

文章编号:1004-7220(2017)02-0143-05

髌股关节紊乱行关节镜手术治疗对髌股关节生物力学改变的三维有限元分析

钱文多, 张开伟

(贵阳中医学院第一附属医院 骨科, 贵阳 550000)

摘要: **目的** 采用三维有限元方法分析关节镜下行外侧髌骨支持带松解、内侧髌骨支持带紧缩手术前后髌股关节应力分布的改变情况。**方法** 建立髌股关节紊乱患者关节镜手术前后髌股关节三维模型,并计算分析在加载200 N载荷下模型在不同屈膝角度(30°、60°、90°、120°)时的髌股关节最大应力和应力分布。**结果** 关节镜术后模型不同屈膝角度的髌股关节最大应力较术前明显减小;术前髌股关节应力集中在髌股外侧关节面,而术后髌股关节应力得到重新分配。**结论** 关节镜下外侧髌骨支持带松解、内侧髌骨支持带紧缩手术后,髌股关节不同屈膝角度的应力得到改善,为关节镜手术方法可以有效恢复髌股关节内外侧关节面压力平衡提供客观理论依据。对于临床上存在力线异常的早期髌股关节紊乱患者,建议应尽早手术干预。

关键词: 髌股关节;有限元分析;关节镜;生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.02.007

Three-dimensional finite element analysis on biomechanical changes after arthroscopic surgery for patients with patellofemoral joint disorders

QIAN Wen-duo, ZHANG Kai-wei (*Department of Orthopedics, the First Affiliated Hospital, Guiyang University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550000, China*)

Abstract: **Objective** To analyze stress distribution changes in patellofemoral joints before and after arthroscopic surgery by lateral retinacular release and medial retinaculum plaction using three-dimensional (3D) finite element method. **Methods** The 3D finite element model of pre- and post-operative patellofemoral joints for patients with patellofemoral joint disorders were constructed, and the maximum stress and stress distributions on patellofemoral joints at different flexion angles (30°, 60°, 90°, 120°) under the load of 120 N were calculated and analyzed. **Results** The maximum stress of patellofemoral joints at different flexion angles after arthroscopic surgery was significantly smaller than that before arthroscopic surgery. The stress concentrated on the lateral patellofemoral joints before the surgery, but was redistributed after the surgery. **Conclusions** The stress on patellofemoral joints at different flexion angles is reduced after arthroscopic surgery by lateral retinacular release and medial retinaculum plaction, which provides an objective theoretic reference for arthroscopic surgery to effectively restore stress balance between lateral and medial patellofemoral joints. It is suggested that patients with early patellofemoral joint disorders and abnormal force line should be treated with surgery intervention as early as possible.

Key words: Patellofemoral joint; Finite element analysis; Arthroscopy; Biomechanics

髌股关节紊乱是以膝前疼痛为主要症状的一类疾病的总称。研究发现,在膝关节病变中,以髌股关节病变发病率最高,而且有年轻化的趋势^[1]。目前,膝关节镜技术已成为临床治疗早期髌股关节紊乱患者的首选方法,其临床疗效也得到一定认可。但目前大部分疗效观察都是通过患者的主观感受获得,临床上尚缺乏关节镜手术对髌股关节实际生物力学改变方面的研究。随着三维有限元技术在骨科领域的应用,模拟研究体内髌股关节的生物力学环境成为现实。基于此,本文通过运用三维有限元方法分析髌股关节紊乱患者行关节镜手术前后髌股关节面的应力分布变化情况,为关节镜手术方法治疗髌股关节紊乱的有效性提供更为有力的证据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

收集早期髌股关节紊乱的患者资料,临床表现为:膝前疼痛、上下楼梯及深蹲时疼痛加重、髌股关节研磨试验阳性、髌骨倾斜试验阳性;术前影像学提示有髌骨外侧倾斜,且测量髌骨倾斜角小于 7° ;髌骨外移程度参考吴俊峰等^[2]测量方法,测得外移度均在 $1^\circ \sim 2^\circ$ 之间,并伴有轻度髌股关节软骨磨损;在关节镜下行外侧髌骨支持带松解、内侧髌骨支持带紧缩手术治疗。收集手术前、后膝关节 CT 及 MRI 影像资料。其中,CT 扫描参数为层厚 1 mm、面内分辨率 0.5 mm;MRI 扫描参数为层厚 1 mm、像素尺寸 0.5 mm。将获得的数据导出并刻盘存为 DICOM 格式,作为建模的数据来源。

1.2 工作平台与应用软件

Lenovo 工作站, CPU: 至强 4 核 \times 2, 内存: 32 GB, 硬盘: 2 000 GB, 显卡: ATI Mobility Radeon HD 4300/4500 series, 操作系统: Suse Linux Enterprise 10.1。医学影像三维仿真重建软件: Mimics 17.0。三维有限元分析软件: ABAQUS 6.14。

1.3 髌股关节三维实体模型构建

首先,将获得的术前 CT 影像资料通过工作站导入 Mimics 17.0 中进行三维重建。根据 CT 灰度值区分骨骼,骨骼的灰度值范围为 226 ~ 3 040。经过添加蒙罩、区域增长、手工修改蒙罩,最终生成髌股关节三维模型。初始生成的三维模型比较粗糙,故需要将其导入 Magics 19 中进行模型优化处理。

对网格进行光滑处理,光滑迭代次数为 10。接着对模型网格进行缩减,再对模型网格进行重划分,质量阈值为 0.3,网格尺寸为 1 ~ 2 mm,获得股骨、胫腓骨、髌骨模型。髌股关节骨模型建立完成之后,对髌股关节软骨以及韧带进行构建。基于 MRI 对软骨和韧带的显影优势,从术前 MRI 扫描数据中重建髌股关节主要韧带和关节软骨的三维模型。软骨和韧带中含水量要远高于骨,故仍然可以通过灰度值识别法对其进行建模。最终获得完整的术前髌股关节三维模型。术后模型通过参考收集的术后膝关节 CT、MRI 影像资料建立,模拟缩短内侧髌骨支持带,并在外侧髌骨支持带上进行切割,降低其弹性模量以增加弹性。

1.4 髌股关节三维有限元模型建立及应力分析

1.4.1 三维实体装配及网格划分 根据 CT 与 MRI 生成的髌股关节三维模型为站立姿态,对股骨相对于胫骨分别屈曲 30° 、 60° 、 90° 、 120° , 导入 ABAQUS 6.14 中进行装配,得到髌股关节有限元装配体。对装配体中各个零件进行网格划分,由表面的三角形网格向内填充为四面体网格,网格类型为 C3D4,节点和单元类型为 4 节点四面体单元。经过网格划分后,髌股关节实体模型共生成网格节点数 132 429、单元数 602 234。

1.4.2 定义材料属性 参照国际上流行的膝关节建模文献报道,对膝关节模型各部件的材料赋予属性。分别把股骨、胫骨、腓骨、髌骨导入 Mimics 中的 FEA Material 模块,对其按照灰度值对材料赋予属性^[3]。材料数量选择 200 种。将关节软骨设置为弹性模量 15 MPa、泊松比 0.46^[4]的均匀、连续、各向同性的弹性材料。参照 Pena 等^[5]建模采用的韧带材料力学参数,设定髌股关节各韧带为 Ogden-3 型各向同性超弹性材料。

1.4.3 定义边界条件及施加载荷 绑定接触包括股骨与软骨、髌骨与软骨、半月板与胫骨软骨、韧带两端与骨和半月板的接触。滑动接触包括股骨软骨与半月板及胫骨软骨、髌骨软骨与股骨软骨的接触。在相互作用模块中定义关节软骨间为非线性接触,接触属性定义为光滑无摩擦的接触。根据正常髌股关节生理运动状态,通过模拟所建膝关节各韧带共同的约束作用,约束膝关节各个平动自由度和冠状面、水平面的旋转自由度,而只保留矢状面的旋转自

由度。参照 Grood 等^[6]研究方法,模拟股四头肌无负载伸膝、大腿固定从膝关节屈曲 120°到完全伸直过程中,股四头肌向心收缩方向维持约 200 N 载荷,记录并分析在此荷载下关节镜手术前后髌股关节模型在屈膝 30°、60°、90°、120°固定位点的生物力学变化情况。

2 结果

由表 1 可知,关节镜手术治疗后,髌股关节有限元模型在不同屈膝角度的髌股关节最大应力较术前明显减小。

表 1 手术前后不同屈曲角度髌股关节最大应力比较

Tab. 1 Comparison of the maximum stress on patellofemoral joints at different flexion angles before and after the surgery

屈膝角/(°)	最大应力/MPa	
	术前	术后
30	2.072	1.687
60	3.418	1.809
90	3.248	1.418
120	10.860	9.325

如图 1 所示,关节镜手术治疗后的髌股关节有限元模型在不同屈膝角度的髌股关节应力分布较术前更加均匀。

3 讨论

3.1 应用膝关节镜治疗髌股关节紊乱的疗效及生物力学研究进展

随着膝关节镜技术的广泛开展,其已成为髌股关节疾病治疗的比较重要手段。Shea 等^[7]认为,关节镜手术治疗髌股关节疾病主要适用于临床和影像学上的髌骨倾斜。孙延山等^[8]对外侧支持带松解治疗髌股关节紊乱症的中远期疗效进行观察,随访 5 年发现,软骨损伤较轻患者的满意度为 100%,但软骨损伤重患者的优良率下降了 14.4%。本课题组在临床上也发现,对于年龄偏大且关节软骨磨损严重的患者,采取关节镜手术治疗的临床疗效尚值得商榷。唐刚健等^[9]对比关节镜下外侧髌股支持带松解、内侧支持带紧缩联合治疗与单纯外侧髌股韧带松解治疗的疗效,结果发现联合治疗术式的临床疗效更好。宣涛等^[10]对 86 例髌股关节紊乱患者

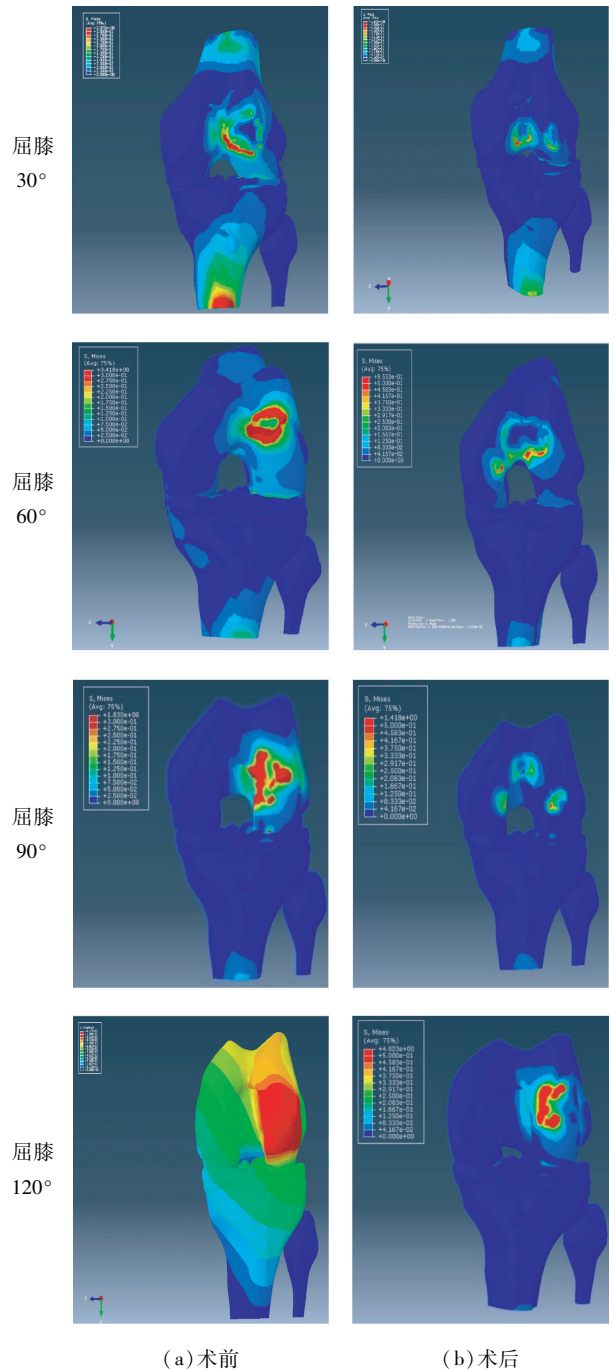


图 1 不同屈膝角度髌股关节模型手术前、后应力分布图

Fig. 1 Stress distributions on pre-and post-operative model of patellofemoral joints at different flexion angles

(a) Before surgery, (b) After surgery

采取关节镜手术进行治疗,并应用 Lysholm 膝关节功能评分进行手术前、后评价,获得满意效果。大量研究表明,应用关节镜治疗髌股关节紊乱在临床上

获得满意的疗效,但目前有关关节镜手术治疗前后髌股关节实际生物力学改变的研究还鲜有报道。髌股关节作为人体诸多关节中的承重关节之一,它的生物力学环境比较复杂,其组成就像一个巨大的滑动垫,时刻承受着不同的压应力和张应力。因此,髌股关节组成结构中任何细微的改变都有可能对髌股关节的应力状态产生较大影响。Flatow 等^[11]研究表明,如果将髌骨向外倾斜 5° 或者是将其向外侧移动5 mm,就会引起髌股关节的接触面积明显减小。目前,由创伤、髌骨外移或者炎症等病因引起的髌股关节紊乱最为常见,临床上将由于上述原因刺激致使外侧髌骨支持带紧张或者挛缩而引起以膝前疼痛为主要症状的疾病统称为外侧高压综合征(elevated lateral pressure syndrome, ELPS)。董启榕等^[12]应用压敏片与电测实验应力分析相互结合,测量分析髌股排列异常的尸体标本,通过对其行外侧支持带松解并松解股内外侧肌发现,压敏片着色面积以及接触压峰值、平均值均有所下降;该试验虽然证明了外侧支持带松解可以恢复髌骨活动度,且缓解了局部高应力状态,但同时提出股四头肌力平衡与否对髌股关节的力学环境也会产生一定影响。Stork 等^[13]研究发现,内侧髌股韧带在维持髌股关节稳定中也起着重要作用。目前大多数有关髌股关节生物力学方面的研究以尸体标本为研究对象,由于髌股关节力学环境的特殊性,体外模拟的膝关节运动与体内髌股关节的生物力学特性差异较大,难以反映真实的情况,为临床提供有力的证据^[14]。因此,既往研究所得到的相关力学结论与实际情况仍有较大差距。近年来,随着计算机与医学影像以及有限元软件的多学科渗透结合,使得需要进行复杂计算的医学生物力学研究变成现实;而三维有限元软件的不开发进步,使得有限元技术在骨科领域得到广泛开展。同时,未来应用三维有限元方法对骨科领域相关生物力学问题进行研究也将成为主流。

3.2 三维有限元模型研究结果分析

初步建立了关节镜手术前后髌股关节紊乱患者的髌股关节三维有限元模型,并模拟施加200 N载荷作用,获得膝关节镜治疗后模型在不同屈膝角度时的髌股关节最大应力,并与术前不同屈膝角度时的髌股关节最大应力进行比较。结果表明,术后髌股关节最大应力较术前明显减小,说明行关节镜手

术后髌股关节应力得到一定改善,同时更客观地证明关节镜手术方法治疗髌股关节紊乱的有效性。通过对手术前后 $0^\circ \sim 90^\circ$ 屈膝角度观察发现,术前、术后模型均在 60° 时发生髌股关节反作用力最大值,这与 Reilly 等^[15]报道的下楼梯时最大受力出现在屈膝 60° 左右相一致。根据上述结果推测,人体正常活动时屈膝 60° 可能是膝关节应力达到一个峰值的角度。从4个不同屈膝角度手术前后模型最大应力来看,屈膝 20° 时的应力最大,而屈膝 $30^\circ \sim 90^\circ$ 的应力最大值变化不大。在屈膝 120° 时髌股关节软骨的压力最大,其磨损也最大,提示在临床上髌股关节紊乱患者应尽量减少深蹲动作,避免对关节软骨造成不可逆的损伤。对比观察手术前后髌股关节三维有限元模型的应力分布可以明显看到,术前模型 $30^\circ \sim 120^\circ$ 髌股关节的接触面明显外移,应力主要集中于外侧髌股关节面,且红色区域代表关节软骨所承受的应力较高,其所受磨损的风险也相对增大。而通过对术后模型的 $30^\circ \sim 120^\circ$ 髌股关节应力分布可知,其在4个屈膝角度的髌股关节应力分布较均匀、广泛,仅在 120° 时出现少量应力集中较高的红色区域,其应力分布基本接近文献报道的正常髌股关节应力分布水平。在同一载荷下,术后髌股关节模型在屈曲 30° 时的应力分布与既往文献报道的髌股关节三维有限元模型自然屈曲 30° 时的应力分布情况基本近似^[16]。

4 结语

本文成功建立了髌股关节紊乱患者关节镜手术治疗前后髌股关节三维有限元模型,并对手术前后髌股关节应力分布进行比较分析。术前模型的分析结果提示,当髌股关节轨迹出现异常时,在屈伸活动过程中容易导致髌股关节呈现病理性的适配状态,从而使髌股关节应力分布发生变化,并使髌股关节软骨处于高应力风险,长此以往可导致髌股关节软骨损伤,甚至形成髌股关节炎。术后模型分析则表明,关节镜下行髌股外侧支持带松解、内侧支持带紧缩术治疗髌股关节紊乱方法可行,并使髌股关节的异常应力分布状态得到明显的改善。同时,通过对手术前后模型髌股关节最大应力及应力分布的比较,也为关节镜手术干预治疗髌股关节紊乱提供客观的理论依据;并提示在临床上对明确有轨迹异常

的髌股关节紊乱患者应早发现、早治疗,防止髌股关节在长期高应力状态下造成关节软骨不可恢复的损伤。但本研究仍有不足之处,例如:模拟施加载荷单一、构建模型过程存在简化、样本量较少缺乏说服力以及目前软件技术还无法真正模拟出真实的肌肉、韧带属性。

参考文献:

- [1] 孙振杰,袁一,刘瑞波. 髌股关节紊乱与胫骨扭转畸形的相关性分析[J]. 中国骨伤, 2015, 28(3): 222-225.
- [2] 吴俊峰,刘丽思,郑卓肇,等. MR 横断面定量测量指标对髌股关节不稳患者的诊断价值[J]. 中华放射学杂志, 2014, 48(8): 189-190.
- [3] MORGAN EF, BAYRAKTAR HH, KEAVENY TM. Trabecular bone modulus-density relationships depend on anatomic site [J]. *J Biomech*, 2003, 36(7): 897-904.
- [4] SHEPHERD DE, SEEDHOM BB. The 'instantaneous' compressive modulus of human articular cartilage in joints of the lower limb [J]. *Rheumatology*, 1999, 38(2): 124-132.
- [5] PEÑA E, CALVO B, MARTÍNEZ MA, *et al.* A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint [J]. *J Biomech*, 2006, 39(9): 1686-1701.
- [6] GROOD ES, SUNTAY WJ, NOYES FR, *et al.* Biomechanics of the knee-extension exercise. Effect of cutting the anterior cruciate ligament [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1984, 66(5): 725-734.
- [7] SHEA KP, FULKERSON JP. Preoperative computed tomography scanning and arthroscopy in predicting outcome after lateral retinacular release [J]. *Arthroscopy*, 1992, 8(3): 327-334.
- [8] 孙延山,姜鑫,张益民,等. 外侧支持带松解治疗髌股关节紊乱症的中远期疗效[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2010, 25(5): 469-470.
- [9] 唐刚健,靳嘉昌,柴晟. 关节镜下治疗髌股关节疼痛综合征的临床观察[J]. 微创医学, 2008, 3(2): 103-105.
- [10] 宣涛,徐斌,徐洪港,等. 关节镜下射频汽化仪治疗髌股关节紊乱症[J]. 中国修复重建外科杂志, 2009, 23(1): 60-63.
- [11] FLATOW EL, ATESHIAN GA, SOSLOWSKY LJ, *et al.* Computer simulation of glenohumeral and patellofemoral subluxation. Estimating pathological articular contact [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1994, 306: 28-33.
- [12] 董启榕,王以进. 髌股关节排列异常的生物力学特性变化的实验研究[J]. 医用生物力学, 1999, 14(1): 41-45.
- [12] DONG QR, WANG YJ. Experimental study on change of the biomechanical property in patellofemoral malalignment [J]. *J Med Biomech*, 1999, 14(1): 41-45.
- [13] STORK A, FELLER JF, SANDERS TG, *et al.* Magnetic resonance imaging of the knee ligaments [J]. *Semin Roentgenol*, 2000, 35(3): 256-276.
- [14] HEINO BJ, POWERS CM. Patellofemoral stress during walking in persons with and without patellofemoral pain [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2002, 34(10): 1582-1593.
- [15] REILLY DT, MARTENS M. Experimental analysis of the quadriceps muscle force and patello-femoral joint reaction force for various activities [J]. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 1972, 43(2): 126-137.
- [16] 杨滨,杨柳,姜哲,等. II、III型髌骨解剖类型间髌股关节应力分布对比研究[J]. 中国矫形外科杂志, 2014, 22(4): 352-358.