

## 腓骨高位截骨术对胫骨平台的生物力学分析

莫诒向<sup>1,2</sup>, 邓羽平<sup>1,2</sup>, 黄文华<sup>1,2,3</sup>, 欧阳汉斌<sup>4</sup>

1. 南方医科大学基础医学院人体解剖学国家重点学科, 广东 广州 510515; 2. 广东省医学3D打印应用转化工程技术研究中心, 广东 广州 510515; 3. 广东医科大学基础医学院人体解剖教研室, 广东 湛江 524023; 4. 广东医科大学附属第一医院骨科中心, 广东 湛江 524000

**【摘要】目的:**采用三维有限元方法分析腓骨高位截骨对胫骨平台造成的生物力学改变,为腓骨高位截骨在伴有内翻畸形的膝关节炎中的应用提供生物力学数据参考。**方法:**根据一例健康志愿者的CT数据,采用Mimics、Geomagic Studio2013以及Abaqus6.13软件建立个体化的膝关节有限元模型,通过对模型设定边界条件、加载材料属性、载荷设置以及模拟腓骨高位截骨术,计算腓骨高位截骨术前后胫骨平台的不同截面上任意节点的应力大小。**结果:**经手术去除腓骨的支撑后,内侧胫骨平台的应力值变化情况不一致,内部的应力降低,中部的不变,外部的增大。而外侧胫骨平台的应力值均增加,且其内部的应力值最大。整个胫骨平台上应力呈现往中间集中的态势。**结论:**腓骨高位截骨术有助于减小胫骨平台内侧的应力,从而达到缓解膝关节炎病人的疼痛及活动不便的症状。由于术后应力的重新分布,故该术式的长期疗效及适应症等仍需观察。

**【关键词】**膝关节炎;内翻畸形;腓骨高位截骨;胫骨平台;生物力学;有限元分析

**【中图分类号】**R318.01

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)05-0644-05

## Effects of proximal fibular osteotomy on tibial plateau: a biomechanical analysis

MO Yixiang<sup>1,2</sup>, DENG Yuping<sup>1,2</sup>, HUANG Wenhua<sup>1,2,3</sup>, OUYANG Hanbin<sup>4</sup>

1. National Key Discipline of Human Anatomy, School of Basic Medical Sciences, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 2. Guangdong Province Medical 3D Printing Application Transformation Engineering Research Center, Guangzhou 510515, China; 3. Department of Human Anatomy, School of Basic Medical Sciences, Guangdong Medical University, Zhanjiang 524023, China; 4. Orthopedics Center, Affiliated Hospital of Guangdong Medical University, Zhanjiang 524000, China

**Abstract: Objective** To investigate the biomechanical changes of the tibial plateau following proximal fibula osteotomy by three-dimensional finite element analysis for providing biomechanical evidences for the application of proximal fibular osteotomy in knee osteoarthritis with varus deformity. **Methods** Based on the CT data of a healthy volunteer, an individual knee joint finite element model was constructed by Mimics, Geomagic Studio2013 and Abaqus6.13 software. The stress of any node on different sections of the tibial plateau before and after proximal fibular osteotomy was calculated by setting the boundary conditions, loading material properties, applying loads and simulating proximal fibular osteotomy in the finite element model. **Results** After the surgical removal of the fibular support, the stress of the medial tibial plateau was inconsistent. The internal stress was reduced; and the middle remained unchanged; but the lateral was increased. However, the stress of the lateral tibial plateau was increased, and the internal stress was the maximum. There was a trend that the stress on the entire tibial plateau was concentrated in the middle. **Conclusion** Proximal fibular osteotomy is conducive to reducing the stress on the medial tibial plateau, thus alleviating the pain and inconvenience of patients with knee osteoarthritis. Due to the postoperative stress redistribution, the long-term efficacy and indications of the operation strategy still need to be further researched.

**Keywords:** knee osteoarthritis; varus deformity; proximal fibular osteotomy; tibial plateau; biomechanics; finite element analysis

**【收稿日期】**2019-12-03

**【基金项目】**国家重点研发计划(2017YFC1103400);广东省科技计划项目(2016B090917001, 2016B090925001, 2016B090913004, 2017B090912006);深圳市医疗卫生“三名工程”高层次医学团队(SZSM201612019);佛山市科技计划(2017AG100243)

**【作者简介】**莫诒向,研究方向:骨外科,E-mail: myxiang15@126.com

**【通信作者】**黄文华,博士,教授,研究方向:临床应用解剖学、数字医学及医学3D打印,E-mail: huangwenhua2009@139.com

前言

膝关节炎是老年人群中常见的致残原因,会导致患者疼痛和活动受限,目前常用的手术方法主要包括全膝关节置换术和胫骨高位截骨术等。然而,全膝关节置换术的经济成本较高,并且在第一次手术后仍有 3.4% 的翻修几率<sup>[1-2]</sup>。尽管如今胫骨高位截骨术为膝内侧骨关节炎的常用手术方法,但是其仍存在骨折不愈合、内固定失效和感染等问题,且对手术技术及内固定方式的选用等有较高的要求<sup>[3-6]</sup>。张英泽等<sup>[7]</sup>根据“不均匀沉降理论”提出用腓骨高位截骨术作为治疗膝关节炎合并内翻畸形的新技术,对于缓解病人疼痛及改善活动功能等方面具有良好疗效。该技术有着相对简单、安全的优点,并且其经济成本在大多数病人的承受范围内。但是对于其适应症,特别是内翻角度,以及长期疗效等方面仍需要进一步的探讨,特别是缺乏生物力学方面的支持。本研究通过生物力学的方法,根据健康志愿者的CT数据来建立膝关节模型,进行相应的模拟力学分析,得出胫骨平台上不同截面的应力变化情况,为腓骨高位截骨术在伴有内翻畸形的膝关节炎中的临床应用提供生物力学数据作为参考。

1 材料和方法

1.1 健康志愿者模型的获取

收集一位健康志愿者的CT数据,利用Mimics提取其部分膝关节模型,只包括近端胫骨、腓骨及其胫骨平台上的关节软骨,不包括半月板等软组织<sup>[8]</sup>;在Geomagic Studio 2013中对其分别进行光顺、精确曲面和实体化等操作,得到stp格式文件,并导入Abaqus6.13。为使三维模型更加符合骨头的实际属性,利用Mimics提供的经验公式对三维模型进行灰度赋值<sup>[9]</sup>。

Density=-1.34×10<sup>-5</sup>+1.017×10<sup>-3</sup>×Gray value (1)

E-Modulus=-388.8+5 925×Density (2)

其中,Density是表观密度,用于描述骨头内部结构的特性;E-Modulus是弹性模量,用于描述骨头的弹性性质。此外,泊松比固定为0.3<sup>[10]</sup>。

1.2 腓骨高位截骨术前模型的建立

基于胫骨平台的解剖学特点,根据软骨的分布范围选择适当大小的表面网格,使用ABAQUS工具栏中的mesh功能对其进行拉伸,得到厚度为1.5 mm的软骨层<sup>[11]</sup>。其材料属性赋值为:E=5 MPa,泊松比=0.46<sup>[12]</sup>。在Assembly模块下对胫腓骨模型及胫骨平台上的软骨进行装配,即完成部分膝关节模型的建模。

1.3 腓骨高位截骨术前模型的数据加载

考虑到人体本身载荷以及膝关节处韧带的作用力,在直立位无负重状态下,确定施加在胫骨平台上的总载荷大小为1 500 N<sup>[8]</sup>。在本研究中,假设腓骨高位截骨前后膝关节的载荷情况与生理情况一致,那么胫骨平台内侧将承受总载荷的60%,外侧为40%<sup>[13-14]</sup>。载荷施加于胫骨平台的软骨表面上,方向与力线方向保持一致。根据实际情况中胫腓骨相对不动的状态,限定胫骨及腓骨最下端6个方向的自由度,使其活动度为0。此外,于胫骨与腓骨小头接触处添加tie约束,保持其相对位置不变。提交任务,即可进行有限元分析。

1.4 腓骨高位截骨术后三维有限元模型建模

于腓骨下端处切除2 cm左右的骨质,模拟腓骨高位截骨手术过程<sup>[15]</sup>。由于进行了截骨,腓骨下端相对不动状态被打破,于是解除腓骨下端6个方向自由度的限制,让其能自由活动。其余步骤和数据保持与术前的不变,完成腓骨高位截骨术后三维有限元模型的建模。腓骨高位截骨术模型的赋值过程以及施加在模型上的条件如图1所示。

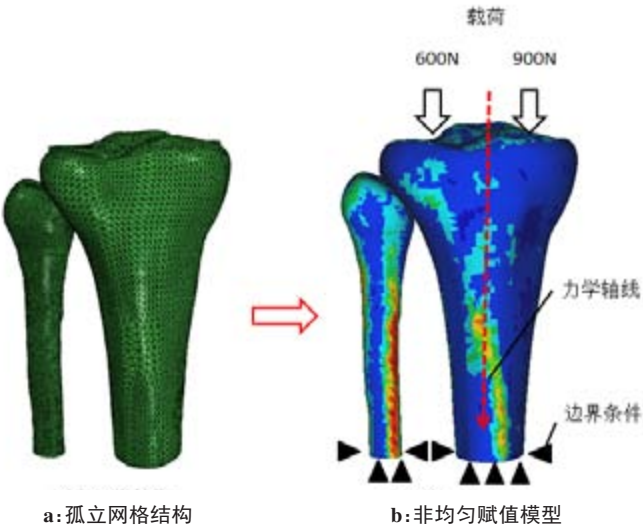


图1 腓骨高位截骨术模型的赋值过程以及施加在模型上的条件  
Fig.1 Assignments of the proximal fibular osteotomy model and the conditions imposed on the model

1.5 统计学方法

使用SPSS 18.0软件对结果进行统计学分析,计量资料以均数±标准差表示,采用配对样本T检验的方法进行计量资料的组间比较,以P<0.05为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 术前部分膝关节模型矢状位剖视图

如图2所示,本研究的结果与Papaioannou等<sup>[16]</sup>的研究结果相比无明显差异。可以认为本研究的有限元模型符合人体膝关节正常参数,能够有效模拟膝关节在切除腓骨前后的应力变化情况,可用于下一步试验。

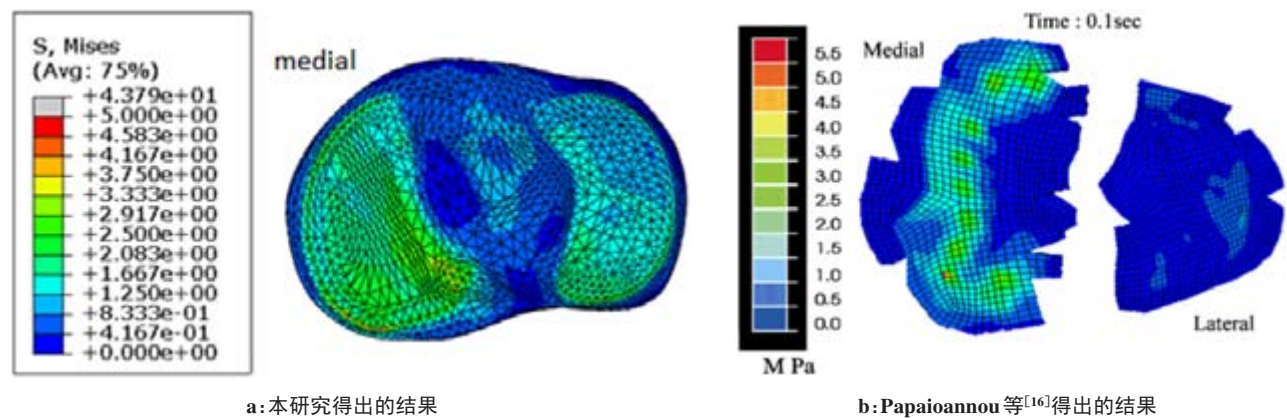


图2 两种实验结果的米塞斯应力分布图  
Fig.2 Von Mises distributions in two experiments

于Abaqus的后处理中,在术前胫骨平台内外侧各截取6个矢状位的米塞斯应力剖视图(分为外、中、内3个面,每个面截取两张典型的应力图),如图3a所示;并记录各个矢状截面于胫骨平台处的最大值,绘制成柱状图,如图3b所示。由图中可以明显看到,正常情况下,胫骨平台内侧所受到的应力值要大于外侧所受到的应力值。

2.2 术后部分膝关节模型矢状位剖视图

于Abaqus的后处理中,在术后胫骨平台内外侧各截取6个矢状位的米塞斯应力剖视图(分为外、中、内3个面,每个面截取两张典型的应力图),如图4a所示;并记录各个矢状截面于胫骨平台处的最大值,绘制成柱状图,如图4b所示。由图可以看出,在腓骨高位截骨后,胫骨平台内侧的所受到的应力值会减少,而外侧所受到的应力值会增加,两者的应力值的差异有所缩小。

2.3 胫骨平台上不同截面的点集合的应力值比较

按照上述剖视图的选取方式,在相应截面上选取一定数量的点构成集合,如图5所示。术前胫骨平台外侧外部为5A,中部为5B,内部为5C;胫骨平台内侧外部为5D,中部为5E,内部为5F。术后也选取同样的点集合进行统计,分别记为5a、5b、5c、5d、5e、5f。分析比较腓骨高位截骨前后不同位置上平均应力的变化情况,如表1所示。

从表1中数据可以看出,腓骨高位截骨手术前后胫骨平台外侧外部的应力值比较无明显差异( $P=0.940$ ),而外侧中部和内部的应力值比较均有显著差异( $P<0.01$ ),术前应力值显著低于术后应力值。在胫骨平台内侧外部应力值比较显著差异( $P<0.05$ ),术前应力值显著高于术后应力值;内侧内部应力值比较亦有显著差异

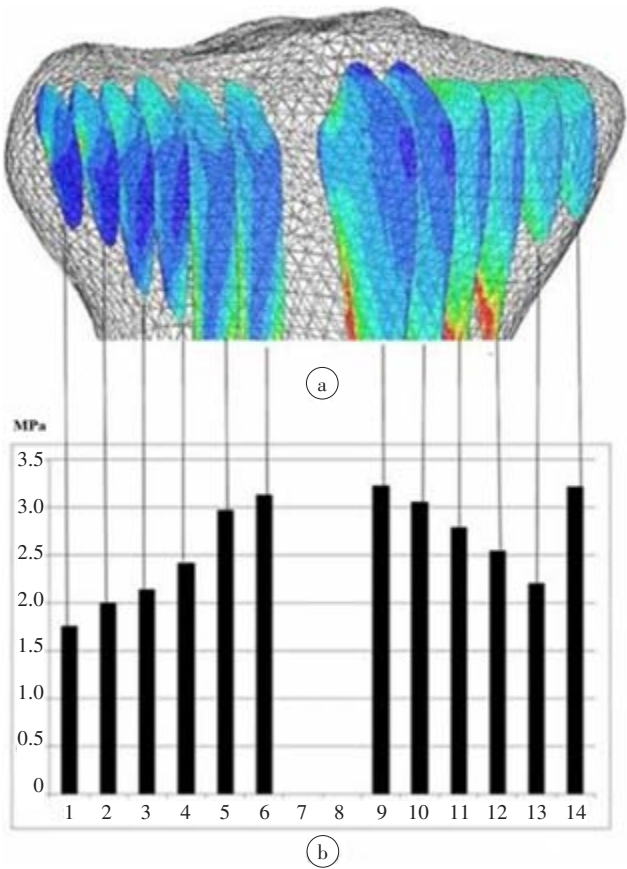


图3 术前胫骨平台内外侧多截面剖视图  
Fig.3 Multiple-sectional views of the medial and lateral tibial plateau before the operation

a: 多个矢状截面与胫骨平台的相对位置关系;b: 多个矢状截面于胫骨平台处对应的最大应力值及其分布趋势(横坐标数字为截面的编号)

( $P<0.05$ ),但是术后的应力平均值大于术前应力平均值,表明术后应力值显著高于术前应力值,而内侧中部应力值比较无显著差异( $P=0.323$ )。



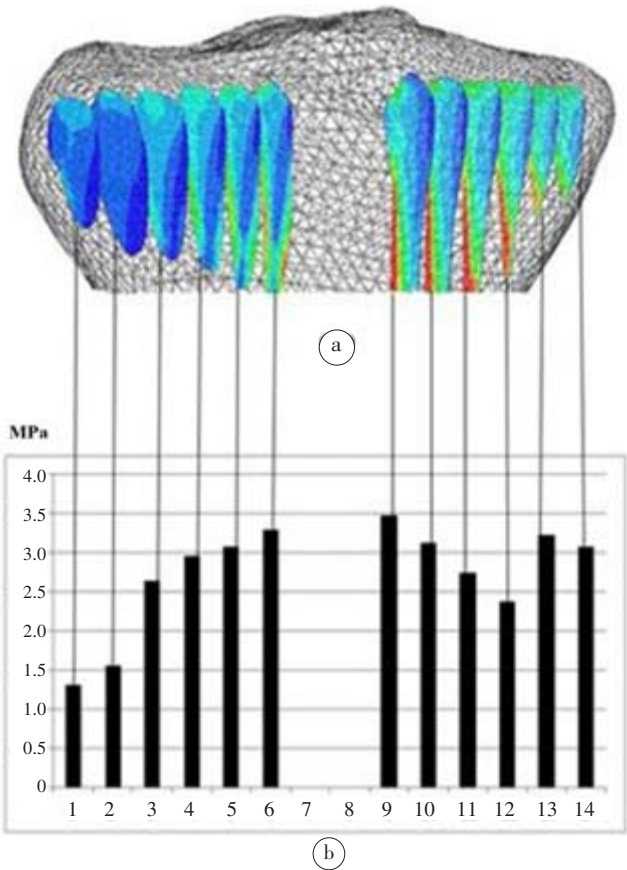


图4 术后胫骨平台内外侧多截面剖视图  
Fig.4 Multiple-sectional views of the medial and lateral tibial plateau after the operation

a: 多个矢状截面与胫骨平台的相对位置关系;b: 多个矢状截面于胫骨平台处对应的最大应力值及其分布趋势(横坐标数字为截面的编号)

3 讨论

本研究发现腓骨高位截骨术式前后胫骨平台上应力有着显著的变化。术前正常情况下,胫骨平台内侧所受载荷大于外侧,其内侧应力值亦大于外侧应力值,其中可能的原因是外侧的腓骨具有较高的骨密度而胫骨平台主要由松质骨组成,因此腓骨能对胫骨平台外侧起到一定的支持作用,内侧则因为缺少支撑而受到较大载荷。这种胫骨平台内外侧受力不均现象可能是导致膝关节炎继发内翻畸形的重要因素<sup>[15,17]</sup>。模拟腓骨高位截骨术后,比较术前术后胫骨平台上应力的变化情况可以看出,术后内侧胫骨平台的应力值减小,而外侧胫骨平台的应力值增加,并且这种变化具有统计学差异( $P<0.05$ ),表明腓骨高位截骨的确有助于减轻胫骨平台内侧的压力,理论上有利于缓解膝关节炎的症状和改善膝关节处的活动状况和功能,与临床病例的手术结果一致<sup>[18-20]</sup>。此外,对术后胫骨平台内侧3个部位上随机点的应力进行比较发现,其外部的应力值低于术前的应力值( $P<0.01$ ),中部的应力值无明显差异( $P>0.05$ ),而内部的应力值高于术前的应力值( $P<0.01$ ),这说明胫骨平台上的应力在腓骨高位截骨后有向平台中间偏移的趋势,内外侧应力趋于平衡。基于上述结果我们可以推测:该区域的应力集中现象对于患者的长期预后可能会造成不良影响。然而,在实际体内

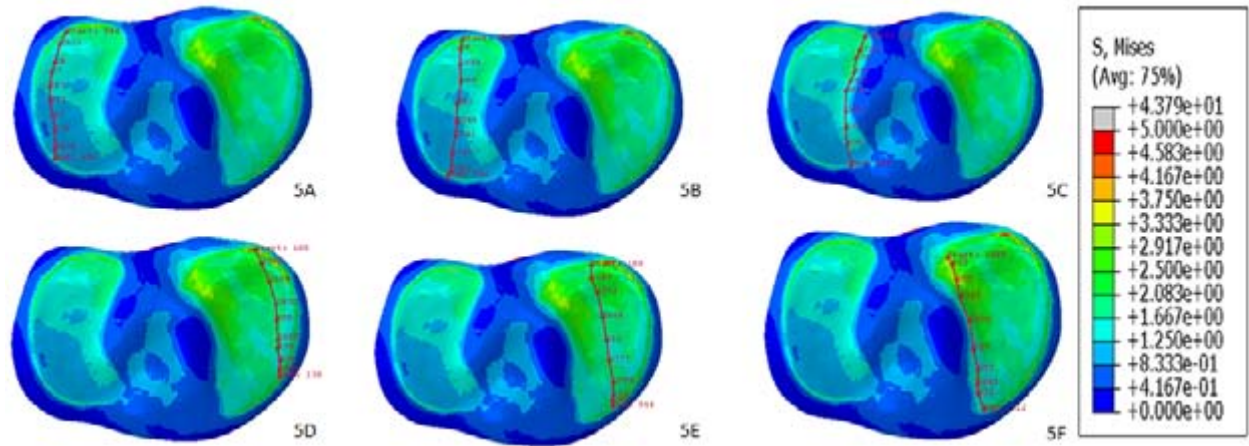


图5 术前胫骨平台内外侧多截面的点集合  
Fig.5 Dot sets of multiple-sectional views of the medial and lateral tibial plateau before the operation

人体环境中,患者术后康复情况很大程度上受到患者身体健康状况、骨质条件以及手术医师水平等因素的影响,更具有信服力的结论仍需临床数据和实验结果的支持。  
本研究构建的部分膝关节模型囊括了胫骨平台

上的软骨,但是不包括半月板和韧带,主要的原因有:(1)半月板在人体内主要起到承担载荷、传递应力的作用,但是可以用直接添加载荷的方式予以替代;(2)据文献报道,添加了软骨的骨头比单纯的骨头模型对于膝关节内载荷的传递具有更精确的模拟

表1 术前术后不同位置的米塞斯应力值  
Tab.1 Von Mises values of different positions  
before and after operation

位置	术前/MPa	术后/MPa	P值
5A vs 5a	1.42±0.45	1.41±0.42	0.940
5B vs 5b	1.50±0.63	1.58±0.60	0.008
5C vs 5c	1.68±0.33	2.00±0.53	0.004
5D vs 5d	2.02±0.49	2.00±0.50	0.008
5E vs 5e	2.03±0.36	2.02±0.38	0.323
5F vs 5f	2.04±0.62	2.09±0.65	0.020

效果<sup>[11]</sup>; (3)简化了韧带、半月板与胫骨平台的连接,采用直接施加相应载荷的方式,从结果上与带有韧带和半月板的实验结果趋于一致,但大大节省了计算成本,提高了分析效率。

Zhang<sup>[15]</sup>提出的腓骨高位截骨除了缓解胫骨平台内侧压力之外,还应具有改善下肢力线情况以及使内侧关节间隙增宽的作用。已有文献报道腓骨高位截骨无助于患者下肢力线的纠正<sup>[19]</sup>。而对于内侧关节间隙增宽这一现象,需要进行下一步的实验进行验证。尽管本研究努力使建立的模型符合实际情况,也与部分研究结果对模型进行了验证,但是缺乏了股骨对胫骨、髌骨对膝关节模型等的影响,并且采用的是正常人体模型而不是膝内翻患者的模型,仍会对实验的精确性造成一定的影响。因此在下一步的研究中,将对这些问题进行进一步的优化,以期能得到更有说服力的结果。

综上所述,腓骨高位截骨对于伴有膝内翻的膝关节炎在缓解疼痛、改善关节功能等方面具有良好的治疗效果。但是由于术后应力集中于胫骨平台中间处后部,对于其术式的适应症、长期疗效等仍需要长期观察。

## 【参考文献】

[1] 白文斌. 膝关节置换术后短期内并发症与翻修状况分析[J]. 检验医学与临床, 2017, 4(7): 954-956.  
BAI W B. Analysis of short-term complications and revision status after artificial total knee arthroplasty[J]. Laboratory Medicine and Clinic, 2017, 4(7): 954-956.

[2] BURNETT R S, BOURNE R B. Indications for patellar resurfacing in total knee arthroplasty[J]. J Bone Joint Surg, 2003, 85(4): 728-745.

[3] DUIVENVOORDEN T, BROUWER R W, BAAN A, et al. Comparison of closing-wedge and opening-wedge high tibial osteotomy for medial compartment osteoarthritis of the knee: a randomized controlled trial with a six-year follow-up[J]. J Bone Joint Surg Am, 2014, 96(17): 1425-1432.

[4] LAPRADE R F, SPIRIDONOV S I, NYSTROM L M, et al. Prospective outcomes of young and middle-aged adults with

medial compartment osteoarthritis treated with a proximal tibial opening wedge osteotomy[J]. Arthroscopy, 2012, 28(3): 354-364.

[5] SPRENGER T R, DOERZBACHER J F. Tibial osteotomy for the treatment of varus gonarthrosis. Survival and failure analysis to twenty-two years[J]. J Bone Joint Surg Am, 2003, 85(3): 469-474.

[6] W-DAHL A, ROBERTSSON O, LIDGREN V. Surgery for knee osteoarthritis in younger patients [J]. Acta Orthop, 2010, 81(2): 161-164.

[7] 张英泽, 李存祥, 李冀东, 等. 不均匀沉降在膝关节退变及内翻过程中机制的研究[J]. 河北医科大学学报, 2014, 35(2): 218-219.  
ZHANG Y Z, LI C X, LI J D, et al. Study on mechanism of uneven settlement in knee degeneration and inversion[J]. Journal of Hebei Medical University, 2014, 35(2): 218-219.

[8] FANG J, GONG H, KONG L, et al. Simulation on the internal structure of three-dimensional proximal tibia under different mechanical environments [J]. Biomed Eng Online, 2013, 12 (1): 130.

[9] 张国栋, 廖维靖, 陶圣祥, 等. 股骨有限元分析材料属性的方法探讨及有效性验证[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(43): 8436-8441.  
ZHANG G D, LIAO W J, TAO S X, et al. Methods for material assignment of finite element analysis and its valid confirmation[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2009, 13(43): 8436-8441.

[10] LENGSELD M, SCHMITT J, ALTER P, et al. Comparison of geometry based and CT voxel based finite element modelling and experimental validation[J]. Med Eng Phys, 1998, 20(7): 515-522.

[11] DEFRAITE L, SUN H T, RUBASH H, et al. In vivo tibiofemoral contact analysis using 3D MRI-based knee models[J]. J Biomech, 2004, 37 (10): 1499-1504.

[12] LI G, LOPEZ O, RUBASH H. Variability of a three-dimensional finite element model constructed using magnetic resonance images of a knee for joint contact stress analysis[J]. J Biomech Eng, 2001, 123(4): 341-346.

[13] PALEY D, PFEIL J. Principles of deformity correction around the knee [J]. Der Orthopde, 2000, 29(1): 18-38.

[14] SONODA N, CHOSA E, TOTORIBE K, et al. Biomechanical analysis for stress fractures of the anterior middle third of the tibia in athletes: nonlinear analysis using a three-dimensional finite element method[J]. J Orthop Sci, 2003, 8(4): 505-513.

[15] ZHANG Y Z. Innovations in orthopedics and traumatology in China [J]. Chin Med J, 2015, 128(21): 2841-2842.

[16] PAPAIOANNOU G, NIANIOS G, MITROGIANNIS C, et al. Patient-specific knee joint finite element model validation with high-accuracy kinematics from biplane dynamic Roentgen stereogrammetric analysis [J]. J Biomech, 2008, 41(12): 2633-2638.

[17] YANG Z Y, CHEN W, LI C X, et al. Medial compartment decompression by fibular osteotomy to treat medial compartment knee osteoarthritis: a pilot study[J]. Orthopedics, 2015, 38(12): e1110-e1114.

[18] WANG X, WEI L, LÜ Z, et al. Proximal fibular osteotomy: a new surgery for pain relief and improvement of joint function in patients with knee osteoarthritis[J]. J Int Med Res, 2017, 45(1): 282-289.

[19] NOVEMBRI U D, FERDIANSYAH M, WIJAYA W A, et al. Proximal fibula osteotomy as an alternative to TKA and HTO in late-stage varus type of knee osteoarthritis[J]. J Orthop, 2018, 15(3): 858-861.

[20] LIU B, CHEN W, ZHANG Q, et al. Proximal fibular osteotomy to treat medial compartment knee osteoarthritis: preoperational factors for short-term prognosis [J]. PLoS One, 2018, 13(5): e0197980.

(编辑:谭斯允)