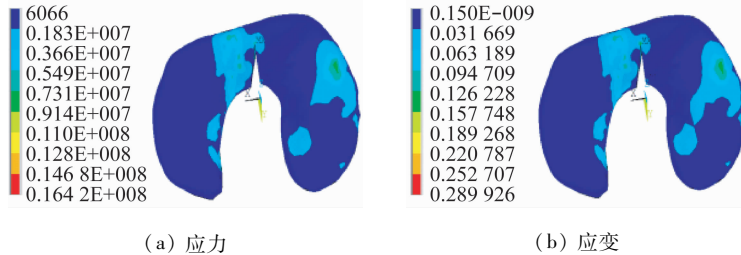


图 4 “V”字形撕裂半月板应力、应变分布图

Fig. 4 Contour of the V-shape meniscal tears (a) Stress, (b) Strain

半月板纵向撕裂模型的计算结果表明,股骨与半月板都发生了较大的位移,股骨被压缩,半月板向四周延伸。等值线的分布主要集中在股骨与半月板上。股骨和胫骨上的应力、应变分布与健康膝关节骨一样,分布比较均匀,并且也非常小。半月板上应

力主要分布在半月板的中间以及右边的边角部位,应力分布最大的部位与健康半月板的最大应力分布部位相同,位于半月板的中间后部,在半月板前部分布的应力较后部小。在半月板纵向撕裂时,最大应力为 1.6 MPa(见图 5)。

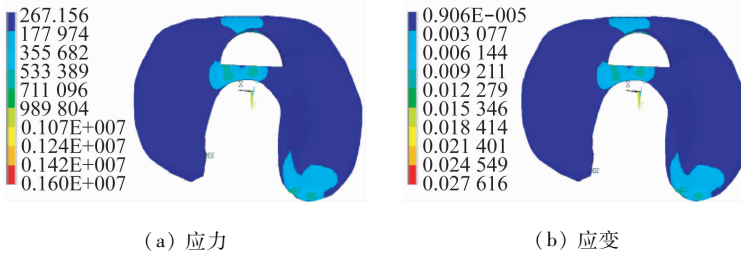


图 5 纵向撕裂半月板应力、应变分布图

Fig. 5 Contour of the longitudinal meniscal tears (a) Stress, (b) Strain

2.3 讨论

通过 3 种模型半月板上最大应力分布对比可知,在 1.15 kN 轴向加载条件下,半月板的最大应力是:健康半月板 > “V”字形撕裂的半月板 > 纵向撕裂的半月板,最大应变与最大应力相对应。结果表明,半月板撕裂会使半月板在一些区域的应力和应变峰值增加,这与 Dong 等^[10]的研究结果相符。

在同样 1.15 kN 轴向加载下,健康膝关节半月板最大的接触压力出现在中间半月板的背后部位,平均压力为 2.9 MPa,中间半月板的接触压力明显

偏高。当半月板撕裂时,平均压缩应力和接触压力各自增加到 5.70、7.05 MPa,分别为健康半月板的 107% 和 143%。

本文设置所有的材料为线弹性材料,对计算结果的可靠性和真实性影响较大。同时,将模型抽象为上、下膝盖骨和半月板三部分,而忽略了关节软骨和韧带,同样会引起计算结果的误差。但通过与其他已有研究结论的比较,本研究结果在一定程度上能够真实反映半月板撕裂对膝关节各部件的应力分布和峰值的影响。

3 结论

本文应用逆向工程原理建立膝关节三维有限元模型,重点探讨半月板撕裂对膝关节和半月板应力分布的影响。研究表明,应用CT、MRI和有限元技术开发具有复杂生物结构的详尽有限元模型,这一方法是有效的,其优势体现在既保持了精度又节省了前处理时间。通过研究可以发现,半月板撕裂对膝关节各部件的应力分布和峰值有很大的影响,研究结果为后续工作,如添加软骨、韧带等半月板撕裂对膝关节影响的研究打下论证基础。研究结果对理解半月板在膝关节结构中传递载荷、有效分布表面压力等原理有一定的帮助,为骨科医疗工作者的临床工作提供参考。医生可根据半月板的撕裂形状确定半月板上应力集中或应力最大的位置,从而可以有效、准确确定半月板撕裂患者最需要重点修复治疗的地方,例如“V”字形撕裂时,最需要治疗的地方一定是在裂纹的尖端。

参考文献:

- [1] Paletta GA, Jr Manning T, Snell E, *et al.* The effect of allograft meniscal replacement on intraarticular contact area and pressures in the human knee. A biomechanical study [J]. *Am J Sports Med*, 1997, 25(5): 692-698.
- [2] McDermott ID, Amis AA. The consequences of meniscectomy [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2006, 88(12): 1549-1556.
- [3] Flanigan DC, Lin F, Koh JL, *et al.* Articular contact pressures of meniscal repair techniques at various knee flexion angles [J]. *J Orthop Res*, 2012, 30(6): 934-942.
- [4] Chang A, Moisio K, Chmiel JS, *et al.* Subregional effects of meniscal tears on cartilage loss over 2 years in knee osteoarthritis [J]. *Ann Rheum Dis*, 2011, 70(1): 74-79.
- [5] Stein T, Mehling AP, Welsch F, *et al.* Long-term outcome after arthroscopic meniscal repair versus arthroscopic partial meniscectomy for traumatic meniscal tears [J]. *Am J Sports Med*, 2010, 38(8): 1542-1548.
- [6] Petty CA, Lubowitz JH. Does arthroscopic partial meniscectomy result in knee osteoarthritis? A systematic review with a minimum of 8 years' follow-up [J]. *Arthroscopy*, 2011, 27(3): 419-424.
- [7] Yang NH, Nayeb-Hashemi H, Canavan PK. The combined effect of frontal plane tibiofemoral knee angle and meniscectomy on the cartilage contact stresses and strains [J]. *Ann Biomed Eng*, 2009, 37(11): 2360-2372.
- [8] Vadher SP, Nayeb-Hashemi H, Canavan PK, *et al.* Finite element modeling following partial meniscectomy: Effect of various size of resection [J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2006, 1(1): 2098-2101.
- [9] Yang NH, Nayeb-Hashemi H, Canavan PK. The combined effect of frontal plane tibiofemoral knee angle and meniscectomy on the cartilage contact stresses and strains [J]. *Ann Biomed Eng*, 2009, 37(11): 2360-2372.
- [10] Dong YF, Hu GH, Dong YH, *et al.* The effect of meniscal tears and resultant partial meniscectomies on the knee contact stresses: A finite element analysis [J]. *Comput Method Biomech*, 2014, 17(13): 1452-1463.