

文章编号:1004-7220(2014)01-0020-05

# 滑动载荷作用下关节软骨不同层区的法向位移

高丽兰, 张春秋, 刘志动, 肖朋朋

(天津理工大学 机械工程学院, 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384)

**摘要:** **目的** 获得滑动载荷作用下关节软骨不同层区的法向位移分布, 探讨压缩应变、滑动速率和滑动次数对不同软骨深度法向位移的影响。 **方法** 以新鲜猪关节软骨为研究对象, 采用非接触式数字图像相关技术, 对滑动载荷作用下软骨不同层区的法向位移分布进行研究。 **结果** 滑动载荷作用下, 关节软骨表层的法向位移最大, 深层的法向位移最小, 中间层的位移介于二者之间; 随着压缩应变的增大, 沿软骨厚度方向的法向位移都增大, 并且表层的法向位移增加幅度最大。滑动速率越大, 软骨沿厚度方向的法向位移越小。在不同的滑动次数下, 法向位移随滑动时间的进行都呈上升趋势; 随着滑动次数的增加, 不同滑动时间时的法向位移都增大, 并且发现从第1次到第2次滑动时法向位移增大最明显。 **结论** 滑动载荷作用下, 软骨不同层区的法向变形有差异, 不同层区的法向位移随着压缩应变、滑动速率和滑动次数的变化而变化。本研究可以为临床软骨疾病治疗和软骨缺损修复等方面提供依据, 同时对人工软骨结构组成、人工构建、力学功能评价有重要意义。

**关键词:** 关节软骨; 滑动载荷; 数字图像相关; 法向位移

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Normal displacement of different layers for articular cartilage under sliding loads

GAO Li-lan, ZHANG Chun-qiu, LIU Zhi-dong, XIAO Peng-peng (*School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Industry Systems, Tianjin 300384, China*)

**Abstract: Objective** To obtain distributions of normal displacement on different layers of articular cartilage under sliding loads and investigate effects of compressive strain, sliding rate and sliding numbers on depth-dependent normal displacement of articular cartilage. **Methods** The non-contact digital image correlation (DIC) technique was applied to investigate the normal displacement of different layers for fresh pig articular cartilage under sliding loads, respectively. **Results** The largest normal displacement was found on the superficial layer, while that on the deep layer was the smallest, with the middle layer was in between under sliding loads. The normal displacement for cartilage at different normalized depth increased with compressive strain increasing and the largest increasing amplitude was in the superficial layer. The depth-dependent normal displacement for cartilage decreased with sliding rates increasing. The normal displacement for cartilage kept increasing with different sliding numbers within its sliding time. The most significant increasing amplitude of normal displacement was found between the first and second slide. **Conclusions** Under sliding loads, the normal displacement of cartilage usually changes along with its depth from surface to deep layer, and compressive strain, sliding rate and sliding numbers all play important roles in such normal displacement distributions on different layers. These results can provide the basis for clinical cartilage disease treatment and cartilage defect repair, and are also important for structure and construction of artificial cartilage as well as in mechanical function evaluation.

**Key words:** Articular cartilage; Sliding load; Digital image correlation; Normal displacement

收稿日期:2013-01-27; 修回日期:2013-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31000422, 10872147, 11172208)。

通信作者:张春秋, 教授, E-mail: zhang\_chunqiu@126.com。

关节在生理载荷环境中具有支撑和运动的功能。股骨远端与胫骨近端相互接触,产生两种相对运动,一种是滚动,可形象地描述为一种圆柱的直接接触压缩;另一种是滑动,产生表面剪应力。人在行走时膝关节中滚动和滑动同时存在,滚动约占60%,滑动约占40%。因此,滑动和滚压载荷是关节软骨生长、发育和维持正常生理功能合适的生理载荷,研究此载荷下软骨的力学行为是非常重要的。

目前,对于滑动载荷作用下关节软骨的研究,主要集中在摩擦性能的研究<sup>[1-10]</sup>。如 Forster 等<sup>[7]</sup>通过软骨与金属间的连续滑动实验,发现连续滑动实验的摩擦系数与加载时间有关;Li 等<sup>[8]</sup>研究了恒定载荷和循环载荷作用下软骨分别与 PVA 水凝胶、软骨及不锈钢间的摩擦行为,结果发现软骨与软骨间的摩擦系数是最小的。但是,滑动载荷作用下软骨不同层区的力学性能研究国内外报道甚少。

关节软骨非线性和各向异性的特性,不仅体现在它的结构和组成,而且体现于它的生物力学性质中。Wang 等<sup>[11]</sup>研究发现,非围限压缩载荷作用下软骨表面的弹性模量和泊松比是最小的,沿着软骨厚度方向二者逐渐增大;Gao 等<sup>[12]</sup>调查了非围限压缩载荷作用下软骨不同层区的变形和应力松弛行为,发现软骨表层的法向应变最大,深层的法向应变最小;沿着厚度方向软骨的松弛模量明显增大,软骨深层的松弛模量是表层模量的5倍。

非接触式数字图像相关技术是近年来发展的一种力学性能测试方法,它是通过光学系统捕捉物体变形图像,然后经计算得到位移场、应变场的过程<sup>[13-15]</sup>。该技术具有非接触、光路相对简单、可适用的测试对象范围广、对测量环境无特别要求等突出的优点,适用于生物软硬组织材料的力学性能测试。

本文以猪膝关节软骨为对象,采用非接触式数字图像相关技术,研究滑动载荷作用下软骨不同层区的法向位移分布,并调查压缩应变值、滑动速率和滑动次数对不同软骨深度的法向位移的影响。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

选取8个月猪的股骨远端滑车处的新鲜关节软骨为材料,将软骨沿关节表面弧度的法线方向切割,制成长6 mm、宽4 mm、厚度为沿软骨自然生长方向

从表层到深层(约1.6~2.2 mm)带有下骨的试样。实验前,将试样放在盛有生理盐水的培养皿中备用。

### 1.2 实验设备与方法

关节软骨的滑动实验是在型号为 MTF-100 的力学性能显微测试系统上完成,其中加载装置采用本实验室自主设计的滑动加载装置。

实验前,在软骨观察表面嵌入黑色氧化铁纳米颗粒进行制斑,该颗粒起到示踪剂的作用,方便滑动实验过程中观察软骨不同层区的变形。实验时,软骨试样被固定在盛有生理盐水的器皿中,直径为35 mm的不锈钢圆柱体滑块在电机的驱动下,在软骨表面水平往返滑动,同时图像采集系统以固定的放大倍数和拍照频率,对整个滑动过程中的试样进行图像采集。图1所示为加载前后采集到的软骨微观图像,加载前任选一点A作为参考点,加载后对应的参考点变为A',则软骨的法向位移  $u_z = z' - z$ 。

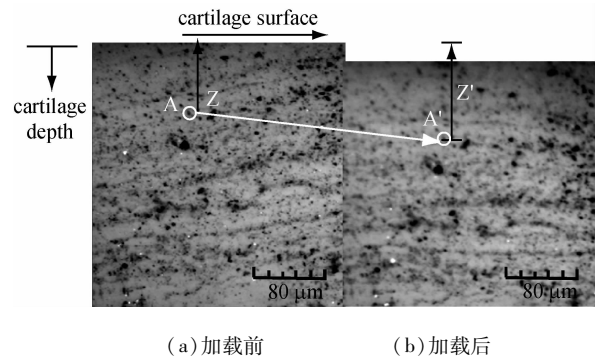


图1 软骨微观图像  
Fig.1 Microscopic images of a section of articular cartilage  
(a) Before loading, (b) After loading

### 1.3 实验内容

在不同压缩应变和滑动速率下,对软骨试样施加滑动载荷,进行连续滑动实验。压缩应变值分别为11.2%、18.9%和35.2%,滑动速率为0.33、0.83和1.67 mm/s。软骨试样在滑动过程中一直进行图像采集,并利用图像处理软件对所采集的图像进行处理,获得其位移分布。

## 2 结果与讨论

### 2.1 滑动载荷作用下软骨不同层区的法向变形

图2显示了滑动速率为0.33 mm/s、压缩应变为11.2%时软骨不同层区的法向位移随滑动时间

的变化。滑动载荷作用下,关节软骨表层的法向位移最大,深层的法向位移最小,中间层的位移介于二者之间;随着滑动时间的增大,软骨不同层区的法向位移均增大,并且表层的法向位移增大幅度最大,深层的法向位移增大幅度最小,中间层的位移变化介于二者之间。

滑动载荷作用下关节软骨不同层区的法向变形主要和软骨结构和组成有关。软骨表层含水量最多,胶原纤维直径较小,且与关节表面平行,载荷作用下易于变形,故软骨的法向位移变化趋势最大;中间层的纤维与表面呈一定角度交错分布,含水量减少,故软骨的法向位移变化减缓;深层的胶原纤维基本垂直于表面分布,且直径更粗,含水量最少,故软骨的深层不易变形,其法向位移随滑动时间变化最小。

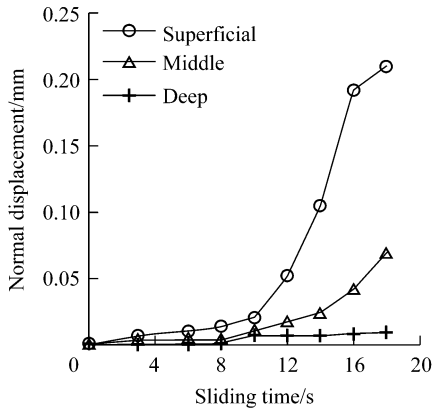


图2 滑动速率为0.33 mm/s、压缩应变为11.2%时软骨不同层区法向位移随滑动时间的变化

Fig. 2 Variation of normal displacement of different layers for cartilage with sliding time under compressive strain of 11.2% at sliding rate of 0.33 mm/s

## 2.2 压缩量对软骨不同层区法向位移的影响

为考察压缩量对软骨不同层区法向位移的影响,分别施加不同的压缩应变进行软骨的滑动实验。图3显示了滑动速率为0.33 mm/s,压缩应变为11.2%、18.9%和35.2%时软骨沿厚度方向的位移分布。同一压缩量下,沿软骨厚度方向,其法向位移不断减小;随着压缩量的增大,沿软骨厚度方向的法向位移都增大,并且表层的法向位移增加幅度较大,深层的法向位移增加幅度较小。究其原因,主要和软骨的结构和组成有关。

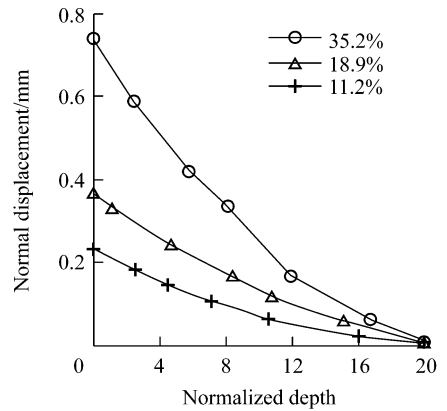


图3 滑动速率为0.33 mm/s不同压缩量下软骨沿厚度方向的法向位移分布

Fig. 3 Cartilage depth-dependent normal displacement distributions under different compressive strain at sliding rate of 0.33 mm/s

## 2.3 滑动速率对软骨不同层区法向位移的影响

关节软骨在滑动载荷作用下的微观法向位移分布,除受到宏观压缩量的影响外,滑动速率也会对位移分布产生影响。图4显示了不同滑动速率下软骨沿厚度方向的法向位移分布。在不同滑动速率下,沿软骨厚度方向从表层到深层,软骨的法向位移不断减小;随着滑动速率的增大,软骨不同标准化深度处的法向位移都减小。

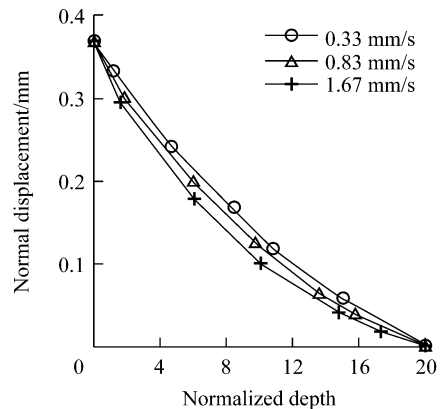


图4 不同滑动速率下软骨沿厚度方向的法向位移分布

Fig. 4 Cartilage depth-dependent normal displacement distributions at different sliding rates

关节软骨是一种黏弹性材料,在应力作用下具有应变滞后的性能<sup>[12]</sup>。当滑动速率较大时,在软骨的变形区域形成前,滑块已滑过软骨,使得软骨的法向位移较小;反之,当滑动速率较小时,软骨的变形

较充分,使得软骨的法向位移较大。

## 2.4 滑动次数对软骨法向位移的影响

关节软骨在体内所受的载荷并不是一次完成的,而是数次的往复过程,故有必要探讨滑动次数对软骨滑动行为的影响。图5显示了不同滑动次数下软骨的法向位移随滑动时间的变化情况。在不同的滑动次数下,法向位移随滑动时间呈上升趋势;第1次滑动载荷作用后软骨的变形不能完全恢复便开始第2次载荷作用,故第2次载荷作用时的初始位移不是0;随着滑动次数的增加,不同滑动时间时的法向位移都增大,并且发现从第1次到第2次滑动时位移增大最明显。

Naka等<sup>[10]</sup>通过软骨的滑动实验发现,在连续滑动载荷作用下,软骨内的水不断被挤出,进而使得摩擦系数增大;Li等<sup>[8]</sup>发现,在初始滑动过程中,软骨与不锈钢间的摩擦系数增大幅度更大,即初始滑动过程中软骨内水分流失的更多。基于上述两人的研究结果,可以解释本研究中软骨法向位移随滑动次数的变化趋势。

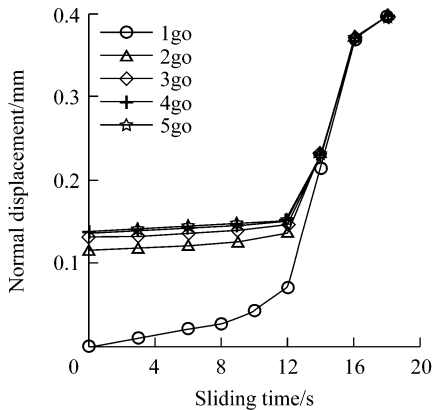


图5 不同滑动次数时软骨法向位移随滑动时间的变化  
Fig.5 Variation of normal displacement of cartilage with sliding time under different sliding numbers

## 3 结论

本文采用非接触式数字图像相关技术,测试了滑动载荷作用下关节软骨不同层区的法向位移分布。结果显示,滑动载荷作用下,关节软骨表层的法向位移最大,深层的法向位移最小,中间层的位移介于二者之间;随着滑块在软骨表面的滑动,软骨不同层区的法向位移都增大。随着压缩应变的增大,沿

软骨厚度方向的法向位移都增大,并且表层的法向位移增加幅度最大;滑动速率越大,软骨沿厚度方向的法向位移越小。随着滑块滑动次数的增加,不同滑动时间时软骨的法向位移都增大,并且从第1次到第2次滑动时位移增大最明显。本研究获得了滑动载荷作用下软骨不同层区的法向位移分布,尤其是得到了滑动速率和滑动次数对软骨不同层区法向位移分布的影响趋势。该结论可以为临床软骨疾病治疗和软骨缺损修复等方面提供依据,同时对人工软骨结构组成、人工构建、力学功能评价具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Northwood E, Fisher J. A multi-directional in vitro investigation into friction, damage and wear of innovative chondroplasty materials against articular cartilage [J]. Clin Biomech, 2007, 22(7): 834-842.
- [2] Pickard JE, Fisher J, Ingham E, et al. Investigation into the effect of proteoglycan molecules on the tribological properties of cartilage joint tissues [J]. Proc Inst Mech Eng H, 1998, 212(3): 177-182.
- [3] Bell CJ, Ingham E, Fisher J. Influence of hyaluronic acid on the time-dependent friction response of articular cartilage under different conditions [J]. Proc Inst Mech Eng H, 220(1): 23-31.
- [4] Northwood E, Fisher J, Kowalski R. Investigation of the friction and surface degradation of innovative chondroplasty materials against articular cartilage [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2007, 221(3): 263-279.
- [5] Krishnan R, Kopacz M, Ateshian GA. Experimental verification of the role of interstitial fluid pressurization in cartilage lubrication [J]. J Orthop Res, 2004, 22(3): 565-570.
- [6] Katta J, Pawaskar SS, Jin ZM, et al. Effect of load variation on the friction properties of articular cartilage [J]. J Eng Tribol, 2007, 221(3): 175-181.
- [7] Forster H, Fisher J. The influence of continuous sliding and subsequent surface wear on the friction of articular cartilage [J]. Proc Inst Mech Eng H, 1999, 213(4): 329-345.
- [8] Li F, Su YL, Wang JP, et al. Influence of dynamic load on friction behavior of human articular cartilage, stainless steel and polyvinyl alcohol hydrogel as artificial cartilage [J]. J Mater Sci Mater Med, 2010, 21(1): 147-154.
- [9] Caligaris M, Ateshian GA. Effects of sustained interstitial fluid pressurization under migrating contact area, and boundary lubrication by synovial fluid, on cartilage friction [J]. Osteoarthritis Cartilage, 2008, 16(10): 1220-1227.
- [10] Naka MH, Hattori K, Ikeuchi K. Evaluation of the superficial characteristics of articular cartilage using evanescent waves in the friction tests with intermittent sliding and loading [J]. J Biomech, 2006, 39(12): 2164-2170.
- [11] Wang CC, Deng JM, Ateshian GA, et al. An automated approach for direct measurement of two-dimensional strain distributions within articular cartilage under unconfined com-

- pression [J]. J Biomech Eng, 2002, 124(5): 557-567.
- [12] Gao LL, Zhang CQ, Dong LM, *et al.* Description of depth-dependent nonlinear viscoelastic behavior for articular cartilage in unconfined compression [J]. Mater Sci Eng C, 2012, 32(2): 119-125.
- [13] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 195-203.
- [14] 张东升. 数字图像相关测量技术及其应用[J]. 医用生物力学, 2009, 24(2): 85-94.
- Zhang DS. Digital image correlation: Theory and applications [J]. J Med Biomech, 2009, 24(2): 85-94.
- [15] 潘兵, 谢惠民, 戴福隆, 等. 体外模拟植入人工髋关节的骨盆外侧在静态负荷下的变形测量[J]. 医用生物力学, 2006, 21(2): 146-147.
- Pan B, Xie HM, Dai FL, *et al.* Deformation measurement of outside pelvis under static loads after implantation of artificial acetabulum joint [J]. J Med Biomech, 2006, 21(2): 146-147.

## 《医用生物力学》2011年度“最高被引论文奖”结果公示

为促进学术交流,鼓励生物力学科研工作者踊跃投稿,不断提高本刊的学术质量,本刊从2012年起开展了《医用生物力学》优秀论文评选活动。2014年1月初,本刊编辑部委托中国科学院上海科技查新咨询中心对本刊2011年发表的86篇论著文章进行检索,检索的数据库为中国引文数据库(CNKI)、中国科学引文库(CSCD)、万方数据知识服务平台、Science Citation Index Expanded(SCI-E)。本刊编委会评审专家小组根据检索报告出具的单篇论文被引频次排序,通过综合评定,对被引频次较高的7篇论文予以表彰,授予“《医用生物力学》2011年度最高被引论文奖”,获奖作者将获得编辑部颁发的证书及奖金1500元。

如对上述评选结果有异议,请在公示之日起15日内向本刊编辑部投诉。欢迎本刊广大读者、作者就上述论文的任何问题提出反馈意见。

本刊编辑部

### 附《医用生物力学》2011年度“最高被引论文奖”名单(\*为通讯作者)

题名: NiTi 心血管支架的疲劳断裂性能分析

作者: 智友海\*, 史向平

单位: 徐州工程学院 土木工程、数学与物理科学学院

来源: 2011, 26(1): 1-6

被引频次: 8(自引0次, 他引8次)

题名: 空军飞行员颈肌强度的研究

作者: 成海平\*, 李交杰, 季思菊, 王致洁, 刘宝善

单位: 空军航空医学研究所 生物力学实验室

来源: 2011, 26(1): 34-38

被引频次: 7(自引0次, 他引7次)

题目: 人体上呼吸道中气流涡结构特征数值仿真研究

作者: 孙栋, 徐新喜\*, 李福生, 赵秀国, 高振海

单位: 军事医学科学院卫生装备研究所

刊期: 2011, 26(3): 262-268

被引频次: 8(自引1次, 他引7次)

题名: 脊柱三维运动测试实验装置的研制

作者: 季伟, 王向阳\*, 徐华梓, 池永龙, 徐晖, 盛孙仁

单位: 温州医学院 第二临床医学院

来源: 2011, 26(5): 454-459

被引频次: 9(自引0次, 他引9次)

题名: 力学刺激和成骨化学诱导剂对大鼠骨髓间充质干细胞成骨分化能力的影响

作者: 何学令, 姚晓玲, 冯贤, 邱飞远, 李凯, 吴江, 李良\*

单位: 四川大学 基础医学与法医学院, 生物医学工程研究室

来源: 2011, 26(2): 116-120

被引频次: 8(自引0次, 他引8次)

题名: 周期性机械拉伸对类风湿关节炎和骨关节炎成纤维样滑膜细胞 BMP-2 表达的影响

作者: 周薇, 吕永钢, Gurinder K Singh, 颜艳, 刘万钱, 杨宁宁, 张非飞, 杨力\*

单位: 重庆大学 生物工程学院

来源: 2011, 26(2): 121-127

被引频次: 6(自引0次, 他引6次)

题名: 剪切应力与心肌细胞裂解液联合诱导骨髓间充质干细胞向心肌分化的研究

作者: 黄艳, 樊瑜波\*

单位: 北京航空航天大学 生物与医学工程学院

来源: 2011, 26(3): 211-216

被引频次: 5(自引0次, 他引5次)